



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Σχεδίαση ευφρούς κεραίας τύπου CSPA (circular switched parasitic array) με παρασιτικά στοιχεία για λειτουργία στις συχνότητες του Wi-Fi με χρήση του λογισμικού πακέτου SuperNEC και βελτιστοποίηση της με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων.

Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνιδης Μιχαήλ
Αρ. Μητρώου: 03104281

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα
Ιούλιος 2011

Κωνσταντινίδης Μιχαήλ

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

Copyright © Κωνσταντινίδης Μιχαήλ
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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η ανάλυση μιας ευφυούς κεραίας με παρασιτικά στοιχεία τύπου CSPA(Circular Switched Parasitic Array) που θα λειτουργεί στη συχνότητα των 2.4 GHz που χρησιμοποιείται κυρίως από τα συστήματα Wi-Fi. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό είναι το λογισμικό πακέτο προσομοίωσης Super Numerical Electromagnetics Code(SNEC), ενώ η βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της κεραίας έγινε μέσω της χρήσης του, ενσωματωμένου στο SNEC λογισμικού γενετικών αλγορίθμων, GA Optimiser.

Η εργασία αυτή χωρίζεται σε 2 μέρη .Στο πρώτο μέρος γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των σύγχρονων συστημάτων ασύρματης ευρυζωνικότητας , των συστημάτων Wi-Fi και των ευφών κεραιοσυστημάτων.Ακολουθούν κάποια εισαγωγικά στοιχεία για την μέθοδο των ροπών (MoM) και για τον τρόπο που αυτή εφαρμόζεται στο SuperNEC για την επίλυση σύνθετων ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων, μέσω γενετικών αλγορίθμων, τα χαρακτηριστικά των οποίων, αναλύονται επίσης στα πλαίσια του πρώτου μέρους. Το θεωρητικό μέρος της εργασίας ολοκληρώνεται με την αναλυτική παρουσίαση του προγράμματος προσομοίωσης SuperNEC και του GA Optimiser καθώς και μια συνοπτική περιγραφή των χαρακτηριστικών της υπό σχεδίαση ευφυούς κεραίας.

Στο δεύτερο μέρος της Διπλωματικής εργασίας, γίνεται ο σχεδιασμός, η ανάλυση και η παρουσίαση των βέλτιστων χαρακτηριστικών του τύπου κεραίας που επιλέχθηκε, τα οποία προέκυψαν από τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων

Λέξεις κλειδιά: Ασύρματη ευρυζωνικότητα, WiFi, SuperNEC, Μέθοδος των Ροπών, Παρασιτικά στοιχεία, Ευφυή κεραιοσυστήματα.,GA Optimiser

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is the design and the optimization of a smart antenna system that operates in the frequency band of 2.4GHz which is mainly used by Wi-Fi Systems. The software, which was used for this cause, is the simulation program SuperNec, while the optimization process was made with the help of the genetic algorithms software GA Optimiser, which is built in SuperNEC.

This diploma thesis is constituted of two parts. In the first part, a brief presentation of modern broadband wireless systems takes place, Wi-Fi, and Smart antenna systems as well are presented. Furthermore, there is an introduction in the method of moments and its application on SuperNec for the solution of complicated electromagnetic problems, with the use of genetic algorithms which are also presented in the first part. The theoretical part is concluded with the presentation of the simulation program SNEC and GA Optimiser, followed by a brief presentation of the smart antenna type that is suggested in this diploma thesis.

In the second part of this diploma thesis, design, analysis and presentation of the optimization of the suggested antenna's characteristics, takes place, via the use of genetic algorithms.

Key Words: Broadband wireless, Wi-Fi, WiMAX, SuperNEC, Method of Moments, Parasitic elements, Smart antenna systems, GA Optimiser

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Χ. Καψάλη, καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την ανάθεση της εργασίας, τις συμβουλές και τις διορθώσεις του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κύριο Τ.Τσαρακλημάνη, υποψήφιο διδάκτορα του ΕΜΠ, για τις παρατηρήσεις του, τις χρήσιμες συμβουλές του και τη γενικότερη συνεισφορά του στην περάτωση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|--|-----------|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | 3 |
| ABSTRACT..... | 4 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ..... | 6 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑ..... | 9 |
| ❖ 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 9 |
| ❖ 1.2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ..... | 10 |
| ➤ 1.2.1 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΕΝΗΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΠΙΚΟΥ ΒΡΟΧΟΥ..... | 11 |
| ➤ 1.2.2 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ 1 ^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ..... | 12 |
| ➤ 1.2.3 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ 2 ^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ..... | 13 |
| ➤ 1.2.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΕΣ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΙΑ..... | 14 |
| ❖ 1.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ..... | 15 |
| ➤ 1.3.1 ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ 3 ^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ..... | 15 |
| ➤ 1.3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ Wi-Fi..... | 17 |
| ➤ 1.3.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ WiMAX..... | 18 |
| ➤ 1.3.4 ΑΛΛΑ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ..... | 20 |
| ❖ 1.4 ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑ..... | 21 |
| ➤ 1.4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΙΤU-R..... | 21 |
| ➤ 1.4.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ..... | 24 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - WI-FI..... | 29 |
| ❖ 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 29 |
| ❖ 2.2 ΙΕΕΕ 802.11..... | 30 |
| ➤ 2.2.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ..... | 30 |
| ➤ 2.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΓΕΝΙΩΝ WLAN..... | 33 |
| ❖ 2.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΙΕΕΕ 802.11..... | 35 |
| ➤ 2.3.1 ΤΑ ΤΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΚΤΥΩΣΗΣ..... | 36 |
| ❖ 2.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ..... | 39 |
| ➤ 2.4.1 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ..... | 40 |
| ➤ 2.4.2 ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΖΕΥΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ..... | 48 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΕΞΥΠΝΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ..... | 51 |
| ❖ 3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ..... | 51 |
| ➤ 3.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 51 |
| ➤ 3.1.2 Η ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ..... | 53 |
| ➤ 3.1.3 Η ΜΟΝΑΔΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΛΟΒΟΥ..... | 54 |
| ➤ 3.1.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΟΜΠΟΥ..... | 55 |
| ➤ 3.1.5 ΚΡΙΣΙΜΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ..... | 56 |
| ❖ 3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ..... | 58 |
| ➤ 3.2.1 Switched Beam..... | 58 |
| ➤ 3.2.2 Phased Array..... | 60 |
| ➤ 3.2.3 Adaptive Arrays..... | 61 |
| ➤ 3.2.4 Διαφορετικές υλοποιήσεις δικτύου που χρησιμοποιεί έξυπνες κεραίες..... | 63 |
| ➤ 3.2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 64 |

| | |
|--|------------|
| ❖ 3.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ANGLE OF ARRIVAL(AoA)..... | 65 |
| ➤ 3.3.1 Υλοποίηση | 65 |
| ➤ 3.3.2 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα..... | 66 |
| ❖ 3.4 Αλγόριθμοι εύρεσης διεύθυνσης..... | 67 |
| ➤ 3.4.1 Μέθοδος φασματικής εκτίμησης..... | 67 |
| ➤ 3.4.2 Ο MVDR ΕΚΤΙΜΗΤΗΣ..... | 67 |
| ➤ 3.4.3 Μέθοδος γραμμικής πρόβλεψης..... | 67 |
| ➤ 3.4.4 MEM..... | 68 |
| ➤ 3.4.5 MLM..... | 68 |
| ➤ 3.4.6 Μέθοδοι ιδιοκατασκευής (eigenstructure)..... | 68 |
| ❖ 3.5 ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..... | 69 |
| ➤ 3.5.1 Βελτιώσεις και κέρδη..... | 69 |
| ❖ 3.6 ΚΟΣΤΟΣ..... | 75 |
| ➤ 3.6.1 Παράγοντες κόστους | 75 |
| ➤ 3.6.2 Ραδιο-σχεδιασμός..... | 76 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΡΟΠΩΝ..... | 77 |
| ❖ 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ..... | 78 |
| ❖ 4.2 Γραμμικοί τελεστές..... | 79 |
| ❖ 4.3 Ολοκληρωτική εξίσωση Rocklington..... | 79 |
| ❖ 4.4 Ανάπτυξη της MoM..... | 82 |
| ❖ 4.5 Κατασκευή του πίνακα..... | 82 |
| ❖ 4.6 Συναρτήσεις βάσης και δοκιμής (basis and testing functions)..... | 84 |
| ❖ 4.7 Εύρεση πεδίων που διεγείρουν τα συρμάτινα τμήματα-thin wire approximation..... | 86 |
| ❖ 4.8 Μοντελοποίηση πηγής τροφοδοσίας..... | 87 |
| ❖ 4.9 Επίλυση της εξίσωσης πινάκων..... | 88 |
| ❖ 4.10 Αγωγοί με διηλεκτρική επικάλυψη..... | 89 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ..... | 95 |
| ❖ 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 95 |
| ❖ 5.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΡΧΙΚΟΥ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ..... | 97 |
| ❖ 5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ (FITNESS)..... | 98 |
| ❖ 5.4 ΦΥΣΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ..... | 100 |
| ❖ 5.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΖΕΥΓΑΡΩΜΑΤΟΣ..... | 102 |
| ➤ 5.5.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΡΟΥΛΕΤΑΣ..... | 102 |
| ➤ 5.5.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΟΥΡΝΟΥΑ..... | 104 |
| ❖ 5.6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟΓΟΝΩΝ..... | 105 |
| ❖ 5.7 ΜΕΤΑΛΛΑΞΗ..... | 109 |
| ❖ 5.8 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ..... | 110 |
| ❖ 5.9 ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΤΟ SUPERNEC..... | 110 |
| ➤ 5.9.1 GA INPUT GUI..... | 110 |
| ➤ 5.9.2 GA ALGORITHM OUTPUT..... | 116 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – SUPERNEC..... | 119 |
| ❖ 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 119 |
| ❖ 6.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ..... | 119 |
| ❖ 6.3 ΤΑ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ SUPERNEC..... | 120 |
| ❖ 6.4 INPUT USER INTERFACE..... | 121 |
| ❖ 6.5 ΣΥΓΓΡΑΦΗ ΝΕΩΝ ΔΟΜΩΝ (ASSEMBLIES) ΑΠΟ ΤΟΝ ΧΡΗΣΤΗ..... | 123 |
| ❖ 6.6 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ..... | 124 |
| ❖ 6.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ..... | 127 |
| ❖ 6.8 OUTPUT USER INTERFACE..... | 129 |

| | |
|--|------------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ELECTRONICALLY STEERABLE SPA..... | 133 |
| ❖ 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 133 |
| ❖ 7.2 ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΕΣ..... | 133 |
| ❖ 7.3 ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΕΣ ΜΕ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ..... | 135 |
| ❖ 7.4 ΕΞΥΠΝΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ..... | 139 |
| ❖ 7.5 CSPA(Circular Switched Parasitic Arrays)..... | 141 |
| ❖ 7.6 ELECTRONICALLY STEERABLE SPA..... | 141 |
| ❖ 7.7 SAW3PE (SMART ANTENNA WITH 3 PARASITIC ELEMENTS) | 142 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΕΡΑΙΑΣ..... | 143 |
| ❖ 8.1 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΣΤΟ SUPERNEC..... | 143 |
| ❖ 8.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΣΩ GA OPTIMIZER..... | 158 |
| ➤ 8.2.1 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΚΟΣΤΟΥΣ..... | 158 |
| ➤ 8.2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ SAW3PE..... | 161 |
| ➤ 8.2.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ 1 ^η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ..... | 165 |
| ➤ 8.2.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ 2 ^η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ..... | 186 |
| | |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ..... | 215 |
| | |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 225 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η “ασύρματη ευρυζωνικότητα”(broadband wireless) αποτελεί την τεχνολογία εκείνη που παρέχει υψηλής ταχύτητας δικτύωση υπολογιστών και ασύρματη πρόσβαση στο Internet. Ευρυζωνική σύνδεση θεωρείται εκείνη που παρουσιάζει στιγμιαίο εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 1MHz και υποστηρίζει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων μεγαλύτερες από περίπου 1.5Mbit/s.

Στην ουσία ο όρος αναφέρεται σε δύο από τους πιο ραγδαία αναπτυσσόμενους τομείς της βιομηχανίας των τηλεπικοινωνιών τα τελευταία χρόνια. Τόσο οι ασύρματες επικοινωνίες όσο και η ευρυζωνικότητα έχουν επιδείξει ταχύτατη εισχώρηση στην αγορά. Είναι χαρακτηριστικό πως οι συνδρομητές υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας έχουν αυξηθεί ραγδαία την τελευταία 15ετία. Κατά την ίδια περίοδο, το internet από ένα απλό ακαδημαϊκό εργαλείο έφτασε να έχει πάνω από ένα δισεκατομμύριο χρήστες παγκοσμίως. Αυτή η απότομη ανάπτυξη του internet έχει οδηγήσει σε αυξημένη ζήτηση για διαδικτυακές υπηρεσίες υψηλών ταχυτήτων, με αποτέλεσμα την υιοθέτηση της ευρυζωνικότητας.

Οι πιο γνωστές σήμερα τεχνολογίες, που αφορούν δίκτυα ευρείας ζώνης είναι η Digital subscriber line (Ψηφιακή γραμμή συνδρομητή) ή πιο απλά DSL που παρέχει πρόσβαση υψηλής ταχύτητας στο διαδίκτυο μέσω κοινών τηλεφωνικών γραμμών και η τεχνολογία Cable modem (Καλωδιακό μόντεμ), η οποία χρησιμοποιεί ομοαξονικά καλώδια τηλεόρασης. Σε συνάρτηση και με τη ραγδαία ανάπτυξη και πρόοδο των υπηρεσιών αυτών και τις συνεχείς βελτιώσεις που γίνονται και οι δύο αυτές τεχνολογίες παρέχουν στους χρήστες ταχύτητες πρόσβασης που πρακτικά φτάνουν έως έναν μικρό αριθμό megabits το δευτερόλεπτο (Mbps) ενώ είναι δυνητικά εφικτές ταχύτητες μέχρι και μερικές δεκάδες megabits το δευτερόλεπτο. Υπολογίζεται από έρευνες ότι, παγκοσμίως, ο αριθμός των συνδρομητών δικτύων ευρείας ζώνης εν έτη 2011 ανέρχεται σε πάνω από 400 εκατομμύρια, οπότε προκύπτει και η ανάγκη μιας ασύρματης λύσης που να εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες της ευρυζωνικότητας.

Χωρίς αμφιβολία η μεταφορά των δυνατοτήτων των ευρυζωνικών δικτύων σε ένα ασύρματο πλαίσιο αποφέρει νέες δυνατότητες σε αυτά καθώς και την εξέλιξη των ήδη υπαρχόντων. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί θεμελιώδεις τύποι ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών. Ο πρώτος έχει ως στόχο την παροχή υπηρεσιών παρόμοιων με αυτές των ενσύρματων ευρυζωνικών δικτύων, με την διαφορά ότι το μέσο μετάδοσης είναι ο αέρας. Ο τύπος αυτός, γνωστός ως fixed (σταθερό) wireless broadband, μπορεί να θεωρηθεί ως μια εναλλακτική των DSL και Cable modem. Ο δεύτερος τύπος, γνωστός ως mobile (κινητό) broadband, παρέχει επιπλέον δυνατότητες, όπως φορητότητα (portability), δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο από διαφορετικές τοποθεσίες μέσω διαφορετικών σταθμών βάσης (nomadicity), και κινητικότητα (mobility).

1.2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η ιστορία της ασύρματης ευρυζωνικότητας ξεκινά με την γέννηση της επιθυμίας εύρεσης μιας εναλλακτικής και ανταγωνιστικής τεχνολογίας σε σχέση με τις παραδοσιακές ενσύρματες τεχνολογίες. Λόγω της απελευθέρωσης στην βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών και της ταχύτερης ανάπτυξης του διαδικτύου, διάφοροι ανταγωνιστικοί φορείς επιχείρησαν να βρουν μία ασύρματη λύση για να παρακάμψουν τους δεσμευτικούς πάροχους υπηρεσιών. Κατά την διάρκεια των δέκα περίπου τελευταίων χρόνων, αναπτύχθηκαν διάφορα συστήματα ασύρματης πρόσβασης, κυρίως από νέες εταιρείες υποκινούμενες από την προοπτική και τις δυνατότητες που προσφέρει η ασύρματη τεχνολογία. Τα συστήματα αυτά εμφάνιζαν μεγάλο εύρος δυνατοτήτων, πρωτοκόλλων, συχνοτήτων λειτουργίας, υποστηριζόμενων εφαρμογών και πολλών άλλων παραμέτρων. Ορισμένα απ' αυτά, αναπτύχθηκαν εμπορικά, για να παροπλιστούν ύστερα από λίγο καιρό. Οι επιτυχημένες απόπειρες μέχρι σήμερα περιορίστηκαν σ' ένα μικρό αριθμό εφαρμογών και κατά βάση σε μικρές αγορές. Όπως προκύπτει λοιπόν, η ασύρματη ευρυζωνικότητα είχε μέχρι τώρα μια αρκετά αποτυχημένη προσπάθεια εδραίωσης ως νέα τεχνολογία, κάτι όμως που οφείλεται σε αρκετά μεγάλο βαθμό στην διάσπαση της βιομηχανίας λόγω της έλλειψης ενός κοινού προτύπου. Η θεσμοθέτηση τέτοιων προτύπων τα τελευταία χρόνια έχει ήδη αλλάξει την κατάσταση και αναμένεται να δώσει την ώθηση για ακόμα μεγαλύτερη ανάπτυξή της βιομηχανίας των τηλεπικοινωνιών.

Λόγω της τεράστιας ποικιλίας λύσεων που σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν για την ασύρματη ευρυζωνικότητα, μια πλήρης ιστορική αναδρομή θα ήταν μακροσκελής, άσκοπη, ίσως ακόμα και αδύνατη. Αντ' αυτού, μια πιο περιεκτική αναδρομή θα παρουσίαζε πιο ξεκάθαρα τα σημαντικότερα βήματα μέσα από τα οποία εξελίχθηκε η τεχνολογία αυτή. Αν και είναι αδύνατο να διαχωριστούν πλήρως μεταξύ τους, μια κατηγοριοποίησή τους θα μπορούσε να είναι η εξής :

- Ασύρματα συστήματα στενής ζώνης τοπικού βρόχου (Narrowband Wireless Local-Loop Systems)
- Ασύρματα συστήματα ευρείας ζώνης – 1^η γενιά (First generation - Line of sight (LOS) broadband systems)
- Ασύρματα συστήματα ευρείας ζώνης – 2^η γενιά (Second generation – Non-line of sight (NLOS) broadband systems)
- Ασύρματα συστήματα ευρείας ζώνης βασισμένα σε πρότυπα (Standards-based broadband wireless systems)

1.2.1 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΕΝΗΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΠΙΚΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Όπως είναι λογικό, η πρώτη εφαρμογή για την οποία σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε ένα εναλλακτικό ασύρματο μοντέλο ήταν το τηλέφωνο (voice telephony). Τα συστήματα που σχεδιάστηκαν, τα οποία ονομάστηκαν wireless local-loop (WLL), αποδείχτηκαν αρκετά επιτυχημένα σε αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία, η Ινδονησία, η Βραζιλία και η Ρωσία, όπου η μεγάλη και συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για βασικές τηλεφωνικές υπηρεσίες ήταν αδύνατο να εξυπηρετηθεί από την προϋπάρχουσα υποδομή. Στην πραγματικότητα, συστήματα WLL που βασίζονται στα πρότυπα DECT (Digital enhanced cordless telephony) και CDMA (Code division multiple access), εξακολουθούν να αναπτύσσονται στις αγορές αυτές.

| Date | Event |
|----------------|--|
| February 1997 | AT&T announces development of fixed wireless technology code named "Project Angel" |
| February 1997 | FCC auctions 30MHz spectrum in 2.3GHz band for wireless communications services (WCS) |
| September 1997 | American Telecasting (acquired later by Sprint) announces wireless Internet access services in the MMDS band offering 750kbps downstream with telephone dial-up modem upstream |
| September 1998 | FCC relaxes rules for MMDS band to allow two-way communications |
| April 1999 | MCI and Sprint acquire several wireless cable operators to get access to MMDS spectrum |
| July 1999 | First working group meeting of IEEE 802.16 group |
| March 2000 | AT&T launches first commercial high-speed fixed wireless service after years of trial |
| May 2000 | Sprint launches first MMDS deployment in Phoenix, Arizona, using first-generation LOS technology |
| June 2001 | WiMAX Forum established |
| October 2001 | Sprint halts MMDS deployments |
| December 2001 | AT&T discontinues fixed wireless services |
| December 2001 | IEEE 802.16 standards completed for > 11GHz. |
| February 2002 | Korea allocates spectrum in the 2.3GHz band for wireless broadband (WiBro) |
| January 2003 | IEEE 802.16a standard completed |
| June 2004 | IEEE 802.16-2004 standard completed and approved |
| September 2004 | Intel begins shipping the first WiMAX chipset, called Rosedale |
| December 2005 | IEEE 802.16e standard completed and approved |
| January 2006 | First WiMAX Forum-certified product announced for fixed applications |
| June 2006 | WiBro commercial services launched in Korea |
| August 2006 | Sprint Nextel announces plans to deploy mobile WiMAX in the United States |

Πίνακας 1 - Τα γεγονότα-ορόσημα στην ανάπτυξη της ασύρματης ευρυζωνικότητας

Σε αγορές όπου προϋπήρχε επαρκής υποδομή τοπικού βρόχου για τηλεφωνικές υπηρεσίες, τα συστήματα WLL έπρεπε να προσφέρουν νέες δυνατότητες για να γίνουν ανταγωνιστικά. Με την εμπορευματοποίηση του διαδικτύου το 1993, η ζήτηση για πρόσβαση σε διαδικτυακές υπηρεσίες άρχισε να διογκώνεται, κάτι που ενέπνευσε αρκετούς να δουν την παροχή γρήγορης πρόσβασης στις υπηρεσίες αυτές ως έναν χαρακτηριστικό που να διαφοροποιεί τα ασύρματα συστήματα. Για παράδειγμα, τον Φεβρουάριο του 1997, η εταιρεία AT&T ανακοίνωσε ότι είχε σχεδιάσει ένα ασύρματο σύστημα που θα λειτουργούσε στην μπάντα των 1900 MHz, γνωστή και ως PCS (Personal communication services) και θα παρείχε δύο γραμμές μετάδοσης φωνής καθώς και μία σύνδεση ταχύτητας 128 kbps για μετάδοση δεδομένων στους συνδρομητές. Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε με το κωδικό όνομα Project Angel και είχε την διάκριση να θεωρείται ένα από τα πρώτα εμπορικά ασύρματα συστήματα που χρησιμοποίησαν τεχνολογία προσαρμοστικών κεραιών (adaptive antenna technology). Ύστερα από αρκετά πειράματα για ορισμένα χρόνια και μία σύντομη εμπορική διάρκεια ζωής, η AT&T διέκοψε την λειτουργία του συστήματος τον Δεκέμβριο του 2001, επικαλούμενη υπερβολικό κόστος και χαμηλή ανταπόδοση ως βασικές αιτίες.

Κατά την ίδια διάρκεια, διάφορες νέες εταιρείες επικεντρώθηκαν στην παροχή ασύρματης πρόσβασης στο διαδίκτυο. Οι εταιρείες αυτές ονομάστηκαν WISP (Wireless internet service provider) και σχεδίασαν συστήματα που λειτουργούσαν κατά βάση στις ελεύθερες μπάντες των 900 MHz και 2,4 GHz. Τα περισσότερα από τα συστήματα αυτά προϋπόθεταν την εγκατάσταση κεραιών είτε στις ταράτσες είτε τις στέγες των κτιρίων των συνδρομητών. Στην πράξη, η εφαρμογή τους περιορίστηκε σε ορισμένες γειτονιές ή μικρές πόλεις. Τα πρώιμα αυτά συστήματα παρείχαν ταχύτητες που έφταναν τα μερικές εκατοντάδες kilobits το δευτερόλεπτο. Οι βελτιώσεις που ακολούθησαν τα επόμενα χρόνια σε συστήματα που χρησιμοποιούσαν τις ίδιες μπάντες έδωσαν την δυνατότητα για παροχή σαφώς μεγαλύτερων ταχυτήτων.

1.2.2 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ 1^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ

Καθώς οι τεχνολογίες DSL και Cable modem άρχισαν να αναπτύσσονται, τα ασύρματα συστήματα έπρεπε να εξελιχθούν ώστε να αποκτήσουν την δυνατότητα παροχής πολύ μεγαλύτερων ταχυτήτων για να παραμείνουν ανταγωνιστικά. Έτσι, άρχισαν να σχεδιάζονται συστήματα με μεγαλύτερες συχνότητες λειτουργίας, όπως είναι οι μπάντες των 2,5 GHz και 3,5 GHz. Συστήματα πολύ υψηλών ταχυτήτων, που ονομάστηκαν LMDS (Local multipoint distribution systems) και παρείχαν ταχύτητες μέχρι ορισμένες εκατοντάδες megabits το δευτερόλεπτο, αναπτύχθηκαν σε μικροκυματικές συχνοτικές μπάντες, όπως αυτές των 24 GHz και 39 GHz. Οι υπηρεσίες των συστημάτων αυτών απευθύνθηκαν κυρίως σε επιχειρήσεις και στα τέλη της δεκαετίας του 90 γνώρισαν αρκετά μεγάλη αλλά ταυτόχρονα και πολύ σύντομη, όπως αποδείχτηκε, επιτυχία. Προβλήματα σχετικά με την δυσκολία εγκατάστασης των απαιτούμενων κεραιών στις στέγες των κτιρίων, σε συνδυασμό με την αρκετά χαμηλή εμβέλεια των συστημάτων, απέτρεψε την περαιτέρω ανάπτυξή τους.

Στα τέλη της δεκαετίας του 90, μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στην ασύρματη ευρυζωνικότητα συνέβη στην μπάντα των 2,5 GHz, η οποία έχει την ονομασία MMDS (Multichannel multipoint distribution services). Η μπάντα αυτή

χρησιμοποιούταν για αρκετά χρόνια για μετάδοση ασύρματων καλωδιακών υπηρεσιών εικόνας (wireless cable broadcast video services), ιδιαίτερα σε επαρχιακές και υπαίθριες περιοχές όπου υπηρεσίες καλωδιακής τηλεόρασης ήταν μη διαθέσιμες. Ο ερχομός της δορυφορικής τηλεόρασης κατέστρεψε τις επιχειρήσεις ασύρματης καλωδιακής τηλεόρασης, με αποτέλεσμα αυτές να αναζητήσουν εναλλακτικούς τρόπους εκμετάλλευσης της μπάντας των 2,5 GHz. Ορισμένες απ' αυτές άρχισαν να παρέχουν υπηρεσίες πρόσβασης στο διαδίκτυο μίας κατεύθυνσης, χρησιμοποιώντας κοινές τηλεφωνικές γραμμές για μετάδοση στην αντίθετη κατεύθυνση. Τον Σεπτέμβριο του 1998 η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών ή FCC (Federal Communications Commission), έκανε πιο ελαστικούς τους περιορισμούς της μπάντας MMDS στις ΗΠΑ επιτρέποντας έτσι παροχή υπηρεσιών διπλής κατεύθυνσης, κάτι που έδωσε το έναυσμα για πολύ μεγαλύτερο ενδιαφέρον της αγοράς για την μπάντα αυτή. Οι εταιρείες MCI WorldCom και Sprint πλήρωσαν η καθεμία σχεδόν 1 δισεκατομμύριο δολάρια για να αποκτήσουν δικαιώματα χρήσης της μπάντας MMDS, και πολλές άλλες εταιρείες άρχισαν να επενδύουν σε ασύρματες τεχνολογίες υψηλών ταχυτήτων για την μπάντα αυτή.

Η πρώτη γενιά σταθερών ασύρματων ευρυζωνικών συστημάτων σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας τους ίδιους πύργους που εξυπηρετούσαν πριν τους συνδρομητές ασύρματης καλωδιακής τηλεόρασης. Οι πύργοι αυτοί είχαν ύψος γύρω στα 200 μέτρα και παρείχαν κάλυψη έως και 55 χιλιόμετρα, με την προϋπόθεση μετάδοσης απευθείας σήματος (LOS – Line of sight), χρησιμοποιώντας πομπούς υψηλής ισχύος. Στα συστήματα MMDS πρώτης γενιάς οι συνδρομητές έπρεπε να εγκαταστήσουν εξωτερικές κεραιές αρκετά ψηλά στα κτίριά τους και με κατεύθυνση προς τον πύργο απ' τον οποίο εξυπηρετούνταν, για να είναι εφικτή η μετάδοση απευθείας σήματος. Οι εταιρείες Sprint και MCI άρχισαν να παρέχουν ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες διπλής κατεύθυνσης χρησιμοποιώντας συστήματα MMDS πρώτης γενιάς σε ορισμένες αγορές στις αρχές της τελευταίας δεκαετίας. Οι προϋποθέσεις εγκατάστασης εξωτερικών κεραιών και δυνατότητας μετάδοσης απευθείας σήματος αποδείχτηκαν τροχοπέδη για την περαιτέρω ανάπτυξη τους. Εξάλλου, από την στιγμή που μια αρκετά μεγάλη περιοχή εξυπηρετούταν από έναν μόνο πύργο, η χωρητικότητα των συστημάτων αυτών ήταν αρκετά περιορισμένη. Παρόμοια συστήματα αναπτύχθηκαν παγκοσμίως στην μπάντα των 3,5 GHz.

1.2.3 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ 2^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ

Τα ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα δεύτερης γενιάς παρείχαν την δυνατότητα κατάργησης της αναγκαιότητας μετάδοσης απευθείας σήματος, ενώ ταυτόχρονα προσέφεραν μεγαλύτερη χωρητικότητα. Αυτό επετεύχθη με την χρήση κυψελωτής αρχιτεκτονικής και εφαρμογή προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος για βελτίωση της απόδοσης του συστήματος σε συνθήκες μετάδοσης πολλαπλών δρόμων (multipath conditions). Διάφορες νέες εταιρείες σχεδίασαν προηγμένες πρωτότυπες λύσεις με στόχο την βελτίωση της απόδοσης των νέων αυτών συστημάτων. Τα περισσότερα από τα νέα συστήματα μπορούσαν να αποδώσουν ικανοποιητικά ακόμα και σε περιπτώσεις μη δυνατότητας μετάδοσης απευθείας σήματος, με τις κεραιές των συνδρομητών να μην χρειάζεται να βρίσκονται σε μεγάλο ύψος. Σε πολλά συστήματα το ζήτημα της μη δυνατότητας μετάδοσης απευθείας σήματος αντιμετωπίστηκε με τεχνικές όπως η OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing), η CDMA (Code division multiple access) και επεξεργασίας πολλαπλών κεραιών (multiantenna processing). Ορισμένα από τα συστήματα, όπως

αυτά που σχεδιάστηκαν από τις εταιρείες SOMA Networks και Navini Networks, πέτυχαν ικανοποιητική απόδοση της σύνδεσης σε αποστάσεις αρκετών χιλιομέτρων με αποδέκτες επιτραπέζιους τερματικούς υπολογιστές, χωρίς καν την προϋπόθεση εγκατάστασης εξωτερικής κεραίας. Ταχύτητες μέχρι και αρκετά megabits το δευτερόλεπτο με εμβέλεις κυψέλης λίγων χιλιομέτρων, έγιναν εφικτές στα συστήματα δεύτερης γενιάς.

1.2.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΕΣ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΑ

Το 1998, το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, ή IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) όπως είναι ευρέως γνωστό, προχώρησε στον σχηματισμό μιας ομάδας εργασίας με την ονομασία 802.16, με σκοπό την ανάπτυξη ενός προτύπου για τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα ή WMAN (Wireless metropolitan area network). Αρχικά, η ομάδα αυτή επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη λύσεων στις μάντες μεταξύ 10 και 66 GHz, με βασική εφαρμογή την παροχή συνδέσεων υψηλών ταχυτήτων σε επιχειρήσεις που δεν είχαν την δυνατότητα εγκατάστασης ενσύρματης δικτύωσης. Τα συστήματα αυτά, όπως το LMDS, είχαν την δυνατότητα να συνδέονται στα ενσύρματα δίκτυα και να διανέμουν το εύρος ζώνης αυτών, μέσω μιας διάταξης τοπικής διανομής πολλαπλών σημείων (point to multipoint configuration), σε επιχειρήσεις με την προϋπόθεση δυνατότητας απευθείας μετάδοσης σήματος. Η ομάδα 802.16 ανέπτυξε ένα πρότυπο το οποίο εγκρίθηκε τον Δεκέμβριο του 2001. Το πρότυπο αυτό, με την ονομασία Wireless MAN-SC, καθόριζε ένα φυσικό στρώμα (physical layer) που έκανε χρήση τεχνικών διαμόρφωσης μονού φέροντος (single carrier modulation techniques), καθώς και ένα υπόστρωμα ελέγχου προσπέλασης στο μέσο μετάδοσης ή αλλιώς MAC (Medium access control) layer με χρήση πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου ή αλλιώς TDM (Time division multiplexing) με ταυτόχρονη υποστήριξη FDD (Frequency division duplexing) και TDD (Time division duplexing).

Αφού η ομάδα ολοκλήρωσε τις εργασίες της πάνω σ' αυτό το πρότυπο, άρχισε προσπάθειες επέκτασης και διαμόρφωσής του με στόχο να μπορεί αυτό να λειτουργήσει τόσο στις ελεύθερες συχνότητες όσο και σ' αυτές που απαιτούν άδεια στο εύρος μεταξύ 2 GHz και 11 GHz, κάτι που θα επέτρεπε σχεδίαση χωρίς την προϋπόθεση δυνατότητας μετάδοσης απευθείας σήματος. Η τροποποίηση αυτή ολοκληρώθηκε το 2003 από την ομάδα 802.16a, με χρήση ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας ή αλλιώς OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) στο φυσικό στρώμα, για υποστήριξη λειτουργίας σε περιβάλλοντα πολλαπλής μετάδοσης (multipath environments). Μέχρι και σήμερα, το OFDM έχει καθιερωθεί ως η κατ' εξοχήν λύση για αντιμετώπιση της πολλαπλής μετάδοσης στα ευρυζωνικά δίκτυα και αποτέλεσε βασικό συστατικό των αναθεωρημένων IEEE 802.11 προτύπων. Πέρα από την ενσωμάτωση του OFDM στο φυσικό στρώμα, η ομάδα 802.16a όρισε επιπλέον επιλογές για το στρώμα MAC, συμπεριλαμβανομένης της υποστήριξης για πολλαπλή πρόσβαση ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας ή αλλιώς OFDMA (Orthogonal frequency division multiple access).

Επιπλέον αναθεωρήσεις του προτύπου 802.16a ολοκληρώθηκαν το 2004. Το αναθεωρημένο πρότυπο, 802.16-2004, αντικαθιστά τα πρότυπα 802.16, 802.16a, 802.16c με ένα ενιαίο πρότυπο, το οποίο μάλιστα υιοθετήθηκε ως η βάση για τα υψηλής επίδοσης μητροπολιτικά δίκτυα ή αλλιώς HIPERMAN (High performance metropolitan area network) από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων ή αλλιώς ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Το

2003, η ομάδα 802.16 ξεκίνησε εργασίες πάνω σε βελτιώσεις των προδιαγραφών ώστε να γίνουν δυνατές οι εφαρμογές και σε περιπτώσεις οχημάτων σε κίνηση. Η αναθεώρηση αυτή, με την ονομασία 802.16e, ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2005 και δημοσιεύτηκε επισήμως με την ονομασία IEEE 802.16e-2005. Καθορίζει το κλιμακωτό OFDM για το φυσικό στρώμα και προχωράει σε ορισμένες τροποποιήσεις στο στρώμα MAC για να μπορεί αυτό να ανταπεξέλθει σε κινητικότητα υψηλών ταχυτήτων.

Όπως προκύπτει λοιπόν, οι προδιαγραφές της ομάδας IEEE 802.16 αποτελούν μια συλλογή προτύπων με πολύ ευρύ πεδίο εφαρμογών. Για να μπορεί να προσαρμόζεται στις ποικίλες απαιτήσεις της βιομηχανίας, η ομάδα ενσωμάτωσε μεγάλο αριθμό επιλογών. Έτσι, για να μπορέσουν να αναπτυχθούν διαλειτουργικές λύσεις με χρήση της οικογένειας προτύπων 802.16, η ομάδα επέβαλε μια ομοφωνία στις επιλογές των προτύπων που θα θέτονταν σε ισχύ και προχώρησε σε πειράματα για επίτευξη διαλειτουργικότητας. Το IEEE καθόρισε τις προδιαγραφές αλλά άφησε στην βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών την αποστολή να τα μετατρέψει σε ένα ενιαίο διαλειτουργικό πρότυπο που θα μπορούσε κατόπιν να πιστοποιηθεί επίσημα. Αυτό οδήγησε στον σχηματισμό του WiMAX Forum που είχε ως στόχο να λύσει το πρόβλημα της διαλειτουργικότητας των προτύπων και να προωθήσει λύσεις βασισμένες στα πρότυπα αυτά. Το WiMAX Forum σχηματίστηκε στα πρότυπα του Wi-Fi Alliance, το οποίο είχε να επιδείξει σημαντικότερη επιτυχία στην προώθηση προϊόντων και στην διενέργεια πειραμάτων για την διαλειτουργικότητα αυτών, βασισμένη στα οικογένεια προτύπων IEEE 802.11.

1.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στις μέρες μας, υπάρχουν στην αγορά διάφορες «αποκλειστικές» τεχνολογίες για την ασύρματη ευρυζωνικότητα, ιδιαίτερα για σταθερές εφαρμογές. Ορισμένες απ' αυτές, όπως η τεχνολογία i-Burst της εταιρείας ArrayComm και η τεχνολογία Flash OFDM της εταιρείας Flarion υποστηρίζουν και κινητές εφαρμογές. Πέρα όμως απ' τις τεχνολογίες αυτές, στην αγορά έχουν καθιερωθεί τεχνολογίες βασισμένες σε διεθνή πρότυπα, οι βασικότερες των οποίων είναι το WiMAX, το Wi-Fi, και τα κυψελωτά συστήματα 3^{ης} γενιάς. Παρακάτω ακολουθεί μια συνοπτική αναφορά στις τεχνολογίες αυτές.

1.3.1 ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ 3^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ

Παγκοσμίως, οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας αναβαθμίζουν τα δίκτυά τους με στόχο την υποστήριξη τεχνολογίας 3^{ης} γενιάς και κατ' επέκταση την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών στους συνδρομητές τους. Όσες απ' αυτές χρησιμοποιούν το σύστημα GSM (Global system for mobile communications) ενσωματώνουν τις τεχνολογίες UMTS (Universal mobile telephone system) και HSDPA (High speed downlink packet access) ως μέρος της αναβάθμισής τους σε 3^{ης} γενιάς. Από την άλλη μεριά, εκείνες που κάνουν χρήση του συστήματος CDMA ενσωματώνουν την τεχνολογία 1xEV-DO (1x evolution data optimized). Στην Κίνα αλλά και σε άλλα μέρη της Ασίας, αρκετές εταιρείες χρησιμοποιούν την τεχνολογία TD-SCDMA (Time

division synchronous CDMA) για να αναβαθμίσουν τα συστήματά τους σε 3^{ης} γενιάς. Όλες οι παραπάνω τεχνολογικές αναβαθμίσεις δίνουν την δυνατότητα στα συστήματα να υποστηρίζουν ταχύτητες ανταλλαγής δεδομένων της τάξης ορισμένων εκατοντάδων kilobits το δευτερόλεπτο μέχρι και λίγα megabits το δευτερόλεπτο.

Η τεχνολογία HSDPA αποτελεί διεπαφή μίας κατεύθυνσης (downlink-only air interface) που έχει καθοριστεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές 3GPP (3rd Generation Partnership Project) UMTS Release 5. Παρέχει την δυνατότητα μετάδοσης ακόμα και σε ταχύτητα 14,4 Mbps, χρησιμοποιώντας κανάλι 5 MHz. Για να γίνει βέβαια εφικτή η ταχύτητα αυτή, είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση και των 15 κωδικών, κάτι που είναι αρκετά απίθανο να επιτευχθεί σε κινητά τερματικά. Χρησιμοποιώντας 5 ή 10 κώδικες, το HSDPA μπορεί να υποστηρίξει ταχύτητες 3,6 Mbps και 7,2 Mbps αντίστοιχα. Στην πράξη οι μέσες ταχύτητες που παρατηρούν οι χρήστες είναι της τάξης των 250 Kbps έως 750 Kbps. Βελτιώσεις, όπως η χρήση χωρικής επεξεργασίας σήματος (spatial processing), διαφορικής λήψης (diversity reception) στις κινητές τερματικές συσκευές ή ανίχνευσης πολλαπλών χρηστών (multiuser detection) μπορούν να αναβαθμίσουν σημαντικά τις επιδόσεις των HSDPA συστημάτων.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι το HSDPA αποτελεί διεπαφή μίας μόνο κατεύθυνσης. Για τον λόγο αυτό, έως ότου μια συμπληρωματική διεπαφή στην αντίθετη κατεύθυνση σχεδιαστεί και τεθεί σε εφαρμογή, οι ταχύτητες στην κατεύθυνση αυτή δεν θα ξεπερνούν τα 384 Kbps, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις θα κυμαίνονται μεταξύ 40 Kbps και 100 Kbps. Μία τέτοια διεπαφή που σχεδιάζεται, είναι το HSUPA (High speed uplink packet access), το οποίο θα υποστηρίζει ταχύτητες έως 5,8 Mbps και έχει προτυποποιηθεί με βάση τις προδιαγραφές 3GPP Release 6. Το HSDPA μαζί με το HSUPA αναφέρονται ως HSPA (High speed packet access).

Η τεχνολογία 1xEV-DO αποτελεί πρότυπο μετάδοσης δεδομένων υψηλών ταχυτήτων και έχει καθοριστεί από τον οργανισμό 3GPP2 ως εξέλιξη των συστημάτων IS-95 CDMA 2^{ης} γενιάς. Το πρότυπο αυτό υποστηρίζει ταχύτητες έως 2,4 Mbps, κάνοντας χρήση καναλιού 1,25 MHz, στην κάτω ζεύξη. Στην πράξη βέβαια οι ταχύτητες που παρατηρούν οι χρήστες κυμαίνονται μεταξύ 100 Kbps και 300 Kbps. Με την πρώτη αναθεώρηση (Revision A) του προτύπου η μέγιστη υποστηριζόμενη ταχύτητα ανήλθε στα 3,1 Mbps, ενώ με την δεύτερη αναθεώρηση (Revision B) στα 4,9 Mbps. Οι δύο αυτές εκδόσεις του προτύπου υποστηρίζουν ταυτόχρονα ταχύτητες μέχρι και 1,8 Mbps στην άνω ζεύξη. Η δεύτερη έκδοση μάλιστα έχει την δυνατότητα να λειτουργήσει κάνοντας χρήση μεγαλύτερου εύρους ζώνης (έως και 20 MHz) υποστηρίζοντας στην περίπτωση αυτή ταχύτητες έως 73 Mbps στην κάτω ζεύξη και 27 Mbps στην άνω.

Εκτός από παροχή υπηρεσιών ανταλλαγής δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες, τα συστήματα 3^{ης} γενιάς εξελίσσονται για να υποστηρίζουν και υπηρεσίες πολυμέσων. Για παράδειγμα, τα συστήματα 1xEV-DO Rev A παρέχουν τηλεφωνικές υπηρεσίες εικόνας και ήχου, με χρήση του πρωτοκόλλου IP. Για να γίνει βέβαια αυτό εφικτό τα συστήματα αυτά ελάττωσαν την καθυστέρηση της εναέριας ζεύξης σχεδόν στα 30 ms, βελτίωσαν το QoS και επιτάχυναν την διαδικασία μεταγωγής σταθμού εξυπηρέτησης. Πέρα από τα παραπάνω, τα συστήματα 1xEV-DO Rev A υποστηρίζουν υπηρεσίες εκπομπής (broadcast) και πολυεκπομπής (multicast). Παρόμοια, προσπάθειες αναβάθμισης γίνονται και για τα συστήματα UMTS/HSPA για να υποστηρίζουν τις παραπάνω υπηρεσίες.

Ο οργανισμός 3GPP ήδη σχεδιάζει μια νέα μεγάλη αναθεώρηση στα πρότυπα 3^{ης} γενιάς. Ο στόχος αυτού του μακροπρόθεσμου σχεδίου εξέλιξης ή LTE (Long term evolution) όπως αποκαλείται, είναι τα νέα συστήματα να υποστηρίζουν ταχύτητες έως και 100 Mbps στην κάτω ζεύξη και 50 Mbps στην άνω, με μέση αποδοτικότητα

φάσματος (spectral efficiency) τρεις έως τέσσερις φορές μεγαλύτερη αυτής του HSPA Release 6. Για να επιτευχθούν βέβαια τόσο υψηλές ταχύτητες και αποδοτικότητες φάσματος, το πιθανότερο είναι η εναέρια διεπαφή να βασιστεί στις τεχνολογίες OFDM/OFDMA και MIMO (Multiple input – Multiple output).

Παρόμοια και ο οργανισμός 3GPP2 έχει μακροπρόθεσμα σχέδια για επίτευξη μεγαλύτερων ταχυτήτων, κάνοντας χρήση μεγαλύτερων εύρων ζώνης. Ο βασικός στόχος είναι η υποστήριξη στα νέα συστήματα EV-DO Revision C, ταχυτήτων της τάξης των 70 με 200 Mbps για κάτω ζεύξη και 30 με 45 Mbps για την άνω, χρησιμοποιώντας εύρος ζώνης μέχρι 20 MHz. Θα πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι τα συστήματα EV-DO Revision C, αλλά και τα LTE δεν αναμένεται να είναι έτοιμα μέχρι το 2010.

1.3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ Wi-Fi

Όπως και τα συστήματα 3^{ης} γενιάς, έτσι και τα συστήματα Wi-Fi μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών. Το Wi-Fi είναι βασισμένο στην οικογένεια προτύπων IEEE 802.11 και είναι κατά κύριο λόγο μια τεχνολογία τοπικών δικτύων ή αλλιώς LAN (Local area networking) σχεδιασμένη για παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών εντός κτιρίων. Τα σύγχρονα Wi-Fi συστήματα βασίζονται στα πρότυπα 802.11a και 802.11g και υποστηρίζουν ταχύτητες έως 54 Mbps με μέση εμβέλεια εντός κτιρίων γύρω στα 30 μέτρα. Το Wi-Fi έχει καθιερωθεί ως η απόλυτη λύση για ευρυζωνικές υπηρεσίες σε σπίτια, γραφεία ή δημόσιες τοποθεσίες που αποκαλούνται hot spots. Τα τελευταία μάλιστα χρόνια, αρκετοί δημόσιοι φορείς ή τοπικές κοινωνίες ανά τον κόσμο πήραν την πρωτοβουλία να εγκαταστήσουν συστήματα Wi-Fi για εξωτερικούς χώρους με στόχο να παρέχουν ευρυζωνικές υπηρεσίες στα κέντρα των πόλεων ή σταθμούς τρένων, καθώς και σε επαρχιακές και αγροτικές περιοχές.

Συστήματα Wi-Fi που προορίζονται για λειτουργία σε εξωτερικούς ή μεγάλους εσωτερικούς χώρους χρησιμοποιούν πομπούς υψηλής ισχύος εγκατεστημένους σε μεγάλα ύψη, όπως στέγες κτιρίων, οι οποίοι εκπέμπουν σχεδόν στα όρια της επιτρεπόμενης ισχύος εκπομπής για τις ελεύθερες συχνότητες. Ακόμα και με πομπούς υψηλής ισχύος, τα συστήματα αυτά έχουν εμβέλεια το πολύ 300 μέτρα από το κάθε σημείο πρόσβασης (access point). Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η εγκατάσταση πολλών σημείων πρόσβασης σε μία πολύ πυκνή δομή, γεγονός που κάνει απαγορευτικό τον σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων για ολική κάλυψη πολύ μεγάλων περιοχών. Από την άλλη μεριά, τέτοια συστήματα είναι πολύ χρήσιμα για παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών σε μικρές περιοχές μεγάλης ζήτησης (hotzones). Το Wi-Fi προσφέρει σημαντικά μεγαλύτερες ταχύτητες ανταλλαγής δεδομένων σε σχέση με τα συστήματα 3^{ης} γενιάς, κυρίως λόγω του μεγαλύτερου εύρους ζώνης (20 MHz). Το ανεπαρκές όμως πρωτόκολλο CSMA (Carrier sense multiple access) που χρησιμοποιεί το Wi-Fi, σε συνδυασμό με τις έντονες παρεμβολές λόγω της λειτουργίας στις ελεύθερες συχνότητες, περιορίζει αισθητά την χωρητικότητα συστημάτων Wi-Fi σε εξωτερικούς χώρους. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά δεν είναι σχεδιασμένα για να υποστηρίζουν έντονη κινητικότητα. Ένα μεγάλο πάντως πλεονέκτημα του Wi-Fi σε σχέση με τους δύο μεγάλους ανταγωνιστές του, το WiMAX και τα συστήματα 3^{ης} γενιάς, είναι η τεράστια διαθεσιμότητα τερματικών συσκευών που το υποστηρίζουν. Η συντριπτική πλειοψηφία των φορητών Η/Υ (laptops) κατασκευάζονται σήμερα με ενσωματωμένη την υποστήριξη στην τεχνολογία του Wi-Fi. Το ίδιο έχει αρχίσει να συμβαίνει και σε πολλές άλλες

συσκευές όπως PDAs (Personal data assistants), ασύρματα οικιακά τηλέφωνα, κινητά τηλέφωνα, κάμερες και συσκευές αναπαραγωγής πολυμέσων (media players). Αυτό έχει κάνει πολύ εύκολη και βολική την πρόσβαση των χρηστών σε ευρυζωνικά δίκτυα βασισμένα στο Wi-Fi. Όπως συμβαίνει και στα συστήματα 3^{ης} γενιάς, γίνονται προσπάθειες βελτίωσης και αναβάθμισης των δυνατοτήτων του Wi-Fi, με στόχο την υποστήριξη ακόμα μεγαλύτερων ταχυτήτων και καλύτερου QoS (Quality of Service). Πιο συγκεκριμένα, μέσω της τεχνολογίας χωρικής πολυπλεξίας με χρήση πολλαπλών κεραιών (multiple antenna spatial multiplexing), το νέο πρότυπο IEEE 802.11n θα υποστηρίζει ταχύτητες μεγαλύτερες των 100 Mbps. Ταυτόχρονα, το νέο αυτό πρότυπο αναμένεται να παρέχει αρκετά ευρύτερη κάλυψη, χρησιμοποιώντας διαφορική εκπομπή (transmit diversity) και άλλες προηγμένες τεχνικές.

1.3.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ WiMAX

Η τρίτη, κατά χρονολογική τουλάχιστον σειρά, τεχνολογία ασύρματης ευρυζωνικότητας είναι το WiMAX. Οι δυνατότητες του WiMAX όσον αφορά τις υποστηριζόμενες ταχύτητες εξαρτώνται από το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται ανά περίπτωση. Αντίθετα με τα συστήματα 3^{ης} γενιάς, στα οποία το εύρος ζώνης είναι σταθερό, στα συστήματα WiMAX το εύρος ζώνης μπορεί να επιλεγεί από 1,25 MHz έως και 20 MHz, κάτι που κάνει τον σχεδιασμό τους πολύ ευέλικτο. Όταν αυτά σχεδιάζονται με χρήση του συνηθέστερου καναλιού εύρους 10 MHz και αμφιδρόμηση διαίρεσης χρόνου ή TDD (Time Division Duplexing), θεωρώντας 3:1 αναλογία άνω και κάτω ζεύξης και 2x2 MIMO (Multiple input - Multiple output), έχουν την δυνατότητα υποστήριξης ταχυτήτων έως και 46 Mbps για την κάτω ζεύξη και έως και 7 Mbps για την άνω. Η χρήση διαμόρφωσης OFDM στο Wi-Fi και το WiMAX, σε αντίθεση με τα συστήματα 3^{ης} γενιάς που χρησιμοποιούν διαμόρφωση CDMA, τους επιτρέπει να υποστηρίζουν πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες. Η ανάγκη για διασπορά κάνει την επίτευξη πολύ υψηλών ταχυτήτων δύσκολη για τα συστήματα που χρησιμοποιούν διαμόρφωση CDMA.

Ακόμα πιο σημαντικά από την μέγιστη ταχύτητα ανταλλαγής δεδομένων σε μια ζεύξη είναι η μέση ταχύτητα και η ολική χωρητικότητα ενός συστήματος που έχει σχεδιαστεί με βάση την κυψελοτή αρχιτεκτονική. Από την οπτική της χωρητικότητας, το πιο ασφαλές μέτρο σύγκρισης της απόδοσης ενός συστήματος είναι η φασματική αποδοτικότητα (spectral efficiency). Τα συστήματα WiMAX στην περίπτωση αυτή, υπερτερούν σε σχέση με τα 3^{ης} γενιάς, καθώς επιτυγχάνουν αρκετά μεγαλύτερες αποδοτικότητες φάσματος. Στην πραγματικότητα, αυτό οφείλεται σε έναν βαθμό στο ότι το WiMAX έκανε χρήση τεχνικών πολλαπλών κεραιών από την αρχική θεμελίωσή του, ενώ στα συστήματα 3^{ης} γενιάς οι τεχνικές αυτές έχουν ενσωματωθεί στις αναθεωρήσεις που γίνονται κατά καιρούς. Επιπλέον, η χρήση OFDM στο φυσικό στρώμα του WiMAX το κάνει πιο επιδεκτικό σε εφαρμογές MIMO, εν αντιθέσει με το CDMA το οποίο απαιτεί μεγαλύτερη πολυπλοκότητα για συγκρίσιμο κέρδος. Το OFDM επίσης διευκολύνει την εφαρμογή διαφορικότητας συχνότητας (frequency diversity) και διαφορικότητας πολλαπλών χρηστών (multiuser diversity). Για τον λόγο αυτό, εν συγκρίσει με τα συστήματα 3^{ης} γενιάς, το WiMAX παρέχει υψηλότερες μέγιστες ταχύτητες, μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς και μεγαλύτερη μέση ρυθμοαπόδοση και χωρητικότητα συστήματος.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα του WiMAX είναι η ικανότητα υποστήριξης περισσότερων συμμετρικών ζεύξεων, κάτι που είναι πολύ χρήσιμο σε σταθερές

εφαρμογές, όπως δίκτυα υποκατάστατα του T1, καθώς και ευέλικτης και δυναμικής προσαρμογής του λόγου ταχυτήτων άνω και κάτω ζεύξης. Τυπικά, στα συστήματα 3^{ης} γενιάς, ο λόγος αυτός είναι σταθερός.

Τι γίνεται όμως όσον αφορά την υποστήριξη προηγμένων IP εφαρμογών, όπως εφαρμογές ήχου, εικόνας και πολυμέσων; Ποια είναι η στρατηγική που χρησιμοποιούν οι τεχνολογίες αυτές σε σχέση με τον καθορισμό προτεραιότητας κίνησης και τον έλεγχο ποιότητας; Το στρώμα MAC του WiMAX είναι από την αρχή δομημένο να υποστηρίζει διάφορες τεχνικές ελέγχου της κίνησης στο δίκτυο, όπως σταθερό ρυθμό δεδομένων πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου (real time – non real time constant bit rate), μεταβλητό ρυθμό δεδομένων (variable bit rate), δεδομένα υψηλής προτεραιότητας (prioritized data) και δεδομένα καλύτερης δυνατής προσπάθειας (best effort data). Οι αντίστοιχες λύσεις στα συστήματα 3^{ης} γενιάς, όπως το HSDPA και το 1xEV-DO έχουν σχεδιαστεί κι αυτές για διάφορα επίπεδα QoS.

Το μεγαλύτερο όμως πλεονέκτημα του WiMAX είναι μάλλον το δυνητικά χαμηλότερο κόστος του, το οποίο οφείλει στην ελαφριά IP αρχιτεκτονική του. Χρησιμοποιώντας IP αρχιτεκτονική, το δίκτυο πυρήνα απλουστεύεται. Τα συστήματα 3^{ης} γενιάς έχουν πιο πολύπλοκο και ξεχωριστό δίκτυο πυρήνα για μετάδοση φωνής και δεδομένων, κάτι που μεγεθύνει τόσο το αρχικό κόστος εγκατάστασης, όσο και το κόστος συντήρησής του. Πέρα από τα παραπάνω, η χρήση IP αρχιτεκτονικής θέτει το WiMAX σε μία καμπύλη απόδοσης/τιμής που ευθυγραμμίζεται με τους επεξεργαστές γενικής χρήσης (general purpose processors) σύμφωνα με το νόμο του Moore, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη αποδοτικότητα κεφαλαίου και συντήρησης. Η χρήση IP αρχιτεκτονικής τέλος, επιτρέπει ευκολότερη εναρμόνιση με ανεξάρτητους σχεδιαστές εφαρμογών, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνει την συνεργασία με άλλα δίκτυα και εφαρμογές.

Όσον αφορά την υποστήριξη περιαγωγής (roaming) και κινητικότητας υψηλών ταχυτήτων, οι δυνατότητες του WiMAX δεν έχουν ακόμα πιστοποιηθεί εν αντιθέσει με τα συστήματα 3^{ης} γενιάς. Σε αυτά, η κινητικότητα ήταν από τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά κατά την αρχική σχεδίαση. Στο WiMAX από την άλλη μεριά, η αρχική σχεδίαση έγινε για σταθερά συστήματα και η υποστήριξη κινητικότητας ενσωματώθηκε ως πρόσθετο χαρακτηριστικό.

Εν κατακλείδι, το WiMAX αποτελεί μια τεχνολογία που θα μπορούσε νοητά να τοποθετηθεί κάπου ανάμεσα σε αυτές των συστημάτων 3^{ης} γενιάς και του Wi-Fi, λαμβάνοντας υπόψη τις αποδόσεις τους σε ρυθμοαπόδοση, εμβέλεια, QoS, υποστήριξη κινητικότητας και φυσικά το κόστος τους. Ο πίνακας 2 συνοψίζει τα κυριότερα χαρακτηριστικά των τριών αυτών τεχνολογιών.

| Parameter | Fixed WiMAX | Mobile WiMAX | HSPA | 1x EV-DO Rev A | Wi-Fi |
|--------------------------|---|--|--|--------------------------------------|--|
| Standards | IEEE 802.16-2004 | IEEE 802.16e-2005 | 3GPP Release 6 | 3GPP2 | IEEE 802.11a/g/n |
| Peak down link data rate | 9.4Mbps in 3.5MHz with 3:1 DL-to-UL ratio TDD; 6.1Mbps with 1:1 | 46Mbps ^a with 3:1 DL-to-UL ratio TDD; 32Mbps with 1:1 | 14.4Mbps using all 15 codes; 7.2Mbps with 10 codes | 3.1Mbps; Rev. B will support 4.9Mbps | 54 Mbps ^b shared using 802.11a/g; more than 100Mbps peak layer 2 throughput using 802.11n |
| Peak uplink data rate | 3.3Mbps in 3.5MHz using 3:1 DL-to-UL ratio; 6.5Mbps with 1:1 | 7Mbps in 10MHz using 3:1 DL-to-UL ratio; 4Mbps using 1:1 | 1.4Mbps initially; 5.8Mbps later | 1.8Mbps | |
| Bandwidth | 3.5MHz and 7MHz in 3.5GHz band; 10MHz in 5.8GHz band | 3.5MHz, 7MHz, 5MHz, 10MHz, and 8.75MHz initially | 5MHz | 1.25MHz | 20MHz for 802.11a/g; 20/40MHz for 802.11n |
| Modulation | QPSK, 16 QAM, 64 QAM | QPSK, 16 QAM, 64 QAM | QPSK, 16 QAM | QPSK, 8 PSK, 16 QAM | BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM |
| Multiplexing | TDM | TDM/OFDMA | TDM/CDMA | TDM/CDMA | CSMA |
| Duplexing | TDD, FDD | TDD initially | FDD | FDD | TDD |
| Frequency | 3.5GHz and 5.8GHz initially | 2.3GHz, 2.5GHz, and 3.5GHz initially | 800/900/1,800/1,900/2,100MHz | 800/900/1,800/1,900MHz | 2.4GHz, 5GHz |
| Coverage (typical) | 3–5 miles | < 2 miles | 1–3 miles | 1–3 miles | < 100 ft indoors; < 1000 ft outdoors |
| Mobility | Not applicable | Mid | High | High | Low |

Πίνακας 2 - Σύγκριση του WiMAX με τις άλλες τεχνολογίες ασύρματης ευρυζωνικότητας

1.3.4 ΑΛΛΑ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Έως τώρα, είχαμε περιοριστεί στις τρεις επικρατούσες, αυτήν την στιγμή, τεχνολογίες ασύρματης ευρυζωνικότητας, το WiMAX, το Wi-Fi και τα συστήματα 3^{ης} γενιάς. Δύο ακόμα τεχνολογίες βασισμένες σε πρότυπα σχεδιάζονται και αναμένεται να ανταγωνιστούν τις προαναφερθείσες, και κυρίως το WiMAX. Πρόκειται για τα πρότυπα IEEE 802.20 και IEEE 802.22. Το πρότυπο IEEE 802.20 επικεντρώνεται στην ενσωμάτωση δυνατότητας υποστήριξης μεγάλης κινητικότητας, που θα φτάνει έως και 250 χιλιόμετρα την ώρα. Το πιθανότερο είναι να λειτουργήσει σε συχνότητες κάτω από 3,5 GHz και να παρέχει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 4 Mbps και 1,2 Mbps για την κάτω και άνω ζεύξη αντίστοιχα. Η προσπάθεια ανάπτυξης του προτύπου αυτού ξεκίνησε πριν μερικά χρόνια, αλλά δεν έχει προχωρήσει αρκετά ακόμη, κυρίως λόγω της έλλειψης ομοφωνίας στις τεχνολογίες και διάφορων ζητημάτων που αφορούν την διαδικασία θεμελίωσης του προτύπου. Το πρότυπο IEEE 802.22 από την άλλη μεριά, επικεντρώνεται στην παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης σε αγροτικές και απόμακρες

περιοχές μέσω των επονομαζόμενων ασύρματων δικτύων περιφερειακών περιοχών ή WRAN (Wireless regional area networks). Ο βασικός στόχος του προτύπου αυτού είναι η εκμετάλλευση των αχρησιμοποίητων καναλιών τηλεόρασης που υπάρχουν σε αραιοκατοικημένες περιοχές. Λειτουργώντας στις συχνότητες VHF ή τις χαμηλές UHF οι συνθήκες μετάδοσης είναι πολύ πιο ευνοϊκές, κάτι που επιτρέπει πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια στα νέα συστήματα. Η ανάπτυξη του προτύπου ουσιαστικά οφείλεται στο γεγονός ότι η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών ή FCC (Federal Communications Commission) ανακοίνωσε την απελευθέρωση των παραπάνω συχνοτήτων. Το πρότυπο IEEE 802.22 βρίσκεται ακόμα στα πρώτα στάδια ανάπτυξης και αναμένεται να παρέχει σταθερές ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες σε μεγάλες περιοχές με αραιή πυκνότητα χρηστών.

1.4 ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑ

Η διαθεσιμότητα φάσματος είναι βασική προϋπόθεση για την παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών. Αυτό οφείλεται σε όλες εκείνες τις παραμέτρους, όπως το διαθέσιμο εύρος ζώνης, η απαιτούμενη ισχύς εκπομπής και τα χαρακτηριστικά διάδοσης του σήματος, οι οποίες εξαρτώνται από την εκάστοτε συχνοτική μάντα. Η πρόσβαση στο φάσμα συχνοτήτων είναι το κλειδί για την ανάπτυξη των ασύρματων ευρυζωνικών τεχνολογιών.

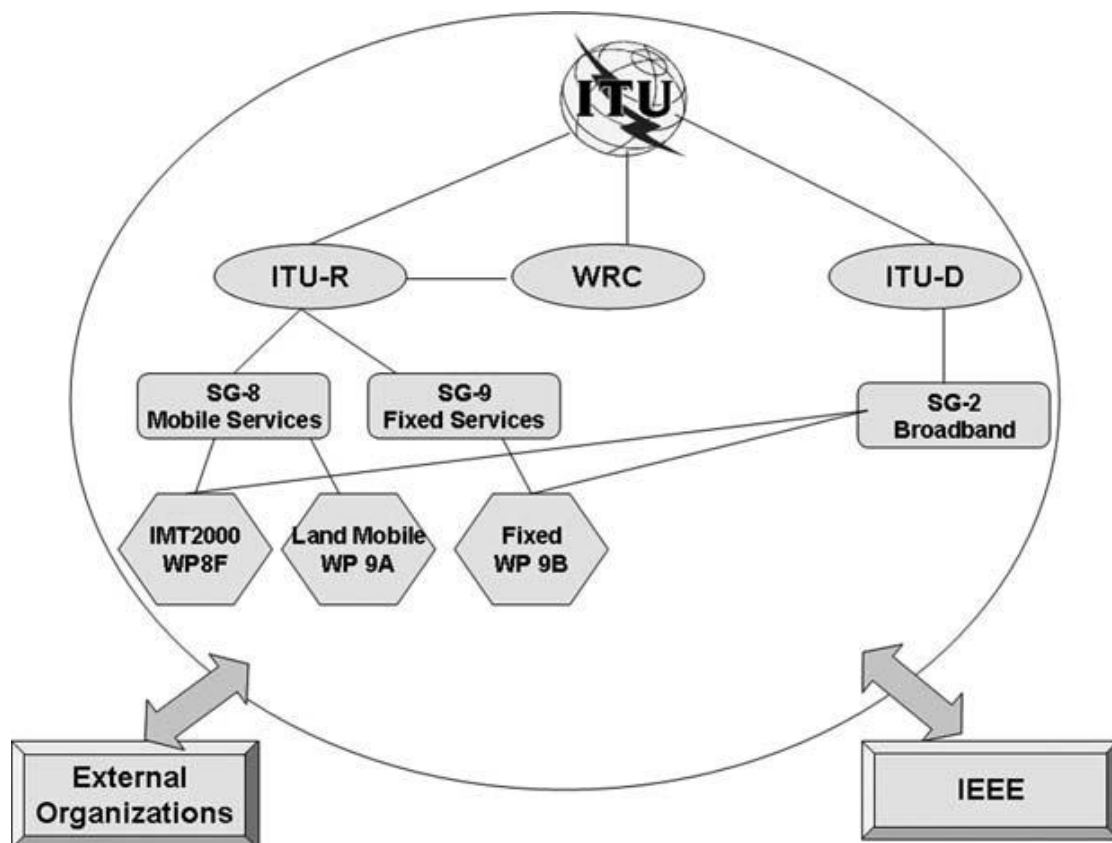
1.4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ITU-R

Η κατανομή του φάσματος στις διάφορες εφαρμογές και τεχνολογίες είναι μια διαδικασία που συντονίζεται σε διεθνή κλίμακα. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών ή ITU (International Telecommunications Union), αποτελεί διεθνή οργανισμό με αντιπροσώπευση από τις υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών όλων των χωρών, και είναι αυτή που συντονίζει την διεθνώς αποδεκτή χρήση του φάσματος από τις διάφορες εφαρμογές. Η λειτουργία αυτή διεκπεραιωνόταν από μία επιτροπή του ITU, με την ονομασία CCIR (International Radio Consultative Committee), η οποία στη συνέχεια μετονομάστηκε σε ITU-R. Σημαντικά ζητήματα σχετικά με τις συχνότητες συζητούνται και διευθετούνται στις συναντήσεις του WRC (World Radio Conference), το οποίο είναι ένα παγκόσμιο συνέδριο που οργανώνεται κάθε τέσσερα χρόνια. Η τελευταία συνάντηση του WRC έγινε το Νοέμβριο του 2007. Στις εργασίες του συνεδρίου βοηθούν και οι τοπικές επιτροπές ή RRCs (Regional Radio Committees), οι οποίες παρέχουν τις κατά τόπους συντονισμένες εισαγωγές στην κατανομή συχνοτήτων. Οι τοπικοί φορείς παρέχουν τα δεδομένα αυτά και στο ITU. Οι συμφωνίες που λαμβάνονται στο WRC, εγκρίνονται στην συνέχεια από το ITU-R, και δημοσιεύονται ως διεθνείς οδηγίες για την κατανομή του φάσματος, τις εφαρμογές και τα χρησιμοποιούμενα κανάλια.. Από κει και πέρα, η κάθε χώρα έχει την επιλογή είτε να υιοθετήσει πλήρως τις διεθνείς αυτές οδηγίες είτε να προβεί σε τροποποιήσεις ανάλογα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις για την χρήση του φάσματος που υπάρχουν σε αυτή. Βέβαια, σε περιπτώσεις που οι οδηγίες αφορούν εφαρμογές που έχουν διεθνή φύση, όπως οι δορυφορικές επικοινωνίες, ή επηρεάζουν τις γείτονες χώρες, η τήρησή τους είναι υποχρεωτική. Η τελική μορφή της κατανομής συχνοτήτων, για παράδειγμα σε ελεύθερες ή επί πληρωμή, με ή χωρίς απαίτηση άδειας, κατανεμημένες ή δημοπρατημένες, αφήνεται στην δικαιοδοσία των εκάστοτε κυβερνήσεων. Από την στιγμή που οι επιμέρους κυβερνήσεις συμμετέχουν στην συνολική συντονιστική διαδικασία του ITU, η αποδοχή των οδηγιών είναι πολύ

μεγάλη και για τον λόγο αυτό πολλές φορές αντιμετωπίζονται ως διεθνή πρότυπα παρά σαν οδηγίες.

Η κατανομή φάσματος είναι μια διαδικασία που ιστορικά ξεκίνησε με την κατανομή των συχνοτήτων για τις ασύρματες ραδιοφωνικές και τηλεγραφικές επικοινωνίες. Από τότε, οι τεχνολογίες έχουν κάνει τεράστια άλματα, συμπεριλαμβανομένων των δορυφορικών επικοινωνιών, της ασύρματης ευρυζωνικότητας, τεχνικών πλοήγησης και πολλών άλλων εφαρμογών. Το CCIR (ή ITU-R όπως έχει μετονομαστεί) έχει κατά καιρούς εξετάσει νέες εφαρμογές, αναθεωρήσει προηγούμενες κατανομές συχνοτήτων και έχει προτείνει την χρησιμοποίηση επιπλέον συχνοτήτων για νέες εφαρμογές. Η παγκόσμια υιοθέτηση των οδηγιών για συγκεκριμένες κατανομές, όπως οι μπάντες C και Ku για δορυφορικές επικοινωνίες, η μπάντα L για ναυτιλιακές κινητές υπηρεσίες (maritime mobile) και οι μπάντες των 800, 1800 και 1900 MHz για την κινητή τηλεφωνία και τα συστήματα 3^{ης} γενιάς, έχει δώσει την δυνατότητα διεθνούς χρήσης των συχνοτήτων αυτών και παγκόσμιας περιαγωγής (global roaming).

Το WRC κάνει περιοδικές αναθεωρήσεις στο παγκόσμιο πλαίσιο κατανομών φάσματος, λόγω παλαιών συστημάτων, όπως δορυφορικά συστήματα, επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις, καθώς και ζητημάτων που αφορούν την άμυνα των χωρών. Η κατανομή συχνοτήτων για νέες υπηρεσίες ήταν πάντα τροχοπέδη για την γρήγορη ανάπτυξη των τεχνολογιών. Συχνά, υπάρχει ανεπάρκεια διαθέσιμου φάσματος, καθώς μπάντες, η χρήση των οποίων θα ήταν ιδανική για κάποιες τεχνολογίες, παραμένουν κατοχυρωμένες σε άλλες υπηρεσίες. Νέες τεχνολογίες, όπως η κινητή τηλεόραση (mobile TV), το κινητό WiMAX (mobile WiMAX) και η εξέλιξη των συστημάτων 3^{ης} γενιάς, είναι οι πιο πρόσφατοι ανταγωνιστές όσον αφορά την κατανομή συχνοτήτων σε αυτές.



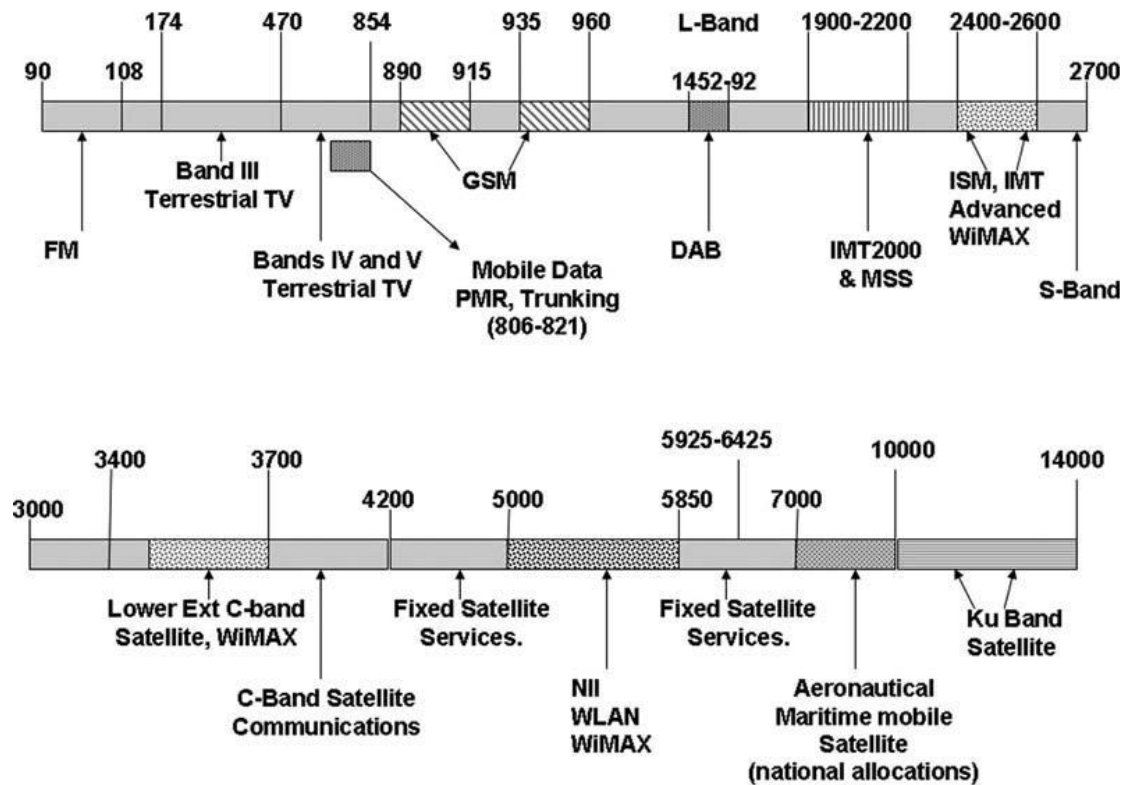
Εικόνα 1 - Διαδικασία κατανομής συχνοτήτων από το ITU

Η κατανομή φάσματος σε νέες εφαρμογές περιορίζεται από τα ήδη υπάρχοντα συστήματα. Ένα παράδειγμα είναι η ανάθεση της μπάντας C και των συμπληρωματικών της (3,5-4,2 GHz και 5,8-6,5 GHz), οι οποίες δίνουν την δυνατότητα λειτουργίας σε πολύ χαμηλή ισχύ, στις δορυφορικές επικοινωνίες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, δορυφορικά συστήματα με διάρκεια ζωής έως 18 χρόνια και κύκλο σχεδιασμού 5 χρόνων, να κατακρατούν τις μπάντες αυτές για μεγάλα διαστήματα, λόγω του μακροπρόθεσμου σχεδίου χρήσης τους. Με πάνω από 600 δορυφορικά δίκτυα να είναι σήμερα σε λειτουργία και σχεδόν 50.000 αναθέσεις συχνοτήτων σε 3.000 επίγειους σταθμούς, το συνολικό δίκτυο έχει χτιστεί επιμελώς τα τελευταία 30 χρόνια. Από την άλλη όμως, ο κύκλος σχεδιασμού νέων τεχνολογιών όπως το WiMAX ή τα συστήματα 3^{ης} γενιάς, είναι αρκετά μικρότερος από την 23χρονη συνολική διάρκεια ζωής των δορυφορικών συστημάτων. Έτσι, τα συστήματα αυτά χρειάζεται να συνυπάρξουν με τις νέες τεχνολογίες που εμφανίζονται και τους παρέχεται πρόσβαση σε γειτονικές μπάντες, όπως συμβαίνει με το WiMAX και τις μπάντες των 3,5 GHz και 5,6 GHz.

Λόγω της κληρονομικής χρήσης και ζητημάτων σχετικά με τις παρεμβολές, η κατανομή φάσματος δεν πρέπει να θεωρείται αποκλειστικά και μόνο ως απλή κατανομή συχνοτήτων στις διάφορες εφαρμογές. Επιπλέον χαρακτηριστικά κάθε συχνότητας αποτελούν η μέγιστη δυνατή ισχύ εκπομπής, οι εξωσυχνοτικές παρεμβολές που προκαλούνται από μια τέτοια εκπομπή, και η ανεκτικότητα του συστήματος σε παρεμβολές άλλων συστημάτων. Μία ακόμα αρμοδιότητα της κατανομής φάσματος είναι ο καθορισμός των χρησιμοποιούμενων καναλιών, όσον αφορά το εύρος ζώνης και τις κεντρικές συχνότητές τους. Επιπρόσθετα, η χρήση του φάσματος υπόκειται στις κανονιστικές διατάξεις που ισχύουν στην εκάστοτε χώρα. Σε περίπτωση που το φάσμα έχει αποδοθεί σε επίγειες ή δορυφορικές υπηρεσίες, ανταλλαγή της χρήσης του είναι μη αποδεκτή ή υπόκειται σε συγκεκριμένη διαδικασία αδειοδότησης.

Το φάσμα μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί ανάλογα με το αν το επιτρέπουν τα χαρακτηριστικά μετάδοσης. Για παράδειγμα, οι σταθμοί βάσης στα κυψελωτά συστήματα, μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις ίδιες συχνότητες σε γειτονικές κυψέλες στην περίπτωση CDMA ή COFDM SFN δικτύων, όπως είναι τα δίκτυα DVB-H. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως στα δίκτυα GSM, οι συχνότητες μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν μόνο σε κυψέλες που βρίσκονται αρκετά μακριά η μία από την άλλη ώστε να αποφεύγονται παρεμβολές μεταξύ τους. Στο WiMAX, η συχνότητα αναχρησιμοποίησης κάθε συχνότητας μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο, διασπώντας κάθε κυψέλη σε τρείς ή περισσότερους τομείς.

Θα πρέπει τέλος να σημειωθεί, ότι σε ορισμένες περιπτώσεις η κατανομή του φάσματος γίνεται ξεχωριστά σε κάποιες χώρες, όπως συμβαίνει με τις υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, το ψηφιακό ραδιόφωνο ή τις μπάντες NII στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.



Εικόνα 2 - Η κατανομή συχνοτήτων όπως είναι διαμορφωμένη σήμερα

1.4.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ

Είναι αρκετά ενδιαφέρον και χρήσιμο στο σημείο αυτό, να δοθεί μια σύντομη και περιεκτική επισκόπηση της κατανομής του φάσματος ανά οικογένεια υπηρεσιών, όπως αυτή είναι διαμορφωμένη σήμερα.

1.4.2.1 ΦΑΣΜΑ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ (BROADCAST SERVICES)

Είναι προφανές ότι οι παλιές υπηρεσίες εκπομπής, όπως οι επίγειες αναλογικές εκπομπές στις μπάντες III, IV και V των VHF και UHF (174 – 854 MHz), καθώς και οι δορυφορικές επικοινωνίες και οι εκπομπές στις μπάντες C και Ku (3,4–4,2GHz, 5,9–6,5GHz και 10-14 GHz) καταλαμβάνουν ένα μεγάλο μέρος του διαθέσιμου φάσματος. Οι υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας (GSM) χρησιμοποιούν τις μπάντες 860-900 MHz και 940-980 MHz, ενώ τα συστήματα 3^{ης} γενιάς UMTS ή MSS χρησιμοποιούν την μπάντα 1800-2100 MHz. Επιπρόσθετα, η μπάντα L στα 1600 MHz χρησιμοποιείται για ναυτιλιακές κινητές και αεροναυτικές υπηρεσίες.

Η στροφή των υπηρεσιών τηλεόρασης από αναλογικές σε ψηφιακές, είναι μια διαδικασία που συντελείται αυτήν την στιγμή στις περισσότερες χώρες και επιφορτίζει ιδιαίτερα τις επίγειες συχνότητες VHF και UHF, λόγω των απαιτήσεων για ταυτόχρονη εκπομπή αναλογικής και ψηφιακής τηλεόρασης. Όταν θα ολοκληρωθεί η απόσυρση των αναλογικών συστημάτων, μεγάλο κομμάτι του φάσματος θα απελευθερωθεί και θα γίνει διαθέσιμο για νέες υπηρεσίες. Οι

δημοπρατήσεις του φάσματος στην μάντα των 700 MHz, που έγιναν στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2008, είναι ενδεικτικές αυτής της τάσης. Οι μάντες αυτές μάλιστα, όταν θα απελευθερωθούν, θα αποτελέσουν βασικές υποψήφιες για χρήση από υπηρεσίες της οικογένειας IEEE 802.16, όπως είναι το WiMAX.

1.4.2.2 ΦΑΣΜΑ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ

Οι υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας λειτουργούν με βάση διάφορες τεχνολογίες. Το GSM και το CDMA είναι οι δύο βασικότερες. Ο παρακάτω πίνακας επισημαίνει τις συχνότητες που έχουν κατοχυρωθεί για τις διάφορες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, έτσι ώστε να είναι δυνατή η παγκόσμια περιαγωγή.

Το ITU έχει θέσει σε εφαρμογή τον σχεδιασμό των εναέριων διεπαφών και των φασματικών απαιτήσεων για τη νέα γενιά κινητών υπηρεσιών, αναθέτοντας το έργο αυτό στην ομάδα εργασίας IMT 2000. Η ομάδα αυτή οραματίζεται την χρήση μακροκυψελών, μικροκυψελών και πικοκυψελών με δυνατή την υποστήριξη των προβλεπόμενων ταχυτήτων. Έχει ορίσει ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων 144 Kbps σε συνθήκες οδήγησης, 384 Kbps για σταθερή χρήση ή συνθήκες βαδίσματος, και 2 Mbps για χρήση σε εσωτερικούς χώρους. Η πρωτοβουλία του IMT 2000 ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 90, και απ' ότι αποδείχτηκε, οι αρχικές εκτιμήσεις για τις ταχύτητες ήταν αρκετά συντηρητικές. Νέες εφαρμογές όπως η κινητή τηλεόραση (mobile TV) δεν είχαν ακόμα οραματιστεί.

International allocations for 2/2.5G mobile services

| | International Allocations ITU R. M.1073-1 | Usage |
|--------------|--|--|
| 800 MHz band | 824–849 MHz paired with 869–894 MHz | CDMA-based mobile services |
| 900 MHz band | 890–915 MHz paired with 935–960 MHz 880–890 paired with 925–935 MHz | GSM band E-GSM band |
| 1800 MHz | 1710–1785 MHz paired with 1805–1880 MHz | GSM band |
| 1900 MHz | 1850–1910 MHz paired with 1930–1990 MHz | Part of IMT-2000 But also used as American PCS and other systems |

Πίνακας 3 - Διεθνής κατανομή συχνοτήτων για υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας

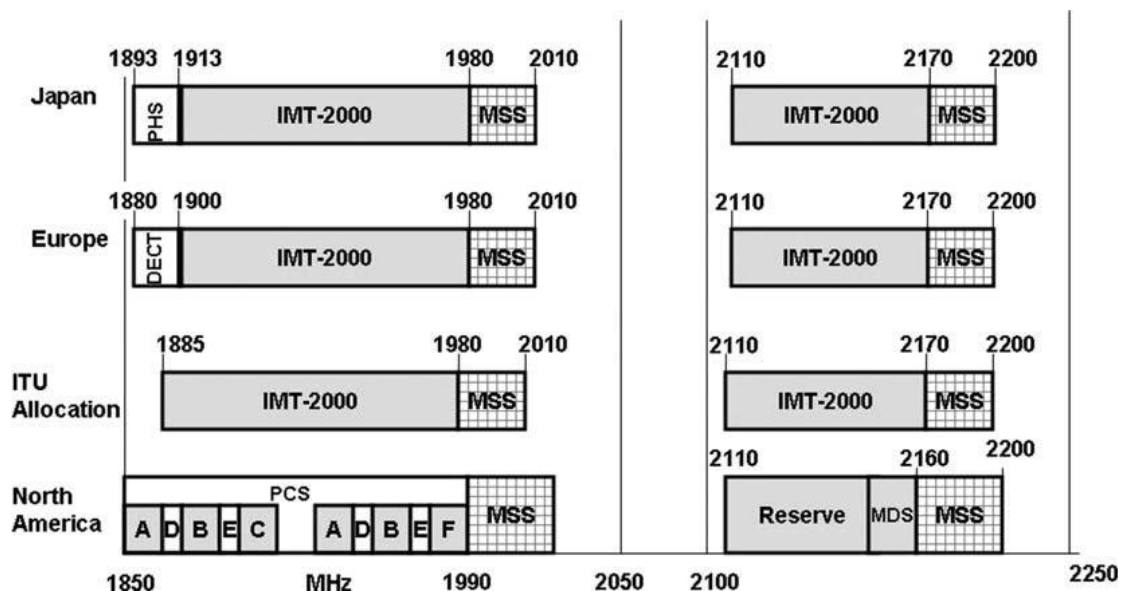
Το φάσμα που πρότεινε η ομάδα IMT 2000 για τα συστήματα 3^{ης} γενιάς περιλάμβανε πέντε τύπους εναέριος διεπαφής (air interface) αλλά και την πρόνοια τόσο για επίγειες κινητές υπηρεσίες όσο και δορυφορικές.

Οι πέντε τύποι εναέριος διεπαφής είναι οι παρακάτω:

- UMTS Terrestrial Radio Access – Frequency Division Duplexing (UTRA-FDD), ένα 3GPP πρότυπο
- UMTS Terrestrial Radio Access – Time Division Duplexing (UTRA-TDD), ένα 3GPP πρότυπο
- CDMA 2000, ένα 3GPP2 πρότυπο
- Single Carrier Time Division Multiple Access (SC-TDMA)
- Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT)

Τον Δεκέμβριο του 2007, το OFDMA-TDD, που χρησιμοποιείται στο mobile WiMAX, προστέθηκε ως ο έκτος τύπος εναέριος διεπαφής.

Οι προτάσεις του ITU για το IMT 2000 έχουν εφαρμοστεί σε διάφορες χώρες, ανάλογα πάντα με τις τεχνολογίες και τις εναέριος διεπαφές που χρησιμοποιούν, καθώς και την κατανομή φάσματος σε αυτές. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, για παράδειγμα, η μπάντα των 1900-2200 MHz έχει αποδοθεί σε διαφορετικές τεχνολογίες, τόσο επίγειες όσο και δορυφορικές. Οι εκτεταμένες UMTS μπάντες (806-960 MHz, 1710-1785 MHz και 2520-2690 MHz), όπως εγκρίθηκε από το WRC 2000, έγιναν διαθέσιμες στην Ευρώπη το 2008. Οι εκτεταμένες αυτές μπάντες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για συστήματα OFDMA-TDD βασισμένα στις τεχνολογίες IEEE 802.16e.



Εικόνα 4 - Η κατανομή του IMT 2000 σε διάφορες χώρες

1.4.2.3 ΕΚΠΟΜΠΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΗΧΟΥ (DAB – DIGITAL AUDIO BROADCASTING)

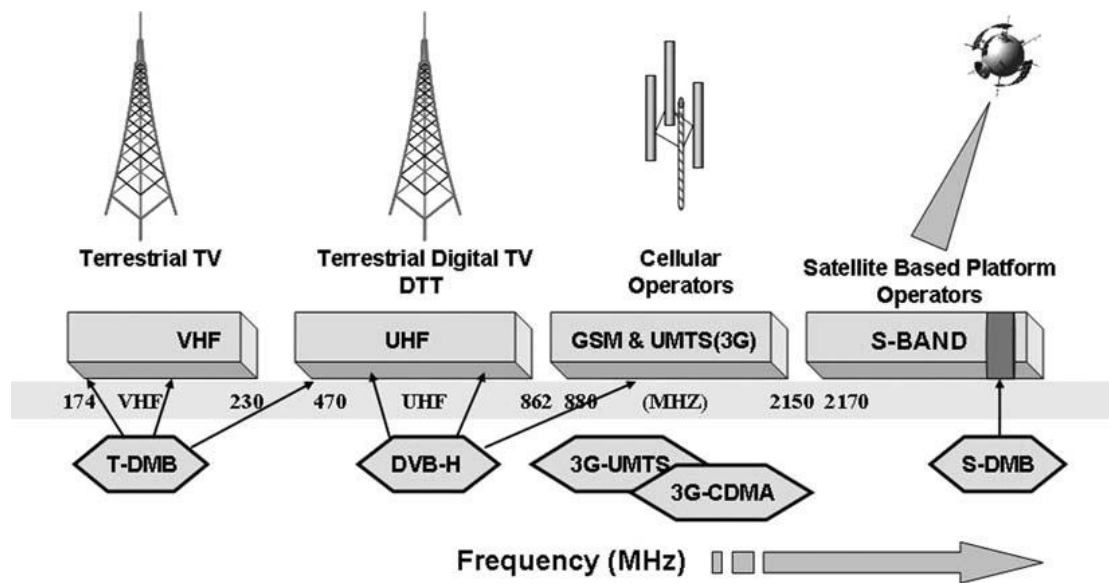
Η εκπομπή ψηφιακού ήχου είναι δυνατή μέσω δύο τεχνολογιών, του S-DAB (Satellite DAB) και του T-DAB (Terrestrial DAB). Το φάσμα που αποδόθηκε για την υπηρεσία αυτή είναι στην μπάντα L (1452-1492 MHz). Στην Ευρώπη, οι αναθέσεις των καναλιών της μπάντας έγιναν σύμφωνα με τις αποφάσεις του Μάαστριχτ το 2002, οι οποίες επιτρέπουν την χρήση κοινών ακουστικών στην Ευρώπη. Τα 25 υψηλότερα από τα συνολικά 40 MHz αποδόθηκαν για χρήση από δορυφορικές DAB υπηρεσίες.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών ή FCC (Federal Communications Commission) ανέθεσε την μπάντα S (2320-2345MHz) για δορυφορικές ραδιοφωνικές υπηρεσίες, οι οποίες παρέχονται από τις εταιρείες Sirius και XM Radio (DARS). Η ανάθεση αυτή των συνολικά 25 MHz επιτρέπει την χρησιμοποίηση 12,5 MHz από τον κάθε πάροχο. Επιπλέον, οι Ηνωμένες Πολιτείες, έχουν κατοχυρώσει το πρότυπο IBOC (In Band On Channel) για την εκπομπή ψηφιακού ήχου. Το πρότυπο αυτό έχει πάρει την έγκριση του ITU για χρήση σε υπηρεσίες DAB. Ουσιαστικά, αυτό που κάνει το πρότυπο είναι να χρησιμοποιεί τις πλευρικές συχνότητες των ραδιοφωνικών FM μπάντων, για ψηφιακή μετάδοση.

1.4.2.4 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗΣ (MOBILE TV SERVICES)

Το φάσμα που θα χρησιμοποιούταν για υπηρεσίες κινητής τηλεόρασης βασισμένες σε επίγεια εκπομπή αποτέλεσε σημείο τριβής σε πολλές χώρες. Στην πραγματικότητα, η υιοθέτηση πολλών και διαφορετικών προτύπων για την κινητή τηλεόραση, οφείλεται σε κάποιο βαθμό και στην ποικιλία της διαθεσιμότητας ελεύθερου φάσματος για νέες τεχνολογίες σε κάθε χώρα. Οι τεχνολογίες DVB-H κάνουν χρήση της υποδομής DVB-T, η οποία χρησιμοποιείται στην Ευρώπη, την Ασία και ορισμένες άλλες περιοχές για υποστήριξη των κινητών υπηρεσιών και για τον λόγο αυτό τυγχάνει μεγαλύτερης αποδοχής. Σε μερικές περιπτώσεις, όπως στο Ηνωμένο Βασίλειο, οι αναθέσεις συχνοτήτων για εφαρμογές DVB-H αποδείχτηκαν ιδιαίτερα δύσκολες, εξαιτίας της τρέχουσας ψηφιοποίησης. Η τεχνολογία DAB-IP για την κινητή τηλεόραση, έκανε την εμφάνισή της στο Ηνωμένο Βασίλειο από την στιγμή που οι αναθέσεις στο DAB, έκαναν εφικτή την παροχή αυτής της υπηρεσίας. Στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Κορέα, όπου χρησιμοποιούνται συστήματα ATSC, η εφαρμογή της τεχνολογίας DVB-H απαιτεί δημιουργία νέων δικτύων. Αυτά έχουν αρχίσει να κατασκευάζονται από νέες εταιρείες και όχι τις παλαιότερες, όπως είναι η HiWire. Παράλληλα, έχει αρχίσει η παροχή υπηρεσιών MediaFLO από την εταιρεία Verizon κάνοντας χρήση της μπάντας των 700 MHz, την οποία εξασφάλισε μέσω δημοπρασίας. Υπηρεσίες MediaFLO από την εταιρεία AT&T άρχισαν να παρέχονται το 2008.

Η κατανομή συχνοτήτων για υπηρεσίες κινητής τηλεόρασης, με χρήση τεχνολογιών επίγεια εκπομπής, έχει αρχίσει να αντιμετωπίζεται ως ζήτημα υψηλής προτεραιότητας στις περισσότερες χώρες. Στις πιο πολλές περιπτώσεις, το φάσμα που ανατίθεται τελικά, είναι στις μπάντες των VHF και UHF.



Εικόνα 5 - Το φάσμα για τις υπηρεσίες κινητής τηλεόρασης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

WI-FI

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος WiFi (Wireless Fidelity, κατά την ορολογία High Fidelity η οποία αφορά την εγγραφή ήχου) χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις συσκευές που βασίζονται στην προδιαγραφή IEEE 802.11 b/g/n και εκπέμπουν σε συχνότητες 2.4GHz. Ωστόσο το WiFi («ασύρματη πιστότητα» στα ελληνικά) έχει επικρατήσει και ως όρος αναφερόμενος συνολικά στα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Συνήθεις εφαρμογές του είναι η παροχή ασύρματων δυνατοτήτων πρόσβασης στο Internet, τηλεφωνίας μέσω διαδικτύου (VoIP) και διασύνδεσης μεταξύ ηλεκτρονικών συσκευών όπως τηλεοράσεις, ψηφιακές κάμερες, DVD Player και ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές το 802.11 βρίσκει εφαρμογές ασύρματης μετάδοσης, όπως π.χ. στη μεταφορά φωτογραφιών από ψηφιακές κάμερες σε υπολογιστές για περαιτέρω επεξεργασία και εκτύπωση, αν και σε αυτόν τον τομέα έχει υποσκελιστεί από το πρωτόκολλο Bluetooth για τα πολύ μικρότερης εμβέλειας ασύρματα προσωπικά δίκτυα.

Τα τελευταία χρόνια, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα ή WLANs (Wireless Local Area Networks) έχουν αποκτήσει περίοπτη θέση στην αγορά των τοπικών δικτύων. Σήμερα, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα που βασίζονται στην οικογένεια προτύπων IEEE 802.11 αποτελούν μία πολύ πρακτική και ενδιαφέρουσα λύση τοπικής δικτύωσης, προσφέροντας κινητικότητα, ευελιξία και χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης.

Η πρώτη έκδοση του WiFi εισήχθη το 1997 και στο φυσικό επίπεδο περιελάμβανε δύο μεθόδους διασποράς φάσματος για τη μετάδοση στη ζώνη συχνοτήτων 2.4GHz, η εκπομπή στην οποία δεν απαιτεί άδεια. Η πρώτη μέθοδος λειτουργούσε με Frequency Hopping (FHSS) και υποστήριζε ρυθμό μετάδοσης 1 Mbps, ενώ η δεύτερη λειτουργούσε με Direct Sequence (DSSS) και υποστήριζε ρυθμό μετάδοσης 1-2 Mbps. Περιλαμβανόταν επίσης και μία υπέρυθρη εκδοχή (IR). Πριν από την εμφάνιση του 802.11 δεν υπήρχε κάποιο ευρέως αποδεκτό πρότυπο για ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών, ούτε ανάλογες εμπορικές εφαρμογές, καθώς η τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης δεν ήταν ακόμα αρκετά ώριμη.

Το 1999 το 802.11b ώθησε την ταχύτητα στα 11 Mbps χρησιμοποιώντας DSSS. Οι ρυθμοί λειτουργίας 1-2 Mbps με DSSS ισχύουν ακόμα, έτσι ώστε οι συσκευές να μπορούν να πέσουν σε χαμηλότερες ταχύτητες για να διατηρήσουν μια σύνδεση όταν τα σήματα είναι αδύνατα. Με την έκδοση αυτή ο όρος WiFi άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως και οι ασύρματες κάρτες δικτύου 802.11 να εξαπλώνονται ταχέως.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μετάδοσης Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), δύο πρότυπα υψηλής ταχύτητας ακολούθησαν το 802.11b τα οποία παρέχουν μέχρι 54 Mbps: το 802.11a εκπέμπει στη ζώνη συχνοτήτων των 5GHz αλλά δεν είναι συμβατό με τις ασύρματες κάρτες δικτύου οι οποίες υποστηρίζουν 802.11b, ενώ το 802.11g εκπέμπει στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz και είναι συμβατό με το 802.11b. Η επικοινωνία μεταξύ συσκευών εξοπλισμένων με

κάρτες 802.11b και 802.11g γίνεται στην υψηλότερη δυνατή κοινή ταχύτητα, αυτήν του 802.11b.

Με τη διάδοση του WiFi κατά τις αρχές της δεκαετίας του 2000 εμφανίστηκε μία νέα μέθοδος πρόσβασης στο Internet: μία ψηφιακή συσκευή με κάρτα ασύρματης δικτύωσης WiFi, π.χ. ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής ή ένα PDA, μπορεί να συνδεθεί στο Διαδίκτυο όταν βρίσκεται σε ακτίνα κάλυψης ασύρματου δικτύου ήδη συνδεδεμένου στο Internet, το οποίο ονομάζεται σημείο πρόσβασης (Access Point). Μία περιοχή που καλύπτεται από ένα ή περισσότερα σημεία πρόσβασης συνδεδεμένα μεταξύ τους λέγεται hotspot. Ένα hotspot μπορεί να καλύπτει έναν χώρο έκτασης δωματίου ή και πολλών τετραγωνικών μέτρων, με εναλλασσόμενα σημεία πρόσβασης.

Έτσι η τεχνολογία WiFi επιτρέπει τη σύνδεση μεταξύ δύο συσκευών μεταξύ τους, τη σύνδεση ενός προσωπικού υπολογιστή με ένα τοπικό δίκτυο και άλλους υπολογιστές και, στη συνέχεια, μέσω αυτών στο Internet. Ένας φορητός υπολογιστής μπορεί να συνδεθεί οπουδήποτε υπάρχει σημείο πρόσβασης.

2.2 IEEE 802.11

Το IEEE 802.11 είναι μια οικογένεια προτύπων της IEEE για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) που είχαν ως σκοπό να επεκτείνουν το 802.3 (Ethernet, το συνηθέστερο πρωτόκολλο ενσύρματης δικτύωσης υπολογιστών) στην ασύρματη περιοχή. Τα πρότυπα 802.11 είναι ευρύτερα γνωστά ως «WiFi» επειδή η WiFi Alliance, ένας οργανισμός ανεξάρτητος της IEEE, παρέχει την πιστοποίηση για τα προϊόντα που υπακούουν στις προδιαγραφές του 802.11. Αυτή η οικογένεια πρωτοκόλλων αποτελεί το καθιερωμένο πρότυπο της βιομηχανίας στο χώρο των ασύρματων τοπικών δικτύων.

2.2.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN) είναι ένα σύστημα μετάδοσης δεδομένων με χρήση ασύρματων ζεύξεων, σχεδιασμένο έτσι ώστε να εξασφαλίζει σύνδεση που να μην εξαρτάται από την θέση των περιφερειακών συσκευών, όπως συμβαίνει στα αντίστοιχα ενσύρματα δίκτυα. Σε διάφορες εταιρείες, τέτοια δίκτυα αποτελούν τον τελικό συνδετικό κρίκο μεταξύ του ενσύρματου δικτύου και μιας ομάδας τερματικών συσκευών, παρέχοντας ασύρματη πρόσβαση στους πόρους και τις υπηρεσίες του εταιρικού δικτύου, μέσα σε ένα ή περισσότερα κτίρια ή τοποθεσίες.

Τα τελευταία χρόνια, ασύρματα τοπικά δίκτυα, εγκαθίστανται σε πανεπιστήμια ή δημόσιες τοποθεσίες μεγάλης ζήτησης, όπως σιδηροδρομικούς σταθμούς ή αεροδρόμια, παρέχοντας έτσι σε καθέναν που είναι εξοπλισμένος με μία κατάλληλη φορητή συσκευή, ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Η ευρεία εξάπλωση τέτοιων δικτύων, όπως είναι λογικό, εξαρτάται από την ύπαρξη κατάλληλων προτύπων. Η προτυποποίηση εξασφαλίζει την αξιοπιστία και την συμβατότητα των προϊόντων που κατασκευάζονται από διάφορους προμηθευτές. Η επιτροπή IEEE 802, η οποία έχει καθοριστεί ως η παγκόσμια αρχή υπεύθυνη για τα

τοπικά δίκτυα, έχει κατοχυρώσει διάφορα πρότυπα τοπικών δικτύων τα τελευταία 20 χρόνια, συμπεριλαμβανομένων των προτύπων IEEE 802.3 Ethernet, του 802.5 Token Ring και του 802.3u 100 BASE-T Fast Ethernet. Το 1990, η επιτροπή IEEE 802 σχημάτισε μία νέα ομάδα εργασίας, την IEEE 802.11, με αποκλειστικό αντικείμενο τα ασύρματα τοπικά δίκτυα, και καταστατικό που προέβλεπε τον σχεδιασμό του κατάλληλου φυσικού μέσου και του πρωτοκόλλου MAC για τα δίκτυα αυτά. Το IEEE επικύρωσε την ολοκλήρωση των εργασιών της ομάδας 802.11 το 1997. Το πρότυπο που κατοχυρώθηκε, στην πρώτη του μορφή, προέβλεπε ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων 1 και 2 Mbps, και καθόριζε τους θεμελιώδεις κανόνες σηματοδότησης και ασύρματων υπηρεσιών. Το βασικότερο πρόβλημα, που περιόρισε την αρχική βιομηχανική ανάπτυξη των ασύρματων τοπικών δικτύων, ήταν η αρκετά χαμηλή ρυθμοαπόδοση (throughput), η οποία ήταν ανεπαρκής για τις ανάγκες των διάφορων επιχειρήσεων. Αναγνωρίζοντας την ανάγκη για αύξηση των ταχυτήτων, το IEEE καθόρισε την προδιαγραφή 802.11 HR (High Rate), ή αλλιώς 802.11b, που προέβλεπε ταχύτητες 5,5 και 11 Mbps. Το IEEE εφάρμοσε επίσης τις προδιαγραφές της έκδοσης 802.11a στην μπάντα των 5 GHz. Οι καταστατικοί οργανισμοί και οι προμηθευτές υιοθέτησαν το νέο αυτό πρότυπο υψηλών ταχυτήτων, και πολλοί νέοι φορείς εμφανίστηκαν στην αγορά.

Πέρα από τις ομάδες εργασίας των παραπάνω προτύπων, οι βασικοί παράγοντες της ασύρματης βιομηχανίας συναντιούνται στα πλαίσια της συμμαχίας Wi-Fi, ή αλλιώς Wi-Fi Alliance, η οποία παλιότερα ονομαζόταν WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance). Ο στόχος της συμμαχίας αυτής είναι η πιστοποίηση της διαλειτουργικότητας και της συμβατότητας των δικτυακών προϊόντων IEEE 802.11 HR, καθώς και η προώθηση του προτύπου.

Μέλη της Wi-Fi Alliance είναι κατασκευαστές ημιαγωγών για ασύρματα τοπικά δίκτυα, προμηθευτές υλικού εξοπλισμού και πάροχοι λογισμικού. Ανάμεσά τους βρίσκονται εταιρείες όπως οι 3Com, Cisco-Aironet, APPLE, Breezecom, Cabletron, Compaq, Dell, Fujitsu, IBM, Intersil, Lucent Technologies, No Wires Needed, Nokia, Samsung, Symbol Technologies, Wayport και Zoom.

Μέχρι τώρα, η οικογένεια προτύπων 802.11, δεν έχει σταματήσει να εξετάζει νέες προτάσεις και νέα πρότυπα. Στη συνέχεια, υπάρχει μία λεπτομερής λίστα των προτύπων και ομάδων του IEEE 802.11.

Τα κυρίαρχα, την στιγμή αυτή, πρωτόκολλα ασύρματων τοπικών δικτύων, είναι αυτά που σχετίζονται με τα πρότυπα IEEE 802.11, IEEE 802.11b (Wi-Fi) και IEEE 802.11g. Η οικογένεια αυτή προτύπων, διαχειρίζεται το φυσικό στρώμα και το στρώμα ζεύξης δεδομένων, όπως αυτά έχουν καθοριστεί από το μοντέλο OSI basic reference model (ISO/IEC 7498-1:1994).

Η ονομασία που δίνεται στα προϊόντα που είναι βασισμένα στο πρότυπο IEEE 802.11b είναι Wi-Fi. Η πιστοποίηση Wi-Fi δίνεται από την Wi-Fi Alliance και έχει ήδη επεκταθεί και σε προϊόντα που βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11g. Η Wi-Fi Alliance έχει μάλιστα προχωρήσει στην κατοχύρωση μιας αντίστοιχης διαδικασίας πιστοποίησης για προϊόντα βασισμένα στο πρότυπο IEEE 802.11a, με την ονομασία Wi-Fi5.

Η λίστα με τα πρότυπα του IEEE 802.11 είναι η παρακάτω.

- IEEE 802.11: το αρχικό πρότυπο ταχυτήτων 1 και 2 Mbps, στην ISM (industrial scientific and medical) μπάντα των 2,4 GHz (1999).
- IEEE 802.11b: βελτιώσεις στο αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 για υποστήριξη ταχυτήτων 5,5 και 11 GHz (1999).
- IEEE 802.11a: λειτουργία στην μπάντα των 5 GHz και υποστήριξη ταχυτήτων από 6 έως 54 Mbps.
- IEEE 802.11g: υποστήριξη υψηλότερων ταχυτήτων (54 Mbps όπως και στο πρότυπο IEEE 802.11a) στην μπάντα των 2,4 GHz. Χρήση διαμόρφωσης ορθογώνιας πολυπλεξίας στο πεδίο της συχνότητας ή OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing). Συμβατότητα με το πρότυπο IEEE 802.11b(2003).
- IEEE 802.11d: υποστήριξη διεθνούς περιαγωγής. Επικοινωνία των σημείων πρόσβασης (access points) στα διαθέσιμα ραδιοφωνικά κανάλια και σε αποδεκτά επίπεδα ισχύος εκπομπής, σύμφωνα με τους νομικούς περιορισμούς κάθε χώρας (2001).
- IEEE 802.11c: εισαγωγή εφαρμογών γέφυρας. Συμπεριλαμβάνεται στο πρότυπο IEEE 802.11d (2003).
- IEEE 802.11e: πρότυπο για την ποιότητα υπηρεσιών (QoS – Quality of Service), που καθορίζει τις προδιαγραφές των μηχανισμών QoS για υποστήριξη εφαρμογών πολυμέσων. Αναφέρεται στα πρότυπα IEEE 802.11 b, a και g. Εισάγει την χρήση του αλγορίθμου HCF (Hybrid Coordination Function). Το HCF χρησιμοποιεί ταυτόχρονα μία μέθοδο ανταγωνιστικής πρόσβασης καναλιού, με την ονομασία EDCA (Enhanced distributed channel access) και μια μέθοδο μη ανταγωνιστικής πρόσβασης καναλιού, με την ονομασία HCCA (HCF controlled channel access) (2005).
- IEEE 802.11f: προτυποποίηση πρωτοκόλλων μεταξύ των σημείων πρόσβασης για δυνατότητα ύπαρξης υποδομής πολλών κατασκευαστών και αποφυγής ιδιωτικών μονοπωλιακών προτύπων. Το IAPP (Inter Access Point Protocol) παρέχει αυτό το χαρακτηριστικό δια λειτουργικότητας.
- IEEE 802.11h: συμβατότητα με τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς. Εισαγωγή μηχανισμών δυναμικής επιλογής συχνότητας και ελέγχου ισχύος εκπομπής (2004).
- IEEE 802.11i: βελτίωση ασφάλειας συστημάτων. Αναφέρεται στα πρότυπα IEEE 802.11 b, a και g (2004).
- IEEE 802.11x: εισαγωγή μηχανισμών ασφαλείας σε διάφορα μέσα, συμπεριλαμβανομένων ασύρματων ζεύξεων, μέσω ισχυρών διαδικασιών επικύρωσης και δυναμικής διανομής κλειδιού.

- IEEE 802.11j: σύγκλιση των αμερικάνικων προτύπων με τα γιαπωνέζικα.
- IEEE 802.11k: βελτιώσεις στην μέτρηση ραδιοφωνικών πόρων (RRM – Radio resource measurement). Καθορισμός μεθόδων και κριτηρίων μέτρησης, απαιτούμενων από τα πρωτόκολλα υψηλότερων στρωμάτων, για εφαρμογή λειτουργιών διαχείρισης και συντήρησης.
- IEEE 802.11n: αναβάθμιση ταχυτήτων. Υποστήριξη ρυθμοαποδόσεων της τάξης των 108 έως 600 Mbps στις μάντες των 2,4 και 5 GHz.
- IEEE 802.11p: υποστήριξη WAVE (Wireless access for vehicular environment).
- IEEE 802.11r: υποστήριξη γρήγορης περιαγωγής (fast roaming).
- IEEE 802.11s: mesh δικτύωση.
- IEEE 802.11t: υποστήριξη λειτουργίας WPP (Wireless Performance Prediction).
- IEEE 802.11u: διαλειτουργικότητα με δίκτυα άλλων τεχνολογιών, όπως τα κυβελωτά συστήματα 3^{ης} γενιάς.
- IEEE 802.11v: υποστήριξη διαχείρισης ασύρματων δικτύων.
- IEEE 802.11w: υποστήριξη προστατευμένων πλαισίων διαχείρισης.
- IEEE 802.11y: λειτουργία στην μπάντα 3650-3700 MHz στις ΗΠΑ.

2.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΓΕΝΙΩΝ WLAN

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN) είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα τεχνολογία, διότι παρέχει πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών, χάρη στα ιδιαίτερα πλεονεκτικά χαρακτηριστικά του, όπως είναι η υψηλή χωρητικότητα, η εμβέλεια μικρών αποστάσεων, η καθολική συνδεσιμότητα και η ικανότητα εκπομπής. Τα βασικά χαρακτηριστικά των WLANs συνοψίζονται στα εξής:

- Λειτουργία χωρίς άδεια.
- Σύνδεση με τα ενσύρματα δίκτυα ραχοκοκαλιάς.
- Παγκόσμια διαθεσιμότητα σύμφωνα με τα πρότυπα.
- Θεωρητικές ταχύτητες σημαντικά μεγαλύτερες απ' αυτές των συστημάτων 3^{ης} γενιάς.
- Χαμηλού κόστους σχεδιασμός με συνεχή μείωση τιμών για τον βασικό εξοπλισμό (σημεία πρόσβασης-access points και ασύρματες κάρτες-wireless

cards). Ανταγωνιστικό κόστος υπηρεσιών εν συγκρίσει με τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς.

- Υποστήριξη περιαγωγής (roaming) και μεταγωγής (handoff).
- Ευκολία εγκατάστασης.

Τα βασικά αυτά χαρακτηριστικά των WLANs εξελίχθηκαν και συνδυάστηκαν με επιμέρους, καθώς τα συστήματα εξελίσσονταν από γενιά σε γενιά. Τα χαρακτηριστικά κάθε γενιάς συνοψίζονται παρακάτω.

ΠΡΩΤΗ ΓΕΝΙΑ (IEEE 802.11) – 1997

- Συνδεσιμότητα τερματικών συσκευών (είτε μεταξύ τους είτε μέσω ενός σταθερού δικτύου).
- Σημεία πρόσβασης (APs) με λειτουργία γέφυρας.
- Περιαγωγή (roaming).
- Συνύπαρξη με άλλα δίκτυα, κάτι που συνεπάγεται γεφύρωση.

ΔΕΥΤΕΡΗ ΓΕΝΙΑ (IEEE 802.11b) – 1998

- Αποδοτικότερη διαχείριση των δικτύων.
- Διαλειτουργικότητα (interoperability).
- Συμμόρφωση με το πρότυπο IEEE 802.11b.

ΤΡΙΤΗ ΓΕΝΙΑ (IEEE 802.11a/g) – 2000

- Υψηλή ρυθμοαπόδοση (HT – High Throughput).
- Σχεδίαση των δικτύων πιο ανοιχτή και ενοποιημένη.
- Συμμόρφωση με τα πρότυπα IEEE 802.11a και IEEE 802.11g.
- Ελαχιστοποίηση μεγέθους κεραιών.
- Βελτίωση ευαισθησίας δεκτών.

ΤΕΤΑΡΤΗ ΓΕΝΙΑ (IEEE 802.11n)

- Πολύ υψηλή ρυθμοαπόδοση (της τάξης λίγων εκατοντάδων Mbps).
- Μεγάλες αποστάσεις εμβέλειας σε πολύ υψηλές ρυθμοαποδόσεις (ανάλογες με των δικτύων 802.11b στα 500 Mbps).

- Χρήση εύρωστων τεχνολογιών (όπως MIMO και space time coding).

Πέρα από τα παραπάνω πλεονεκτικά χαρακτηριστικά των WLANs, υπάρχουν και ορισμένα τα οποία δρουν ανασταλτικά για αυτά. Τα βασικότερα απ' αυτά συνοψίζονται παρακάτω.

- Χαμηλότερες ρυθμοαποδόσεις σε σχέση με αυτές σταθερών δικτύων πολύ υψηλής ταχύτητας.
- Περιορισμένη εμβέλεια, η οποία επηρεάζεται σημαντικά από σταθερά εμπόδια, ειδικά από μεταλλικούς τοίχους.
- Διαμοιρασμός εύρους ζώνης χωρίς δυνατότητα ελέγχου υψηλού βαθμού.
- Κενά στην ασφάλεια των δικτύων.
- Ποιότητα υπηρεσιών που επηρεάζεται σημαντικά από το περιβάλλον και τις μεταβολές σε αυτό.
- Έλλειψη ελέγχου QoS

Για να αντιμετωπιστούν όλα τα παραπάνω, οι ομάδες εργασίας του IEEE, συνεχώς εξετάζουν διάφορες λύσεις και προτάσεις. Όσο αυτές αποδεικνύονται εφαρμόσιμες και αποδοτικές, οι επιδόσεις των WLANs αναβαθμίζονται και αναπτύσσονται ολοένα και περισσότερο.

2.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΝ IEEE 802.11

Το πρότυπο του IEEE 802.11 προβλέπει δύο βασικά συστατικά στοιχεία για κάθε δίκτυο. Το ένα είναι ο ασύρματος σταθμός πελάτη (wireless client station), που στις περισσότερες περιπτώσεις πρόκειται για έναν προσωπικό ηλεκτρονικό υπολογιστή (PC) εξοπλισμένο με μία ασύρματη κάρτα δικτύου (NIC – Network Interface Card), ενώ συνήθως αποκαλείται απλώς σταθμός ή STA (station). Το δεύτερο είναι το σημείο πρόσβασης ή AP (Access Point), το οποίο πολλές φορές αποκαλείται και ασύρματος αναμεταδότης (wireless relay) και λειτουργεί ως συνδετικός κρίκος μεταξύ του ενσύρματου και του ασύρματου δικτύου. Η συσκευή του σημείου πρόσβασης συνήθως αποτελείται από έναν ραδιοφωνικό πομποδέκτη, μία κάρτα δικτύου (π.χ. Ethernet 802.3) και το απαραίτητο λογισμικό για λειτουργία γέφυρας σε συμφωνία με τις προδιαγραφές του προτύπου IEEE 802.11d. Το AP λειτουργεί ως ο βασικός σταθμός του ασύρματου δικτύου, παρέχοντας την πρόσβαση πολλαπλών ασύρματων σταθμών στο σταθερό δίκτυο. Οι ασύρματοι σταθμοί, από την άλλη μεριά, είναι εξοπλισμένοι είτε με κάρτες δικτύου IEEE 802.11 είτε με ασύρματους προσαρμογείς (wireless adapters). Οι προσαρμογείς αυτοί είναι διαθέσιμοι σε διάφορες μορφές, όπως PCI, PCMCIA, USB και πρόσφατα και σε Wi-Fi chips.

2.3.1 ΤΑ ΤΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΚΤΥΩΣΗΣ

Το πρότυπο του IEEE 802.11 καθορίζει τρία βασικά μοντέλα δικτύωσης: το μοντέλο υποδομής (infrastructure mode), το αδόμητο μοντέλο (ad hoc mode), και το πλεγματοειδές μοντέλο (mesh mode).

2.3.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΔΟΜΗΣ (INFRASTRUCTURE)

Στο μοντέλο αυτό, το ασύρματο δίκτυο αποτελείται από ένα τουλάχιστον σημείο πρόσβασης, το οποίο είναι συνδεδεμένο με το σταθερό δίκτυο υποδομής, και έναν αριθμό από ασύρματους σταθμούς πελάτη. Η δομή αυτή είναι βασισμένη στην κυψελωτή αρχιτεκτονική, όπου το σύστημα είναι χωρισμένο σε κυψέλες. Κάθε κυψέλη αποτελεί μια βασική ομάδα εξυπηρέτησης ή BSS (Basic service set), και στο πρότυπο IEEE 802.11 ελέγχεται από έναν σταθμό βάσης, που στην περίπτωση αυτή είναι το σημείο πρόσβασης.

Οι σταθμοί που ανήκουν στην ίδια ομάδα εξυπηρέτησης εφαρμόζουν το ίδιο πρωτόκολλο MAC και συναγωνίζονται για πρόσβαση μέσω του κοινού ασύρματου μέσου. Παρ' ότι ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο θα μπορούσε να σχηματιστεί με μία μόνο κυψέλη, χρησιμοποιώντας δηλαδή ένα μόνο σημείο πρόσβασης, η μέγιστη απόσταση μεταξύ των σταθμών και κατά συνέπεια η εμβέλεια του συστήματος, περιορίζεται από διάφορους παράγοντες. Οι δύο βασικότεροι είναι οι περιορισμοί στην μέγιστη επιτρεπτή ισχύ εκπομπής και οι συνθήκες μετάδοσης σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς χώρους. Για επίτευξη ευρύτερης κάλυψης, χρησιμοποιούνται πολλαπλά BSS, ενώ τα σημεία πρόσβασης συνδέονται μέσω ενός δικτύου ραχοκοκαλιάς (backbone network), το οποίο αποκαλείται και δίκτυο διανομής (distribution network).

Ένα WLAN δίκτυο, αποτελούμενο από τουλάχιστον δύο σημεία πρόσβασης και κατά συνέπεια ισάριθμες βασικές ομάδες εξυπηρέτησης (BSS), διασυνδεδεμένο απ' άκρη σ' άκρη μέσω του δικτύου διανομής, θεωρείται για το επίπεδο LLC (Logical link layer) ως ένα ενιαίο δίκτυο IEEE 802, με την ονομασία εκτεταμένη ομάδα εξυπηρέτησης ή ESS (Extended Service Set). Το δίκτυο διανομής είναι, στην περίπτωση αυτή, υπεύθυνο να μεταδίδει τα πακέτα δεδομένων μεταξύ των διάφορων κυψελών ενός ESS.

Όσον αφορά την κινητικότητα που υποστηρίζεται από το μοντέλο υποδομής, υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι.

- Τοπική κινητικότητα μέσα σε ένα BSS.
- Κινητικότητα μέσα σε ένα ESS και μεταξύ δύο διαφορετικών BSS.
- Κινητικότητα μεταξύ δύο BSS που ανήκουν σε διαφορετικά ESS.

Θα πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι το μοντέλο υποδομής είναι αυτό που χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα.

2.3.1.2 ΑΔΟΜΗΤΟ (AD HOC) ΜΟΝΤΕΛΟ

Το αδόμητο ή κατ' απαίτηση μοντέλο (ad hoc mode) αναπαριστά ένα σύνολο από ασύρματους σταθμούς IEEE 802.11, οι οποίοι επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, χωρίς την μεσολάβηση σύνδεσης με ένα σημείο πρόσβασης ή ένα σταθερό δίκτυο μέσω του δικτύου διανομής. Η δομή αυτή αποκαλείται συχνά και ομότιμη (peer to peer) δομή. Ο κάθε σταθμός μπορεί να δημιουργήσει μια σύνδεση με οποιονδήποτε άλλο μέσα στην κυψέλη, η οποία στην περίπτωση αυτή αποκαλείται IBSS (Independent Basic Service Set). Τα δίκτυα αυτά μελετήθηκαν αρχικά την δεκαετία του 70 και ονομάστηκαν δίκτυα PRNET (Packet radio networks).

Το μοντέλο αυτό, επιτρέπει την εύκολη και γρήγορη δημιουργία ενός ασύρματου δικτύου, όταν δεν υπάρχει σταθερή υποδομή, ή αυτή δεν είναι απαραίτητη για τις ζητούμενες υπηρεσίες (όπως σε δωμάτια ξενοδοχείων, κέντρα διασκέψεων ή αεροδρόμια), ή τέλος, όταν η πρόσβαση στο σταθερό δίκτυο είναι δύσκολή ή απαγορεύεται.

Τα ad hoc ασύρματα δίκτυα είναι μία κατηγορία δικτύων που κάνει χρήση multihop ραδιοφωνικών αναμεταδόσεων και έχει την δυνατότητα λειτουργίας με έναν αυτοοργανούμενο (self-organizing) και αυτορυθμιζόμενο (self-configuring) τρόπο, χωρίς την υποστήριξη σταθερής υποδομής. Η χρήση multihop αναμετάδοσης αποτελεί την βασική αρχή των ad hoc δικτύων, και είναι μια τεχνική η οποία μελετήθηκε και αναπτύχθηκε στο παρελθόν, με την ονομασία PRNET, στα πλαίσια της αμυντικής έρευνας που γινόταν στην DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) στις αρχές της δεκαετίας του 70.

2.3.1.3 ΠΛΕΓΜΑΤΙΚΟ (MESH) ΜΟΝΤΕΛΟ

Το τρίτο αυτό μοντέλο είναι ένα υβριδικό μοντέλο που συνδυάζει στοιχεία των δύο προηγούμενων. Αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη λύση για την ασύρματη δικτύωση, καθώς επιτρέπει την πρόσβαση κινητών χρηστών σε υπηρεσίες, χωρίς την αναγκαιότητα ύπαρξης σταθερών συνδέσεων. Ο κάθε κινητός χρήστης μπορεί να έχει συνδεσιμότητα στο δίκτυο υποδομής, είτε απευθείας, είτε μέσω μίας πύλης (gateway). Το δίκτυο υποδομής μπορεί να είναι ένα δίκτυο IP, ένα δίκτυο 3G WAWN (Wide Area Wireless Network), ή ένα δίκτυο IEEE 802.11 WLAN. Επιπρόσθετα στα υβριδικά αυτά δίκτυα, μπορεί να γίνεται χρήση διάφορων όμοιων ή ετερογενών τεχνολογιών, με τον κάθε κινητό χρήστη να έχει την δυνατότητα επιλογής κατ' απαίτηση της τεχνολογίας που θέλει να χρησιμοποιήσει. Μία ειδική περίπτωση των δικτύων αυτών είναι τα WLAN mesh δίκτυα, τα οποία συνδυάζουν αρχιτεκτονικές υποδομής και ad hoc. Ήδη έχουν αρχίσει προσπάθειες προτυποποίησης για τα δίκτυα αυτά. Οργανισμοί προτυποποίησης, όπως οι IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16 και IEEE 802.20, ορίζουν τις προδιαγραφές των νέων αυτών προτύπων. Για την ειδική περίπτωση των WLAN mesh δικτύων, το έργο καθορισμού του προτύπου το έχει η ομάδα εργασίας IEEE 802.11s.

Πρακτικά, στα περισσότερα δίκτυα WLAN που υπάρχουν σήμερα, υφίσταται σαφής διαχωρισμός ανάμεσα στις συσκευές που συνθέτουν το δίκτυο υποδομής και αυτές που απλά χρησιμοποιούν το δίκτυο αυτό για πρόσβαση σε υπηρεσίες. Οι πιο κοινές συσκευές της πρώτης κατηγορίας είναι τα σημεία πρόσβασης (access points), τα οποία παρέχουν μια σειρά από υπηρεσίες. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα σημεία πρόσβασης είναι απευθείας συνδεδεμένα με το ενσύρματο δίκτυο, παρέχοντας απλά ασύρματη συνδεσιμότητα στις συσκευές-πελάτες (client devices). Οι

τελευταίες, από την άλλη μεριά, αποτελούν απλούς IEEE 802.11 σταθμούς, που πρέπει να συνδεθούν σε ένα σημείο πρόσβασης για να μπορέσουν να αποκτήσουν πρόσβαση στο δίκτυο.

Πέρα από το παραπάνω συνηθέστερο μοντέλο, υπάρχουν πολύ πιο ευέλικτα σχήματα για την δομή των WLAN δικτύων. Οι συσκευές που συνθέτουν το δίκτυο υποδομής, όπως τα σημεία πρόσβασης, μπορούν να εγκαθιστούν ασύρματες ομότιμες (peer to peer) ζεύξεις με άλλα γειτονικά τους σημεία πρόσβασης, σχηματίζοντας έτσι ένα δίκτυο υποδομής, στο οποίο δεν είναι απαραίτητη η απευθείας σύνδεση όλων των APs στο ενσύρματο δίκτυο. Επιπλέον, σε αρκετές περιπτώσεις, συσκευές-πελάτες μπορούν να εγκαθιστούν παρόμοιες ασύρματες ζεύξεις με γειτονικά τους APs ή άλλες συσκευές-πελάτες, λειτουργώντας κατά κάποιο τρόπο σαν σημεία πρόσβασης για τις άλλες συσκευές, παρέχοντάς τους πρόσβαση στο δίκτυο.

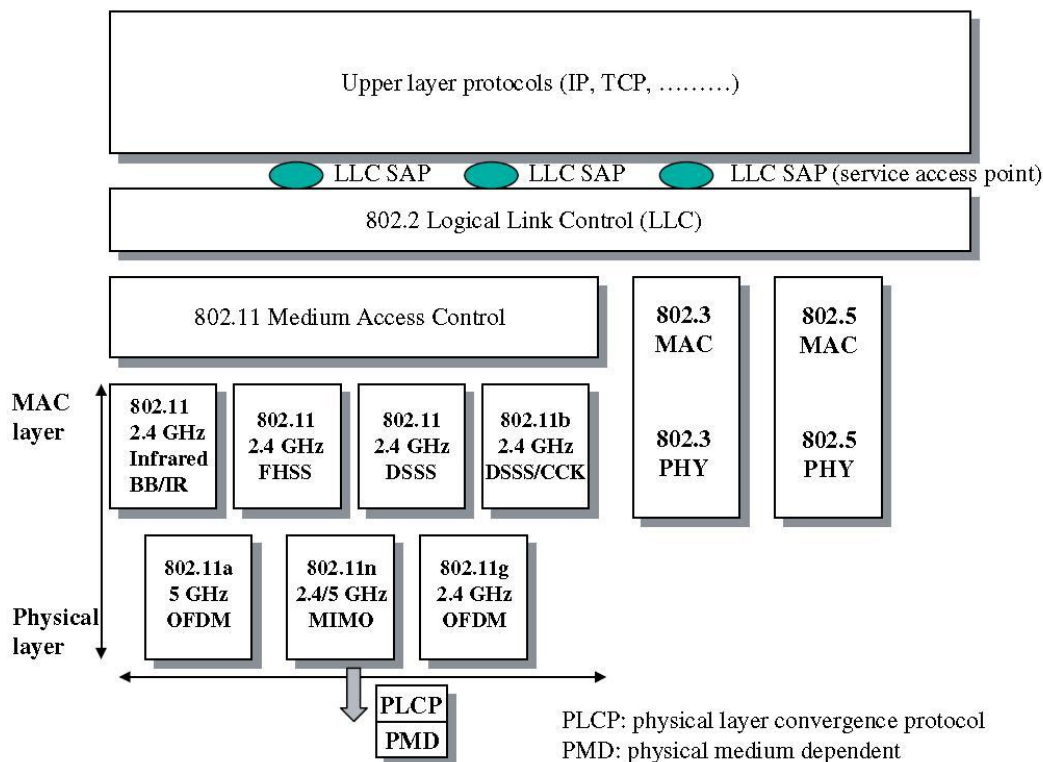
Βάσει των προδιαγραφών του 802.11s, μια τυπική mesh αρχιτεκτονική διαχωρίζει τους κόμβους (nodes) σε δύο κλάσεις. Η μία κλάση είναι αυτή των mesh κόμβων, οι οποίοι έχουν την ικανότητα υποστήριξης mesh υπηρεσιών, ενώ η άλλη (non-mesh class) περιλαμβάνει τους απλούς σταθμούς-πελάτες του δικτύου. Οι κόμβοι της πρώτης κλάσης μπορεί να έχουν και δυνατότητα υποστήριξης υπηρεσιών σημείου πρόσβασης, ενώ μπορεί να είναι διαχειριζόμενοι ή όχι.

Οι συσκευές που υποστηρίζουν mesh υπηρεσίες αποκαλούνται mesh points (MPs). Ένα MP μπορεί να είναι είτε μία συσκευή αμιγώς προορισμένη για την σύνθεση του δικτύου υποδομής, είτε μία συσκευή χρήστη, με δυνατότητα συμμετοχής στον σχηματισμό και την λειτουργία του δικτύου mesh. Ένας ειδικός τύπος MP, είναι το MAP (Mesh Access Point), το οποίο παρέχει υπηρεσίες σημείου πρόσβασης (AP), πέρα από mesh υπηρεσίες.

Τα δίκτυα mesh αποτελούν μία πολύ πρόσφατη τεχνολογία, η οποία αναμένεται να διαδραματίσει πολύ σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των ασύρματων κινητών δικτύων. Ήδη διενεργούνται πολλές ερευνητικές προσπάθειες για την ανάπτυξη αποδοτικών πρωτοκόλλων και την σχεδίαση προγραμματιζόμενων ρυθμίσεων.

2.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Παρόμοια με τα πρότυπα IEEE 802, το IEEE 802.11 επικεντρώνεται στα δύο χαμηλότερα υποστρώματα του μοντέλου ISO (Interconnection of the open systems), δηλαδή το φυσικό (PHY) στρώμα και το στρώμα ζεύξης δεδομένων, το οποίο περιέχει το υπόστρωμα MAC και το LLC, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 6 - Το μοντέλο ISO για τα συστήματα IEEE 802.11

Το φυσικό στρώμα, το οποίο είναι υπεύθυνο για την μετάδοση των πλαισίων MAC στο ασύρματο μέσο, κάνει χρήση διαφόρων τεχνικών διαμόρφωσης και δυαδικής κωδικοποίησης. Το στρώμα MAC εμπεριέχει διάφορες λειτουργίες όπως συνεργασία (association), κατακερματισμό (fragmentation), έλεγχο πρόσβασης (access control), ασφάλεια (security) και άλλες. Το πρότυπο IEEE 802 καθορίζει το ίδιο υψηλό υπόστρωμα ζεύξης δεδομένων για όλα τα LANs. Ουσιαστικά, το υπόστρωμα αυτό λειτουργεί όπως ένα LLC 802.2 υπόστρωμα.

2.4.1 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Διάφοροι τύποι εναέριας διεπαφής μπορούν να υποστηριχθούν από την αρχιτεκτονική του IEEE 802.11. Τρία διαφορετικά στρώματα καθορίζονται στο βασικό πρότυπο:

- Ένα φυσικό υπόστρωμα ραδιοσυχνοτήτων, το οποίο κάνει χρήση τεχνικής FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) και λειτουργεί στην ISM μπάντα των 2,4 GHz.
- Ένα φυσικό υπόστρωμα ραδιοσυχνοτήτων, το οποίο κάνει χρήση τεχνικής DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) και λειτουργεί στην ISM μπάντα των 2,4 GHz.
- Ένα φυσικό στρώμα για υπέρυθρη μετάδοση (infrared transmission), με μήκος κύματος μεταξύ 850 και 950 nm.

Οι τεχνικές εξάπλωσης φάσματος (spread spectrum) επιτρέπουν την βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων, ελαχιστοποιώντας την επίδραση επιζήμιων φαινομένων, όπως η μετάδοση πολλαπλών δρόμων (multipath propagation), οι παρεμβολές (interferences) και ο θόρυβος (noise). Στα πρότυπα των WLAN 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς, καθορίστηκαν οι εξής νέες διαμορφώσεις:

- Συμπληρωματική διαμόρφωση CCK (Complementary codes keying) για τα συστήματα IEEE 802.11b. Το φυσικό στρώμα, στην περίπτωση αυτή ονομάζεται HR/DSSS (High rate DSSS).
- Διαμόρφωση OFDM (Orthogonal frequency multiplexing division) για τα συστήματα IEEE 802.11a και IEEE 802.11g.
- Τεχνικές MIMO (Multiple input – Multiple output) για τα συστήματα IEEE 802.11n.

Στα πρότυπα IEEE 802.11, IEEE 802.11b (Wi-Fi) και IEEE 802.11g, η μπάντα που χρησιμοποιείται είναι μία ελεύθερη μπάντα, γνωστή ως ISM (Industrial Scientific Medical), γύρω από την συχνότητα των 2,4 GHz. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι 83 MHz. Για τα συστήματα IEEE 802.11a, το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι μεγαλύτερο. Βρίσκεται στην μπάντα των 5 GHz και ισούται με περίπου 455 MHz. Όπως η ISM μπάντα, έτσι και η μπάντα των 5 GHz είναι ελεύθερη μπάντα, αλλά διαθέτει μεγαλύτερο άνω όριο για την επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής (έως 100 mWatt).

Σε κάθε περίπτωση, το φυσικό στρώμα είναι δομημένο σε δύο υποστρώματα:

- Το υπόστρωμα σύγκλισης (Convergence sublayer).
- Το υπόστρωμα PMD (Physical medium dependent).

Το υψηλότερο τμήμα του φυσικού στρώματος είναι το υπόστρωμα σύγκλισης, ή όπως αλλιώς αποκαλείται PLCP (Physical Layer Convergence Sublayer Procedure). Η αποστολή του στρώματος αυτού είναι η προσαρμογή του κατώτερου υποστρώματος, που εξαρτάται από το μέσο διάδοσης. Έχει τον ρόλο της εισαγωγής

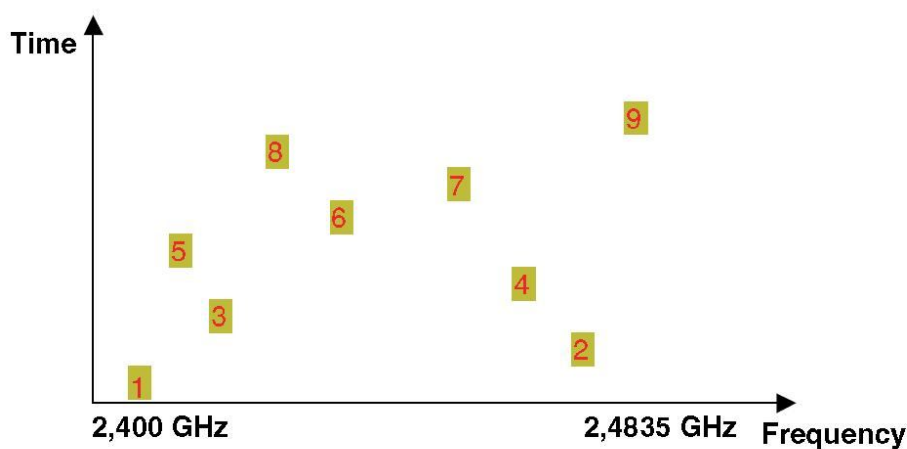
των απαιτούμενων επικεφαλίδων για συγχρονισμό και ταυτοποίηση της χρησιμοποιούμενης διαμόρφωσης στο μέσο. Επιπλέον, επιτρέπει την κατάλληλη επιλογή κεραίας για την λήψη του σήματος (στη περίπτωση ενός σημείου πρόσβασης που κάνει χρήση τεχνικών διαφορικής κεραίας και MIMO). Τα πλαίσια που στέλνονται από το υπόστρωμα σύγκλισης ονομάζονται PPDU (PLCP Protocol Data Units). Η μορφή ενός PPDU εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο κατώτερο υπόστρωμα. Η διαδικασία μετάδοσης PPDU επικαλείται από την διαδικασία CS/CCA (Carrier sense / clear channel assessment), η οποία εκτελείται βασικά για δύο λόγους:

- Για να ανιχνεύσει την αρχή του σήματος που μπορεί να ληφθεί (CS phase).
- Για να διαπιστώσει αν το κανάλι είναι ελεύθερο πριν μεταδοθεί ένα πακέτο (CCA phase)

Η ελάχιστη διάρκεια μιας διαδικασίας CS/CCA ισούται με την διάρκεια μιας χρονοθυρίδας (time slot), η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του επιλεγμένου φυσικού στρώματος. Το πρότυπο IEEE 802.11 δεν καθορίζει τις διαδικασίες με τις οποίες θα γίνεται η διαπίστωση της διαθεσιμότητας του καναλιού. Έτσι, οι διάφοροι προμηθευτές εξοπλισμού, έχουν την επιλογή να σχεδιάσουν καινοτόμες μεθόδους για την πραγματοποίηση των διαδικασιών αυτών, αρκεί βέβαια οι μέθοδοι αυτές να μην παραβιάζουν τους νομικούς περιορισμούς που υφίστανται για την χρήση των συχνοτήτων.

Το κατώτερο υπόστρωμα έχει ως βασικό καθήκον την κωδικοποίηση και την αποστολή των bits που έχουν σταλεί από το υπόστρωμα σύγκλισης, στο μέσο μετάδοσης. Το στρώμα αυτό ονομάζεται υπόστρωμα PMD.

Πέρα από το σχέδιο αποστολής πληροφορίας (information transport plan), υπάρχει και ένα σχέδιο ελέγχου (control plan). Όλες οι, σχετικές με το φυσικό στρώμα, λειτουργίες ελέγχου (control) ή διαχείρισης (management), πραγματοποιούνται σε ένα υπόστρωμα που ονομάζεται PHY management layer. Πληροφορίες διαχείρισης αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων, η οποία ονομάζεται MIB (Management Information Base), και συνήθως χρησιμοποιεί την μορφοποίηση SNMP. Το IEEE 802.11 έχει σχηματίσει μία ομάδα εργασίας με την ονομασία TGV, η οποία εργάζεται επάνω στο σχέδιο διαχείρισης.



Εικόνα 7 – Η τεχνική FHSS

2.4.1.1 FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)

Η τεχνική αυτή μπορεί να παρέχει ταχύτητες 1 ή 2 Mbps. Η μπάντα που χρησιμοποιείται βρίσκεται ανάμεσα στις συχνότητες των 2,4 και 2,483 MHz. Στις ΗΠΑ είναι διαθέσιμα 79 κανάλια του 1 MHz, ενώ στην Γαλλία διαθέσιμα μόνο 35 κανάλια λόγω της αποκλειστικής χρήσης κάποιων καναλιών για την άμυνα της χώρας. Το σήμα μεταδίδεται εναλλακτικά και διαδοχικά στα διάφορα διαθέσιμα κανάλια. Ο πομπός και ο δέκτης είναι συγχρονισμένοι σε μία ακολουθία αναπηδήσεων συχνότητας κατά την διάρκεια της επικοινωνίας. Η ακολουθία των αναπηδήσεων καθορίζει ένα συγκεκριμένο σχήμα. Οι ακολουθίες συχνότητας καθορίζονται βάσει ψευδοτυχαίων ακολουθιών σε περιπτώσεις συσκευών δημόσιας χρήσης, ή βάσει συγκεκριμένων μυστικών κλειδιών σε περιπτώσεις στρατιωτικών συσκευών. Η αλλαγή των συχνοτήτων πρέπει να γίνεται κάθε 400 περίπου milliseconds, και όπως είναι φυσικό απαιτείται πολύ καλός συγχρονισμός.

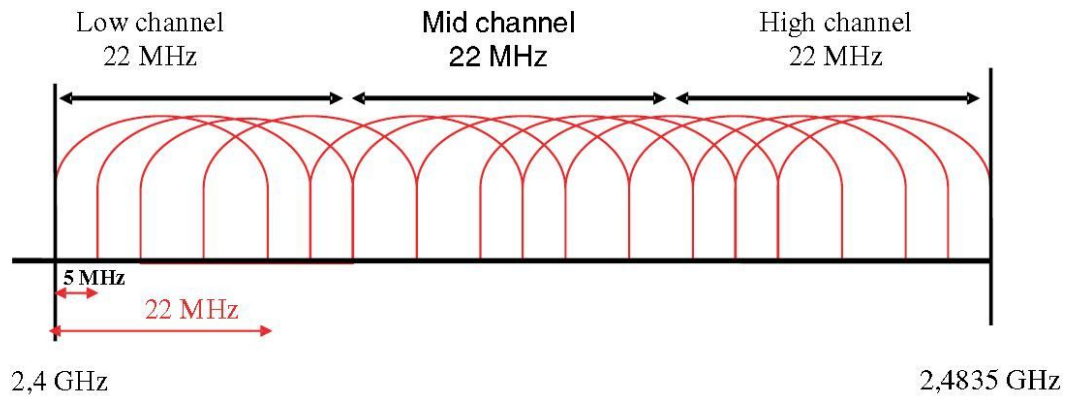
Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι αρκετά. Αποτρέπει την ολική απώλεια του σήματος, καθώς υπάρχει απώλεια μόνο του κωδικοποιημένου σήματος στην προβληματική συχνότητα, το οποίο αναμεταδίδεται συνήθως με την αμέσως επόμενη αναπήδηση συχνότητας. Παρέχει ανοσία σε μεγάλο βαθμό, ενάντια σε παρεμβολές, σκίαση και θόρυβο. Έτσι, η τεχνική αυτή αποτελεί μια αποδοτική λύση σε ένα περιβάλλον μετάδοσης πολλαπλών δρόμων (multipath environment).

Η τεχνική FHSS υποστηρίζει δύο διαφορετικές ταχύτητες μετάδοσης, ανάλογα με την διαμόρφωση που χρησιμοποιείται. Όταν χρησιμοποιείται διαμόρφωση GFSK (Gaussian frequency shift keying) δύο επιπέδων, η υποστηριζόμενη ταχύτητα είναι 1 Mbps. Όταν χρησιμοποιείται GFSK τεσσάρων επιπέδων, η υποστηριζόμενη ταχύτητα είναι 2 Mbps.

2.4.1.2 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί μία μοναδική μπάντα, αντίθετα με την τεχνική FHSS. Η χρησιμοποιούμενη μπάντα είναι αυτή των 2,4 έως 2,4835 GHz. Σε αυτήν καθορίζονται 14 κανάλια των 22 MHz, με απόσταση 5 MHz το ένα από το άλλο. Κοντινά κανάλια επικαλύπτονται μερικώς, όπως φαίνεται και στην εικόνα κάτω.

Στην αρχική έκδοση του προτύπου, η τεχνική DSSS υποστηρίζει δύο διαφορετικές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, ανάλογα με την διαμόρφωση που χρησιμοποιείται. Όταν χρησιμοποιείται η δυαδική διαμόρφωση φάσης DBPSK (Differential binary phase shift keying), η υποστηριζόμενη ταχύτητα είναι 1 Mbps. Όταν χρησιμοποιείται τετραγωνική διαμόρφωση φάσης DQPSK (Differential quadrature phase shift keying), η υποστηριζόμενη ταχύτητα είναι 2 Mbps. Οι δύο αυτές διαμορφώσεις βασίζονται στην αρχή των διαφορικών διαμορφώσεων φάσης. Έτσι, για κάθε νέο σύμβολο που πρόκειται να μεταδοθεί συμβαίνει και στροφή φάσης του σήματος. Η τεχνική αυτή προϋποθέτει μόνο την γνώση της φάσης αναφοράς του πρώτου προς μετάδοση συμβόλου. Από κει και πέρα η μετάδοση των επόμενων συμβόλων, η οποία οδηγεί σε διαδοχικές στροφές φάσης, δεν χρειάζεται περαιτέρω πληροφορίες για την φάση του σήματος.



Εικόνα 8 – Τα κανάλια στην τεχνική DSSS

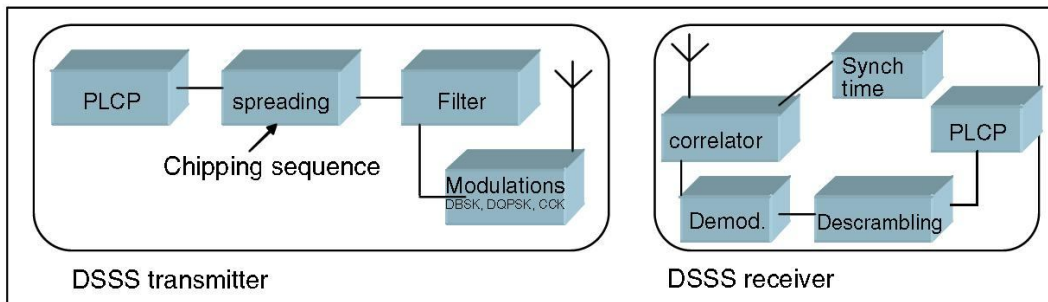
Στην δυαδική διαμόρφωση DBPSK, κάθε σύμβολο που μεταδίδεται εμπεριέχει ένα μόνο bit πληροφορίας. Έτσι, όταν το bit αυτό έχει την τιμή 0, δεν έχουμε στροφή φάσης, ενώ όταν το bit έχει την τιμή 1, έχουμε αντιστροφή φάσης του σήματος. Στην τετραγωνική διαμόρφωση DQPSK, από την άλλη μεριά, κάθε σύμβολο εμπεριέχει 2 bits πληροφορίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον διπλασιασμό της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων. Η στροφή φάσης που προκαλείται ανάλογα με τις τιμές των bits κάθε συμβόλου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

| Symbol | Rotation |
|--------|----------|
| 00 | 0° |
| 01 | 90° |
| 11 | 180° |
| 10 | 270° |

Πίνακας 4 - Η στροφή φάσης στην περίπτωση τετραγωνικής διαμόρφωσης DQPSK

Για την αντιμετώπιση προβλημάτων, όπως παρεμβολές ή/και θόρυβος, χρησιμοποιείται μια τεχνική θρυμματισμού (chipping), με την οποία επιτυγχάνεται εξάπλωση φάσματος. Το κάθε bit πληροφορίας κωδικοποιείται σε μία ακολουθία από bits, τα οποία αποκαλούνται θραύσματα (chips). Η ακολουθία αυτή συνήθως αποτελείται από 11 bits, και είναι προσυμφωνημένη μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Ο κώδικας που χρησιμοποιείται είναι ο κώδικας Barker, με την εξής ακολουθία: “+1,-1,+1,+1,-1,+1,+1,+1,-1,-1,-1”. Ο πλεονάζων αυτός κώδικας επιτρέπει την ανάκτηση ενός ολόκληρου bit, ακόμα και όταν σημαντικό τμήμα του σήματος έχει χαθεί. Η μετάδοση γίνεται σε μία σταθερή συχνότητα, αντίθετα με την τεχνική FHSS.

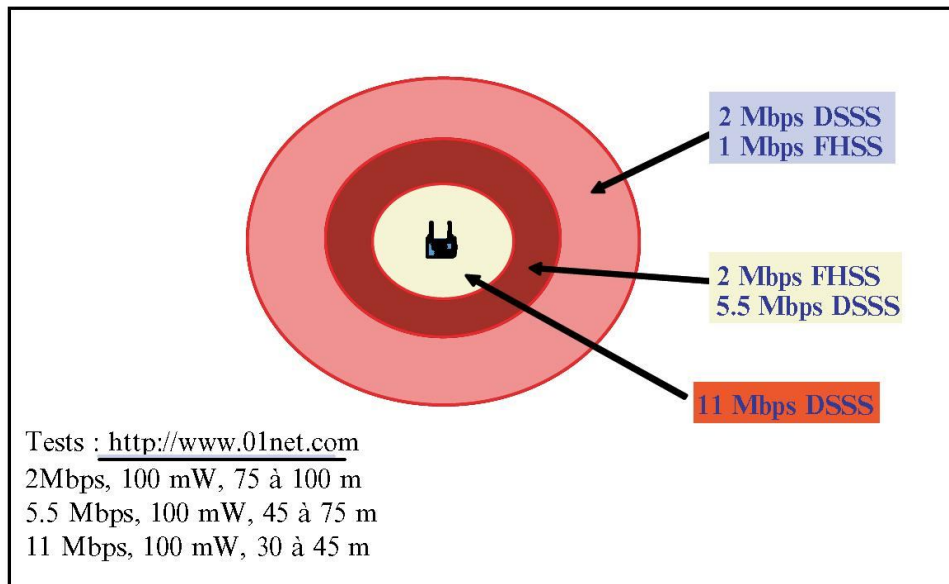
Η επόμενη εικόνα δείχνει ένα πομπό και ένα δέκτη DSSS, οι οποίοι όπως φαίνεται είναι πιο πολύπλοκοι σε σχέση με τους FHSS



Εικόνα 3 - Ένας πομπός και ένας δέκτης DSSS

Ποια είναι λοιπόν η καλύτερη και αποδοτικότερη τεχνική; Η FHSS ή η DSSS; Η απάντηση εξαρτάται από τις απαιτήσεις των εφαρμογών των πελατών. Αν αυτές επικεντρώνονται στην ευρεία κάλυψη των συστημάτων ή τις υψηλές ταχύτητες, η κατάλληλη επιλογή είναι η τεχνική DSSS. Από την άλλη μεριά, όταν η μετάδοση γίνεται σε περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών (multipath environment), η κατάλληλη επιλογή είναι η τεχνική FHSS.

Η πλειοψηφία των προϊόντων που υπάρχουν αυτήν την στιγμή στην αγορά, χρησιμοποιεί την τεχνική DSSS, η οποία υποστηρίζει τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες μετάδοσης. Η ταχύτητα καθορίζεται δυναμικά σύμφωνα με τις συνθήκες μετάδοσης. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τον μηχανισμό αυτό. Σε αυτό φαίνεται ότι όσο πιο κοντά στο σημείο πρόσβασης είναι μια συσκευή, τόσο υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης χρησιμοποιούνται και για τις δύο τεχνικές. Η πρώτη ζώνη υποστηρίζει ταχύτητα 11 Mbps, η δεύτερη 5,5 Mbps για DSSS και 2 Mbps για FHSS, ενώ η τρίτη 2 Mbps για DSSS και 1 Mbps για FHSS.



Εικόνα 4 - Παραλλαγές ρυθμοαπόδοσης

2.4.1.3 ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ (INFRARED TRANSMISSION)

Η μετάδοση αυτή εφαρμόζεται μόνο σε εσωτερικό περιβάλλον. Διαπέραση εμποδίων, όπως τοίχοι και πατώματα, δεν είναι εφικτή. Οι υπέρυθρες διεπαφές δεν πρέπει να είναι εκτεθειμένες στο φως του ήλιου, ενώ είναι και πολύ ευαίσθητες στο χιόνι και την ομίχλη. Η μετάδοση γίνεται σε μήκος κύματος μεταξύ 850 και 950 nm και με ισχύ εκπομπής έως και 2 Watt. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται είναι η PPM.

2.4.1.4 HR/DSSS (High rate DSSS)

Εκτός από μεταδόσεις σε ταχύτητες 1 και 2 Mbps το βασικό πρότυπο IEEE 802.11b υποστηρίζει και μεταδόσεις σε ταχύτητες 5,5 και 11 Mbps, με χρήση της διαμόρφωσης CCK (Complementary Code Keying). Τα δεδομένα αποστέλλονται με ειδική και υπερσύγχρονη κωδικοποίηση. Ο ρυθμός θρυμματισμού (chipping rate) είναι της τάξης των 11 Mc/s με διάρκεια συμβόλου 8 chip. Η ταχύτητα των 5,5 Mbps επιτυγχάνεται όταν η μετάδοση γίνεται με 4 bits σε κάθε σύμβολο, ενώ αυτή των 11 Mbps με 8 bits σε κάθε σύμβολο. Επίσης η μορφή του αλγόριθμου του CCK κάνει δυνατή την εύκολη αναγνώριση των διάφορων κωδικών από τους δέκτες, ακόμα και με παρουσία έντονων παρεμβολών και σκίασης λόγω μετάδοσης πολλαπλών δρόμων. Η διαδικασία παραγωγής των συμβόλων CCK μοιάζει αρκετά με αυτήν που χρησιμοποιείται στο DSSS, με την διαφορά ότι οι κωδικές λέξεις προέρχονται μερικώς από τα δεδομένα. Από την άλλη μεριά, δεν χρησιμοποιείται ο κώδικας Barker και η εξάπλωση του σήματος γίνεται με χρήση συμβόλων CCK.

Το υποστηριζόμενο στρώμα MAC είναι πάντα το ίδιο. Ακόμα κι αν η χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση είναι διαφορετική, τα διαθέσιμα κανάλια είναι πανομοιότυπα με αυτά που έχουν αποδοθεί για το DSSS φυσικό στρώμα με χαμηλή ρυθμοαπόδοση.

2.4.1.5 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

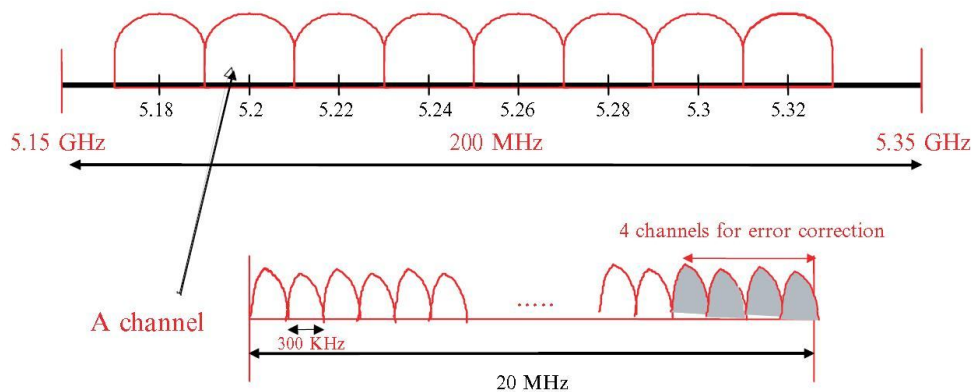
Τα συστήματα IEEE 802.11a και IEEE 802.11g χρησιμοποιούν την διαμόρφωση OFDM στην ISM μπάντα των 2,4 GHz και σε αυτή των 5 GHz. Το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι περίπου 455 MHz, εκ των οποίων τα 200 είναι για χρήση σε εσωτερικό χώρο, ενώ τα υπόλοιπα 255 είναι για χρήση σε εξωτερικό χώρο. Η διαμόρφωση αυτή υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης μεταξύ 6 και 54 Mbps και παρέχει καλή απόδοση συστήματος σε συνθήκες μετάδοσης πολλαπλών δρόμων. Το στρώμα MAC είναι πανομοιότυπο με αυτό που χρησιμοποιείται για τα άλλα φυσικά στρώματα (FHSS, DSSS, HR/DSSS, IR).

Το OFDM φυσικό στρώμα είναι αρκετά πολύπλοκο, γιατί εφαρμόζει διάφορες τεχνικές ψηφιακής μετάδοσης, όπως διαμόρφωση φάσης, μετάδοση OFDM πολλαπλών φερουσών (multicarrier), συνελκτική κωδικοποίηση (convolutional coding) και διαστρωμάτωση (interleaving). Η τεχνική OFDM είχε προταθεί για πρώτη φορά από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων ή ETSI (European Telecommunications Standards Institute) για το ευρωπαϊκό σύστημα HiperLAN 1.

Το OFDM βασίζεται στην διαίρεση συχνότητας, όπου η συχνοτική μπάντα χωρίζεται σε φέρουσες (carriers), που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα,

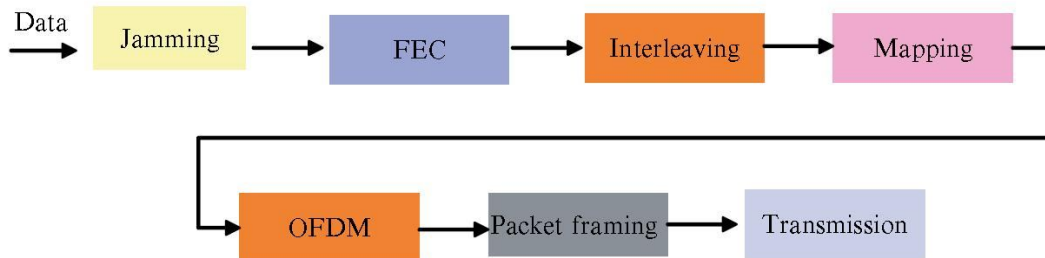
κάνοντας χρήση πολυπλεξίας δεδομένων σε υποφέρουσες (subcarriers). Ένα κανάλι αποτελείται από 52 φέρουσες με εύρος 300 KHz. Οι 48 απ' αυτές είναι για μετάδοση δεδομένων και οι υπόλοιπες 4 είναι πιλοτικές φέρουσες για διόρθωση λαθών. Το OFDM υποστηρίζει μία σειρά από διαφορετικές διαμορφώσεις και κωδικοποιήσεις, δίνοντας έτσι την δυνατότητα υποστήριξης διαφορετικών ρυθμοαποδόσεων.

Οχτώ κανάλια των 20 MHz είναι καθορισμένα στην χαμηλή μπάντα μεταξύ 5,15 και 5,35 GHz. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία οχτώ διαφορετικών δικτύων στην ίδια τοποθεσία με μέγιστη ρυθμοαπόδοση 432 Mbps



Εικόνα 5 - Τα κανάλια OFDM στην χαμηλή μπάντα των 5 GHz

Η συνολική αλυσίδα για την μετάδοση OFDM φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 6 - Αλυσίδα μετάδοσης OFDM

2.4.1.6 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ IEEE 802.11n

Στο πρότυπο IEEE 802.11n η πραγματική ρυθμοαπόδοση αναμένεται να φτάσει τα 540 Mbps, 100 φορές δηλαδή μεγαλύτερη από αυτή του IEEE 802.11b και 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του IEEE 802.11a ή του IEEE 802.11g. Επιπρόσθετα, το πρότυπο αυτό αναμένεται να υποστηρίζει μεγαλύτερη εμβέλεια συστημάτων. Η βασική καινοτομία του προτύπου σε σχέση με τα προηγούμενα, είναι η χρήση τεχνικής MIMO (Multiple input multiple output). Η τεχνική αυτή κάνει χρήση πολλαπλών κεραιών τόσο στον δέκτη, όσο και στον πομπό. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερες ρυθμοαποδόσεις χάρη στην χρήση χωρικής πολυπλεξίας (spatial multiplexing), και παράλληλα σε μεγαλύτερη εμβέλεια χάρη στην χρήση χωρικής διαφορικότητας (spatial diversity) και ισχυρής κωδικοποίησης.

Τα συστήματα IEEE 802.11n είναι βασισμένα στις προδιαγραφές του προτύπου IEEE 802.11e, όσον αφορά το QoS (Quality of Service). Υποστηρίζουν βασικές

μπάντες με εύρος ζώνης 20 ή 40 MHz και μπορούν να λειτουργήσουν με έναν από τους 3 παρακάτω τρόπους:

- Low mode: Η λειτουργία είναι αντίστοιχη με αυτή των συστημάτων a, b και g.
- HT mode: Οι συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν με εύρος ζώνης 20 ή 40 MHz και με 1 έως 4 χωρικές ροές (spatial streams).
- Duplicate non HT mode: Οι συσκευές λειτουργούν με χρήση καναλιών εύρους ζώνης 40 MHz, αποτελούμενα από δύο γειτονικά κανάλια των 20 MHz.

Η τελευταία λειτουργία γίνεται με δύο τρόπους:

- 40 MHz upper mode: Οι συσκευές αποστέλλουν πλαίσια στο υψηλότερο κανάλι των 20 MHz.
- 40 MHz lower mode: Οι συσκευές αποστέλλουν πλαίσια στο χαμηλότερο κανάλι των 20 MHz.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις μέγιστες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, στην περίπτωση χρήσης τεχνικής MIMO τεσσάρων κεραιών και με εύρος ζώνης 40 MHz

| Modulation | Mbps |
|-------------------|-------------|
| BPSK | 60.0 |
| QPSK | 120.0 |
| QPSK | 180.0 |
| 16-QAM | 240.0 |
| 16-QAM | 360.0 |
| 64-QAM | 480.0 |
| 64-QAM | 540.0 |
| 64-QAM | 600.0 |

Πίνακας 5 - Οι ταχύτητες μετάδοσης στο IEEE 802.11n

2.4.2 ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΖΕΥΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το στρώμα αυτό αποτελείται από δύο επιμέρους υποστρώματα. Το ένα είναι το LLC (Logical Link Control), το οποίο κάνει χρήση των ίδιων στοιχείων με ένα υπόστρωμα LLC 802.2 και επιτρέπει την σύνδεση ενός WLAN με ένα άλλο LAN της οικογένειας IEEE. Το δεύτερο είναι το υπόστρωμα MAC (Media Access Control), το οποίο είναι ξεχωριστό για τα συστήματα IEEE 802.11 και καθορίζει νέους μηχανισμούς πρόσβασης στο μέσο διάδοσης. Είναι ανεξάρτητο από τα χαρακτηριστικά του φυσικού στρώματος και τις υποστηριζόμενες ρυθμοαποδόσεις, και υποστηρίζει τρεις διαφορετικές τοπολογίες, την δομημένη ή τοπολογία υποδομής (infrastructure), την αδόμητη ή κατ' απαίτηση (ad hoc) και την πλεγματική (mesh). Επίσης υποστηρίζει τις παρακάτω υπηρεσίες:

- Υπηρεσία ασύγχρονης μετάδοσης δεδομένων (υποχρεωτικά), με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - ✓ Δεν παρέχει εγγύηση ποιότητας (best effort service).
 - ✓ Υποστηρίζει εκπομπή (broadcast) και πολυδιανομή (multicast).
 - ✓ Χρησιμοποιεί τον μηχανισμό DCF (Distributed Coordination Function).
- Υπηρεσία κίνησης με χρονικούς περιορισμούς (προαιρετικά), με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - ✓ Υποστηρίζει εφαρμογές πραγματικού χρόνου.
 - ✓ Χρησιμοποιεί τον μηχανισμό PCF (Point Coordination Function).

Πέρα από την μετάδοση δεδομένων, επιπλέον υπηρεσίες που υποστηρίζονται, είναι οι ακόλουθες:

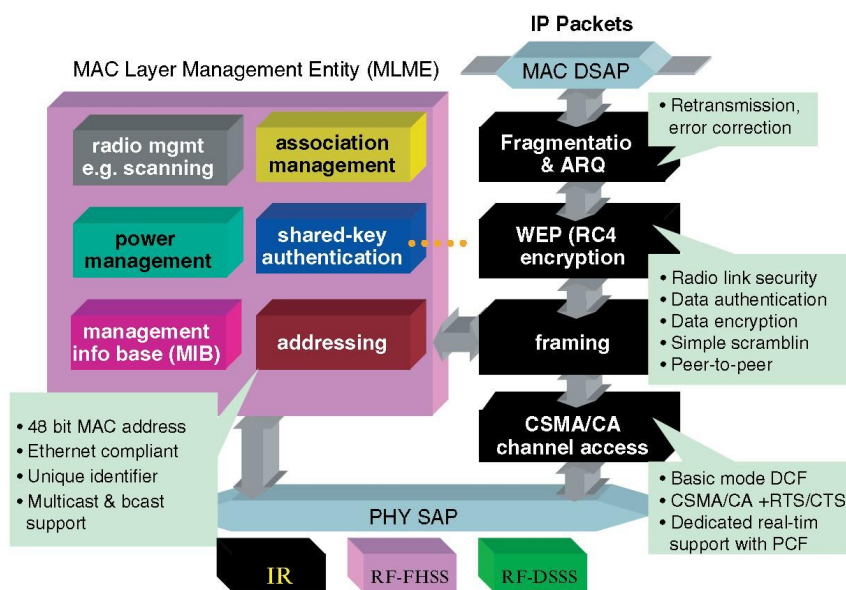
- Συσχετισμός (Association) / Αποσυσχετισμός (Disassociation).
- Ασφάλεια μέσω μηχανισμών όπως ο WEP (Wired Equivalent Privacy).
- Πιστοποίηση (Authentication) και έλεγχος πρόσβασης (access control).
- Κατακερματισμός (Fragmentation) / Ανασυναρμολόγηση (Reassembly).
- Εξοικονόμηση ενέργειας.

Μια συνολική εικόνα του στρώματος MAC φαίνεται στην εικόνα 13. Το στρώμα MAC καθορίζει δύο διαφορετικές μεθόδους πρόσβασης. Η μία είναι η DCF (Distributed Coordination Function), η οποία χρησιμοποιείται για κατανεμημένη και τυχαία πρόσβαση όπως στα δίκτυα IEEE 802.3 με ορισμένους ξεχωριστούς αλγόριθμους για τα WLAN. Η άλλη μέθοδος είναι η PCF (Point Coordination Function).

Η μέθοδος DCF είναι καθορισμένη να ελέγχει την κίνηση σε δίκτυα ασύγχρονης μετάδοσης δεδομένων και καλύτερης δυνατής προσπάθειας (best effort). Όλοι οι χρήστες που θέλουν να μεταδώσουν, έχουν ίση πιθανότητα πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης.

Η μέθοδος PCF έχει πια αντικατασταθεί από την υβριδική μέθοδο HCF (Hybrid Coordination Function) και βασίζεται σε μία διαφοροποιημένη προσέγγιση, καθορίζοντας διαφορετικούς χρόνους αναμονής για πρόσβαση στο μέσο, σύμφωνα με τις προτεραιότητες των κόμβων. Όπως είναι λογικό, προϋποθέτει την ύπαρξη μία μονάδας ελέγχου. Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μετάδοσης δεδομένων με χρονικούς περιορισμούς, όπως είναι η μετάδοση εικόνας ή/και ήχου σε πραγματικό χρόνο.

Η μέθοδος DCF είναι η κύρια και υποχρεωτική μέθοδος που χρησιμοποιείται και προκαλεί ανταγωνισμό, ενώ η μέθοδος HCF είναι προαιρετική μέθοδος και δεν προκαλεί ανταγωνισμό. Η περίοδος μη ανταγωνισμού ή CFP (Contention Free Period) είναι η περίοδος που χρησιμοποιείται η μέθοδος HCF, ενώ η περίοδος ανταγωνισμού ή CP (Contention Period) είναι η χρονική διάρκεια του ανταγωνισμού.



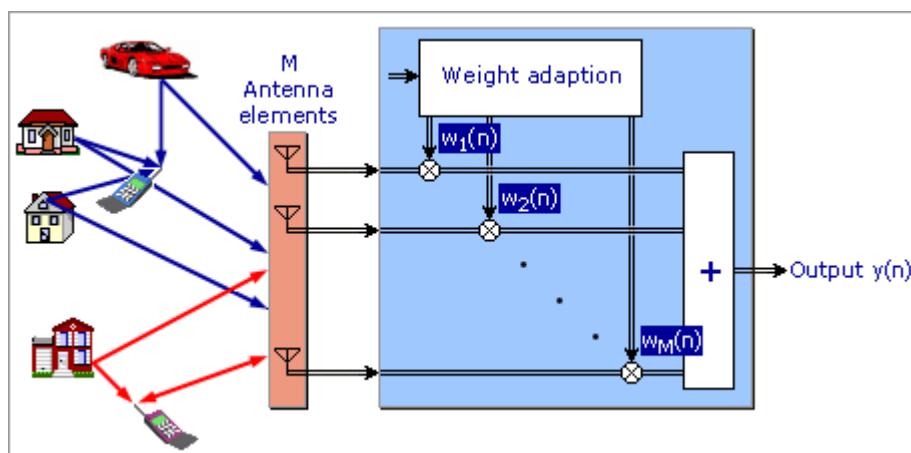
Εικόνα 7 - Το στρώμα MAC των συστημάτων IEEE 802.11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΞΥΠΝΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ

3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

3.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

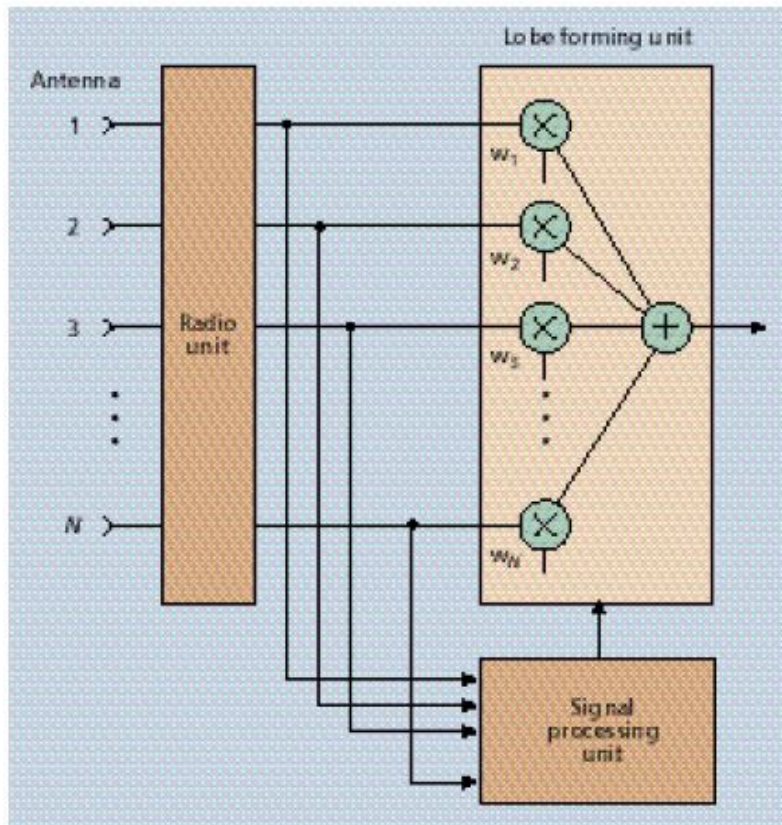


Εικόνα 14 – Έξυπνη κεραία

Η θεωρία πίσω από τις ευφυείς κεραίες δεν είναι καινούρια. Η τεχνική είχε για πολλά χρόνια χρησιμοποιηθεί στον ηλεκτρονικό πόλεμο (EWF) σαν αντίμετρο στην ηλεκτρονική παρεμβολή. Σε στρατιωτικά συστήματα ραντάρ παρόμοιες τεχνικές χρησιμοποιούνταν ήδη από τον 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο. Υπάρχουν σε γενικές γραμμές διάφοροι τρόποι με τους οποίους μια προσαρμοστικά διευθετήσιμη ακτίνα κεραιών μπορεί να παραχθεί, παραδείγματος χάριν με μηχανικά οδηγούμενες κεραίες.

Με τον όρο έξυπνη κεραία, δεν χαρακτηρίζουμε την ίδια τη κεραία, αλλά το πλήρες σύστημα κεραιών, συμπεριλαμβανομένης και της επεξεργασίας σήματος. Μια έξυπνη κεραία αποτελείται από M στοιχεία κεραιών μέσω των οποίων λαμβάνει τα σήματα του πομπού. Στην συνέχεια αυτά υποβάλλονται προσαρμοστικά σε επεξεργασία, προκειμένου να εκμεταλλευτούμε τη χωρική διάσταση του κινητού ράδιο-καναλιού. Μια από τις χαρακτηριστικές περιπτώσεις είναι αυτή, στην οποία τα σήματα που παραλαμβάνονται από τα διαφορετικά στοιχεία κεραιών πολλαπλασιάζονται με σύνθετα βάρη—σχήμα 3.1.1-1. Όλα τα M στοιχεία της σειράς κεραιών πρέπει να συνδυαστούν προκειμένου να προσαρμοστούν στα παρόντα χαρακτηριστικά καναλιών και χρηστών.

Η μονάδα ελέγχου καλείται νοημοσύνη της ευφυούς κεραίας και πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας έναν ψηφιακό επεξεργαστή σήματος (Digital Signal Processor, DSP). Ο επεξεργαστής ελέγχει παραμέτρους τροφοδοσίας της κεραίας, βασισμένες σε διάφορες εισόδους, έτσι ώστε να βελτιστοποιήσει τη σύνδεση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα κριτήρια βελτιστοποίησης. Αυτό δείχνει ότι η ευφυής κεραία είναι περισσότερο από μια απλή κεραία. Είναι μια ολοκληρωμένη έννοια πομποδέκτη.



Εικόνα 15 –Η βασική διάταξη μιας έξυπνης κεραίας

Η τεχνολογία που σχεδόν αποκλειστικά προτείνεται για επίγεια συστήματα προσωπικών και κινητών επικοινωνιών είναι οι κεραίες συστοιχίας (array antennas) στη θεωρία των οποίων θα αναφερθούμε εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο. Η κύρια φιλοσοφία είναι ότι οι παρεμβολείς σπανίως έχουν την ίδια γεωγραφική θέση με τον χρήστη. Με τη μεγιστοποίηση του κέρδους της κεραίας στην επιθυμητή κατεύθυνση και ταυτόχρονα με την τοποθέτηση του ελάχιστου διαγράμματος ακτινοβολίας στις κατευθύνσεις των παρεμβολών, η ποιότητα της σύνδεσης μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά. Στην προσωπική και κινητή επικοινωνία, οι παρεμβολείς είναι διαφορετικοί, από τον αναφερόμενο, χρήστες.

Η χρησιμοποίηση των έξυπνων κεραιών αποσκοπεί στο να μπορεί ο σταθμός βάσης να εντοπίζει τον επιθυμητό χρήστη, να τον απομονώνει, από τους άλλους, καταστέλλοντας σε μεγάλο βαθμό τις παρεμβολές. Με αυτό τον τρόπο παρέχονται καλύτερες υπηρεσίες στον επιθυμητό χρήστη. Η εφαρμογή των έξυπνων κεραιών μπορεί να δώσει πολλές λύσεις, όταν έχουμε χρησιμοποίηση τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης, όπου διαφορετικοί χρήστες μοιράζονται το ίδιο μέσο μετάδοσης.

3.1.2 Η ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

Η μονάδα επεξεργασίας σήματος, βασιζόμενη στο ληφθέν σήμα, υπολογίζει τα μιγαδικά βάρη w_1-w_N με τα οποία το ληφθέν, από το καθένα από τα στοιχεία της κεραίας, σήμα πολλαπλασιάζεται. Αυτά τα βάρη θα αποφασίσουν για το διάγραμμα κεραίας στην διεύθυνση της άνω ζεύξης. Τα βάρη μπορούν να βελτιστοποιηθούν με δύο κύρια κριτήρια: με μεγιστοποίηση του ληφθέντος, από τον επιθυμητό χρήστη, σήματος (π.χ. Switched Lobe ή Phased Array, βλέπε αντίστοιχη παράγραφο) ή με μεγιστοποίηση του SIR καταπιέζοντας το σήμα που προέρχεται από τις παρεμβόλουσες πηγές (π.χ. Adaptive Array). Θεωρητικά με M στοιχεία κεραίας μπορούν να μηδενιστούν $M-1$ παρεμβολές, αλλά λόγω του προβλήματος της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών ο αριθμός αυτός είναι συνήθως μικρότερος.

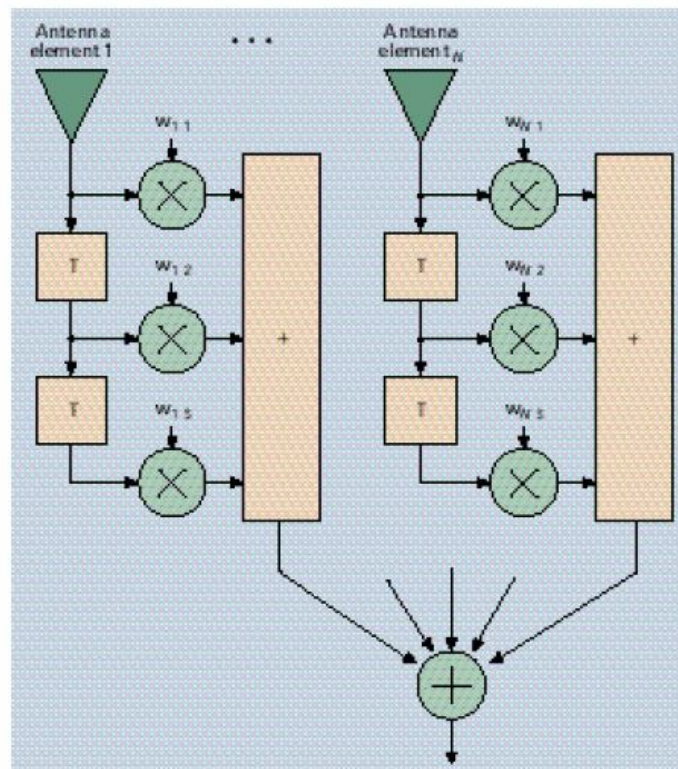
Η μέθοδος για τον υπολογισμό των βαρών διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του κριτηρίου βελτιστοποίησης. Όταν χρησιμοποιείται Switched Lobe (SL), ο δέκτης θα ελέγξει όλα τα προκαθορισμένα διανύσματα βάρους (που αντιστοιχούν στους λοβούς) και θα επιλέξει αυτό που δίνει το ισχυρότερο επίπεδο λαμβανόμενου σήματος. Αν χρησιμοποιείται η Phased Array (PA) προσέγγιση, η οποία περιλαμβάνει την κατεύθυνση μιας ακτίνας μέγιστου κέρδους προς το ισχυρότερο σήμα, τότε πρώτα υπολογίζεται η διεύθυνση άφιξης (Direction-of-Arrival, DoA) και στη συνέχεια υπολογίζονται τα βάρη με ομοιόμορφο, με την επιθυμητή γωνία στρέψης, πλάτος και φάση. Υπάρχει ένας αριθμός μεθόδων, με καλό υπόβαθρο για τον υπολογισμό της DoA, όπως οι αλγόριθμοι MUSIC, ESPRIT και SAGE.

Εάν πρέπει να επιτευχθεί μεγιστοποίηση του SIR (περίπτωση AA), τότε το βέλτιστο διάνυσμα βάρους (της διάστασης N) \mathbf{W}_{opt} δίνεται από το κυρίαρχο γενικευμένο ιδιοδιάνυσμα του ζεύγους πινάκων $[\mathbf{R}_k, \mathbf{Q}_k]$ όπου \mathbf{R}_k είναι ο $N \times N$ πίνακας συσχέτισης του συνολικού ληφθέντος σήματος και \mathbf{Q}_k είναι ο $N \times N$ πίνακας συσχέτισης της συνολικής παρεμβολής. Αυτό ονομάζεται βέλτιστος συνδυασμός.

Για να μπορέσει ο σταθμός βάσης να εκτιμήσει τους ράδιο-διαύλους, χρειάζεται συνήθως μια αναφορά ή μια εκπαιδευτική αλληλουχία π.χ. πρέπει να μεταδίδεται περιοδικά μία γνωστή αλληλουχία bit. Οι μέθοδοι που μεγιστοποιούν τον SIR απαιτούν γνώση της άμεσης απόκρισης διαύλου τόσο από τον επιθυμητό χρήστη όσο και από όλες τις πηγές παρεμβολών, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η εκπαιδευτική αλληλουχία πρέπει να είναι μοναδική για κάθε χρήστη.

3.1.3 Η ΜΟΝΑΔΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΛΟΒΩΝ

Ο πραγματικός υπολογισμός του βάρους του λαμβανόμενου, από τα καθένα από τα στοιχεία της συστοιχίας, σήματος πραγματοποιείται στη μονάδα σχηματισμού λοβών. Στην πιο προηγμένη περίπτωση αυτή η μονάδα είναι μία ενσωμάτωση του ισοσταθμιστή καναλιού/δέκτη RAKE και της ευφυούς κεραίας. Σ' αυτή την περίπτωση χρειάζονται $N \times D$ βάρη, όπου D είναι ο αριθμός των περιόδων συμβόλων (βάθος) στον ισοσταθμιστή ή ο αριθμός των άκρων (fingers) στον δέκτη RAKE. Αυτό ονομάζεται spatio-temporal filter, επειδή αφαιρεί τα μη επιθυμητά συστατικά του σήματος και διατηρεί τα επιθυμητά τόσο στην περιοχή του χώρου όσο και σ' αυτή του χρόνου. Τέτοια μονάδα φαίνεται σχηματικά στην ακόλουθη εικόνα.



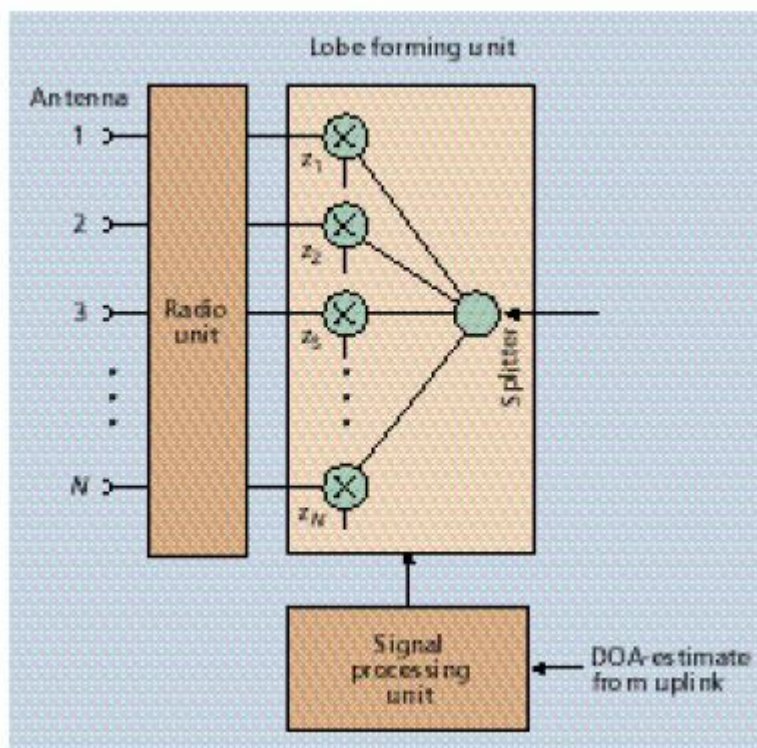
Εικόνα 16 – Ενσωματωμένη RAKE ευφυούς κεραίας

Σε αυτό το παράδειγμα ο αριθμός των βαρών είναι $N \times 3$ πράγμα το οποίο δείχνει ότι το βάθος του ισοσταθμιστή είναι 3. Ο χρόνος μεταξύ των λήψεων κάθε στοιχείου κεραίας είναι T . Σε έναν δέκτη RAKE η χρονική καθυστέρηση μεταξύ των λήψεων δεν είναι ομοιόμορφη.

Όταν ο σχηματισμός λοβού γίνεται ψηφιακά (μετά από A/D) τότε οι μονάδες σχηματισμού λοβών και επεξεργασίες σήματος είναι συνήθως ενσωματωμένες στην ίδια μονάδα, που τότε ονομάζεται DSP. Ο διαχωρισμός στο σχήμα έγινε για να διευκρινιστεί αυτή η λειτουργία. Είναι επίσης πιθανή η πραγματοποίηση της λειτουργίας σχηματισμού λοβών στο υλικό σε ραδιοσυχνότητα (RF) ή σε μεσαία συχνότητα (IF).

3.1.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΟΜΠΟΥ

Το τμήμα εκπομπής μιας ευφυούς κεραίας είναι σχηματικά παρόμοιο με το τμήμα λήψεως. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Το σήμα χωρίζεται σε N παρακλάδια τα οποία στη συνέχεια βαρύνονται από τα μιγαδικά βάρη z_1-z_N στη μονάδα σχηματισμού λοβών. Τα βάρη που καθορίζουν το διάγραμμα ακτινοβολίας στην κατεύθυνση της κάτω ζεύξης, υπολογίζονται από τη μονάδα επεξεργασίας σήματος. Η ράδιο-μονάδα αποτελείται από ψηφιακό-αναλογικούς μετατροπείς (D/A converters) και αλυσίδες μετατροπών προς τα άνω. Πρακτικά, κάποια συστατικά, όπως οι κεραίες αυτές καθ' αυτές και η μονάδα DSP, θα είναι φυσικά τα ίδια όπως και στη λήψη.



Εικόνα 17 – Σύστημα εκπομπής ευφυούς κεραίας

Η πρωτεύουσα διαφορά μεταξύ της άνω και της κάτω ζεύξης είναι ότι, εφόσον δεν υπάρχουν ευφυείς κεραίες στο τερματικό (κινητός σταθμός), δεν είναι διαθέσιμη στην κάτω ζεύξη η χωρική απόκριση διαύλου (spatial channel response). Σε ένα σύστημα αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου (Time Division Duplex TDD) ο κινητός σταθμός και ο σταθμός βάσης χρησιμοποιούν την ίδια φέρουσα συχνότητα που χωρίζεται μόνο στο χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση τα βάρη που υπολογίζονται στην άνω ζεύξη θα είναι βέλτιστα και στην κάτω ζεύξη μόνο αν το κανάλι δεν αλλάξει μεταξύ της μετάδοσης άνω ζεύξης και της μετάδοσης κάτω ζεύξης. Η μη αλλαγή καναλιού δεν μπορεί να θεωρηθεί σαν η γενική περίπτωση, τουλάχιστον σε συστήματα όπου οι χρήστες αναμένεται να κινούνται σε υψηλές ταχύτητες. Αν χρησιμοποιείται αμφίδρομη

διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Duplex FDD), τότε η άνω και η κάτω ζεύξη χωρίζονται σε συχνότητα. Σε αυτή την περίπτωση τα βέλτιστα βάρη δεν θα είναι γενικά τα ίδια λόγω της εξάρτησης της απόκρισης του διαύλου από την συχνότητα

Επομένως το βέλτιστο beamforming (π.χ. AA) στην κάτω ζεύξη είναι δύσκολο και η τεχνική που προτείνεται συχνότερα είναι η χρήση της γεωμετρική προσεγγίσεως της εκτίμησης της διεύθυνσης άφιξης (DoA). Η υπόθεση είναι κατευθυντική αμοιβαιότητα, δηλαδή, η διεύθυνση από την οποία καταφθάνει το σήμα κατά την άνω ζεύξη, είναι η διεύθυνση προς την οποία το σήμα θα πρέπει να εκπεμφθεί κατά την κάτω ζεύξη, για να φτάσει στον χρήστη. Η υπόθεση αυτή έχει ενδυναμωθεί από πρόσφατα πειραματικά αποτελέσματα. Η στρατηγική που χρησιμοποιείται από τον σταθμό βάσης είναι η εκτίμηση του DoA της κατευθύνσεως (ή των κατευθύνσεων από τις οποίες λαμβάνεται το κυρίως μέρος του σήματος χρήστη).

Αυτή η κατεύθυνση χρησιμοποιείται στην κάτω ζεύξη επιλέγοντας τα βάρη z_1-z_N έτσι ώστε το διάγραμμα ακτινοβολίας να είναι ένας λοβός (ή λοβοί) κατευθυνόμενος προς τον επιθυμητό χρήστη. Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με την PA. Επιπροσθέτως είναι δυνατή η τοποθέτηση μηδενικών στην κατεύθυνση άλλων χρηστών έτσι ώστε η παρεμβολή από αυτούς να ελαχιστοποιηθεί. Λόγω εξασθένησης στα διαφορετικά μονοπάτια σήματος έχει προταθεί να γίνεται η επιλογή της διεύθυνσεως κάτω ζεύξης βασισόμενη στην εύρεση μιας μέσης τιμής του διαύλου άνω ζεύξης κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι για τα πιο πάνω έχει υποθεθεί ότι οι παρεμβολές που παρατηρούνται από τον σταθμό βάσης είναι κινητοί σταθμοί, και ότι οι παρεμβολές που παρατηρούνται από τους κινητούς σταθμούς είναι σταθμοί βάσης. Αυτό σημαίνει ότι όταν ο σταθμός βάσης κατά την εκπομπή τοποθετεί μηδενικά στην διεύθυνση προς άλλους κινητούς σταθμούς εκτός του επιθυμητού, θα ελαττώσει την παρεμβολή από αυτά τα κινητά.

3.1.5 ΚΡΙΣΙΜΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

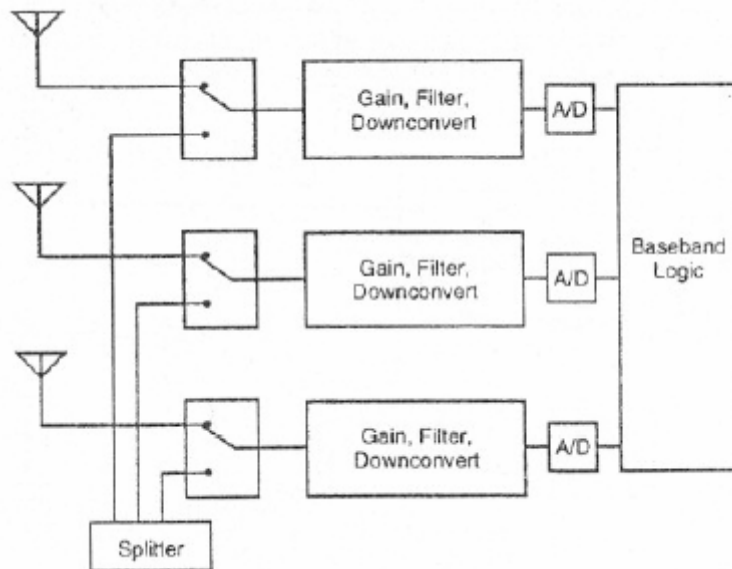
Για να φτάσουν οι ευφείς κεραιές το πλήρες δυναμικό τους μένει να λυθεί ένας αριθμός τεχνικών προκλήσεων. Αυτές αφορούν τόσο την υλοποίηση modem όσο και τους αλγορίθμους για beamforming.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το beamforming στην κάτω ζεύξη γίνεται δυσκολότερο λόγω της έλλειψης γνώσης σχετικά με την άμεση απόκριση καναλιού. Συχνά χρησιμοποιείται η στρατηγική της κατευθύνσεως του(των) λοβού(λοβών) στην διεύθυνση της DoA του σήματος. Όμως η στρατηγική αυτή καθιστά την απόδοση της κάτω ζεύξης εξαρτημένη κατά πολύ από τον ράδιο-διάυλο και τον ρυθμό εναλλαγής αυτού. Αν το κανάλι υποφέρει από πολύ γωνιακή διασπορά, δηλαδή το σήμα λαμβάνεται από πολλές διευθύνσεις, το να κατευθυνθεί ένας λοβός στη διεύθυνση της μέγιστης λήψης είναι μακράν του βέλτιστου σε όρους μεγιστοποίησης μεταφοράς ισχύος στον χρήστη. Η κατεύθυνση μηδενικών προς άλλους χρήστες για την ελαχιστοποίηση της παρεμβολής από αυτούς είναι δύσκολη για τον ίδιο λόγο. Όταν το κανάλι αλλάζει ραγδαία, όπως συμβαίνει σε ταχέως κινούμενα κινητά και σε πολύ πυκνά, πολύπλοκα περιβάλλοντα, τότε οι δυσκολίες στην κάτω ζεύξη επιδεινώνονται.

Άλλος ένας κρίσιμος παράγοντας είναι η γραμμικότητα στις αλυσίδες λήψεως και εκπομπής. Οι συναρτήσεις μεταφοράς για όλες τις προς άνω και προς κάτω αλυσίδες μετατροπής πρέπει να είναι απολύτως γνωστές, έτσι ώστε το beamforming να είναι

απολύτως ακριβές. Παρ' όλα αυτά οι αποκρίσεις μεταβάλλονται ανάλογα με το χρόνο και τη θερμοκρασία, καθώς αναμιγνύονται ενεργά στοιχεία. Αυτό σημαίνει ότι για να λειτουργήσει κανονικά μια ευφυής κεραία θα πρέπει να γίνεται συχνή online ρύθμιση των παραμέτρων της.

Για να πραγματοποιηθεί η παρακολούθηση του κέρδους και της εναλλαγής φάσης κάθε καναλιού μεταξύ επί-γραμμής ρυθμίσεων μετρήσεων, είναι χρήσιμος ο εξοπλισμός της κεραίας με ένα calibration injection σύστημα. Ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται στην εικόνα. Σε ένα τέτοιο σύστημα το σήμα μπορεί να εισαχθεί απευθείας σε καθένα από τα στοιχεία της κεραίας. Αν οι μετρήσεις είναι συχνές, μπορεί να παρακολουθηθεί η αλλαγή στην απόκριση διαύλου, επιμηκύνοντας με αυτό τον τρόπο την εγκυρότητα των επί-γραμμής ρυθμίσεων μετρήσεων.



Εικόνα 18 – Calibration injection σύστημα

Οι απαιτήσεις για γραμμικότητα στις αλυσίδες του πομποδέκτη μπορούν να χαλαρώσουν αν πραγματοποιηθεί η A/D (και D/A) μετατροπή όσο πιο κοντά στο στοιχείο της συστοιχίας γίνεται, δηλαδή με δειγματοληψία στην RF ή στην IF. Αυτό απαιτεί πολύ γρήγορο και εξειδικευμένο υλικό.

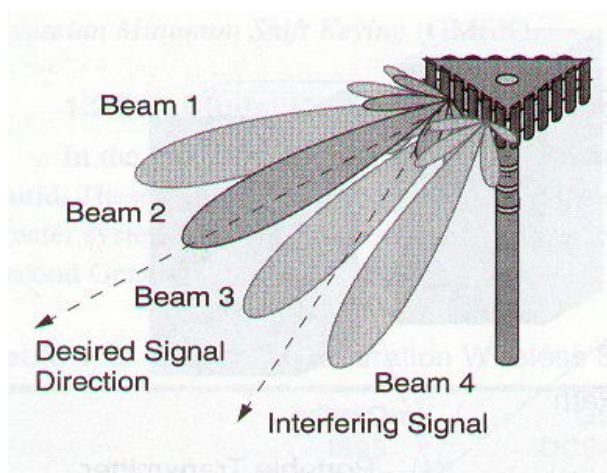
Η πολυπλοκότητα της ευφυούς κεραίας είναι μια μεγάλη πρόκληση καθώς οι πιο προηγμένες υλοποιήσεις περιλαμβάνουν ταυτόχρονη μεγιστοποίηση του χρήσιμου σήματος και μηδενισμό των πηγών παρεμβολής. Επιπροσθέτως αυτό το beamforming πρέπει να επιτελείται για κάθε χρήστη που επικοινωνεί μέσω του σταθμού βάσης. Ακόμα και με τις πανίσχυρες μονάδες επεξεργασίας σήματος, που είναι διαθέσιμες σήμερα, η πραγματοποίησή του σε πραγματικό χρόνο είναι μια μεγάλη πρόκληση.

3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ

Όταν χρησιμοποιούμε στους σταθμούς βάσης ομοιοκατευθυντικές κεραίες για την εκπομπή σημάτων μόνο ένα μικρό μέρος της ενέργειας που εκπέμπουμε φτάνει στον επιθυμητό χρήστη, ενώ την ίδια στιγμή η υπόλοιπη ενέργεια θα πάει χαμένη και πιθανότατα θα προκαλέσει παρεμβολές σε άλλους χρήστες του δικτύου. Γίνεται λοιπόν εύκολα κατανοητό, ότι οι ζεύξεις με συμβατικές κεραίες είναι ανεπαρκείς, τόσο από πλευράς εκπεμπόμενης ισχύος, όσο και από πλευράς χωρητικότητας του δικτύου. Τα συστήματα έξυπνων κεραιών έχουν ακριβώς ως στόχο να ελαττώσουν την εκπεμπόμενη ισχύ προς κάθε κατεύθυνση και να προσδώσουν στη ζεύξη κατευθυντικότητα, ώστε να φτάσει στον επιθυμητό χρήστη η μέγιστη δυνατή ισχύς και στους υπόλοιπους χρήστες οι ελάχιστες δυνατές παρεμβολές.

Θα παρουσιαστούν στην συνέχεια οι διαφορετικές δομές δεκτών, για την κατασκευή έξυπνων κεραιών και θα αναλυθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν αυτές τις κατασκευές .

3.2.1 Switched Beam



Εικόνα 19 – Switched Beam υλοποίηση

Η προσέγγιση του προβλήματος με έξυπνες κεραίες μεταγωγής λοβών μπορεί να αποτελέσει το πρώτο βήμα για τη λύση του προβλήματος με πιο εξελιγμένες τεχνικές. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί έναν αριθμό από σταθερούς λοβούς ακτινοβολίας, στραμμένους σε διαφορετικές διευθύνσεις. Στην πιο απλή του μορφή ο αλγόριθμος αυτός επιλέγει για κάθε χρήστη της κυψέλης το λοβό που μεγιστοποιεί την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος του χρήστη.

Εκ πρώτης όψεως, ο αλγόριθμος μεταγωγής λοβών φαίνεται να δουλεύει καλά κυρίως σε περιπτώσεις που το σήμα λαμβάνεται από μια συγκεκριμένη γωνία άφιξης. Ακόμη όμως και στην περίπτωση που το σήμα εμφανίζει γωνιακή διασπορά, αν η εν λόγω γωνιακή διασπορά είναι μικρότερη από το γωνιακό εύρος κάθε λοβού ακτινοβολίας, τότε μπορούν να προκύψουν σημαντικά οφέλη από μία έξυπνη κεραία μεταγωγής λοβών.

Με βάση τη θεωρία των γραμμικών στοιχειοκεραιών, μπορούμε να υπολογίσουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας για κάθε λοβό. Έτσι, για να παραχθεί ο i λοβός

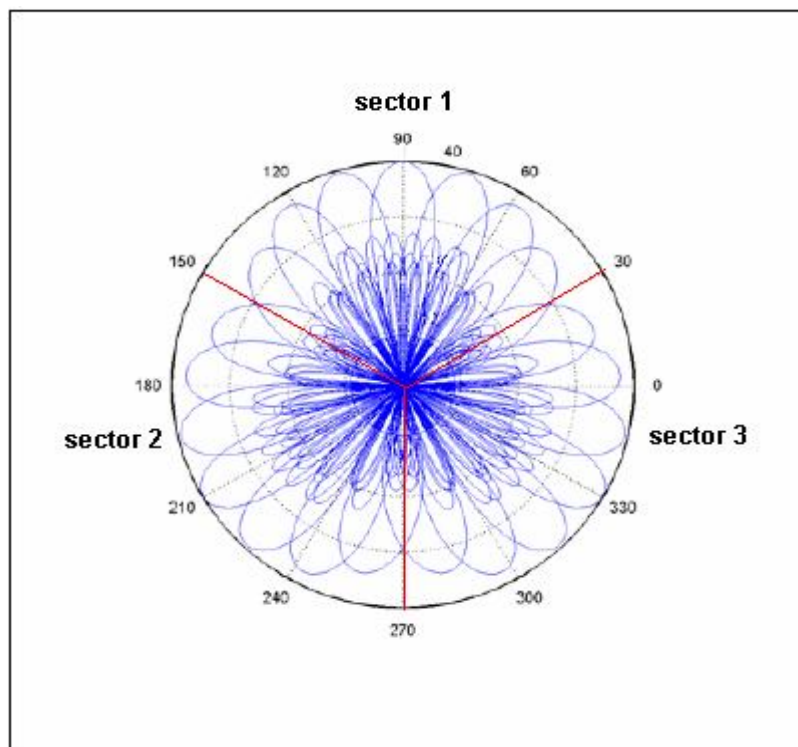
ακτινοβολίας, ο οποίος θέλουμε να είναι στραμμένος στη γωνία ϕ_i , θα πρέπει τα βάρη της κεραίας να δίνονται από την εξίσωση :

$$W_{m,i} = \exp(j \cdot k \cdot m \cdot d \cdot \cos \phi_i)$$

Το $W_{m,i}$ αφορά στο βάρος στο m -οστό στοιχείο της κεραίας. Σαν αποτέλεσμα ο παράγοντα διάταξης της κεραίας για τον i λοβό, προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\sum_{m=0}^{M-1} W_{m,i} \cdot \exp(-j \cdot k \cdot m \cdot d \cdot \cos \phi)$$

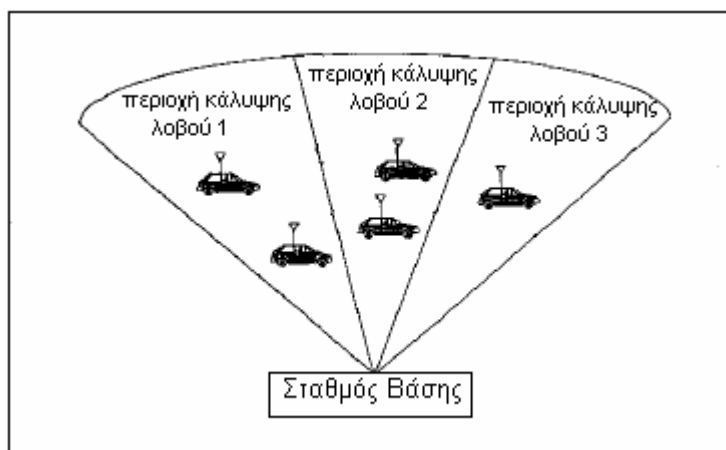
Στην παραπάνω εξίσωση η γωνία ϕ παίρνει τιμές μέσα στο εύρος των 120 μοιρών ενός τομέα μιας κυπέλης. Με χρήση της εν λόγω εξίσωσης μπορούμε να δημιουργήσουμε μια σειρά από ανεξάρτητους μεταξύ τους λοβούς ακτινοβολίας όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 20 – Το διάγραμμα ακτινοβολίας 7 λοβών ανά τομέα 120 μοιρών ,που δημιουργούνται από γραμμική κεραία 8 στοιχείων

Η ιδέα της μεταγωγής λοβών γίνεται φανερή και από την εικόνα 21. Σε αυτό έχουμε την περίπτωση ενός τομέα 120⁰ στον οποίο έχουμε τοποθετήσει μια έξυπνη κεραία με τρεις σταθερούς λοβούς ακτινοβολίας. Κάθε λοβός έχει εύρος 40⁰ και εξυπηρετεί τους χρήστες που βρίσκονται εντός της περιοχής κάλυψής του. Αν υποθέσουμε ότι οι χρήστες είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι στον τομέα, τότε θα πρέπει οι παρεμβολές

να μειωθούν κατά ένα παράγοντα ίσο με τρία, σε σχέση με την περίπτωση που χρησιμοποιούσαμε μια συμβατική sector κεραία, η οποία θα εξέπεμπε με το ίδιο κέρδος στο αζιμουθιακό εύρος των 120° .



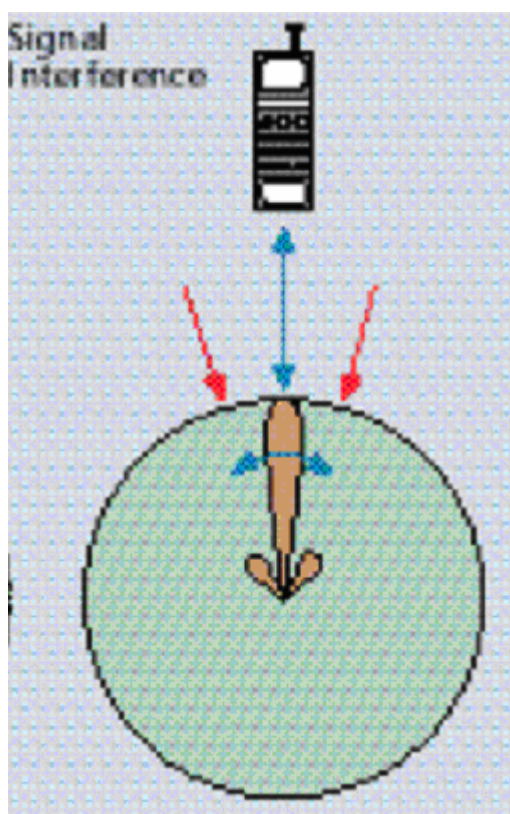
Εικόνα 21 – Τομέας στον οποίο έχει τοποθετηθεί σύστημα έξυπνων κεραιών μεταγωγής λοβών με τρεις δέσμες ακτινοβολίας

Η ταχύτητα δεν αποτελεί πρόβλημα για την υλοποίηση SB και ο λόγος είναι ότι γενικά, η επιλογή διαγραμμάτων μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να γίνει αρκετά γρήγορα. Δηλαδή το σύστημα είναι σε θέση να προσδιορίσει σε ποια ακτίνα ο συνδρομητής στόχων ανήκει, πριν από τις κινήσεις συνδρομητών στόχων σε μια διαφορετική ακτίνα. Το βασικό πρόβλημα της μεθόδου αυτής εντοπίζεται, όταν η παρεμβολή είναι ισχυρότερη από το επιθυμητό σήμα. Τότε η μέθοδος αυτή μπορεί να μην αποδώσει σωστά και να προκύψουν εσφαλμένα συμπεράσματα για την θέση του στόχου, οδηγώντας στην διακοπή της επικοινωνίας ανάμεσα στο σταθμό και στο χρήστη.

3.2.2 Phased array (PA)

Στη μέθοδο αυτή παράγεται μια ψηφιακή ακτίνα η οποία στρέφεται προς το ισχυρότερο σήμα παρακολουθώντας τις κινήσεις του τερματικού-εικόνα 22. Βασικό ρόλο παίζει το περιβάλλον και η κινητικότητα του χρήστη καθώς και η ταχύτητα με την οποία υπολογίζεται η εκάστοτε θέση του, σύμφωνα με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται.

Με την εισαγωγή ενός αλγορίθμου DoA (Direction of Arrival) για το λαμβανόμενο από τον χρήστη σήμα, μπορεί να επιτευχθεί συνεχής παρακολούθηση. Αυτό μπορεί να ιδωθεί σαν μια γενίκευση της έννοιας switched lobe. Σε αυτή την περίπτωση μεγιστοποιείται η λαμβανόμενη ισχύς



Εικόνα 22 – Phased Array (μπλέ : επιθυμητό σήμα κόκκινο : παρεμβολές)

3.2.3 Adaptive arrays (AA)

Σε αυτήν την περίπτωση προστίθεται ένας αλγόριθμος DoA (Direction of Arrival) για να υπολογιστεί η κατεύθυνση προς τις πηγές παρεμβολής. Το διάγραμμα ακτινοβολίας, μπορεί να προσαρμοστεί για να αποκλείσει τις παρεμβολές –εικόνα 23. Επιπροσθέτως, με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων και τεχνικών διαφορικότητας χώρου (SDMA), το διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να προσαρμοστεί έτσι ώστε να λαμβάνει σήματα πολλαπλών διαδρομών που μπορούν να συνδυαστούν.

Αυτές οι τεχνικές μπορούν να μεγιστοποιήσουν τον λόγο σήματος προς παρεμβολή (Signal to Interference Ratio SIR) ή τον λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Signal to Noise and Interference Ratio SINR).

Τα συμβατικά συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών συνήθως χρησιμοποιούν κάποιο είδος διαφορικότητας κεραίας (π.χ. διαφορικότητα χώρου ή πόλωσης). Οι προσαρμόσιμες κεραίες μπορούν να θεωρηθούν ως ένα πλάνο εκτεταμένης διαφορικότητας, καθώς έχουν πάνω από δύο παρακλάδια διαφορικότητας. Έτσι οι προσαρμόσιμες συστοιχίες (AAs) έχουν μεγαλύτερο περιθώριο κέρδους από τις κεραίες



Εικόνα 23 – Adaptive Array

Με τη βοήθεια προσαρμοστικών τεχνικών υπολογίζονται τα βέλτιστα βάρη της κεραίας ξεχωριστά για κάθε χρήστη μέσα στην κυψέλη. Ας υποθέσουμε ότι το λαμβανόμενο σήμα από κάθε στοιχείο της κεραίας την παρούσα χρονική στιγμή εκφράζεται μέσω του διανύσματος M συνιστωσών X_M , όπου M ο συνολικός αριθμός στοιχείων της κεραίας. Για να υπολογιστούν τα κατάλληλα βάρη της κεραίας, ώστε αυτά να χρησιμοποιηθούν την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή $t+1$, θα πρέπει ένας αλγόριθμος να επιλύσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης που ανακύπτει, έχοντας ως είσοδο το διάνυσμα X_M και ένα σήμα αναφοράς.

Υπάρχουν διάφορα κριτήρια επιλογής του αλγορίθμου που θα μας λύσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα κριτήρια “Ελάχιστου Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος” (Minimum Mean Square Error), “Μέγιστου Σηματοθορυβικού Λόγου” (Maximum SINR), “Ελάχιστης Διακύμανσης Θορύβου” (Minimum Noise Variance), κ.α. Μπορεί να δείχτεί ότι όλα τα παραπάνω κριτήρια συνδέονται στενά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα η επιλογή ενός από αυτά να μη διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος. Όμως, η επιλογή του κατάλληλου “προσαρμοστικού αλγορίθμου” (adaptive algorithm) είναι μείζονος σημασίας. Κάθε αλγόριθμος επιφέρει διαφορετική πολυπλοκότητα στο σταθμό βάσης, ενώ διαφορετική είναι και η ταχύτητα με την οποία κάθε αλγόριθμος συγκλίνει στη λύση του προβλήματος. Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται τόσο από την σχεδίαση του συστήματος (π.χ. διάρκεια χρονοσχισμής για ένα TDMA σύστημα), όσο και από το ασύρματο περιβάλλον (ταχύτητα κινητού τερματικού και ταχύτητα με την οποία αλλάζει το προφίλ του ραδιοδιαύλου).

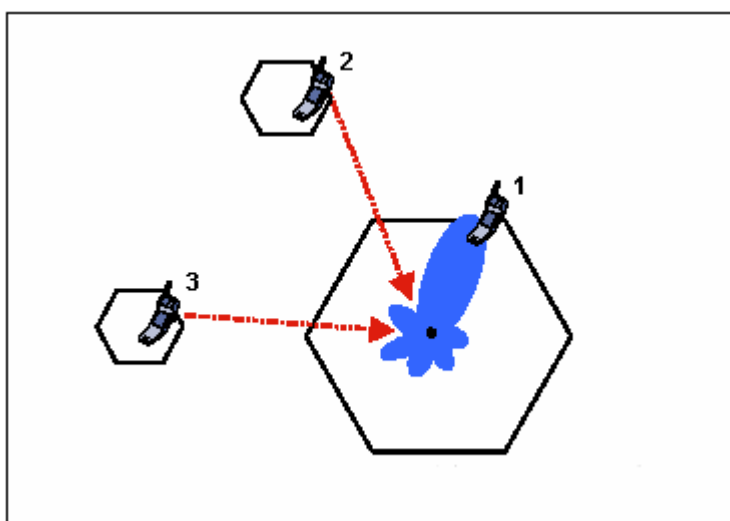
Ανάμεσα στους πιο διαδεδομένους προσαρμοστικούς αλγορίθμους είναι ο SMI (Sample Matrix Inverse), ο οποίος βασίζεται στην αντιστροφή του πίνακα αυτοσυσχέτισης R_{xx} του λαμβανόμενου σήματος, ο αλγόριθμος “Ελαχίστων Μέσων Τετραγώνων” LMS (Least Mean Squares), ο κανονικοποιημένος αλγόριθμος LMS και ο “Αναδρομικός Αλγόριθμος Ελαχίστων Τετραγώνων” RLS (Recursive Least

Squares). Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα των προσαρμοστικών μεθόδων είναι ότι καταλήγουν σε ένα αποτέλεσμα που μεγιστοποιεί το σηματοθορυβικό λόγο SINR.

Από την άλλη μεριά, οι προσαρμοστικοί αλγόριθμοι έχουν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα του αυξημένου υπολογιστικού φόρτου. Παρακάτω κρίνουμε σκόπιμο να αναφερθούμε σε ορισμένες τεχνικές που υιοθετούνται συχνά μαζί με την χρησιμοποίηση των ευφυών κεραιών.

3.2.4 Διαφορετικές υλοποιήσεις δικτύου που χρησιμοποιεί έξυπνες κεραιές

Όταν κάνουμε χρήση έξυπνων κεραιών προκύπτουν δύο βασικές υλοποιήσεις για το δίκτυο. Η πρώτη υλοποίηση ονομάζεται “Φιλτράρισμα στο Χώρο για Μείωση των Παρεμβολών” (Spatial Filtering for Interference Reduction, SFIR). Ο βασικός στόχος της μεθόδου SFIR είναι ελάττωση των διακυψελικών παρεμβολών, ώστε να πετύχουμε όσο το δυνατόν χαμηλότερο συντελεστή επαναχρησιμοποίησης συχνότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με το να υποστηρίζουμε ένα χρήστη σε κάθε ομοδιαυλική κυψέλη με το λοβό ακτινοβολίας μιας έξυπνης κεραιάς και κατά αυτόν τον τρόπο να ελαττώσουμε τις παρεμβολές. Η ιδέα της τεχνικής SFIR φαίνεται στην εικόνα 24.



Εικόνα 24– Δύο ομοδιαυλικοί χρήστες εκπέμπουν την ίδια χρονική στιγμή με τη βοήθεια της μεθόδου SDMA

Το μεγάλο πλεονέκτημα της SDMA είναι ότι, σε αντίθεση με τη μέθοδο SFIR, η συγκεκριμένη υλοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί τοπικά για να αυξήσει τη χωρητικότητα μιας κυψέλης. Δεν υπάρχει δηλαδή η ανάγκη για εφαρμογή της μεθόδου σε μεγάλο μέρος του δικτύου, ώστε να εκμεταλλευτούμε το κέρδος σε χωρητικότητα που η SDMA προσδίδει. Ένα από τα μειονεκτήματα της SDMA είναι ότι απαιτείται κάποιος επιπλέον διαχωρισμός μεταξύ των χρηστών της κυψέλης, για να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε σε ποιον χρήστη ανήκει το λαμβανόμενο σήμα.

Επίσης, η SDMA προϋποθέτει πιο πολύπλοκη διαχείριση ασύρματων πόρων, σε σχέση πάντα με τη μέθοδο SFIR.

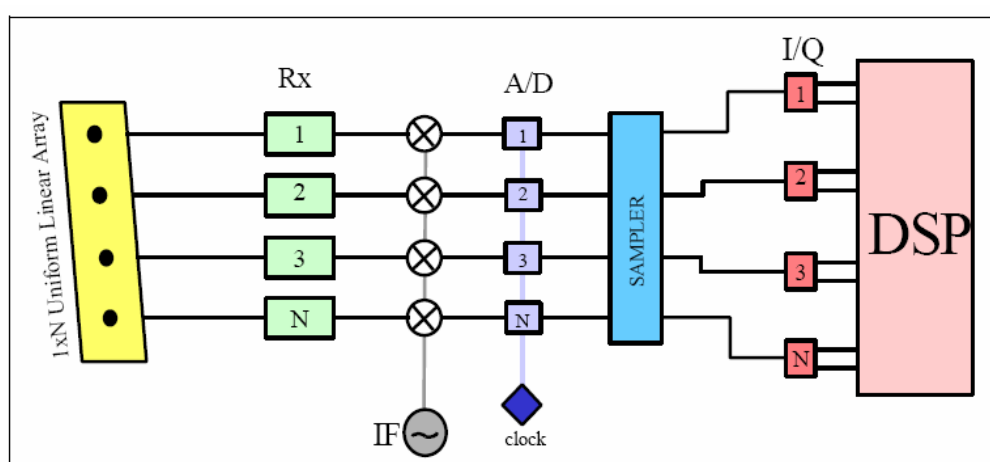
3.2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι τρεις προαναφερθείσες μέθοδοι (SL, PA και AA) διαφέρουν σε πολυπλοκότητα και υπολογιστικό φορτίο. Σε γενικές γραμμές η SL είναι λιγότερο πολύπλοκη από την PA, η οποία με τη σειρά της είναι λιγότερο πολύπλοκη από την AA. Οι συνθήκες που επηρεάζουν είναι, για παράδειγμα, η απαραίτητη ακρίβεια και η επίδοση σε όρους ισχύος ή C/I κέρδους. Επίσης υπάρχει διαφορά και ανάλογα με τη μέθοδο πρόσβασης στον ραδιοδιάλογο (TDMA ή CDMA).

3.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ANGLE OF ARRIVAL(AoA)

3.3.1 Υλοποίηση

Η κατεύθυνση του επιθυμητού στόχου σε δύο διαστάσεις (2D) μπορεί να βρεθεί από την τομή δύο γραμμών βάσης, όπου η κάθε μία σχηματίζεται ακτινωτά από έναν OP (δέκτη) προς το στόχο (συνεπώς απαιτούνται τουλάχιστον δύο OP's). Για να δοθεί μία πολύ ακριβής τοποθεσία απαιτούνται πολλά ζευγάρια σταθμών βάσης και πολύ κατευθυντικές ακτίνες. Το σχηματικό διάγραμμα ενός σταθμού παρατήρησης AoA φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Αποτελείται από τρία κύρια μέρη : τη στοιχειοκεραία φάσης, το RF/IF μέρος και την DSP όπου εκεί βρίσκεται ο αλγόριθμος εκτίμησης κατεύθυνσης



Εικόνα 25- Σχηματικό διάγραμμα ενός σταθμού παρατήρησης AoA

Η πιο ευθύς προσέγγιση για την εκτίμηση AoA είναι η παρεμβολομετρία φάσης (phase interferometry). Ένα παρεμβολόμετρο φάσης μετράει ευθέως τη διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων που λαμβάνονται σε πολλαπλά ζευγάρια στοιχείων της κεραίας και τη μετατρέπει σε μία εκτίμηση AoA. Αυτή η προσέγγιση λειτουργεί αρκετά καλά για υψηλό SNR, αλλά θα αποτύχει για δυνατή διασυμβολική παρεμβολή και/ή για διάδοση πολλαπλών διαδρομών.

Η δεύτερη μέθοδος εκτίμησης AoA είναι ο σχηματισμός ακτινών. Για σήματα ραδιοσυχνότητας, η AoA υλοποιείται με ηλεκτρονική (ή μηχανική) στρέψη του κυρίως λοβού μιας προσαρμόσιμης στοιχειοκεραίας φάσης προς την κατεύθυνση του εισερχόμενου κινητού σήματος. Τυπικά, δύο στοιχειοκεραίες τοποθετημένες κοντά η μία με την άλλη χρησιμοποιούνται για να προσεγγιστεί η ακριβής κατεύθυνση της κορυφής της εισερχόμενης ενέργειας ώστε να αποδοθεί υψηλότερης ανάλυσης μέτρηση. Η ισχύς εξόδου του σχηματιστή ακτινών μετράται ενώ στρέφεται η κύρια ακτίνα της στοιχειοκεραίας πάνω στο γωνιακό πεδίο που ενδιαφερόμαστε. Αυτό παράγει μία ισχύ διανομής ενάντια στην AoA. Αυτή η μέθοδος υποφέρει σημαντικά από διάδοση πολλαπλών διαδρομών.

Μέθοδοι που δουλεύουν καλά σε διάδοση πολλαπλών διαδρομών μπορούν να προέλθουν χρησιμοποιώντας το ML (maximum likelihood) πλαίσιο. Σε περιβάλλοντα

πολλαπλών διάδρομων η ML θα εκτιμήσει την AoA της κάθε διαδρομής. Ωστόσο, η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων απαιτεί σύνθετη και πολυδιάστατη αναζήτηση. Ο βαθμός της πολυδιάστατης αυτής αναζήτησης είναι ίσος με τον συνολικό αριθμό των διαδρομών που ακολουθούν όλα τα εισερχόμενα σήματα. Αυτή η αναζήτηση είναι ακόμα πιο πολύπλοκη διότι ο αριθμός των διαδρομών δεν είναι γνωστός από πριν αλλά πρέπει να εκτιμηθεί.

Άλλη κλάση μεθόδων που δουλεύει καλά σε διάδοση πολλαπλών διαδρομών μπορεί να προκύψει συνθέτοντας χωρική εξομάλυνση με αλγόριθμους υποδιαστήματος (π.χ. MUSIC, ESPRIT). Γενικά αυτές οι μέθοδοι αποτυγχάνουν σε διάδοση πολλαπλών διαδρομών αλλά η χρησιμοποίηση ενός χωρικά εξομαλυσμένου πίνακα συνδιασποράς στη θέση του αντίστοιχου συμβατικού τους επιτρέπει να εφαρμοστούν με επιτυχία. Οι διαφορετικοί αλγόριθμοι επιδεικνύουν διαφορετικούς συνδυασμούς μεταξύ ανάλυσης, σταθερότητας και υπολογιστικής πολυπλοκότητας.

3.3.2 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Το πλεονέκτημα της μεθόδου AoA είναι ότι χρειάζονται μόλις μόνο δύο δέκτες για να εντοπισθεί ένας στόχος (εκτός και αν οι δύο δέκτες και ο στόχος βρίσκονται σε μια ευθεία) και ότι δεν χρειάζεται να υπάρξει συγχρονισμός μεταξύ των δεκτών.

Τα μειονεκτήματα είναι ότι απαιτεί σχετικά μεγάλο και πολύπλοκο υλικό και ότι η εκτίμηση θέσης υποβαθμίζεται καθώς η απόσταση μεταξύ του στόχου και του δέκτη αυξάνεται. Παρακάτω παρατίθενται μερικές ακόμα παρατηρήσεις :

- i. Ο Rx χρειάζεται ρύθμιση για θερμοκρασία και mismatches
- ii. Οι AoA μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συστήματα ευρείας ζώνης για την ανοσία στη διάδοση πολλαπλών διαδρομών
- iii. Δύο κοντινά τοποθετημένες στοιχειοκεραίες χρησιμοποιούνται για να προσεγγιστεί η ακριβής κατεύθυνση της κορυφής της ισχύος του εισερχόμενου σήματος δίνοντας υψηλότερη ανάλυση
- iv. Τα AoA στοιχεία της στοιχειοκεραίας θα πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση $\lambda/2$ το ένα με το άλλο σε μοναδική συχνότητα
- v. Η γωνιακή ανάλυση είναι ανάλογη του $1/L$ όπου L είναι το άνοιγμα της στοιχειοκεραίας
- vi. Η ακρίβεια εξαρτάται από τον SNR, το χρόνο ολοκλήρωσης, τον αριθμό των κεραιών, τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται, το υλικό και τη ρύθμιση της στοιχειοκεραίας
- vii. Τα AoA στενής ζώνης εξαρτώνται από το εύρος ζώνης σήματος, τα στοιχεία της κεραίας και το υλικό του Rx

3.4 Αλγόριθμοι εύρεσης διεύθυνσης

Πολλοί τύποι αλγορίθμων έχουν προταθεί και μελετηθεί ώστε να βρεθεί η DoA σε ένα AoA σύστημα. Οι πλέον γνωστοί περιγράφονται παρακάτω.

3.4.1 Μέθοδος φασματικής εκτίμησης

Αυτές οι μέθοδοι εκτιμούν την AoA υπολογίζοντας το χωρικό φάσμα και καθορίζοντας έπειτα τα τοπικά μέγιστα. Μία από τις πρώιμες μεθόδους φασματικής ανάλυσης είναι η μέθοδος Bartlett όπου ένα ορθογώνιο παράθυρο ομοιόμορφου βάρους εφαρμόζεται στα με χρονική σειρά δεδομένα για να αναλυθεί. Η διαδικασία είναι παρόμοια με αυτή της μηχανικής στρέψης της στοιχειοκεραίας προς μια κατεύθυνση και τη μέτρηση της ισχύος εξόδου. Λόγω των πλευρικών λοβών που προκύπτουν, η ισχύς εξόδου δεν εξαρτάται μόνο από την κατεύθυνση προς την οποία η στοιχειοκεραία στρέφεται αλλά και από τις κατευθύνσεις που δείχνουν οι πλευρικοί λοβοί. Γίνεται φανερό ότι η μέθοδος αυτή υποφέρει έντονα από διάδοση πολλαπλών διαδρομών.

3.4.2 Ο MVDR εκτιμητής

Αυτή είναι η ML μέθοδος της εκτίμησης του φάσματος η οποία βρίσκει την ML εκτίμηση της εισερχόμενης ισχύος από μία σημειακή πηγή σε κατεύθυνση u υποθέτοντας όλες τις άλλες πηγές ως παρεμβολή. Στην beamforming βιβλιογραφία είναι γνωστή ως MVDR όπως επίσης και ως ο βέλτιστος beamformer αφού, ελλείψει λαθών, μεγιστοποιεί το εξερχόμενο SNR. Για ένα πρόβλημα εκτίμησης της εύρεσης κατεύθυνσης η μέθοδος βρίσκει την εκτίμηση ML της κατεύθυνσης αντί της ισχύος.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί τα βάρη των στοιχειοκεραίων, τα οποία αποκτούνται ελαχιστοποιώντας τη μέση ισχύ εξόδου η οποία περιορίζεται στην κατεύθυνση που κοιτάμε προς τη μονάδα. Αυτή η μέθοδος έχει καλύτερες ιδιότητες ανάλυσης από τη μέθοδο Bartlett.

3.4.3 Μέθοδος γραμμικής πρόβλεψης

Αυτή η μέθοδος εκτιμά την έξοδο ενός αισθητήρα χρησιμοποιώντας γραμμικούς συνδυασμούς των εναπομεινάντων αισθητήρων εξόδων και ελαχιστοποιεί το προβλεπόμενο μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ της εκτιμώμενης και της πραγματικής εξόδου. Έτσι λοιπόν, αποκτά τα βάρη των στοιχειοκεραίων ελαχιστοποιώντας την ισχύ εξόδου της υπαγόμενης στοιχειοκεραίας με τον περιορισμό ότι τα βάρη στον επιλεγμένο αισθητήρα είναι μοναδιαία.

Δεν υπάρχει παρά ταύτα ένα κριτήριο για την σωστή επιλογή αυτού του στοιχείου. Η επιλογή αυτή επηρεάζει την ικανότητα ανάλυσης και την πόλωση στην εκτίμηση

και αυτά τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τον SNR και τον διαχωρισμό των κατευθυντικών πηγών. Η μέθοδος γραμμικής πρόβλεψης δουλεύει καλά σε ένα σχετικά χαμηλού SNR περιβάλλον και είναι ένας καλός συμβιβασμός σε περιπτώσεις που οι πηγές είναι περίπου ίσης δύναμης και είναι σχετικά σύμφωνες.

3.4.4 MEM

Αυτή η μέθοδος βρίσκει ένα φάσμα ισχύος, ώστε ο μετασχηματισμός Fourier αυτού να ισοδυναμεί με τη μετρούμενη συσχέτιση, όταν η εντροπία του μεγιστοποιείται.

3.4.5 MLM

Αυτή η μέθοδος εκτιμά την AoA από μία δοσμένη σειρά δειγμάτων στοιχειοκεραιών μεγιστοποιώντας την συνάρτηση πιθανότητας. Η συνάρτηση πιθανότητας είναι η δεσμευμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των δειγματοληπτούμενων δεδομένων, δοσμένης της AoA και θεωρείται ως μία συνάρτηση των επιθυμητών μεταβλητών. Η μέθοδος αναζητά αυτές τις κατευθύνσεις που μεγιστοποιούν το log της συνάρτησης, την log-likelihood συνάρτηση. Το ML κριτήριο υποδηλώνει ότι επίπεδα κύματα από αυτές τις κατευθύνσεις είναι το πιο πιθανό να προκαλέσουν εμφάνιση των δοσμένων δειγμάτων. Η μεγιστοποίηση της log-likelihood συνάρτησης είναι ένα πρόβλημα μη-γραμμικής βελτιστοποίησης. Στην απουσία μιας κλειστής-φόρμας λύσης, απαιτεί επαναλαμβανόμενα πλάνα για λύσεις.

Η ML έχει ανώτερες επιδόσεις συγκρινόμενη με άλλες μεθόδους, ειδικότερα όταν ο SNR είναι μικρός, ο αριθμός των δειγμάτων είναι μικρός ή οι πηγές είναι συσχετισμένες. Για μία μόνο πηγή οι αναμενόμενες τιμές των εκτιμήσεων είναι ίσες με τις πραγματικές τιμές. Με αυτή τη λογική μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση σύγκρισης για την επίδοση των άλλων μεθόδων. Η μέθοδος προϋποθέτει ότι ο αριθμός των πηγών είναι γνωστός. Όταν διατίθεται ένας μεγάλος αριθμός δειγμάτων, άλλα πλάνα που είναι πιο αποδοτικά υπολογιστικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επίδοση εξίσου καλή με αυτή αυτής της μεθόδου.

3.4.6 Μέθοδοι ιδιοκατασκευής (eigenstructure)

Αυτές οι μέθοδοι στηρίζονται στις ακόλουθες ιδιότητες του πίνακα συσχετισμού (R) στοιχειοκεραίας. Πρώτον, το διάστημα που εκτείνεται από τα ιδιοδιανύσματά του μπορεί να διαχωριστεί σε δύο υποδιαστήματα, το υποδιάστημα σήματος και το υποδιάστημα θορύβου. Δεύτερον, τα διανύσματα στρέψης που αντιστοιχούν στις κατευθυντικές πηγές είναι ορθογώνια προς το υποδιάστημα θορύβου. Καθώς το υποδιάστημα θορύβου είναι ορθογώνιο προς αυτό του σήματος, αυτά τα διανύσματα περιέχονται στο υποδιάστημα σήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι η έκταση του υποδιαστήματος θορύβου εξαρτάται από τα ιδιοδιανύσματα που σχετίζονται με τις μικρότερες ιδιοτιμές του πίνακα συσχετισμού και η έκταση του υποδιαστήματος σήματος εξαρτάται από τα ιδιοδιανύσματα που σχετίζονται με τις μεγαλύτερες τιμές.

Κατά κύριο λόγο αυτές οι μέθοδοι εύρεσης διευθύνσεων, όπως αυτή των διανυσμάτων στρέψης που σχετίζονται με αυτές τις διευθύνσεις, είναι ορθογώνιες

προς το υποδιάστημα θορύβου και περιέχονται στο υποδιάστημα σήματος. Η εύρεση συνήθως υλοποιείται σε δύο βήματα. Αρχικά βρίσκεται το διάνυσμα βάρους που περιέχεται στον θόρυβο. Έπειτα αναζητούνται διευθύνσεις έτσι ώστε τα διανύσματα στρέψης που σχετίζονται με αυτές να είναι ορθογώνια προς αυτά τα διανύσματα βάρους. Οι διευθύνσεις των πηγών που αντιστοιχούν στα τοπικά ελάχιστα της συνάρτησης $|w^H s_0|$ όπου w είναι τα βάρη και s_0 το διάνυσμα στρέψης. Όταν αυτά τα διανύσματα στρέψης δεν είναι επιβεβαιωμένο ότι βρίσκονται στο υποδιάστημα σήματος μπορεί να υπάρχουν περισσότερα ελάχιστα από τον αριθμό των πηγών, και ο διαχωρισμός μεταξύ της πραγματικής διεύθυνσης πηγής και των παρασιτικών ελαχίστων στην $|w^H s_0|$ γίνεται με μέτρηση της ισχύος σε αυτές τις διευθύνσεις.

Πολλές μέθοδοι ιδιοκατασκευής έχουν προταθεί. Αυτή του Pisarenko έχει καλύτερες ιδιότητες ανάλυσης από τις μεθόδους ελάχιστης διασποράς, μέγιστης εντροπίας και γραμμικής πρόβλεψης. Κάποιες μέθοδοι εφαρμόζονται καλύτερα σε off-line υλοποιήσεις ενώ άλλες είναι πιο χρήσιμες για real-time. Αυτός ο τύπος των μεθόδων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για θόρυβο βάθους που δεν είναι 'λευκός' αλλά έχει είτε γνωστή είτε άγνωστη διασπορά ή όταν οι πηγές είναι στο κοντινό πεδίο και/ή όταν οι αισθητήρες έχουν άγνωστα μοντέλα κέρδους.

3.5 ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η εισαγωγή των ευφυών κεραιών έχει ένα μεγάλο αντίκτυπο στην απόδοση των κυψελοειδών δικτύων. Επηρεάζει επίσης πολλούς τομείς, τόσο του σχεδιασμού όσο και της ανάπτυξης των συστημάτων κινητών επικοινωνιών.

3.5.1 Βελτιώσεις και κέρδη

Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα αναφερθούμε με συνοπτικό τρόπο σε όλα όσα μπορούμε να αποκομίσουμε από ένα σύστημα έξυπνων κεραιών. Η ανάλυσή μας ξεκινάει από την αύξηση της ραδιοκάλυψης και συνεχίζει με θέματα που αφορούν την αύξηση της χωρητικότητας και τη βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας.

3.5.1.1 Επέκταση της ραδιοκάλυψης

Ένα από τα βασικά οφέλη που μπορούν να προκύψουν από τη χρήση των έξυπνων κεραιών είναι η αύξηση της ακτίνας ραδιοκάλυψης της κυψέλης. Η ισχύς δεν εκπέμπεται πλέον προς κάθε κατεύθυνση εντός της περιοχής κάλυψης της κυψέλης, αλλά η εκπομπή γίνεται με κατευθυντικό τρόπο, ώστε να ταιριάζει στις ιδιαίτερες ανάγκες της ζεύξης κάθε χρήστη. Μπορεί να αποδειχτεί ότι μια έξυπνη κεραία με N τον αριθμό στοιχεία αυξάνει το σηματοθορυβικό λόγο SNR (με παρουσία λευκού προσθετικού θορύβου τύπου Gauss) κατά ένα παράγοντα περίπου ίσο με :

$$G \approx 10 \cdot \log_{10} (N)$$

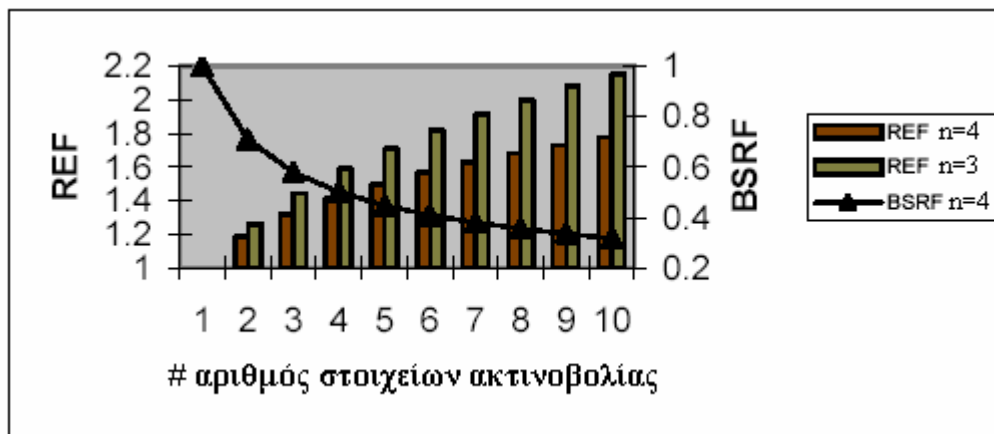
Το επιπλέον κέρδος G έχει ως άμεση συνέπεια την αύξηση των απωλειών διάδοσης που μπορούμε να ανεχτούμε για αποδεκτή ποιότητα υπηρεσίας, με αποτέλεσμα και την αύξηση της ακτίνας ραδιοκάλυψης. Αν υποθέσουμε μικρή γωνιακή διασπορά σήματος (δηλαδή ότι κάθε συνιστώσα σήματος συλλαμβάνεται από την κεραία) και συντελεστή απωλειών διάδοσης ίσο με n, τότε ο “συντελεστής αύξησης της ραδιοκάλυψης” (Range Extension Factor, REF) υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$REF = \frac{R_2}{R_1} = N^{1/n}$$

R_1 και R_2 είναι οι ακτίνες ραδιοκάλυψης στην περίπτωση κεραίας με ένα στοιχείο ακτινοβολίας και με N στοιχεία ακτινοβολίας αντίστοιχα

Ο συντελεστής βελτίωσης σε επίπεδο περιοχής μας δίνεται από το τετράγωνο της ποσότητας REF, ενώ το αντίστροφο του συντελεστή βελτίωσης περιοχής μας δίνει το “συντελεστή ελάττωσης σταθμών βάσης”, οι οποίοι απαιτούνται για την εξυπηρέτηση της ίδιας περιοχής (Base Station Reduction Factor, BSRF). Αν δηλαδή προς κάλυψη μιας περιοχής χρειαζόμασταν K σταθμούς βάσης με συμβατικές κεραίες, τώρα χρειαζόμαστε $K/(REF)^2 = K*BSRF$ σταθμούς βάσης με έξυπνες κεραίες.

Στην εικόνα 26 βλέπουμε πως μεταβάλλεται ο συντελεστής αύξησης της ραδιοκάλυψης, REF, σε συνάρτηση με τον αριθμό των στοιχείων ακτινοβολίας της έξυπνης κεραίας, για n=3 και n=4. Επίσης, στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή ελάττωσης σταθμών βάσης, BSRF, σε συνάρτηση με τον αριθμό των στοιχείων ακτινοβολίας, για n=4.



Εικόνα 26– Αύξηση της ραδιοκάλυψης με τη βοήθεια των έξυπνων κεραίων

Το σχήμα δείχνει ότι με χρήση έξυπνης κεραίας 8 στοιχείων και συντελεστή απωλειών διάδοσης ίσο με 3 μπορούμε να διπλασιάσουμε τη ραδιοκάλυψη και κατά συνέπεια να τετραπλασιάσουμε την περιοχή κάλυψης, ή να ελαττώσουμε τον αριθμό των αναγκαίων σταθμών βάσης στο ένα τέταρτο σε σχέση με την περίπτωση που κάνουμε χρήση συμβατικών κεραίων.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αύξηση της ραδιοκάλυψης δεν αποτελεί ένα επιθυμητό στόχο. Το επιπλέον όμως κέρδος που προσδίδουν οι έξυπνες κεραίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί ούτως ώστε να ελαττωθεί η εκπεμπόμενη ισχύς από τα κινητά τερματικά. Κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα ωφέλιμο, αφού έτσι θα διαρκεί

περισσότερο η μπαταρία του κινητού. Αν καταφέρουμε να εκμεταλλευτούμε το παραπάνω γεγονός σε πλήρη έκταση, θα μπορέσουμε να οδηγηθούμε μελλοντικά σε συσκευές με μικρότερο μέγεθος, μιας και θα μειωθούν οι απαιτήσεις μας σε μπαταρία.

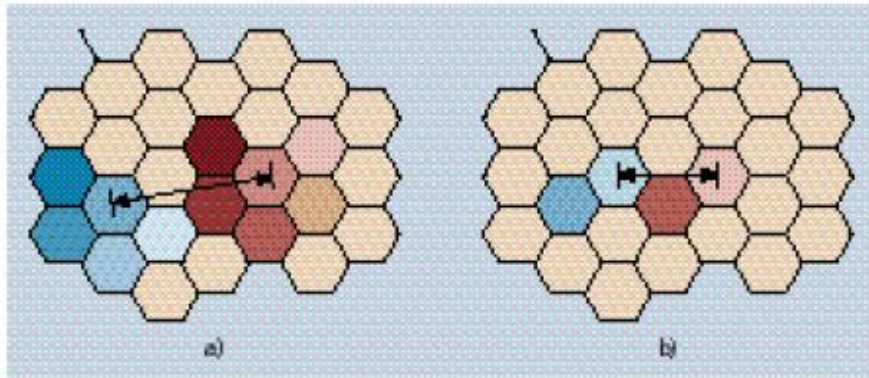
Το επιπλέον κέρδος που προσδίδουν οι έξυπνες κεραιές μπορούμε να το εκμεταλλευτούμε στο άλλο άκρο, δηλαδή στο σταθμό βάσης. Ο κάθε ενισχυτής στο σταθμό βάσης είναι σε θέση να ελαττώσει την ισχύ κατά ένα παράγοντα ίσο με N^2 , κάτι που θα οδηγήσει σε συνολική μείωση της εκπεμπόμενης ισχύς από το σταθμό βάσης κατά N^{-1} (N^2 ο κάθε ενισχυτής επί N ενισχυτές για κάθε στοιχείο ακτινοβολίας της κεραιάς).

Σε αραιοκατοικημένες περιοχές η ραδιοκάλυψη είναι πιο σημαντική από την χωρητικότητα για την απόφαση της ανάπτυξης ενός σταθμού βάσης. Η αύξηση της εμβέλειας πραγματοποιείται λόγω του ότι οι ευφυείς κεραιές είναι περισσότερο κατευθυντικές από τις παραδοσιακές τμηματοποιημένες ή πολυκατευθυντικές κεραιές. Αυτό σημαίνει ότι οι σταθμοί βάσης μπορούν να τοποθετηθούν πιο μακριά ο ένας από τον άλλον, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μια πιο αποτελεσματική από άποψη κέρδους ανάπτυξη. Το κέρδος της κεραιάς συγκρινόμενο με αυτό κεραιάς ενός στοιχείου μπορεί να αυξηθεί κατά έναν αριθμό ίσο με τον αριθμό στοιχείων της συστοιχίας, για παράδειγμα μια συστοιχία 8 στοιχείων μπορεί να αποδώσει ένα κέρδος της τάξεως του 8 (9dB).

3.5.1.2 Αύξηση χωρητικότητας

Ο κυρίαρχος λόγος του αυξανόμενου ενδιαφέροντος για τις ευφυείς κεραιές είναι η αύξηση της χωρητικότητας. Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές η κύρια πηγή θορύβου στο σύστημα είναι οι παρεμβολές από άλλους χρήστες. Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος σήματος προς παρεμβολή (SIR) είναι πολύ μεγαλύτερος από τον λόγο σήματος προς θερμικό θόρυβο (SNR). Οι ευφυείς κεραιές θα αυξάνουν τον SIR, καθώς ταυτόχρονα θα αυξάνουν το επίπεδο του χρήσιμου λαμβανόμενου σήματος και θα μειώνουν το επίπεδο της παρεμβολής. Ειδικά η προσαρμοζόμενη συστοιχία(AA) παρέχει σημαντική βελτίωση. Πειραματικά αποτελέσματα αναφέρουν μια αύξηση 10dB κατά μέσο όρο σε αστικές περιοχές.

Σε TDMA συστήματα η επίπτωση του αυξημένου SIR είναι η πιθανότητα μειωμένης απόστασης επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχήμα όπου η παραδοσιακή ομάδα των 7 κυψελών ελαττώθηκε σε μία ομάδα των 3 κυψελών. Αυτό οδηγεί σε μία αύξηση της χωρητικότητας της τάξης των 7/3 καθώς όλες οι κυψέλες μπορούν να δεχθούν αυτής της τάξης περισσότερα φέροντα.



Εικόνα 27– Παράδειγμα μειωμένης απόστασης επαναχρησιμοποίησης συχνотήτων

Τα CDMA συστήματα όπως το UMTS είναι περισσότερο εξαρτημένα από την παρεμβολή σε σχέση με τα TDMA συστήματα. Η κυρίαρχη πηγή θορύβου στο σύστημα είναι η παρεμβολή από άλλους χρήστες λόγω της μη ιδανικής ορθογωνικότητας των κωδικών διάδοσης. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση της χωρητικότητας είναι ακόμα μεγαλύτερη για ένα CDMA σύστημα από ότι για ένα TDMA. Έχει αναφερθεί μια αύξηση της χωρητικότητας της τάξεως του 500% για το CDMA.

Ως έχουμε αναφέρει, με τις συμβατικές κεραιές μόνο ένα μικρό μέρος της ενέργειας εκπομπής φτάνει στον επιθυμητό χρήστη, ενώ το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ενέργειας θα προκαλέσει παρεμβολές στους υπόλοιπους χρήστες του δικτύου. Στην κάτω ζεύξη, η κατευθυντικότητα που προσδίδουν οι έξυπνες κεραιές μπορεί να ελαττώσει τα επίπεδα των παρεμβολών σε ομοδιαυλικούς χρήστες. Ομοίως στην άνω ζεύξη, ένας κατευθυντικός λοβός μιας έξυπνης κεραιάς λαμβάνει λιγότερες παρεμβολές από ομοδιαυλικούς χρήστες εξαιτίας του στενού γωνιακού του εύρους. Έτσι, το φιλτράρισμα στο πεδίο του χώρου που παρέχουν οι έξυπνες κεραιές είναι ιδιαίτερος επιθυμητό για συστήματα CDMA, αφού σε αυτά οι χρήστες μοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ένας μεγάλος αριθμός από παρεμβολείς.

Στο σύστημα τρίτης γενιάς WCDMA η χωρητικότητα ενός WCDMA δικτύου περιορίζεται από την ποσότητα της συνολικά λαμβανόμενης ισχύος από τους σταθμούς βάσης, δηλαδή δεν υπάρχει κάποιος τεχνικός περιορισμός στην χωρητικότητα όπως τα διαθέσιμα κανάλια, αλλά αυτή εξαρτάται μονάχα από τις παρεμβολές. Στα συστήματα CDMA πρώτης γενιάς (τα οποία προσέφεραν μόνο φωνητικές υπηρεσίες) υπήρχαν 6 με 10 παρεμβολείς στην κάτω ζεύξη και πολλοί περισσότεροι (αδύναμοι λόγω του κέρδους επεξεργασίας) παρεμβολείς στην άνω ζεύξη. Όμως στο WCDMA η παρεμβολή δεν μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφα κατανομημένη χωρικά και αυτό επειδή προσφέρονται διαφορετικές υπηρεσίες δεδομένων με διαφορετικό κέρδος επεξεργασίας.

Το παραπάνω σημαίνει ότι δεν είναι εύκολο να βρεθεί μια απλή αναλυτική σχέση που να υπολογίζει το κέρδος σε χωρητικότητα που προσδίδει μια έξυπνη κεραιά σε ένα WCDMA σύστημα, μιας και είναι πολλά τα σενάρια που εμφανίζονται στην πράξη με χρήστες διαφόρων ρυθμών μετάδοσης.

3.5.1.3. Νέες υπηρεσίες

Με την χρήση των ευφύων κεραιών το δίκτυο θα έχει πρόσβαση σε χωρικές πληροφορίες των χρηστών. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των θέσεων των χρηστών με περισσότερη ακρίβεια απ' ό τι στα υπάρχοντα δίκτυα.

- Αποτελεσματικότερος έλεγχος ισχύος και έξυπνη διαπομπή

Το κέρδος G της εξίσωσης που προσφέρει η έξυπνη κεραία έχει ως συνέπεια τη μείωση του φαινομένου των γρήγορων διαλείψεων. Το λαμβανόμενο σήμα είναι πλέον ισχυρότερο και οι παρεμβολές χαμηλότερες εξαιτίας του φιλτραρίσματος στο πεδίο του χώρου. Όλα τα παραπάνω κάνουν πιο εύκολες τις απαιτήσεις του έλεγχου ισχύος. Οι γρήγορες διαλείψεις και οι περιπτώσεις έντονης σκίασης μπορούν να αναγκάσουν το κινητό να εκπέμψει οριακά υψηλή ισχύ για να πετύχει το απαιτούμενο κατώφλι SINR. Άρα το κέρδος G από μια έξυπνη κεραία βοηθά αποφασιστικά στο να εξομαλυνθεί η κατάσταση και έτσι να οδηγηθούμε σε αποτελεσματικότερο έλεγχο ισχύος.

Οι έξυπνες κεραιές μπορούν να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη θέση ενός χρήστη μέσα σε μια κυψέλη. Οι κεραιές μεταγωγής λοβού μπορούν να μας πληροφορήσουν σε ποιου λοβού την περιοχή κάλυψης ανήκει κάθε χρήστης. Οι πιο εξελιγμένες προσαρμοστικές μέθοδοι είναι σε θέση να δώσουν ακριβέστερες πληροφορίες σχετικά με τη θέση και την ταχύτητα του χρήστη. Όλα αυτά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στη διαπομπή, αφού πλέον θα γνωρίζουμε πότε ένα τερματικό θα διασχίσει το σύνορο δύο κυψελών. Έτσι, η διαπομπή μετατρέπεται από “ήπια” ή “ηπιότερη” σε “έξυπνη διαπομπή”.

Επιπλέον, έχοντας στα χέρια μας πληροφορίες σχετικά με το που βρίσκονται οι χρήστες του δικτύου, μπορούμε να εκχωρήσουμε διαύλους με δυναμικό τρόπο σε κυψέλες που το έχουν ανάγκη, με αποτέλεσμα να αυξήσουμε τη χωρητικότητα του δικτύου.

- Εντοπισμός χρήστη για κλήσεις έκτακτης ανάγκης

Πρόσφατες προδιαγραφές από κυβερνητικά σώματα, οι οποίες αφορούν στον εντοπισμό των χρηστών κινητής τηλεφωνίας όταν αυτοί πραγματοποιούν μια κλήση επείγουσας ανάγκης, έχει στρέψει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας προς τις έξυπνες κεραιές, ανάμεσα σε άλλες προτεινόμενες τεχνικές. Πιο κατάλληλες για αυτό είναι οι προσαρμοστικές κεραιές που παρέχουν πληροφόρηση για τη θέση κάποιου χρήστη στο δίκτυο. Οι κεραιές μεταγωγής λοβού μπορούν να δώσουν και αυτές πληροφορίες σχετικά με τη θέση ενός χρήστη στο δίκτυο και άρα να βοηθήσουν στην επίλυση του προβλήματος.

- Εντοπισμός κλεμμένων τερματικών, οχημάτων, κ.τ.λ.

Και πάλι η υπηρεσία αυτή βασίζεται σε πληροφορίες σχετικά με τη θέση ενός χρήστη μέσα σε μια κυψέλη. Αν κάποιος έχει κλέψει ένα τερματικό και επιχειρήσει να πραγματοποιήσει κλήσεις με αυτό, μπορεί πλέον με τη βοήθεια των έξυπνων κεραιών να συλληφθεί, αφού οι αρχές θα γνωρίζουν το χώρο στον οποίο κινείται. Έτσι, αντί ένα κλεμμένο τερματικό απλά να απενεργοποιείται από το δίκτυο, τώρα είμαστε σε θέση να συλλάβουμε το δράστη. Ακολουθώντας την ίδια λογική, ένα

δίκτυο κινητών επικοινωνιών μπορεί να προσφέρει μια επιπλέον υπηρεσία στους χρήστες του: τον εντοπισμό χαμένων οχημάτων.

- Κοστολόγηση με βάση την περιοχή πραγματοποίησης μιας κλήσης

Εδώ προστίθεται μια τρίτη διάσταση –η θέση του χρήστη– στις ήδη υπάρχοντες δύο διαστάσεις για την κοστολόγηση μιας κλήσης (κοστολόγηση σε σχέση με την ώρα της ημέρας, δηλαδή σε ώρες αιχμής και μη αιχμής). Το παραπάνω, θα δώσει στους παροχείς υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας τη δυνατότητα να ελέγχουν το δίκτυό τους, με το να ενθαρρύνουν στους χρήστες συγκεκριμένους τύπους συμπεριφοράς. Με άλλα λόγια, θα μπορεί ένας χρήστης να επιλέγει τη περιοχή εκείνη (ή τις περιοχές εκείνες) στις οποίες πραγματοποιεί τις περισσότερες κλήσεις και το δίκτυο θα τον ανταμείβει χρεώνοντάς τον λιγότερο όταν καλεί από τις συγκεκριμένες περιοχές.

Στην περίπτωση όμως που θα καλεί από άλλες περιοχές θα πληρώνει και ανάλογο τίμημα, δηλαδή μια πιο αυξημένη κοστολόγηση. Το ερώτημα λοιπόν δεν είναι απλά πώς θα ελαττώσουμε το κόστος μιας κλήσης (αφού αυτό θα προξενούσε περισσότερη κίνηση για το δίκτυο και το ίδιο κέρδος στον παροχέα), αλλά πώς θα βελτιστοποιήσουμε τη χωρητικότητά του δικτύου, με το να χωρίσουμε την περιοχή κάλυψης σε ζώνες υψηλής και χαμηλής κοστολόγησης, δίνοντας έτσι τα ανάλογα κίνητρα στους χρήστες.

3.5.1.4 Βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας

Η βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου SNR κατά ένα παράγοντα G είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί προς αύξηση της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος. Το γεγονός αυτό θα έχει ως άμεση συνέπεια τη μείωση του ρυθμού των λαμβανόμενων ψηφίων, BER. Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να υποστηρίξουμε ένα χρήστη, του οποίου η υπηρεσία απαιτεί ένα δεδομένο κατώφλι BER και που απέχει μια συγκεκριμένη απόσταση από το σταθμό βάσης. Αν στο σταθμό βάσης κάνουμε χρήση μιας έξυπνης κεραίας, τότε για τον ίδιο χρήστη που απέχει την ίδια απόσταση από το σταθμό βάσης είμαστε σε θέση να τον εξυπηρετήσουμε με χαμηλότερο BER και έτσι να του παρέχουμε καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας.

3.5.1.5 Ασφάλεια

Είναι πολύ πιο δύσκολο να παγιδευτεί μία σύνδεση όταν χρησιμοποιούνται ευφυείς κεραίες. Για να παγιδευτεί μια σύνδεση θα πρέπει ο εισβολέας να βρίσκεται στην ίδια κατεύθυνση με τον χρήστη ως προς το σταθμό βάσης.

3.5.1.6 Μειωμένο πρόβλημα διάδοσης πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation)

Το πρόβλημα της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών μπορεί κάπως να ελαττωθεί με τη χρήση στενής ακτίνας κεραίας στο σταθμό βάσης. Η πραγματική μείωση εξαρτάται από το σενάριο και δεν είναι πάντα σημαντική. Παρ' όλο που οι εξισοροποιητές καναλιού και οι δέκτες RAKE χειρίζονται, ακόμα και εκμεταλλεύονται τα συστατικά των πολλαπλών διαδρομών, αυτό δεν είναι το ζητούμενο σε συνδέσεις πολύ υψηλής ταχύτητας. Η ελάττωση του προβλήματος αυτού μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην χαλάρωση των απαιτήσεων στη σχεδίαση modem.

3.6 ΚΟΣΤΟΣ

3.6.1 Παράγοντες κόστους

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα της χρήσης ευφυών κεραιών υπάρχουν επίσης και κάποια μειονεκτήματα και παράγοντες κόστους.

Πολυπλοκότητα πομποδέκτη: Είναι φανερό ότι ο πομποδέκτης μιας ευφυούς κεραιάς είναι πολύ πιο πολύπλοκος από αυτόν ενός παραδοσιακού σταθμού βάσης. Η κεραιά χρειάζεται ξεχωριστές αλυσίδες πομποδεκτών για καθένα από τα στοιχεία της συστοιχίας και ακριβή ρύθμιση πραγματικού χρόνου για καθένα από αυτά.

Επιπροσθέτως η διαδικασία του beamforming της κεραιάς είναι μια υπολογιστικά έντονη διαδικασία, ειδικά στην περίπτωση των προσαρμοσμένων συστοιχιών (AAs). Αυτό σημαίνει ότι ο σταθμός βάσης της ευφυούς κεραιάς θα πρέπει να περιλαμβάνει πολύ ισχυρούς αριθμητικούς επεξεργαστές και συστήματα ελέγχου. Επίσης χρειάζονται αποτελεσματικοί αλγόριθμοι για βελτιστοποίηση πραγματικού χρόνου και παρακολούθηση σήματος.

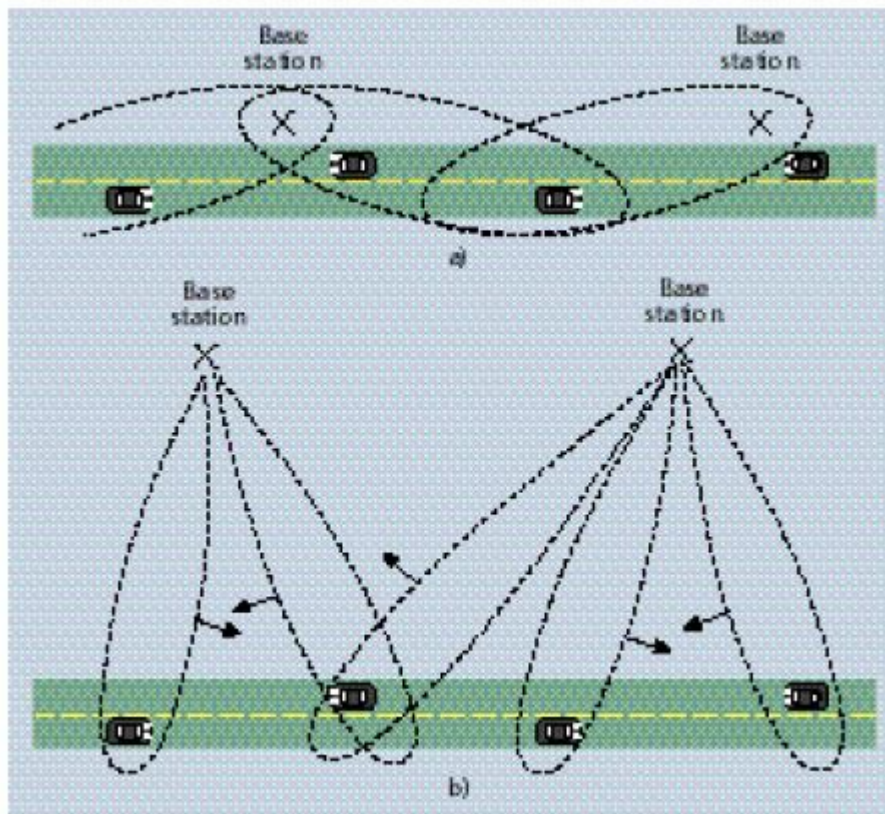
Διαχείριση πόρων: Όταν πρόκειται να εγκατασταθεί μια νέα σύνδεση ή όταν μια υπάρχουσα σύνδεση δίνεται σε έναν νέο σταθμό βάσης, τότε ο νέος σταθμός βάσης δεν έχει κάποια πληροφορία γωνίας και χρειάζεται κάποια μέσα έτσι ώστε να «βρει» τον κινητό σταθμό. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αφήνοντας το σταθμό βάσης να σαρώνει (sweep) την κυψέλη με μια ακτίνα αναζήτησης ψάχνοντας για κάποια νέα σύνδεση ή για κάποιο handover. Μια άλλη πιθανότητα είναι η χρήση κάποιου εξωτερικού συστήματος εύρεσης θέσης, π.χ. GPS. Όσον αφορά το handover υπάρχει και μία τρίτη πιθανότητα : μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το δίκτυο πληροφορίες κατεύθυνσης από την υπάρχουσα κυψέλη, έτσι ώστε να υπάρξει κάποια εκτίμηση ως προς το σε ποια κυψέλη μπορεί να αποδοθεί η σύνδεση.

Το SDMA περιλαμβάνει διάφορους χρήστες οι οποίοι χρησιμοποιούν το ίδιο φυσικό κανάλι στην ίδια κυψέλη και χωρίζονται μόνο κατά γωνία. Όταν υπάρξει κάποια γωνιακή σύγκρουση ανάμεσά τους τότε ένας από αυτούς θα πρέπει να αλλάξει γρήγορα σε κάποιο άλλο κανάλι έτσι ώστε να μην πέσει η σύνδεση. Αυτό σημαίνει ότι σε συστήματα που παρέχουν πλήρες SDMA θα υπάρχουν πολύ περισσότερα ενδοκυψελικά handovers και θα χρειάζεται περισσότερη παρακολούθηση από το δίκτυο σε σχέση με τα συμβατικά CDMA και TDMA συστήματα

Φυσικό μέγεθος: Για να έχει μια ευφυής κεραιά λογικό κέρδος, χρειάζεται μια στοιχειοκεραία με αρκετά στοιχεία. Για εξωτερικά περιβάλλοντα έχουν προταθεί συστοιχίες που αποτελούνται από 6 έως 10, οριζόντια χωριζόμενα, στοιχεία. Η απαραίτητη απόσταση των στοιχείων είναι 0.4-0.5 μήκη κύματος. Αυτό σημαίνει ότι κεραιά 8 στοιχείων θα έχει πλάτος περίπου 1.2 μέτρα στα 900 MHz και 60 εκατοστά στα 2 GHz. Με αυξανόμενη την απαίτηση του κόσμου για λιγότερο ορατούς σταθμούς βάσης, αυτό το μέγεθος, παρ' όλο που δεν είναι υπερβολικό θα μπορούσε να προκαλέσει πρόβλημα

3.6.2 Ράδιο-σχεδιασμός

Για να έχουν οι ευφυείς κεραιές το επιθυμητό κέρδος, θα πρέπει οι σταθμοί βάσης να έχουν τη δυνατότητα να ξεχωρίζουν τους χρήστες σύμφωνα με τη γωνία. Αυτό σημαίνει ότι κάποιες από τις υπάρχουσες στρατηγικές ραδιοσχεδιασμού θα πρέπει να μεταβληθούν. Στα υπάρχοντα δίκτυα οι σταθμοί βάσης τοποθετούνται συνήθως κατά μήκος των δρόμων ταχείας κυκλοφορίας και των σιδηροδρομικών σταθμών. Από την πλευρά μιας ευφυούς κεραιάς είναι πολύ πιο αποτελεσματική η τοποθέτηση του σταθμού βάσης μακριά από τον δρόμο ή τον σιδηρόδρομο. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει εκμετάλλευση της χωρικής διάστασης. Η στρατηγική αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα.



Εικόνα 28– Διαχωρισμός χρηστών ανάλογα με τη γωνία

Ένα άλλο δύσκολο σημείο είναι οι μικρές αστικές κυψέλες με σταθμούς βάσης τοποθετημένους κάτω από το επίπεδο των στεγών. Σε αυτές τις περιπτώσεις το σήμα, τόσο από τους επιθυμητούς χρήστες όσο και από τους παρεμβολείς θα τείνει να φτάνει μέσω των οδών, καθιστώντας δύσκολο το γωνιακό τους διαχωρισμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΡΟΠΩΝ (Method of Moments-MoM)

Εισαγωγικό σημείωμα – Αριθμητικές μέθοδοι

✓ Γιατί είναι χρήσιμη και σημαντική η προσομοίωση σε υπολογιστή προβλημάτων που αφορούν κεραίες και άλλες ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις ;

Είναι γνωστό ότι οι τρόποι για να επιλυθεί ένα πραγματικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει ένας τηλεπικοινωνιακός μηχανικός είναι ουσιαστικά τρεις (χωρίς να αποκλείονται και οι συνδυασμοί τους) :

- η θεωρητική επίλυση χρησιμοποιώντας ως βάση τις εξισώσεις του Maxwell και τις θεωρίες που απορρέουν από αυτές , όπως είναι η γεωμετρική οπτική, η φυσική οπτική, οι εξισώσεις των Sommerfeld και Norton και άλλες μεταγενέστερες
- η πειραματική ανάλυση και μέτρηση του προβλήματος είτε στις πραγματικές συνθήκες είτε σε ιδανικές συνθήκες (ανηχοϊκός θάλαμος)
- η προσομοίωση του προβλήματος με τη βοήθεια υπολογιστή και με τη χρήση κάποιας αριθμητικής μεθόδου

Τα τελευταία χρόνια ο πρώτος τρόπος επίλυσης χρησιμοποιείται όλο και λιγότερο, καθώς τα εναπομείναντα προς λύση προβλήματα μάλλον δεν επιδέχονται αναλυτική λύση κλειστού τύπου καθώς η πολυπλοκότητά τους την καθιστά απαγορευτική.

Η «πειραματική οδός» οδηγεί σε λύση, η οποία όμως είναι συχνά αμφισβητήσιμη λόγω των απρόβλεπτων συνθηκών που μπορούν να ανακύψουν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος σε ανοιχτό χώρο ή των μεγάλων διαφορών με την πραγματική εικόνα αν η μέτρηση πραγματοποιείται σε ανηχοϊκό θάλαμο. Ο κύριος λόγος, όμως, που ο τηλεπικοινωνιακός μηχανικός οφείλει να κάνει χρήση της ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης είναι η μείωση του κόστους της μελέτης και ενδεχομένως του προϊόντος αγοράς. Χωρίς αυτό το εργαλείο, πρέπει να βασιστεί σε εγχειρίδια, εξισώσεις και γραφήματα, τα οποία αφενός έχουν περιορισμένη εφαρμογή, αφετέρου οι περιορισμοί και οι παραδοχές που προϋποθέτουν δεν αντιστοιχούν στο πραγματικό πρόβλημα. Αντιθέτως, ορθή χρήση των εργαλείων προσομοίωσης επιτρέπει στον μηχανικό να κάνει χρήση μιας πλήρους ηλεκτρομαγνητικής λύσης, αντί να αναγκάζεται να καταφεύγει σε απλουστεύσεις.

Η παραπάνω ανάλυση εξηγεί τους λόγους της όλο και μεγαλύτερης χρησιμοποίησης πακέτων που βασίζονται σε κάποια τεχνική προσομοίωσης για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με το σχεδιασμό κεραιών, με τη μελέτη συμπεριφοράς σκεδαστών και ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Οι βασικότερες αριθμητικές μέθοδοι που βρίσκουν εφαρμογή τα τελευταία χρόνια είναι οι εξής:

- η FDTD (Finite-Difference Time-Domain), η οποία βασίζεται σε υπολογισμούς στις τρεις διαστάσεις του χώρου (volume-based) . Οι εξισώσεις του Maxwell μετατρέπονται σε εξισώσεις διαφορών και επιλύονται απευθείας στο πεδίο του χρόνου.
- η Finite Element Method (FEM) , η οποία είναι κι αυτή volume-based . Ο χώρος επίλυσης χωρίζεται σε μικρά, συνήθως τριγωνικά ή τετραεδρικά κομμάτια . Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε κάθε τέτοιο «στοιχείο» (finite element) προσεγγίζεται από πολυώνυμο μικρού βαθμού με άγνωστους συντελεστές.
- η μέθοδος των ροπών (Method of Moments, MoM), η οποία θα χρησιμοποιηθεί μέσω του πακέτου προγράμματος προσομοίωσης SUPERNEC (Super Numerical Electromagnetic Code) για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, γι' αυτό και θα αναλυθεί λεπτομερέστερα.

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος των ροπών (στο εξής για λόγους συντομίας θα αναφέρεται ως MoM) αποτελεί μέρος ενός γενικότερου συνόλου μαθηματικών τεχνικών - όπως έχει ήδη προαναφερθεί - των οποίων ο στόχος είναι να επιλύσουν μια ολοκληρωτική εξίσωση, μετατρέποντας την σε εξίσωση πινάκων, η οποία μπορεί τότε να δοθεί προς επίλυση σε έναν υπολογιστή. Η MoM είναι μία εκ των πιο καλά αναπτυγμένων αριθμητικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρομαγνητική ανάλυση, είναι δε ιδιαίτερος επαρκής για μεταλλικές δομές, αποτελούμενες από λεπτούς αγωγούς (σύρματα) και μεταλλικές επιφάνειες.

Η MoM διαφέρει αρκετά από τις προαναφερόμενες volume-based FDTD και FEM, στο ότι βασίζεται στην ανάλυση και διακριτοποίηση στις δύο διαστάσεις – surface-based method. Πιο συγκεκριμένα, με αυτόν τον όρο υπονοείται ότι μόνο η δομή του αντικειμένου που θέλουμε να μελετήσουμε διακριτοποιείται και μετατρέπεται σε διακριτές ενότητες, η οποίες στη συνέχεια «φορτώνονται» στη μνήμη του υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία. Το γεγονός αυτό κάνει την MoM ιδιαίτερα επιτυχή όσον αφορά προβλήματα τέλεια αγωγικών σκεδαστών, χωρίς την παρουσία ηλεκτρομαγνητικά διαπερατών σωμάτων, όπως διηλεκτρικά ή μαγνητικά υλικά. Επιπλέον, εξαιτίας του ότι η MoM είναι μια τεχνική στο πεδίο των συχνοτήτων, αποτελεί ένα πολύ αποδοτικό εργαλείο ανάλυσης όταν είναι επιθυμητή η απόκριση μιας δομής σε μία και μοναδική συχνότητα ή σε ένα στενό εύρος συχνοτήτων.

Σημείωση: Στο σημείο αυτό, επιστούμε την προσοχή στις δύο αυτές παρατηρήσεις, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη στα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Η διαδικασία που ακολουθεί η MoM συνίσταται σε τέσσερα (4) στάδια:

- διαίρεση της δομής που θα μοντελοποιηθεί σε μια σειρά συρμάτων τμημάτων, των οποίων οι διαστάσεις είναι πολύ μικρότερες του μήκους κύματος

- επιλογή των συναρτήσεων βάσης (basis or expansion functions) που θα αναπαραστήσουν την άγνωστη ρευματική κατανομή, όπως επίσης και των συναρτήσεων δοκιμής (testing or weighting functions)
- συμπλήρωση των στοιχείων του πίνακα και εύρεση της άγνωστης ρευματικής κατανομής πάνω στη δομή
- υπολογισμός με τη βοήθεια των τιμών του ρεύματος του κοντινού, του μακρινού πεδίου και άλλων επιθυμητών χαρακτηριστικών όπως η χαρακτηριστική αντίσταση, η ισχύς, η αποδοτικότητα και άλλα

4.2 ΓΡΑΜΜΙΚΟΙ ΤΕΛΕΣΤΕΣ

Η MoM αποτελεί μια γενική διαδικασία για την επίλυση γραμμικών μαθηματικών εξισώσεων της μορφής:

$$L(u) = g \quad (4.1)$$

όπου ο L είναι γραμμικός τελεστής, στην προκειμένη περίπτωση ολοκληρωτικός, u είναι η άγνωστη συνάρτηση που αναζητούμε, και g η γνωστή διέγερση που αναπαριστά την πηγή ενέργειας του συστήματος. Ως γνωστόν, ένας γραμμικός τελεστής ικανοποιεί την παρακάτω ταυτότητα :

$$L(au_1 + bu_2) = aL(u_1) + bL(u_2) \quad (4.2)$$

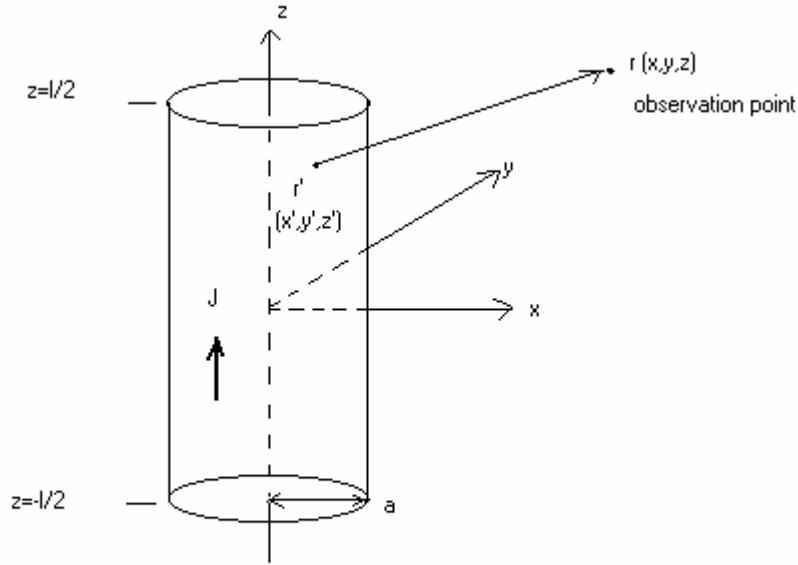
όπου a και b είναι σταθερές και u_1, u_2 ανεξάρτητες συναρτήσεις. Η γραμμικότητα του τελεστή όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά στη συνέχεια είναι απαραίτητη για την επιτυχία της μεθόδου MoM. Στις ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές η γνωστή διέγερση g είναι ως επί το πλείστον ένα επιβαλλόμενο ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο ή ακόμα μία επιβληθείσα πυκνότητα ρεύματος. Η άγνωστη συνάρτηση u είναι συνήθως η ρευματική κατανομή πάνω στη δομή που μελετάται. Έτσι, η εξίσωση που μπορεί να λυθεί από την MoM έχει την παρακάτω μορφή:

$$L(u) = \int uK = g \quad (4.3)$$

Η εξίσωση (4.3) είναι γνωστή ως ολοκληρωτική εξίσωση πρώτου βαθμού , με την έννοια ότι η άγνωστη συνάρτηση u εμφανίζεται μόνο κάτω από το ολοκλήρωμα, η δε συνάρτηση K δεν εξαρτάται από τη δομή που μελετάται αλλά από το χώρο του προβλήματος. Ως γνωστόν, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι αλληλοεξαρτώμενα όπως προκύπτει από τη θεώρηση των εξισώσεων του Maxwell οπότε η επίλυση μιας ολοκληρωτικής εξίσωσης για ένα μόνο από τα δύο πεδία μας οδηγεί στην πλήρη λύση. Το πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην επίλυση της πλέον δημοφιλούς ολοκληρωτικής εξίσωσης για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου E , της εξίσωσης Pocklington.

4.3 ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ POCKLINGTON

Για την εξαγωγή της εξίσωσης Pocklington, ας θεωρήσουμε ένα συρμάτινο τμήμα προσανατολισμένο κατά τον z-άξονα, όπως φαίνεται στο σχήμα (4.1).



Σχήμα 4.1: Επιφανειακό ρεύμα που διαρρέει ένα συρμάτινο τμήμα.

Υποθέτοντας μια ρευματική κατανομή κατά μήκος της συρμάτινης (τέλεια αγωγιμης) επιφάνειας, το διανυσματικό δυναμικό \vec{A} εκφράζεται ως εξής:

$$\vec{A}(r) = \mu \iint_S \vec{J}(r') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dr' \quad (4.4)$$

όπου \vec{J} είναι η επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος και R η απόσταση από το σημείο ολοκλήρωσης πάνω στην επιφάνεια της δομής μέχρι το σημείο παρατήρησης:

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (4.5)$$

Το ηλεκτρικό πεδίο σε κάθε σημείο του χώρου λαμβάνεται από το \vec{A} ως εξής:

$$\vec{E}(r) = -j\omega\vec{A} - j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) \quad (4.6)$$

Υποθέτοντας ότι το ρεύμα ρέει κατά μήκος του σύρματος στη διεύθυνση παράλληλη στον άξονά του, μόνο ο παράγοντας A_z υπάρχει και δίνεται από τη σχέση:

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \int_0^{2\pi} J_z \frac{e^{-jkR}}{R} d\phi' dz' \quad (4.7)$$

οπότε κατά συνέπεια το προκύπτον E_z πεδίο παίρνει την απλούστερη μορφή:

$$E_z = -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} (k^2 A_z + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2}) \quad (4.8)$$

Αντικαθιστώντας την σχέση (1. 7) στην (1.8) λαμβάνουμε:

$$E_z = \frac{-j}{4\pi\omega\epsilon} \int_{-l/2}^{l/2} \int_0^{2\pi} \left(k^2 \frac{e^{-jkR}}{R} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \frac{e^{-jkR}}{R} \right) J_z dz' \quad (4.9)$$

Περαιτέρω απλοποίηση του παραπάνω τύπου επιτυγχάνεται υποθέτοντας ότι η ρευματική κατανομή είναι ομοιόμορφη ως προς ϕ . Η υπόθεση αυτή είναι γνωστή ως «*thin wire approximation*» και ισχύει όταν η ακτίνα του σύρματος-αγωγού α είναι μικρότερη από 0.1λ . Υπό αυτές τις παραδοχές η ρευματική πυκνότητα, J_z δεν έχει πια αζιμουθιακή μεταβολή και η έκφρασή της είναι :

$$J_z = \frac{1}{2\pi\alpha} I_z(z') \quad (4.10)$$

Σε αυτό το σημείο ο παράγοντας I_z υποτίθεται ότι είναι μια ισοδύναμη γραμμική κατανομή ρεύματος πάνω στην επιφάνεια του σύρματος. Περαιτέρω απλοποίηση επιτυγχάνεται παρατηρώντας το πεδίο στον άξονα του σύρματος αντί στην επιφάνειά του και αντικαθιστώντας $R = [\alpha^2 + (z - z')^2]^{1/2}$. Τελικά, λοιπόν η σχέση (1.9) απλοποιείται στην :

$$E_z = \frac{-j}{2\pi\omega\epsilon} \int_{-l/2}^{l/2} \left(k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) G(z, z') I_z dz' \quad (4.11)$$

$$\text{όπου έχουμε θέσει } G(z, z') = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \quad (4.12)$$

Το πεδίο E_z είναι το αποτέλεσμα της ροής του ρεύματος I_z στο συρμάτινο τμήμα. Είναι γνωστό από τη θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού ότι πάνω στην επιφάνεια του αγωγού (και μετά την παραδοχή ισχύος της *thin wire approximation* πάνω στον άξονα του αγωγού) το συνολικό επαπτομενικό ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδενικό, αφού έγινε η υπόθεση ότι το σύρμα είναι τέλεια αγωγίμο. Το συνολικό πεδίο στην επιφάνεια του σύρματος είναι το άθροισμα του πεδίου που προκαλεί το ρεύμα I_z και του προσπίπτοντος πεδίου (επιβαλλόμενου πεδίου) E_z^{inc} , που είναι γνωστή ποσότητα. Έτσι, λαμβάνουμε:

$$E_z = -E_z^{inc} \quad (4.13)$$

Τελικά, λοιπόν, με αντικατάσταση της (1.13) στην (1.11) έχουμε:

$$E_z = \frac{j}{2\pi\omega\epsilon} \int_{-l/2}^{l/2} \left(k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) G(z, z') I_z dz' \quad (4.14)$$

Η εξίσωση (4.4) είναι γνωστή ως «*ολοκληρωτική εξίσωση Pocklington*» και περιγράφει την μεταβολή του ρεύματος που ρέει στην επιφάνεια του σύρματος

δοσμένου ενός προσπίπτοντος ηλεκτρικού πεδίου. Παρατηρώντας τις σχέσεις (4.1) και (4.14) ο ολοκληρωτικός τελεστής που ορίζει την εξίσωση Pocklington δίνεται από την σχέση :

$$L(E) = \frac{j}{2\pi\omega\epsilon} \int_{-l/2}^{l/2} (k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2})G(z, z')Edz' \quad (4.15)$$

και η συνάρτηση διέγερσης στην (1.1) είναι τώρα το E_z^{inc} .

4.4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ MoM

Από τη στιγμή που καθορίζεται ο γραμμικός τελεστής που συσχετίζει την άγνωστη ρευματική κατανομή με το επιβαλλόμενο πεδίο, ο στόχος της MoM είναι να επιλύσει την εξίσωση των τελεστών μετατρέποντάς την σε εξίσωση πινάκων. Η τεχνική MoM απαιτεί τη δημιουργία ενός συστήματος N γραμμικών εξισώσεων με N αγνώστους, εκ των οποίων ο καθένας αναπαριστά το μέτρο του ρεύματος σε ένα συρμάτινο τμήμα.

4.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ

Το πρώτο βήμα στην διαδικασία επίλυσης είναι να περιγραφεί η άγνωστη ρευματική κατανομή στην κατατμημένη συρμάτινη δομή ως ένας γραμμικός συνδυασμός συναρτήσεων με άγνωστες πολλαπλασιαστικές σταθερές όπως στην :

$$I(z) = \sum_{i=1}^N I_i \psi_i(z) \quad (4.16)$$

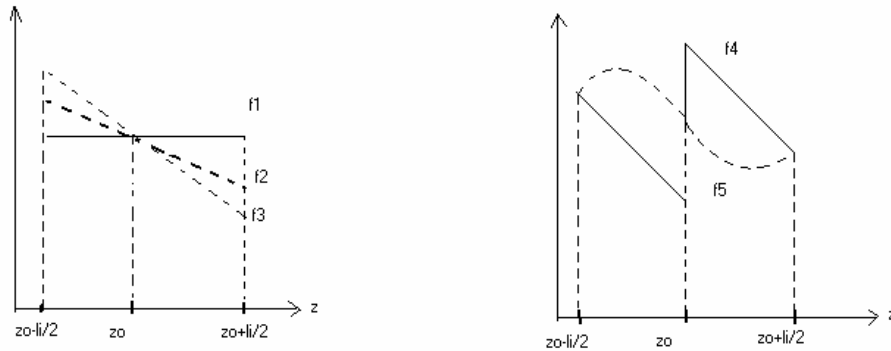
Εδώ, κάθε όρος ψ_i είναι μια συνάρτηση που έχει σκοπό να προσεγγίσει την συμπεριφορά του ρεύματος στο τμήμα i , ενώ I_i είναι μία άγνωστη πολλαπλασιαστική σταθερά. Η διαδικασία που απομένει είναι ο καθορισμός των καταλληλότερων I_i που δίνει την ακριβέστερη προσέγγιση στην ρευματική κατανομή σύμφωνα με κάποιο κριτήριο. Ας ορίσουμε στο σημείο αυτό το σφάλμα υπολοίπου (*Residual Error, RE*) ως εξής :

$$RE = E_z^{inc} - L(I) \quad (4.17)$$

Αν η λύση της εξίσωσης $L(I) = E_z^{inc}$ είναι ακριβής, το σφάλμα υπολοίπου θα είναι μηδενικό. Ο βασικός στόχος – ιδέα της MoM είναι να επιτευχθεί λύση για την $L(I) = E_z^{inc}$ εξαναγκάζοντας το σφάλμα υπολοίπου να γίνει μηδενικό, χρησιμοποιώντας μέσους όρους και βάρη. Με άλλα λόγια, αναζητείται λύση που ικανοποιεί την σχέση (4.17) με κάποιο στατιστικό μέσο όρο. Για να γίνει αυτό, πολλαπλασιάζονται και τα δύο μέλη της (1.17) με το σύνολο των συναρτήσεων δοκιμής (*testing or weighting functions*) w_j , $j=1,2,\dots,N$ και το γινόμενο ολοκληρώνεται σε όλο το μήκος του συρμάτινου τμήματος. Η προαναφερόμενη διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την σχέση:

$$\int_{\alpha}^b REw_j dl = \int_{\alpha}^b [E_z^{inc} - L(I)]w_j dl = 0, \quad j=1,2,\dots,N \quad (4.18)$$

όπου τα α, b δηλώνουν τα άκρα του συρμάτινου αγωγού. Αξίζει να προσέξει κανείς ότι το κριτήριο μέσου όρου που επιβάλλεται εδώ δεν είναι πολύ αυστηρό. Απλά απαιτεί ο μέσος όρος μιας νέας συνάρτησης που ορίζεται ως το σφάλμα υπολοίπου με βάρη (*Weighted Residual Error, WRE*), $[E_z^{inc} - L(I)]w_j$ να είναι μηδέν. Για να δώσει κανείς μια ιδέα για το τί υπονοείται από το μέσο όρο το σχήμα 2 απεικονίζει 5 διαφορετικές συναρτήσεις, f_1 έως f_5 . Προφανώς οι συναρτήσεις είναι διαφορετικές η μία από την άλλη, εντούτοις ο μέσος όρος τους είναι ισοδύναμος.



Σχήμα 4.2: Πέντε διαφορετικές συναρτήσεις με τον ίδιο μέσο όρο

Χρησιμοποιώντας την γραμμικότητα του τελεστή L και αντικαθιστώντας την (4.16) στην (4.18) το δεξί μέλος της (4.18) γίνεται

$$\int_{\alpha}^b [E_z^{inc} - L(\sum_{i=1}^N I_i \psi_i)]w_j dl = 0, \quad j=1,2,\dots,N \quad (4.19)$$

και τελικά :

$$\sum_{i=1}^N I_i \int_{\alpha}^b w_j L(\psi_i) dl = \int_{\alpha}^b w_j E_z^{inc} dl, \quad j=1,2,\dots,N \quad (4.20)$$

Για να γίνουν οι εξισώσεις περισσότερο συμπαγείς και κατανοητές θέτουμε :

$$Z_{ij} = \int_{\alpha}^b L(\psi_i)w_j dl \quad (4.21)$$

$$E_j = \int_{\alpha}^b w_j E_z^{inc} dl \quad (4.22)$$

Τελικά, αντικαθιστώντας τις σχέσεις (4.21) και (4.22) στην (4.20) λαμβάνουμε :

$$\begin{aligned} Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \dots + Z_{1N}I_N &= E_1 \\ Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + \dots + Z_{2N}I_N &= E_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$Z_{N1}I_1 + Z_{N2}I_2 + \dots + Z_{NN}I_N = E_N$$

το οποίο σύστημα μπορεί να εκφραστεί με συμβολισμό πινάκων ως εξής :

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \cdot & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \cdot \\ E_N \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

ή πιο συνεπτυγμένα ως εξής :

$$[Z][I] = [E] \quad (4.25)$$

Αξίζει να επισημανθεί ότι το τελικό σύστημα της εξίσωσης (4.25) θυμίζει το νόμο του Ohm όπου ο $[Z]$ μπορεί να ερμηνευτεί ως ένας πίνακας γενικευμένων συνθέτων αντιστάσεων, ενώ ο πίνακας διεγέρσεων $[E]$ ως ένας πίνακας γενικευμένων τάσεων.

Το κόστος μιας διαδικασίας MoM συνήθως υπολογίζεται συναρτήσει δύο παραμέτρων:

- Η πρώτη είναι ο αριθμός των τμημάτων που απαιτούνται για να επιτευχθεί μια ακριβώς ακριβής λύση (σύγκλιση λύσης) . Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφέρουμε ότι κατά τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων η διακριτοποίηση σε τμήματα γινόταν αυτομάτως από το πρόγραμμα σύμφωνα με την παραπάνω αρχή και σε άμεση συνάρτηση με τη συχνότητα μοντελοποίησης που καθοριζόταν από τον χρήστη ως ίση ή μεγαλύτερη από τη μέγιστη συχνότητα στην οποία χρειαζόταν να προσομοιωθεί η διάταξη (συνήθως το μέγεθος κυμαινόταν από 5 ως 30 τμήματα ανάλογα με την συχνότητα και τον αριθμό των διπόλων).
- Η δεύτερη είναι ο χρόνος που απαιτείται για να συμπληρωθούν τα στοιχεία του πίνακα $[Z]$, διαδικασία σε μεγάλο βαθμό εξαρτώμενη αφενός από το είδος των συναρτήσεων βάσης (basis functions) που χρησιμοποιούνται για το ρεύμα, αφετέρου από το είδος των συναρτήσεων δοκιμής (testing functions), που θα αναλυθούν περαιτέρω ευθύς αμέσως.

4.6 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΗΣ (BASIS AND TESTING FUNCTIONS)

Το προηγούμενο εδάφιο περιέγραψε σε αδρές γραμμές την γενική διαδικασία που υιοθετείται από την MoM για την μετατροπή της εξίσωσης $L(I) = E_z^{inc}$ σε εξίσωση

πινάκων η οποία μπορεί να επιλυθεί από έναν υπολογιστή. Ωστόσο μέχρι στιγμής δεν έχει γίνει λόγος για την επιλογή των συναρτήσεων βάσης και δοκιμής που είναι απαραίτητες για την επίτευξη της λύσης. Σε θεωρητικό επίπεδο, η κλάση των συναρτήσεων που γίνονται δεκτές ως τέτοιες μπορεί να είναι πολύ μεγάλη. Εντούτοις, πρακτικοί και αριθμητικοί λόγοι θέτουν περιορισμούς στο εύρος των συναρτήσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Είναι επίσης πολύ σημαντική η επισήμανση ότι η MoM είναι μια προσεγγιστική αριθμητική μέθοδος η οποία δεν εγγυάται την σύγκλιση ανεξάρτητα από την επιλογή των συναρτήσεων βάσης και δοκιμής.

Σε ότι αφορά τις συναρτήσεις δοκιμής (*weighting or testing functions*) αυτές που υιοθετούνται από το πρόγραμμα προσομοίωσης εξαιτίας της μεγάλης απλότητάς τους είναι οι συναρτήσεις Δέλτα-Dirac $\delta(z'-z_n)$, όπου το z_n αποτελεί το κέντρο του n -οστού συρμάτινου τμήματος. Η επιλογή αυτή αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως μέθοδος *point-matching or collocation*, αφού θέτει με επιτυχία το σφάλμα υπολοίπου σε καθένα από τα κέντρα των συρμάτινων τμημάτων ίσο με μηδέν. Με τις συναρτήσεις Δέλτα-Dirac ως *weighting functions* το τυχαίο στοιχείο του πίνακα $[Z]$ απλοποιείται και γίνεται :

$$Z_{mn} = \int_{-l_i/2}^{l_i/2} G(z_n, z') dz' \quad (4.26)$$

Η μέθοδος point-matching δημιουργεί τα απλούστερα δυνατά στοιχεία του πίνακα $[Z]$. Ωστόσο η ακρίβεια της λύσης σε σημεία διαφορετικά από τα κέντρα των τμημάτων δεν είναι εγγυημένη.

Η απλούστερη επιλογή για τη ρευματική συνάρτηση βάσης είναι μια σειρά παλμικών συναρτήσεων που συντιθέμενες δίνουν μια προσέγγιση της άγνωστης ρευματικής κατανομής που θυμίζει «σκάλα» (*staircase approximation*). Εξαιτίας όμως του ότι παρά την απλότητα τους δεν υιοθετούνται από το πρόγραμμα προσομοίωσης SuperNEC, δεν θα γίνει βαθύτερη ανάλυσή τους (για τον ίδιο λόγο δεν θα αναλυθεί και η μέθοδος Galerkin, στην οποία οι συναρτήσεις βάσης είναι ίδιες με τις συναρτήσεις δοκιμής, παρά το γεγονός ότι είναι η πλέον δημοφιλής) .

Οι αγωγοί στο SuperNEC [1], όπως έχει ήδη προαναφερθεί, μοντελοποιούνται ως ένα σύνολο από μικρά ευθύγραμμα συρμάτινα τμήματα, με το ρεύμα σε κάθε τέτοιο τμήμα να αναπαρίσταται από τρεις όρους: έναν σταθερό, έναν ημιτονικό και ένα συνημιτονικό. Αυτού του είδους η συνάρτηση βάσης πρωτοχρησιμοποιήθηκε από τους Yeh και Mei [2] και αποδείχθηκε ότι οδηγεί ταχύτατα σε σύγκλιση. Έχει δε το πρόσθετο πλεονέκτημα ότι τα πεδία των ημιτονικών ρευμάτων μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά σε κλειστή μορφή. Τα μέτρα των τριών όρων συσχετίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το άθροισμά τους να ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες του ρεύματος και του φορτίου στα άκρα κάθε τμήματος. Πιο συγκεκριμένα, το ρεύμα που διαρρέει το τυχαίο συρμάτινο τμήμα j έχει τη μορφή:

$$f_j(s) = A_j + B_j \sin k(s - s_j) + C_j \cos k(s - s_j), |s - s_j| < \frac{\Delta_j}{2} \quad (4.27)$$

όπου s_j είναι η απόσταση του κέντρου του τμήματος j από το σημείο πάνω στον αγωγό που έχει οριστεί ως αφετηρία, $k = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$, ενώ Δ_j το μήκος του τμήματος j . Από τις τρεις άγνωστες σταθερές οι δύο υπολογίζονται από τις οριακές συνθήκες στα άκρα των τμημάτων και στα σημεία σύνδεσης των τμημάτων για το ρεύμα και το

φορτίο [3], αφήνοντας την τρίτη που σχετίζεται με το πλάτος του ρεύματος να υπολογιστεί από την εξίσωση πινάκων.

4.7 ΕΥΡΕΣΗ ΠΕΔΙΩΝ ΠΟΥ ΔΙΕΓΕΙΡΟΥΝ ΤΑ ΣΥΡΜΑΤΙΝΑ ΤΜΗΜΑΤΑ- THIN WIRE APPROXIMATION

Για να δώσει κανείς μια γενική ιδέα για τον τρόπο με τον οποίο το SuperNEC χρησιμοποιεί την παραπάνω μορφή για να υπολογίσει τα συνεπακόλουθα επιβαλλόμενα πεδία χωρίς να υπεισέλθει σε κουραστικές λεπτομέρειες (οι οποίες άλλωστε εξηγούνται αναλυτικά στο εγχειρίδιο του προγράμματος [3]), αρκεί να επικαλεστεί την **thin wire approximation**. Η ακρίβεια της παραπάνω προσέγγισης για έναν αγωγό ακτίνας a και μήκους Δ εξαρτάται από τους παράγοντες ka και Δ/a . Μελέτες έδειξαν ότι τα σφάλματα της προσέγγισης είναι μικρότερα του 1% εάν $\Delta/a > 8$, και ότι κρατώντας τα μήκη των επιμέρους τμημάτων μικρότερα του 0.1λ η ρευματική κατανομή είναι επαρκής αφού ο παράγοντας ka γίνεται μικρότερος από 0.08. Η πηγή ρεύματος στο συρματινό τμήμα αναπαρίσταται με μία γραμμική πηγή (απείρως λεπτή) που διατρέχει τον άξονα του τμήματος και παρέχει μια σχεδόν σταθερή τιμή I_0 σε όλο το μήκος του (η ισοδύναμη πηγή τάσης θα περιγραφεί λεπτομερέστερα στο αμέσως επόμενο εδάφιο περί μοντελοποίησης πηγών). Ο υπολογισμός του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου γίνεται θέτοντας το υπόψιν τμήμα στο κέντρο ενός κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων για την ευκολία των υπολογισμών.

Θέτοντας λοιπόν :

$$G_0 = \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \quad (4.28)$$

όπου
$$r_0 = [\rho^2 + (z - z')^2]^{1/2} \quad (4.29)$$

και μετά από εκτέλεση αριθμητικών πράξεων προκύπτει ότι οι επαγόμενες ρ και z συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου που προκαλεί η παραπάνω πηγή ρεύματος έχουν την μορφή :

$$E_\rho^f(\rho, z) = \frac{-I_0}{\lambda} \frac{jn\rho}{2k^2} \left[(1 + jkr_0) \frac{G_0}{r_0^2} \right]_{-l/2}^{l/2} \quad (4.30)$$

και

$$E_z^f(\rho, z) = \frac{-I_0}{\lambda} \frac{jn}{2k^2} \left\{ \left[(z - z')(1 + jkr_0) \frac{G_0}{r_0^2} \right]_{-l/2}^{l/2} + k^2 \int_{-l/2}^{l/2} G_0 dz \right\} \quad (4.31)$$

όπου (ρ, z) οι συντεταγμένες του σημείου παρατήρησης που συνήθως τίθεται στην επιφάνεια κάποιου άλλου τμήματος από το εκάστοτε θεωρούμενο, n η κυματική αντίσταση και ο συμβολισμός f υπενθυμίζει το συσχετισμό των παραπάνω συνιστωσών με τις συναρτήσεις βάσης.

4.8 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΗΓΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

Επειδή στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται ιδιαίτερη μνεία για την τροφοδοσία διπολικών κεραιών στο σημείο αυτό θα αναλυθεί με ποιον τρόπο αυτή μοντελοποιείται ώστε να μπορέσει να εφαρμοστεί η MoM. Το πρόβλημα τροφοδοσίας κεραιών έχει τύχει ιδιαίτερης προσοχής και ανάλυσης στη βιβλιογραφία. Μια ιδιαιτέρως λεπτομερής μελέτη για την κατάλληλη μοντελοποίηση της τροφοδοσίας γραμμικής διπολικής κεραιάς έχει δοθεί από τον King [4]. Η πηγή-συνάρτηση δέλτα (*delta-function source*), που υλοποιείται ως ένα απείρως λεπτό, αξονικά κατευθυνόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι κατάλληλο μαθηματικά, αλλά αμφίβολης πρακτικής υλοποίησης. Εφόσον η διέγερση μπορεί να καθοριστεί μόνο σε διακριτά σημεία στο SuperNEC, μία τέτοια πηγή δεν είναι εφικτή.

Ένα χρήσιμο μοντέλο πηγής, είναι, παρόλα αυτά ένα ηλεκτρικό πεδίο καθορισμένο σε ένα και μοναδικό σημείο. Για μία πηγή τάσης V στο τμήμα i , το στοιχείο του διανύσματος διέγερσης που αντιστοιχεί στο εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο στο μέσο του τμήματος i τίθεται :

$$E_i = \frac{V_i}{\Delta_i} \quad (4.32)$$

όπου Δ_i είναι το μέτρο του τμήματος i . Η διεύθυνση του E_i είναι προς το θετικό άκρο της πηγής τάσης έτσι ώστε να ωθεί τα φορτία στην ίδια κατεύθυνση με την πηγή. Το πεδίο στα άλλα σημεία είναι μηδενικό.

Η πραγματική ενεργή τάση είναι το γραμμικό ολοκλήρωμα του επιβαλλόμενου αυτού πεδίου κατά μήκος του αγωγού. Αυτό όμως δεν μπορεί να καθοριστεί εκ των προτέρων διότι το πεδίο είναι γνωστό μόνο στα κέντρα των τμημάτων, αλλά να προσδιοριστεί μετά την εύρεση των ρευμάτων, ολοκληρώνοντας το σκεδαζόμενο πεδίο που παράγεται από το ρεύμα αυτό. Θεωρώντας ίσα μήκη τμημάτων, αυτό το πεδίο, που πρέπει να είναι το αντίθετο του εφαρμοζόμενου πεδίου σε κάθε σημείο του σύρματος, είναι σχεδόν σταθερό κατά μήκος του τμήματος i και πέφτει απότομα στα άκρα του τμήματος. Τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα η τάση στο τμήμα i να είναι περίπου ίση με $\Delta_i E_i$ όπως υπονοείται από την (4.32).

Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η παραπάνω διαδικασία δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε τμήματα διαφορετικού μήκους γιατί τότε τα δύο πεδία δεν είναι απολύτως ίσα. Επειδή όμως για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν ίσα συρμάτινα τμήματα, επελέγη για πηγή διέγερσης η **AFVS** (*Applied Field Voltage Source*) για την οποία ισχύει η παραπάνω ανάλυση (αντί της CSDVS, Current Slope Discontinuity Voltage Source που είναι πιο σύνθετη και ισχύει και για τις περιπτώσεις των άνισων τμημάτων).

Ιδανικά, αυτό το μοντέλο πηγής εφαρμόζει μία τάση V μεταξύ των άκρων του τμήματος τροφοδοσίας. Έτσι, η αντίσταση εισόδου μιας τέτοιας κεραιάς μπορεί να υπολογιστεί ως το πηλίκο του ρεύματος στα άκρα - ή σε περίπτωση έλλειψης συμμετρίας του μέσου όρου των ρευμάτων στα άκρα - προς την εφαρμοζόμενη τάση. Προφανώς, στην περίπτωση αυτή η κανονική expansion για N_s συρμάτινα τμήματα είναι :

$$I(s) = \sum_{j=1}^{N_s} a_j f_j(s) \quad (4.33)$$

όπου οι συναρτήσεις βάσης f_j έχουν ήδη περιγραφεί σε προηγούμενο εδάφιο, έτσι ώστε η κατανομή $I(s)$ να έχει συνεχή τιμή και παράγωγο κατά μήκος των τμημάτων,

όπως επίσης και να ικανοποιεί το νόμο του Kirchhoff και μία συνθήκη για την πυκνότητα φορτίου στις ενώσεις των τμημάτων. Σημειώνεται ότι επιλογή της AFVS φαίνεται πως έχει ως αποτέλεσμα μια σχεδόν ορθογωνική κατανομή πεδίου στην περιοχή της πηγής.

4.9 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Από τη στιγμή που τα στοιχεία των πινάκων έχουν υπολογιστεί και το σύστημα πινάκων (4.25) είναι πλήρως καθορισμένο, το διάνυσμα των ρευμάτων λαμβάνεται αρχικά με την αντιστροφή του πίνακα $[Z]$ και στη συνέχεια με την επίλυση της εξίσωσης :

$$[I] = [Z]^{-1} [E] \quad (4.34)$$

Οι μέθοδοι επίλυσης της (4.34) είναι πολλές και ποικίλες, διαφορετικών βαθμών αποδοτικότητας, εξαρτώμενες από τη μορφή του πίνακα $[Z]$. Η ενδεχόμενη συμμετρία πολλών συρμάτινων δομών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μείωση του χρόνου συμπλήρωσης των στοιχείων του πίνακα, καθώς και του χρόνου επίλυσης της παραπάνω εξίσωσης. Εντούτοις, εν γένει, ο πίνακας $[Z]$ μπορεί να θεωρηθεί γεμάτος.

Για γεμάτους πίνακες, μία επαρκής λύση επιτυγχάνεται συνήθως με τη βοήθεια του αλγορίθμου Gauss-Jordan , ο οποίος φτάνει σε λύση σε χρόνο ευθέως ανάλογο του N^2 , όπου προφανώς N είναι ο αριθμός των αγνώστων. Παρ'όλα αυτά το SuperNEC χρησιμοποιεί μια παραλλαγή, η οποία στην βιβλιογραφία είναι γνωστή ως **Gauss Elimination**. Η βασική ιδέα είναι η παραγοντοποίηση του πίνακα $[Z]$ σε γινόμενο ενός άνω τριγωνικού πίνακα $[U]$ και ενός κάτω τριγωνικού πίνακα $[L]$ έτσι ώστε :

$$[Z] = [L][U] \quad (4.35)$$

Έτσι, η βασική εξίσωση με τους πίνακες παίρνει τώρα την μορφή :

$$[L][U][I] = [E] \quad (4.36)$$

από την οποία η λύση, I , μπορεί να υπολογιστεί σε δύο στάδια :

$$[L][F] = [E] \quad (4.37)$$

και αμέσως μετά :

$$[U][I] = [F] \quad (4.38)$$

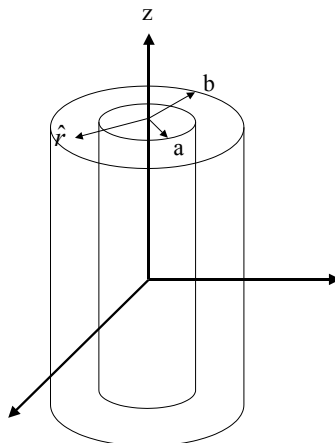
Η εξίσωση (4.37) λύνεται αρχικά ως προς F με τη μέθοδο της εμπρός-αντικατάστασης (forward-substitution), και αμέσως μετά λύνεται η (4.38) ως προς I με τη μέθοδο της πίσω-αντικατάστασης (backward-substitution). Για να αντιληφθεί κανείς το λόγο χρησιμοποίησης αυτής της μεθόδου αρκεί να επισημανθεί ότι για την παραγοντοποίηση του πίνακα $[Z]$ απαιτούνται $1/3N^3$ πολλαπλασιασμοί, ενώ για την αντιστροφή του με τη μέθοδο Gauss-Jordan N^3 , όπου N ο αριθμός των αγνώστων. Η

δε επίλυση των εξισώσεων (4.37) και (4.38) έχει υπολογιστικό κόστος όσο περίπου και ο πολλαπλασιασμός της Z^{-1} με το διάνυσμα E . Επιπλέον, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ύπαρξη οποιοδήποτε είδους συμμετρίας (εκ περιστροφής, εκατέρωθεν επιπέδου) μειώνει δραματικά τον υπολογιστικό χρόνο. Τέλος, σε ότι αφορά το λόγο επίλυσης της παραπάνω εξίσωσης, είναι προφανές ότι έχοντας υπολογίσει την ρευματική κατανομή κατά μήκος όλων των συρμάτινων τμημάτων, το ηλεκτρικό πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου είναι πλήρως καθορισμένο και υπολογίζεται με τη βοήθεια των εξισώσεων (4.4) και (4.6).

4.10 ΑΓΩΓΟΙ ΜΕ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

Στο εδάφιο αυτό θα περιγραφεί το πώς μεταβάλλεται η μορφή των εξισώσεων Maxwell -που ήδη περιγράφηκαν για την περίπτωση του ελεύθερου χώρου- στην περίπτωση διηλεκτρικού και το πώς εφαρμόζεται η μέθοδος των ροπών στην περίπτωση αυτή για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου και της ισχύος απωλειών, δηλαδή αυτής που απορροφά η διάταξη με διηλεκτρική επίστρωση.

Έστω ένα συρμάτινο τμήμα ακτίνας a , καλυμμένο με διηλεκτρικό πάχους $b - a$ και διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_2 , όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3 : Διηλεκτρικά καλυμμένο συρμάτινο τμήμα.

Υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει ρεύμα μαγνήτισης στο εσωτερικό του τμήματος, ισχύει η σχέση :

$$\oint H \cdot dl = \int J \cdot dS \quad (4.39)$$

Έτσι το μαγνητικό πεδίο στο διηλεκτρικό που οφείλεται στο ρεύμα του αγωγού είναι ίσο με :

$$H_\phi 2\pi r = J \quad (4.40)$$

Υποθέτοντας γραμμικό ρεύμα κατά μήκος του άξονα του τμήματος με μορφή $J = I(z')$ έχουμε:

$$H_\phi = \frac{I(z')}{2\pi r} \quad (4.41)$$

Σε ένα διηλεκτρικό (διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_2) ισχύει η εξίσωση :

$$\nabla \times H = j\omega\epsilon_2 E \quad (4.42)$$

Για ένα σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων έχουμε :

$$\nabla \times H_\phi = -\frac{\partial H_\phi}{\partial z} \mathbf{r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} r H_\phi \right) \mathbf{z} \quad (4.43)$$

Παραγωγίζοντας την (4.41) και με την βοήθεια της (4.42) προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις :

$$\nabla \times H_\phi = -\frac{I'(z')}{2\pi r} \mathbf{r} \quad \text{και} \quad E = \frac{-1}{j\omega\epsilon_2} \frac{I'(z')}{2\pi r} \mathbf{r} \quad (4.44)$$

Τώρα, αντικαθιστώντας το διηλεκτρικό με έναν όγκο ισοδύναμων ρευμάτων και χρησιμοποιώντας την (4.44) :

$$J_{eq} = j\omega(\epsilon_2 - \epsilon)E \Rightarrow J_{eq} = -\frac{\epsilon_2 - \epsilon}{\epsilon_2} \frac{1}{2\pi r} I'(z') [u(r - \alpha) - u(r - b)] \mathbf{r} \quad (4.45)$$

Τώρα, είναι απαραίτητη η εύρεση των πεδίων που επάγονται από αυτά τα ισοδύναμα ρεύματα και έτσι το μαγνητικό διανυσματικό και βαθμωτό δυναμικό σε σφαιρικές συντεταγμένες δίνονται από τις δύο ακόλουθες σχέσεις :

$$A(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-\delta}^{\delta} \int_{\alpha}^b \int_0^{2\pi} J_s(r', z', \phi') \frac{e^{-jkr}}{|r - r'|} |r - r'| d\phi' dr' dz' \quad (4.46)$$

$$\phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{-\delta}^{\delta} \int_{\alpha}^b \int_0^{2\pi} \rho_s(r', \phi', z') \frac{e^{-jkr}}{|r - r'|} |r - r'| d\phi' dr' dz' \quad (4.47)$$

Η πυκνότητα φορτίου ρ_s και η πυκνότητα ρεύματος J_s συσχετίζονται με την εξίσωση συνέχειας :

$$\nabla \cdot J_s = -j\omega\rho_s \Rightarrow \rho_s = \frac{j}{\omega} \nabla \cdot J_s \quad (4.48)$$

Εκτός των δύο ασυνεχειών $r = \alpha, r = b$ στην υπόλοιπη περιοχή $a < r < b$ η απόκλιση της πυκνότητας ρεύματος είναι μηδενική, οπότε :

$$\nabla \cdot J_s = 0 \Rightarrow \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r J_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} J_\phi + \frac{\partial}{\partial z} J_z = 0 \quad (4.49)$$

Λόγω κυλινδρικής συμμετρίας ισχύουν :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} J_\phi = 0 \quad \text{και} \quad \frac{\partial}{\partial z} J_z = 0 \quad (4.50)$$

Λόγω των προηγούμενων απλοποιήσεων, επειδή η παράγωγος της βαθμωτής συνάρτησης είναι η συνάρτηση Δέλτα-Dirac και με την βοήθεια της (4.45) που δίνει την πυκνότητα ρεύματος εντός του διηλεκτρικού, η σχέση (4.48) γίνεται :

$$\rho_s = -\frac{j}{\omega} \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon}{\varepsilon_2} \frac{1}{2\pi r} I'(z') [\delta(r-a) - \delta(r-b)] \quad (4.51)$$

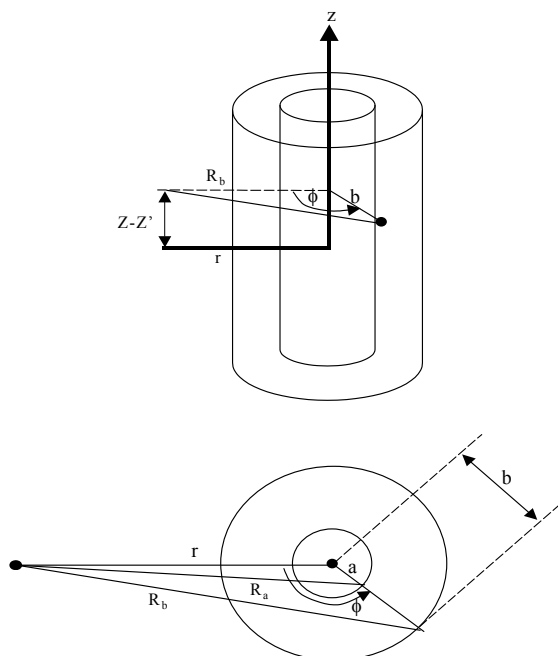
Το δε βαθμωτό δυναμικό από την σχέση (4.47) και αντικαθιστώντας σε αυτήν την (4.51) παίρνει την μορφή :

$$\phi(r, z) = -\frac{j(\varepsilon_2 - \varepsilon)}{8\pi^2 \omega \varepsilon \varepsilon_2} \int_{-\delta}^{\delta} \int_0^{2\pi} I'(z') \left[\frac{e^{-jkR_a}}{R_a} - \frac{e^{-jkR_b}}{R_b} \right] d\phi' dz' \quad (4.52)$$

όπου

$$\begin{aligned} R_a &= [r^2 + a^2 + (z - z')^2 - 2ra \cos \phi']^{1/2} \\ R_b &= [r^2 + b^2 + (z - z')^2 - 2rb \cos \phi']^{1/2} \end{aligned} \quad (4.53)$$

τα οποία διακρίνονται για την διευκόλυνση του αναγνώστη στα παρακάτω σχήματα :



Σχήμα 4.4: Διαγραμματική αναπαράσταση των R_a, R_b .

Το ηλεκτρικό πεδίο πάνω στον άξονα του συρμάτινου τμήματος προκύπτει ως γνωστόν από τα δυναμικά ως εξής :

$$E = -\nabla \phi - j\omega A \quad (4.54)$$

Θεωρώντας το σημείο παρατήρησης πάνω στον άξονα σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε για την thin wire approximation, είναι $r = 0$, οπότε :

$$\begin{aligned} R_a &= (a^2 + (z - z')^2)^{1/2} \\ R_b &= (b^2 + (z - z')^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (4.55)$$

Εξαιτίας της συμμετρίας είναι $A = 0$, οπότε το ηλεκτρικό πεδίο οφείλεται αποκλειστικά στο βαθμωτό δυναμικό, δηλαδή

$$E = -\nabla \phi \quad (4.56)$$

όπου

$$\phi(0, z) = -\frac{j(\varepsilon_2 - \varepsilon)}{4\pi\omega\varepsilon\varepsilon_2} \int_{-\delta}^{\delta} I'(z') \left[\frac{e^{-jkR_a}}{R_a} - \frac{e^{-jkR_b}}{R_b} \right] dz' \quad (4.57)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνουν οι εξής τρεις παραδοχές ώστε να μπορέσει να απλοποιηθεί η παραπάνω εξίσωση :

- i. Τα ka και kb είναι πολύ μικρά.
- ii. Η κύρια συνεισφορά του πεδίου προέρχεται από το μέσο του συρμάτινου τμήματος ($z = z'$).
- iii. Ο όρος $I'(z')$ μεταβάλλεται πολύ αργά και μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερά .

Υπό αυτές τις προϋποθέσεις η εξίσωση (4.56) γίνεται διαδοχικά :

$$\phi(0, z) \approx -\frac{j(\varepsilon_2 - \varepsilon)}{4\pi\omega\varepsilon\varepsilon_2} I'(z') \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{e^{-jkR_a}}{R_a} - \frac{e^{-jkR_b}}{R_b} \right] dz' \Rightarrow \phi(0, z) \approx -\frac{j(\varepsilon_2 - \varepsilon)}{4\pi\omega\varepsilon\varepsilon_2} I'(z') [H_0^2(ka) - H_0^2(kb)] \quad (4.58)$$

Είναι γνωστό ότι για μικρά ορίσματα η συνάρτηση Hankel μπορεί να προσεγγιστεί με τον τύπο :

$$H_0^2(ka) \approx \frac{-2}{\pi} \ln\left(\frac{ka}{2}\right) \quad (4.59)$$

οπότε τελικά το δυναμικό γίνεται :

$$\phi(0, z) \approx \frac{-j(\varepsilon_2 - \varepsilon)}{2\pi\omega\varepsilon\varepsilon_2} I'(z') \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4.60)$$

και με τη σειρά της η z -συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου :

$$E = -\nabla\phi = \frac{j(\varepsilon_2 - \varepsilon)}{2\pi\omega\varepsilon\varepsilon_2} I''(z') \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4.61)$$

Όπως εξηγήθηκε και στο εδάφιο περί των συναρτήσεων βάσης και δοκιμής, οι συναρτήσεις βάσης που χρησιμοποιεί το SuperNEC δίνουν την μορφή για το ρεύμα :

$$I(z') = A + B \sin k(z - z') + C \cos k(z - z') \quad (4.62)$$

οπότε εκτελώντας τις πράξεις, το ηλεκτρικό πεδίο είναι ίσο με :

$$E = \frac{-j(\varepsilon_2 - \varepsilon)k^2}{2\pi\omega\varepsilon\varepsilon_2} (B \sin k(z - z') + C \cos k(z - z')) \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4.63)$$

Τέλος, εκτιμώντας την παραπάνω συνιστώσα στο κέντρο του συρμάτινου τμήματος (**match point**) ισχύει :

$$E = \frac{-j(\varepsilon_2 - \varepsilon)k^2}{2\pi\omega\varepsilon\varepsilon_2} C \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4.64)$$

Είναι αξιοσημείωτο ότι τα πεδία εκτός διηλεκτρικού βρέθηκαν να είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερα από το πεδίο επί του άξονα και γι' αυτό το λόγο αγνοούνται.

Είναι επίσης γνωστό ότι η συνολική ισχύς που απορροφάται από το διηλεκτρικό στρώμα και άρα αποτελεί την ισχύ απωλειών της διάταξης είναι το ολοκλήρωμα σε

όλο τον όγκο του μεγέθους : $\frac{\sigma_2 |E_r|^2}{2}$, όπου σ_2 η ειδική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού και η ακτινική συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου είχε υπολογιστεί στην εξίσωση (4.44). Έτσι, εκτελώντας τις πράξεις προκύπτει ότι :

$$P_{loss} = \frac{1}{8\pi^2 \omega^2 \varepsilon_0^2} \int_{-\delta}^{\delta} \frac{\sigma_2 |I'(z')|^2}{\varepsilon_2^2 r^2} dz' \quad (4.65)$$

όπου προφανώς :

$$I'(z') = k(B \cos k(z - z') - C \sin k(z - z'))$$

Τελικά λοιπόν η ισχύς απωλειών δίνεται από τον τύπο :

$$P_{loss} = \frac{k^2 \sigma}{8\pi \omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_2^2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \left[(|B|^2 + |C|^2) \delta + (|B|^2 - |C|^2) \frac{\sin k\delta}{\delta} \right] \quad (4.66)$$

όπου θυμίζουμε ότι οι συντελεστές B, C υπολογίζονται από τις οριακές συνθήκες και από την γνωστή εξίσωση πινάκων που επιλύεται με την βοήθεια του υπολογιστή κατά την MoM.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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

Ο τομέας της σχεδίασης ασύρματων κεραιοών παρουσιάζει πολλές προκλήσεις. Για παράδειγμα, 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 κεραιοών, 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 είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ο οποίος έχει εμπνευστεί από τους γνωστούς βιολογικούς μηχανισμούς της γενετικής και της εξέλιξης. Η γενετική είναι η επιστήμη που μελετάει την κληρονομικότητα και τις παραλλαγές των βιολογικών γνωρισμάτων. Ο μηχανισμός της εξέλιξης 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. Η είσοδος της αντικειμενικής συνάρτησης είναι ένα χρωμόσωμα (chromosome). 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:

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

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:

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

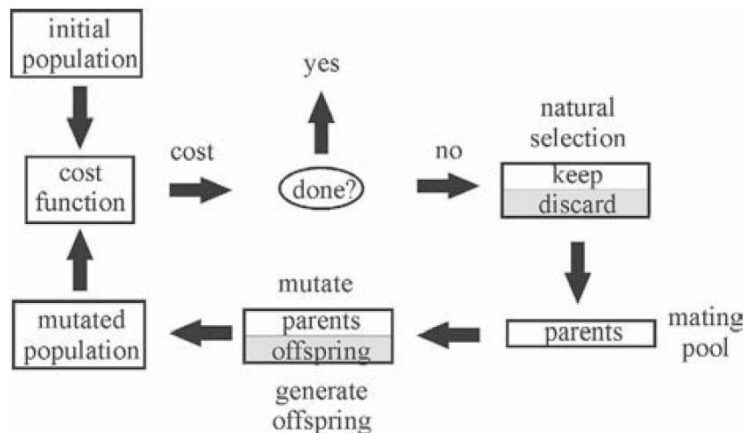
Το κόστος είναι αυτό που καθορίζει την καταλληλότητα (fitness) ενός μέλους στον πληθυσμό. Ένα χαμηλότερο κόστος υπονοεί μεγαλύτερο fitness.

Οι διαδικασίες ΓΑ λειτουργούν μόνο με αριθμούς. Κατά συνέπεια, στις μη αριθμητικές τιμές, όπως ένα χρώμα ή μια άποψη, πρέπει να οριστεί ένας αριθμός. Συχνά, 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 βασικά βήματα:

- Δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού.
- Αξιολόγηση του fitness κάθε χρωμοσώματος του πληθυσμού.
- Χρήση του μηχανισμού φυσικής επιλογής (natural selection).
- Επιλογή των χρωμοσωμάτων για το ζευγάρι (mating).
- Παραγωγή των απογόνων (offspring).
- Μετάλλαξη των επιλεγμένων χρωμοσωμάτων.
- Ολοκλήρωση της διαδικασίας ή επιστροφή στο 2^ο βήμα.

Τα βήματα αυτά αναπαρίστανται γραφικά στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 29 - Διάγραμμα ροής ενός γενετικού αλγόριθμου

5.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΡΧΙΚΟΥ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ

Ο αρχικός πληθυσμός είναι η μήτρα εκκίνησης των χρωμοσωμάτων. Κάθε σειρά είναι μια τυχαία «εικασία» 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. Εάν χρησιμοποιούνται δυαδικοί αριθμοί, τότε η μήτρα πληθυσμών παράγεται μέσω της εντολής:

$$pop = \text{round}(\text{rand}(npop, nvar * nbits))$$

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 ($npop = 8$, $nvar = 4$, $nbits = 3$):

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

5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ (FITNESS)

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

$$cost = \text{fun}(pop)$$

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:

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

Κατά συνέπεια, 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 αντί για τον πληθυσμό με τις συνεχείς τιμές χρησιμοποιηθεί αυτός με τις δυαδικές, τότε οι δυαδικές τιμές μετατρέπονται σε συνεχείς με την εξής εντολή:

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

Εάν τα όρια x_{hi} και x_{lo} είναι και πάλι 5 και -5 αντίστοιχα, τότε το πρώτο χρωμόσωμα θα έχει τις τιμές:

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

Μερικές φορές, 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 πρέπει να κληθεί πολλές φορές για να αξιολογήσει το κόστος όλων των μελών των πληθυσμών, 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, για την μεγιστοποίηση 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 αποδίδει ιδιαίτερα οφέλη στην συνέχεια.

Συχνά, η συνάρτηση κόστους πρέπει να ικανοποιήσει περισσότερους από έναν στόχους. Για παράδειγμα, το κέρδος κεραιών μπορεί να μεγιστοποιηθεί ενώ συγχρόνως, να ελαχιστοποιείται και ο όγκος της κεραίας. Αυτός ο τύπος προβλήματος είναι γνωστός ως βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων (multiple-objective optimization). Ένας κοινός τρόπος αντιμετώπισης προβλημάτων πολλαπλών στόχων είναι να τυποποιηθεί 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 είναι:

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

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

5.4 ΦΥΣΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ

Μόνο τα καταλληλότερα μέλη του πληθυσμού (αυτά με το μεγαλύτερο fitness), έχουν την δυνατότητα να επιζήσουν στην επόμενη γενιά. Υπάρχουν δύο κοινοί τρόποι να επικαλεσθεί η φυσική επιλογή. Ο πρώτος είναι να κρατηθεί ένα αριθμός, ίσος με *natsel*, από υγιή χρωμοσώματα και να απορριφθούν τα υπόλοιπα. 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 πριν την ταξινόμηση τα κόστη. 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 εξής:

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

Ο δεύτερος τρόπος εφαρμογής του μηχανισμού της φυσικής επιλογής είναι ο αποκαλούμενος ως *thresholding*. Σε αυτόν, 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* παραλείπεται το στάδιο ταξινόμησης. Μερικές εναλλακτικές λύσεις για το *maxcost* μπορεί 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 οι γονείς (*parents*) για να δημιουργήσουν τον απόγονο (*offspring*).

5.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΖΕΥΓΑΡΩΜΑΤΟΣ

Τα πιο κατάλληλα μέλη του πληθυσμού ορίζεται να έχουν την υψηλότερη πιθανότητα επιλογής για ζευγάρισμα (mating). 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).

5.5.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΡΟΥΛΕΤΑΣ

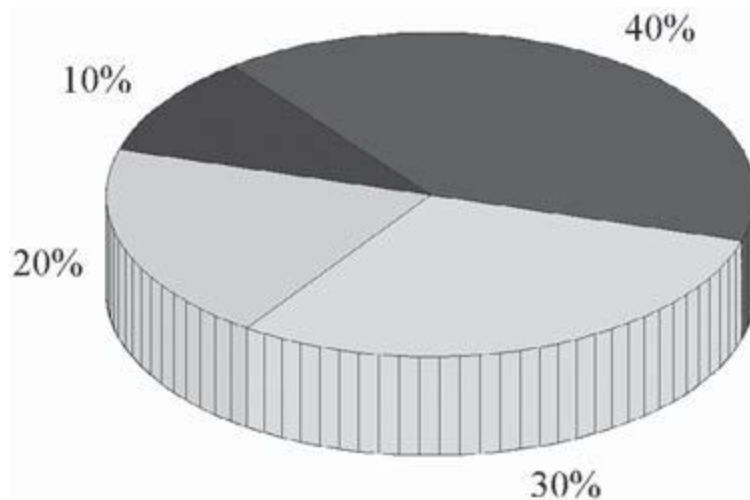
Ο πληθυσμός πρέπει πρώτα να ταξινομηθεί για την μέθοδο της ρουλέτας. Για κάθε χρωμόσωμα ορίζεται μια πιθανότητα επιλογής βάσει είτε της σειράς του στον ταξινομημένο πληθυσμό είτε του κόστους του. Η επιλογή βάσει της σειράς ταξινόμησης είναι η ευκολότερη υλοποίηση της μεθόδου της ρουλέτας. Ο κώδικας MATLAB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

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

Όταν είναι $natsel=4$, οι παραπάνω εντολές MATLAB έχουν το εξής αποτέλεσμα:

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

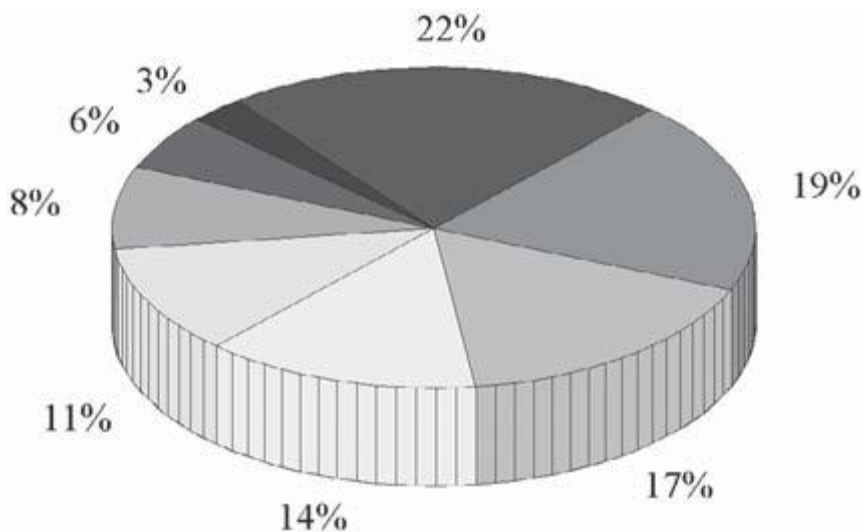
Η ρουλέτα για μια ομάδα επιλογής τεσσάρων γονέων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα χρωμοσώματα με το χαμηλότερο κόστος έχουν υψηλότερη πιθανότητα επιλογής από τα χρωμοσώματα με το υψηλότερο κόστος. Σε αυτήν την περίπτωση, το πρώτο (ή καλύτερο) χρωμόσωμα έχει μια πιθανότητα 40% να επιλεγεί.



Εικόνα 30 - Η ρουλέτα για μια ομάδα επιλογής 4 γονέων

Όσο περισσότεροι γονείς προστίθενται, η πιθανότητα επιλογής ενός χρωμοσώματος αλλάζει. Για παράδειγμα, το επόμενο σχήμα παρουσιάζει μια ρουλέτα για οκτώ γονείς στην δεξαμενή ζευγαρώματος.

Σε αυτήν την περίπτωση, το καλύτερο το χρωμόσωμα έχει μια πιθανότητα 22% να επιλεγεί. Η ρουλέτα χρειάζεται να υπολογιστεί μόνο μία φορά, δεδομένου ότι ο αριθμός των γονέων στην δεξαμενή ζευγαρώματος παραμένει σταθερός από γενιά σε γενιά.



Εικόνα 31 - Η ρουλέτα για μια ομάδα επιλογής 8 γονέων

Είναι δυνατό να αναπτυχθεί μια ρουλέτα βάσει των κόστων που συνδέονται με τα χρωμοσώματα. Υπάρχουν διάφορα προβλήματα σχετικά με αυτήν την προσέγγιση:

- 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.

Κατά συνέπεια, συστήνεται η επιλογή βάσει της ταξινομημένης σειράς, παρά μια προσέγγιση βασισμένη στα κόστη.

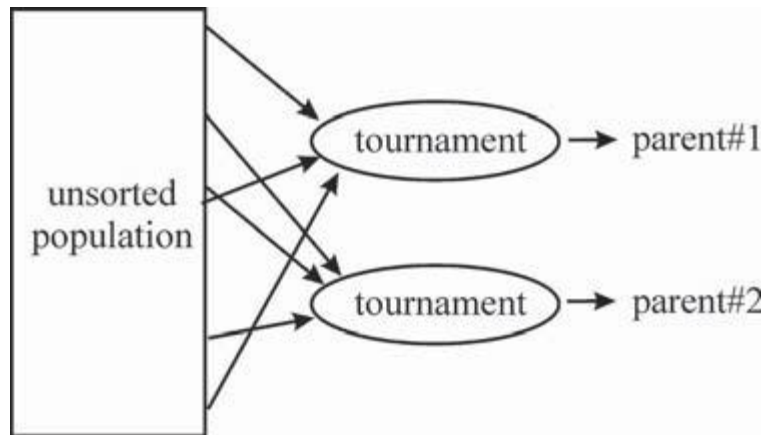
Αφού οριστεί η πιθανότητα της επιλογής για κάθε γονέα, τότε παράγεται ένας τυχαίος αριθμός r . Για την δεξαμενή ζευγαρώματος τεσσάρων γονέων, το χρωμόσωμα που επιλέγεται είναι βασισμένο στην τιμή του r και σύμφωνα με τις παρακάτω συνθήκες:

$$\begin{aligned} 0 \leq r \leq 0.4 & \quad chrom_1 \\ 0.4 < r \leq 0.7 & \quad chrom_2 \\ 0.7 < r \leq 0.9 & \quad chrom_3 \\ 0.9 < r \leq 1.0 & \quad chrom_4 \end{aligned}$$

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

5.5.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΟΥΡΝΟΥΑ

Μια δεύτερη προσέγγιση για την εύρεση των γονέων, επιλέγει τυχαία 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. Αρκετά από αυτά τα πρωταθλήματα ή τουρνουά (tournaments) κρατιούνται 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. Η ταχύτητα ταξινόμησης γίνεται ζήτημα μόνο σε περίπτωση μεγάλων πληθυσμών. Το διάγραμμα 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.



Εικόνα 32 - Ένα παράδειγμα της μεθόδου επιλογής τουρνουά

5.6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟΓΟΝΩΝ

Ο απόγονος μπορεί να παραχθεί από τους επιλεγμένους γονείς με ένα αριθμό 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. Η μάσκα έχει 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. Με έναν παρόμοιο τρόπο, 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
```

Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί μια μάσκα και για τα μη δυαδικά χρωμοσώματα. Στην προσέγγιση 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 β 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:

$$offspring1 = 0.5 * mother + 0.5 * father$$

$$offspring2 = 1.5 * mother - 0.5 * father$$

$$offspring3 = -1.5 * mother + 0.5 * father$$

Μόνο δύο από τις τρεις κρατιούνται τελικά. Οποιαδήποτε τιμή έξω από τους περιορισμούς απορρίπτεται. Η ευριστική διασταύρωση (heuristic crossover) είναι μια παραλλαγή όπου κάποιος τυχαίος αριθμός β 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 β για κάθε μεταβλητή. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την 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 β . Η δευτεροβάθμια διασταύρωση (quadratic crossover) εκτελεί μια δευτεροβάθμια παρεμβολή (quadratic interpolation) του κόστους ως συνάρτηση κάθε μεταβλητής. Τρεις γονείς και τα κόστη τους είναι απαραίτητοι για να την μέθοδο αυτή. 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:

$$\text{mother} = [m_1 m_2 \cdots m_q \cdots m_{nvar}]$$

$$\text{father} = [f_1 f_2 \cdots f_q \cdots f_{nvar}]$$

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

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

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

Εάν έχει επιλεγθεί η πρώτη μεταβλητή των χρωμοσωμάτων, τότε μόνο οι μεταβλητές δεξιά της επιλεγμένης μεταβλητής ανταλλάσσονται. Από τη άλλη μεριά, αν έχει επιλεγθεί 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, θεωρούμε τους ακόλουθους δύο γονείς:

$$\text{mother} = [1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6]$$

$$\text{father} = [3 \quad 2 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 2]$$

Αν η διασταύρωση γίνει με ένα τυχαίο β (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 0.85433 1.8543 2.8543]

```

Αν το β 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=[2.3917 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]

```

Αν 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=-.5*chrom1+1.5*chrom2
chrom5=[4 2 0 -2 -1 0]

```

Αν χρησιμοποιηθεί ευριστική διασταύρωση, το αποτέλεσμα θα είναι το εξής:

```

b=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]

```

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

```

a=round(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]

```

5.7 ΜΕΤΑΛΛΑΞΗ

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

```
pop(mutindx)=abs(pop(mutindx)-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(mutindx)=rand(1,nmut);
```

Αυτή η προσέγγιση κρατά όλες τις τιμές των μεταβλητών μέσα στα αποδεκτά όρια. 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.

5.8 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Αυτή 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.

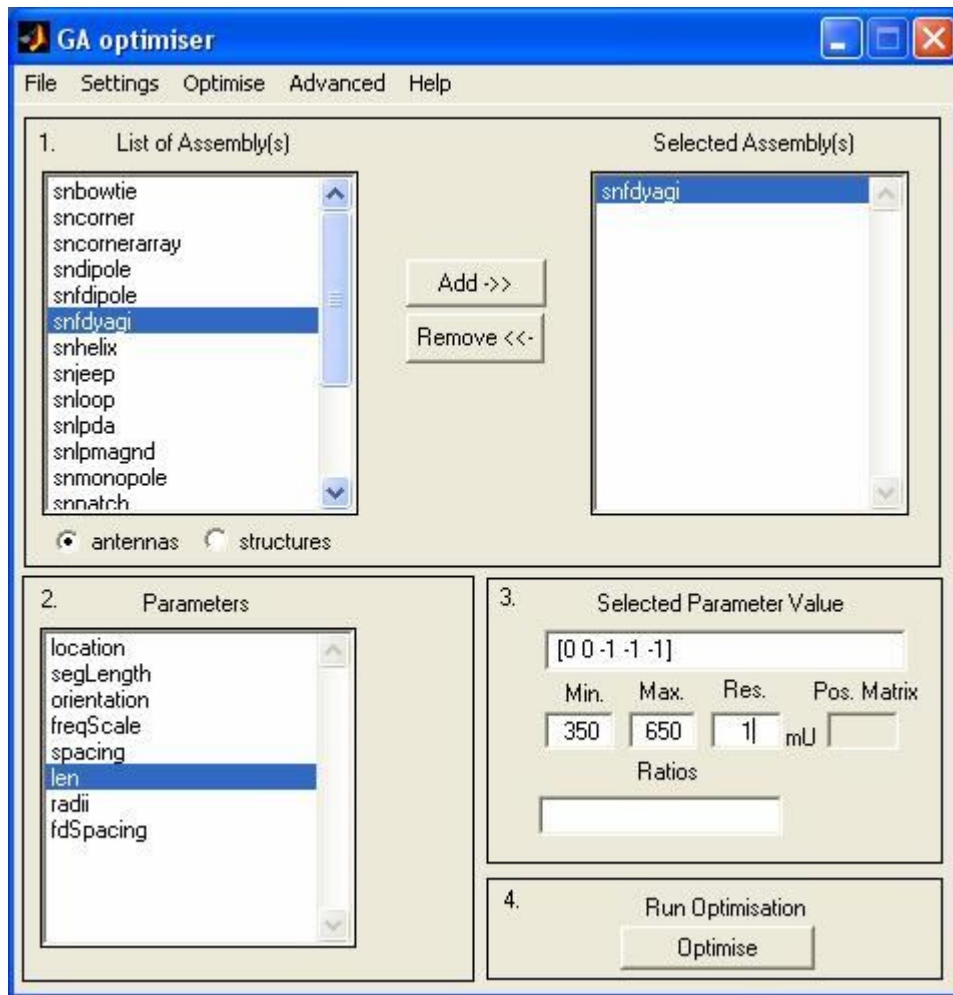
Αυτές οι διαδικασίες οδηγούν τελικά σε έναν πληθυσμό χρωμοσωμάτων που είναι διαφορετικός από αυτόν της πρώτης γενιάς. Γενικά το μέσο fitness των χρωμοσωμάτων θα έχει αυξηθεί από αυτήν την διαδικασία, δεδομένου ότι μόνο τα καλύτερα χρωμοσώματα από την προηγούμενη γενιά επιλέγονται για την αναπαραγωγή.

5.9 ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ 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.

5.9.1 GA INPUT GUI (GRAPHICAL USER INTERFACE)

Η ρύθμιση των παραμέτρων της βελτιστοποίησης στο SuperNEC γίνεται μέσω του GA Input GUI (γραφική διεπαφή χρήστη). Η μορφή του GA Input GUI φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



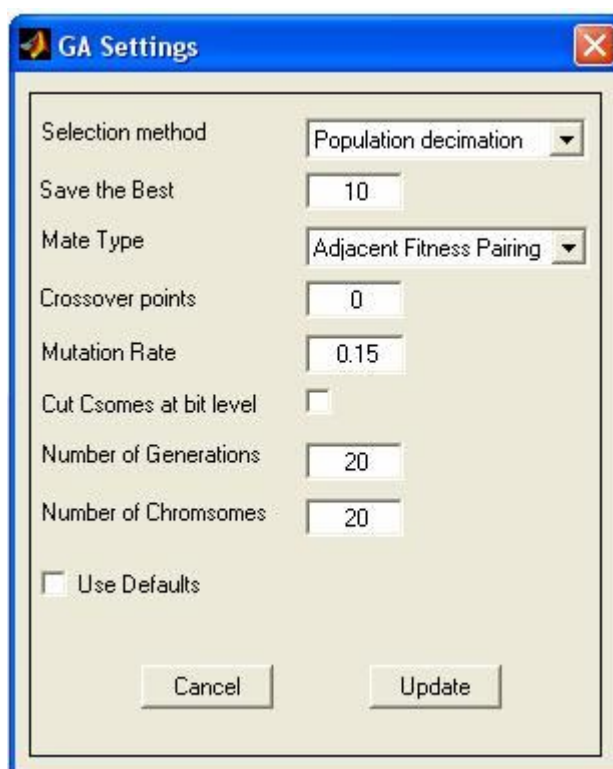
Εικόνα 33 - Το GA Input GUI του SuperNEC

Για να εισαχθεί μία διάταξη (assembly) στο μοντέλο βελτιστοποίησης, επιλέγεται από την αριστερή λίστα και πατιέται το κουμπί ADD. Για τον καθορισμό των παραμέτρων βελτιστοποίησης, επιλέγεται η επιθυμητή παράμετρος του assembly από τη λίστα Parameters κάτω αριστερά και στην συνέχεια, για την επιλεγμένη παράμετρο, καθορίζονται οι 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. Η μία είναι οι ανεξάρτητες παράμετροι, οι οποίες καθορίζονται με ένα μηδενικό ή έναν οποιοδήποτε αρνητικό ακέραιο αριθμό στο πεδίο Selected Parameter Value. Η άλλη είναι οι εξαρτημένες παράμετροι, οι οποίες καθορίζονται με έναν αρνητικό δεκαδικό αριθμό στο ίδιο πεδίο και κάποια τιμή στο πεδίο Ratios, η οποία καθορίζει τον σταθερό λόγο εξάρτησης της εξαρτημένης παραμέτρου.

5.9.1.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ 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 επόμενο σχήμα. Σε αυτό ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει τις δικές του ρυθμίσεις για τις εξής παραμέτρους:



Εικόνα 34 - 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. Αυτοί οι μηχανισμοί επιλογής, 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 εξάλλου 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. Αυτή η τεχνική 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 χρωμοσώμα 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 $[0,1]$. Πιο 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. Από κει και πέρα, αν για παράδειγμα θέσει ο χρήστης 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 χρωμοσώμα. Αν θέσει την τιμή 1, τότε θα γίνει μετάλλαξη σε όλα τα χρωμοσώματα.

Cut Csomas at bit level:

Αν το πεδίο αυτό είναι τικαρισμένο, 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:

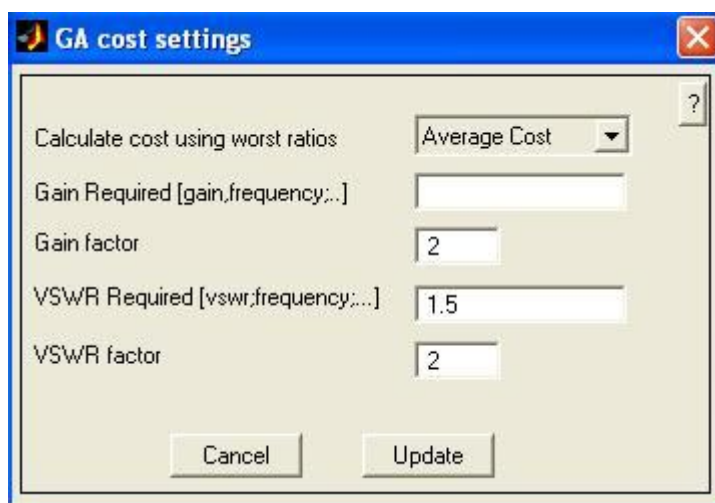
Στο πεδίο αυτό καθορίζεται ο ακέραιος αριθμός των γενιών που θα δημιουργηθούν για να ολοκληρωθεί η διαδικασία του γενετικού αλγορίθμου.

Number of Chromosomes:

Σε αυτό το πεδίο καθορίζεται ο ακέραιος αριθμός των χρωμοσωμάτων που θα αποτελούν τον πληθυσμό για κάθε γενιά.

5.9.1.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ GA COST SETTINGS

Αφού καθοριστούν οι βασικές ρυθμίσεις του γενετικού αλγορίθμου, το επόμενο βήμα 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 επόμενο σχήμα. Σε αυτό ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει τις δικές του ρυθμίσεις για τις εξής παραμέτρους:



Εικόνα 35 - 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 default 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:

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

Gain Required:

Στο πεδίο αυτό καθορίζεται το απαιτούμενο κέρδος σε db για κάθε συχνότητα στην οποία θα γίνει βελτιστοποίηση.

Gain factor:

Σε αυτό το πεδίο καθορίζεται ο εκθέτης gFactor της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους.

VSWR Required:

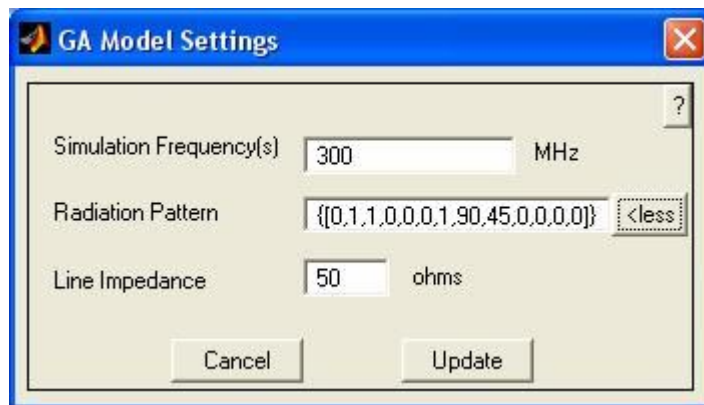
Στο πεδίο αυτό καθορίζεται ο απαιτούμενος λόγος στάσιμων κυμάτων στην γραμμή μεταφοράς ή VSWR (Voltage Standing Wave Ratio). Για τέλεια προσαρμογή η τιμή του VSWR πρέπει να είναι ίση με 1, ενώ γενικά αποδεκτές είναι τιμές κάτω από 2.

VSWR factor:

Σε αυτό το πεδίο καθορίζεται ο εκθέτης vFactor της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους.

5.9.1.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ 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 επόμενο σχήμα.



Εικόνα 36 - 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 παραπάνω σχήμα, 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:

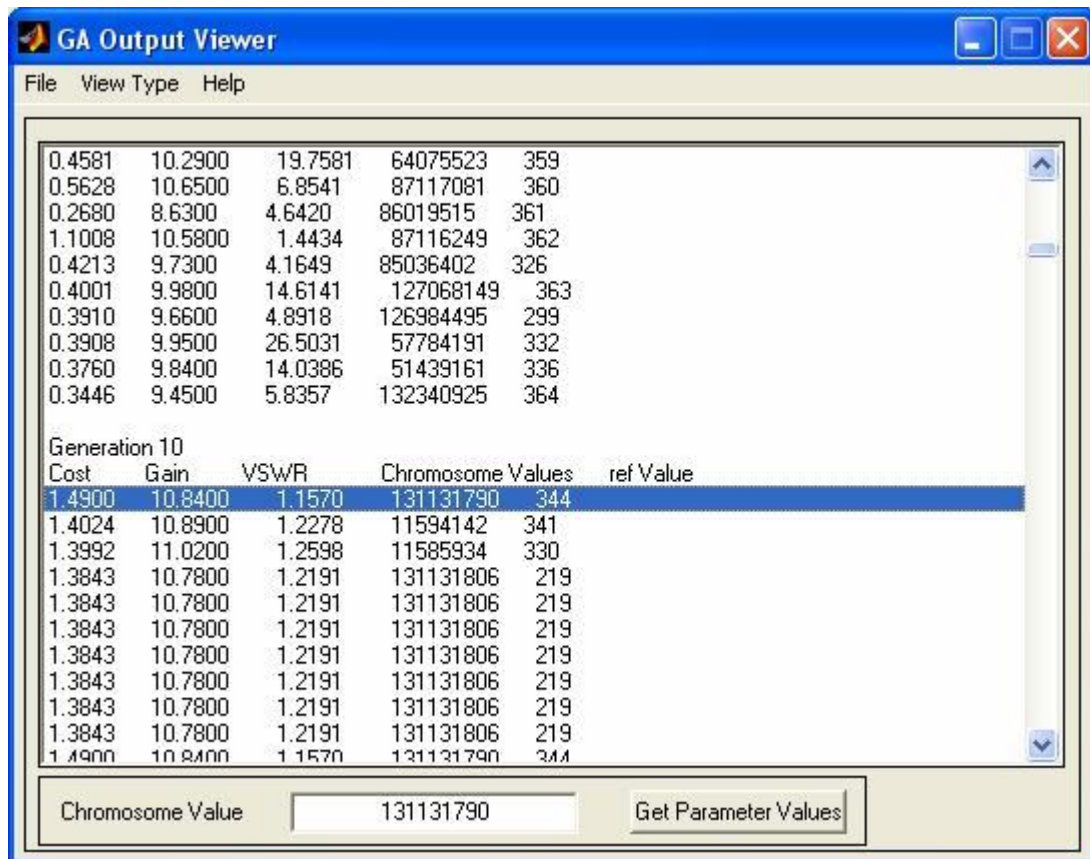
Σε αυτό το πεδίο καθορίζεται η τιμή της αντίστασης της γραμμής μεταφοράς. Οι πιο συνηθισμένες τιμές είναι τα 50Ω και τα 75Ω .

5.9.2 GA ALGORITHM OUTPUT

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας 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.

5.9.2.1 GA OUTPUT GUI

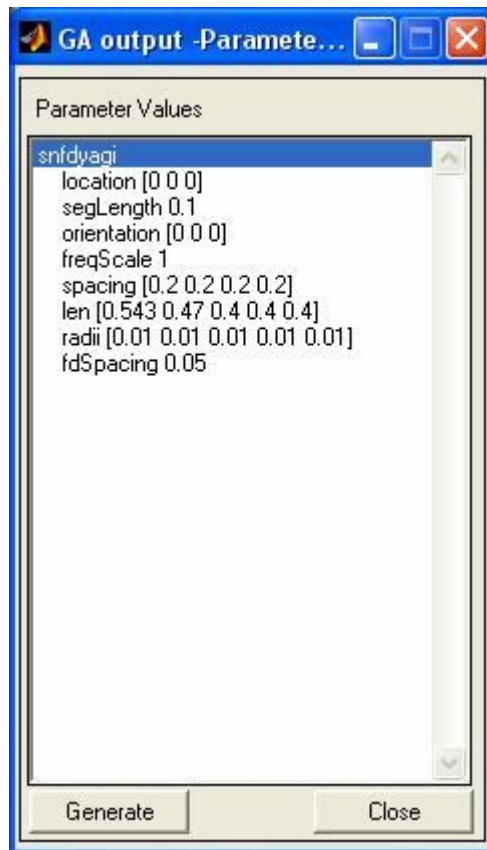
Με το GA Output GUI, το οποίο αποκαλείται GA Output Viewer, μπορεί ο χρήστης να δει τις πληροφορίες που υπάρχουν στο αρχείο *.cgv.mat, δηλαδή όλα τα χρωμοσώματα που δημιουργήθηκαν από τον αλγόριθμο, καθώς και τις επιμέρους πληροφορίες για το καθένα απ' αυτά. Η μορφή του GA Output Viewer φαίνεται στο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



Εικόνα 37 - Η μορφή του GA Output Viewer

Εάν στον Output Viewer είναι ενεργοποιημένη η επιλογή View entire file, η οποία είναι εξάλλου και η default 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 του επόμενου σχήματος. Σε αυτό, μπορεί ο χρήστης να πατήσει το πλήκτρο Generate κάτω αριστερά, κάτι που θα προκαλέσει το άνοιγμά ενός νέου παραθύρου του SuperNEC, στο οποίο θα έχει παραχθεί η δομή του χρωμοσώματος, με τις αντίστοιχες παραμέτρους του.



Εικόνα 38 - Το παράθυρο GA Output

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

SUPERNEC

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 τελευταίο 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, δηλαδή του SuperNEC, είναι η πολύ βελτιωμένη απόδοση όσον αφορά τον χρόνο εκτέλεσής της προσομοίωσης. Για παράδειγμα, για ένα πρόβλημα με 3285 τμήματα (segments) που οργανώθηκε σε έναν επεξεργαστή Power2 66 MHz, η προσομοίωση διήρκεσε 38 λεπτά χρησιμοποιώντας τον κώδικα C++ και 2,36 ώρες χρησιμοποιώντας τον κώδικα FORTRAN. Κατά συνέπεια, 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 λογικό να είναι ακόμα μεγαλύτερο σε πιο σύνθετα 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.

6.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Το 1989 το πρόγραμμα FORTRAN, NEC-2, τροποποιήθηκε για να λειτουργήσει παράλληλα σε ένα δίκτυο transputers. Κατά τη διάρκεια αυτού του προγράμματος, 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, και ακόμα υψηλότερες αποδοτικότητες επιτεύχθηκαν για το διάγραμμα ακτινοβολίας και τους υπολογισμούς κοντινού πεδίου. Υπό 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++.

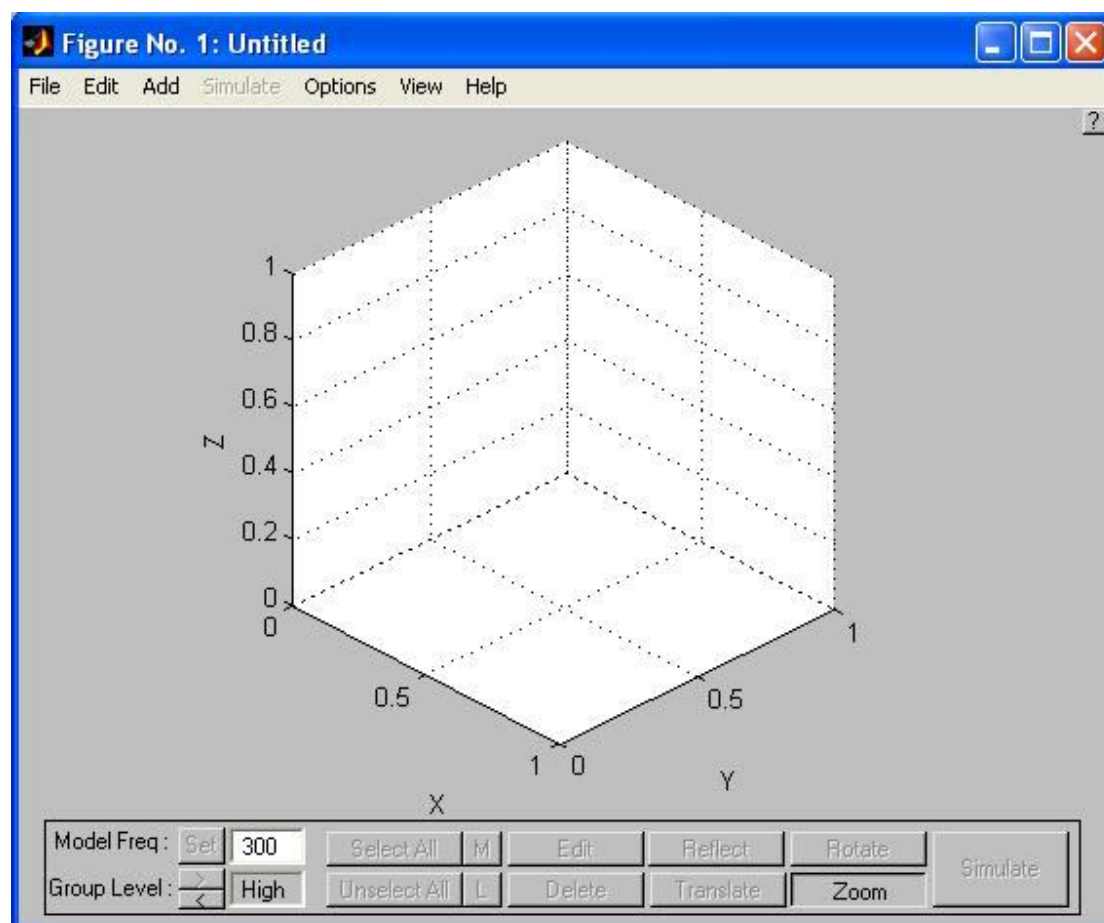
6.3 ΤΑ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ SUPERNEC

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

- 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.

6.4 INPUT USER INTERFACE

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



Εικόνα 39 - Το SuperNEC input user interface

Η δομή που επιθυμεί κάποιος 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): Πρόκειται για μικρά κομμάτια σύρματος που μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους άκρη με άκρη για να δημιουργήσουν τις δομές και τις επιφάνειες.

2. UTD Plates (πιάτα): Πρόκειται για επίπεδα, πολύπλευρα, καλυμμένα με διηλεκτρικό πιάτα. Αυτά τα πιάτα αντιμετωπίζονται σε μια προσομοίωση

χρησιμοποιώντας την ομοιόμορφη θεωρία της περίθλασης, η οποία 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): Πρόκειται για ελλειπτικούς κυλίνδρους, 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 περίβλημα 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): Παρόμοια με τις γραμμές μεταφοράς, με την διαφορά ότι αυτά καθορίζονται από τις y-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 επομένως αδύνατο να παραθέσει κανείς έναν πλήρη κατάλογο όλων των διαθέσιμων assemblies. Ενδεικτικά μόνο κάποια από τα υποστηριζόμενα assemblies είναι τα εξής:

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

- **Cylinder (κύλινδρος):** Πρόκειται για έναν κύλινδρο που διαμορφώνεται και αυτός 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.

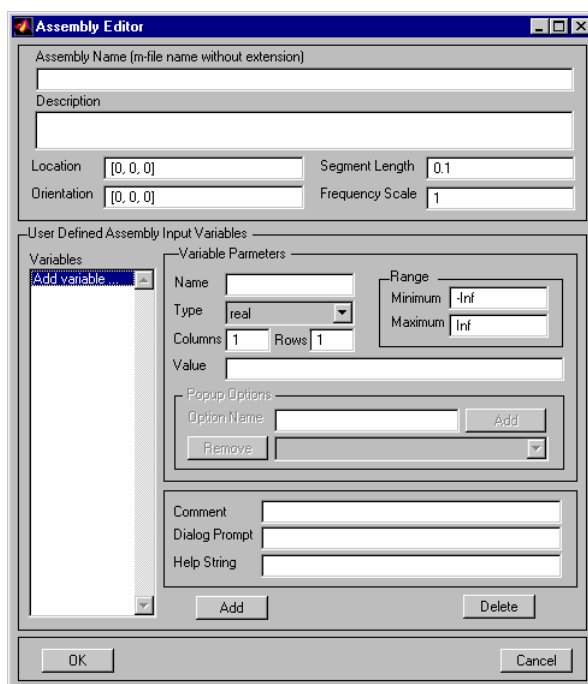
- **Helix (Ελικας):** Πρόκειται για μια ελικοειδή δομή κατασκευασμένη από τμήματα σύρματος και διεγερμένη από μία πηγή AFVS.

· **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. Κατά συνέπεια 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.

6.5 ΣΥΓΓΡΑΦΗ ΝΕΩΝ ΔΟΜΩΝ (ASSEMBLIES) ΑΠΟ ΤΟΝ ΧΡΗΣΤΗ

Υπάρχουν δύο στάδια κατά τη δημιουργία ενός assembly. Το πρώτο 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 παρακάτω σχήματος:



Εικόνα 40 - 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 τέτοια μεταβλητή πρέπει να καθοριστεί μία σειρά από παραμέτρους. Μεταξύ αυτών των παραμέτρων είναι και οι εξής:

- Όνομα.
- Τύπος: Υπάρχει δυνατότητα επιλογής ενός από τους 6 παρακάτω 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.

6.6 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Αφού ολοκληρωθεί ο καθορισμός της δομής, πρέπει να καθοριστούν και ορισμένες ρυθμίσεις για την προσομοίωση της δομής αυτής. Αυτές οι ρυθμίσεις περιλαμβάνουν:

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

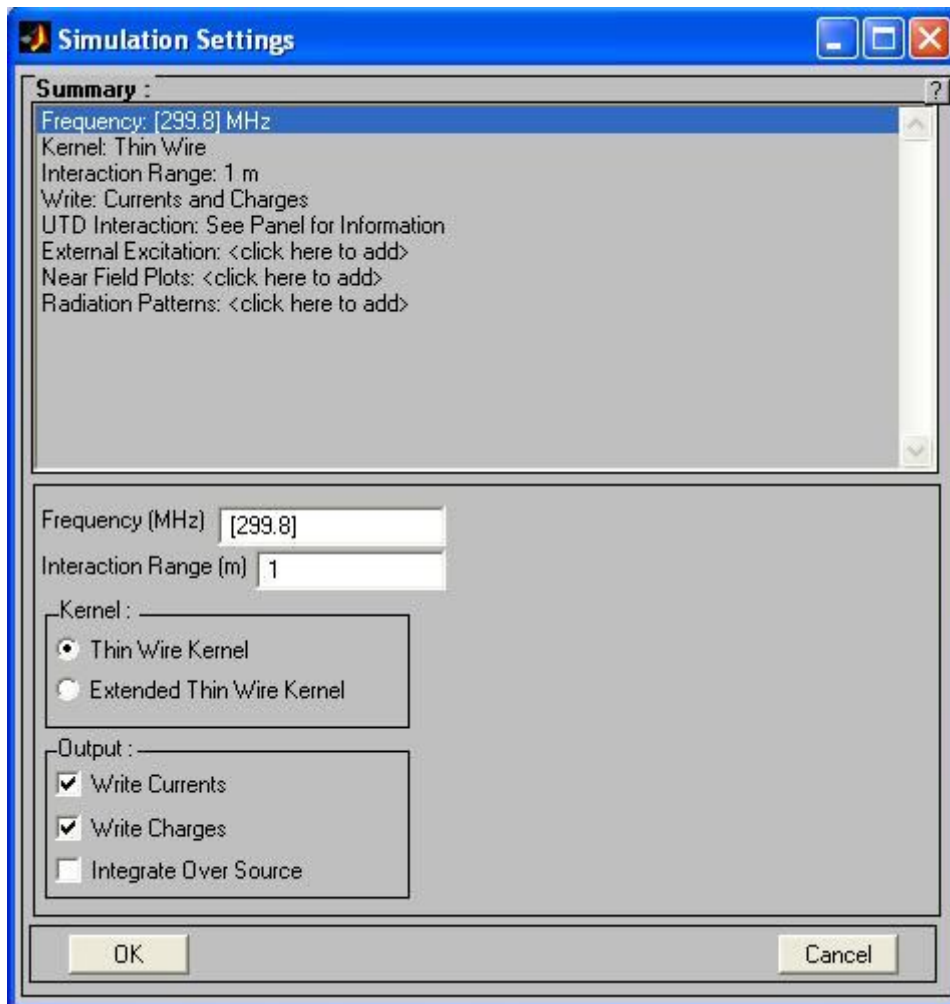
Το παράθυρο που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των ρυθμίσεων αυτών ανοίγει με την επιλογή Edit > Simulation Settings στο SuperNEC input user interface. Το παράθυρο αυτό φαίνεται στην εικόνα 41.

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, ϕ) είτε της γωνίας ανύψωσης (elevation, θ)

- 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.



Εικόνα 41 - 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 ακτινική απόσταση (radial distance), η οποία καθορίζει την

απόσταση του εκάστοτε θεωρούμενου σημείου του πεδίου ακτινοβολίας από την πηγή σε μέτρα. Αν αυτή η τιμή επιλεγεί 0, αυτό σημαίνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο αγνοεί τον παράγοντα $\frac{e^{-jkr}}{R}$. Επιπλέον, 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 μία 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 θ συνιστώσα του πεδίου, ενώ την επόμενη στην ϕ 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 για τη μορφή της διάταξης, την διέγερσή της και την επιθυμητή έξοδο. Οι βασικότερες από τις παραμέτρους παρατίθενται στην συνέχεια :

- Μέγιστη ακτίνα αλληλεπίδρασης των συρμάτων τμημάτων πέρα από την οποία δεν έχουν ισχύ οι υπολογισμοί (interaction range). Αν πρόκειται να προσομοιωθούν μεγάλες διατάξεις πρέπει ο χρήστης 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 διπόλου Hertz.

6.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ

Το SuperNEC έχει μια ενσωματωμένη δυνατότητα έλεγχου, για τον 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.

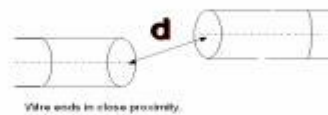
| <i>Μεμονωμένα τμήματα</i> | <i>Προειδοποίηση</i> | <i>Σφάλμα</i> |
|--|---|------------------------------|
| Μήκος τμήματος (Segment length) | $\frac{\lambda}{10} < \Delta < \frac{\lambda}{5}$ | $\Delta > \frac{\lambda}{5}$ |
| Ακτίνα (Radius) | $30 < \frac{\lambda}{a} < 100$ | $\frac{\lambda}{a} 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

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

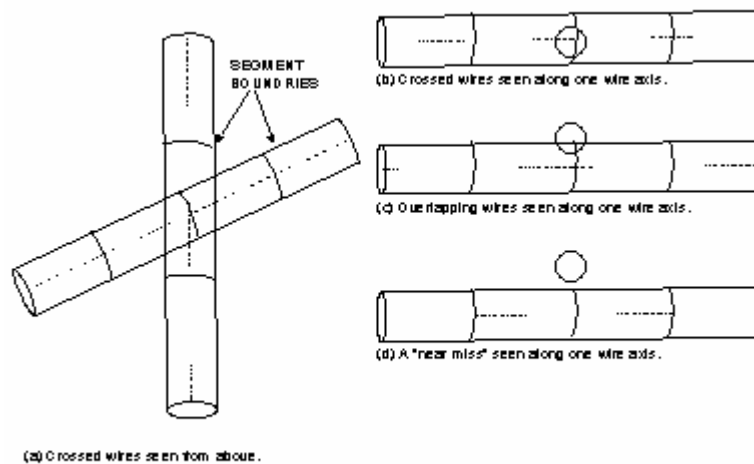
| <i>Αποστάσεις τμημάτων</i> | <i>Προειδοποίηση</i> | <i>Σφάλμα</i> |
|---|----------------------|--|
| Διασταυρούμενα τμήματα (Crossed wires) | | <i>Οι άξονες των τμημάτων διασταυρώνονται</i> |
| Πολύ κοντινά τμήματα (Overlapping wires) | | <i>Οι άξονες των τμημάτων περνούν πιο κοντά από το</i> |

| | | |
|--|--|---|
| | | 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 |

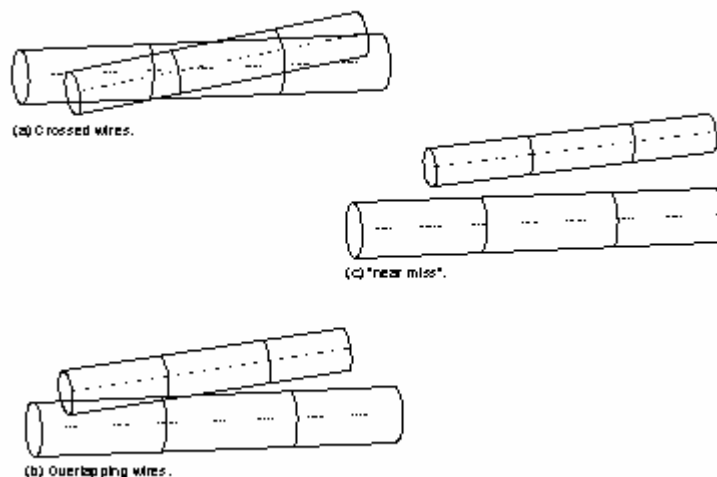
Οι 4 περιπτώσεις προειδοποιήσεων και σφαλμάτων της κατηγορίας των αποστάσεων των τμημάτων φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Εικόνα 42 - Απόσταση τμημάτων



Εικόνα 43 - Σφάλματα στις αποστάσεις τμημάτων

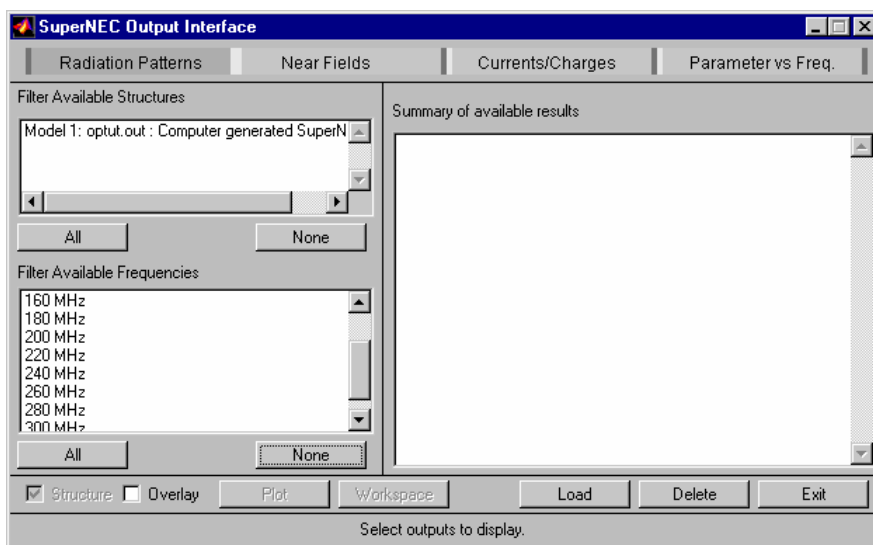


Εικόνα 44 - Προειδοποιήσεις και σφάλματα στις αποστάσεις τμημάτων

6.8 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.

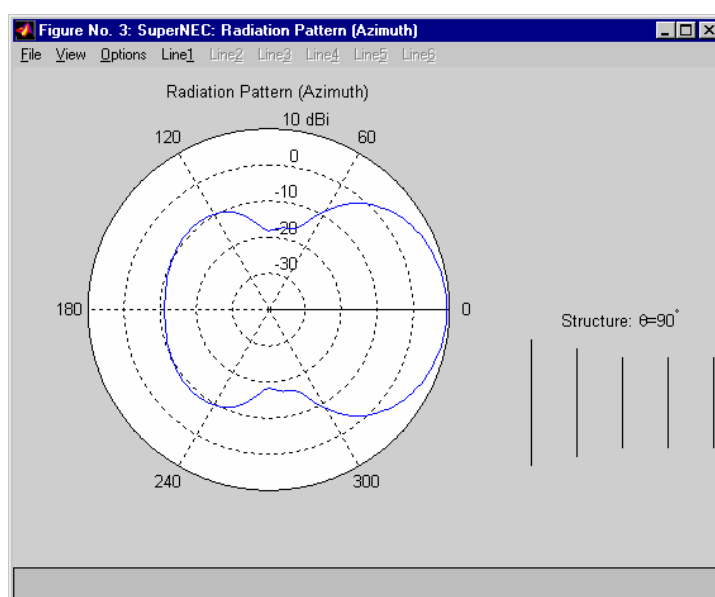
Η δυνατότητα αυτή δίνεται με την επιλογή Simulate > View Output, οπότε στην οθόνη βγαίνει το παρακάτω παράθυρο.



Εικόνα 45 - Το SuperNEC Output Interface

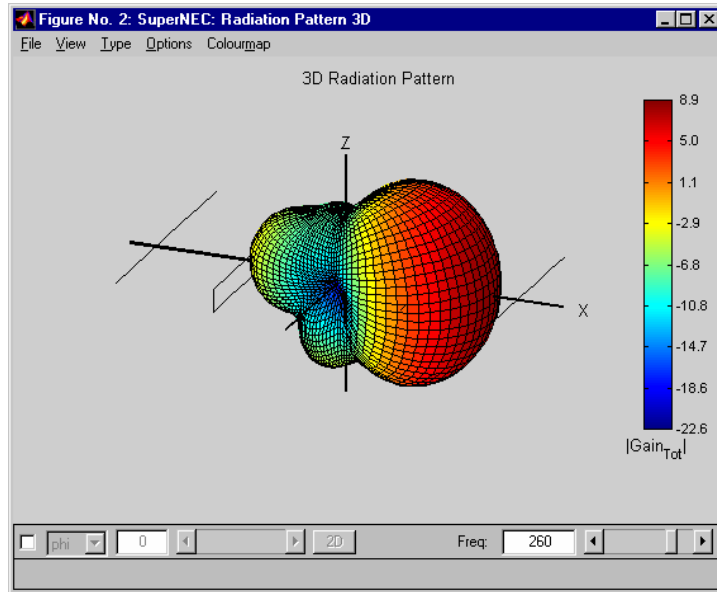
Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει ταυτόχρονα παραπάνω από μία δομές και παραπάνω από μία συχνότητες. Η υπέρθεση δύο ή περισσότερων διαγραμμάτων στο ίδιο παράθυρο μπορεί να γίνει με την επιλογή Overlay, ενώ η παράθεση της διάταξης στο διάγραμμα έτσι ώστε ο χρήστης να βλέπει τον προσανατολισμό των λοβών ακτινοβολίας σε σχέση με αυτήν γίνεται με την επιλογή Structure. 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 $\theta = 90^\circ$, η έξοδος θα δώσει ένα διάγραμμα σαν κι αυτό του επόμενου σχήματος.



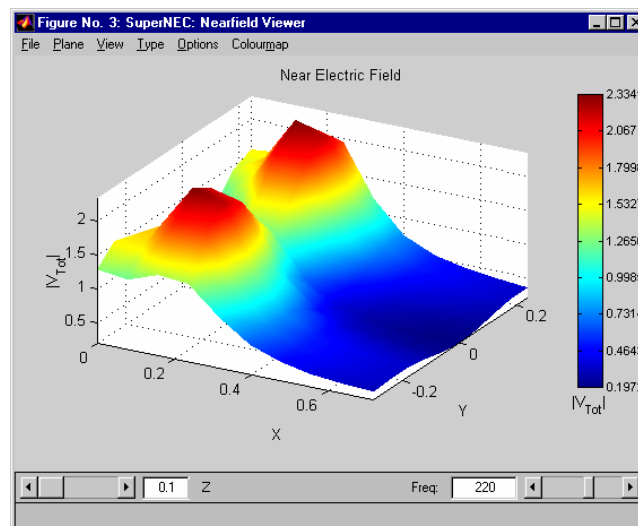
Εικόνα 46 - Ένα 2D διάγραμμα ακτινοβολίας

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 παρακάτω σχήματος.



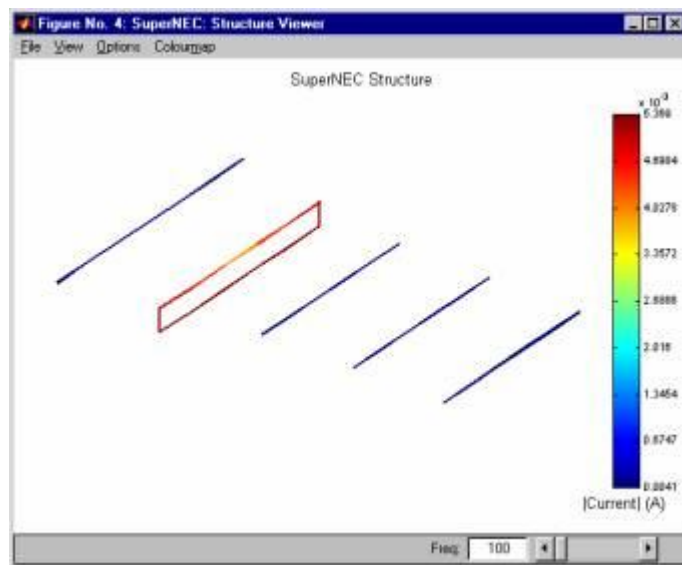
Εικόνα 47 - Ένα 3D διάγραμμα ακτινοβολίας

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 , θ και ϕ), 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 παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 48 - 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 επόμενο σχήμα.



Εικόνα 49 - 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ELECTRONICALLY STEERABLE SWITCHED PARASITIC ARRAY

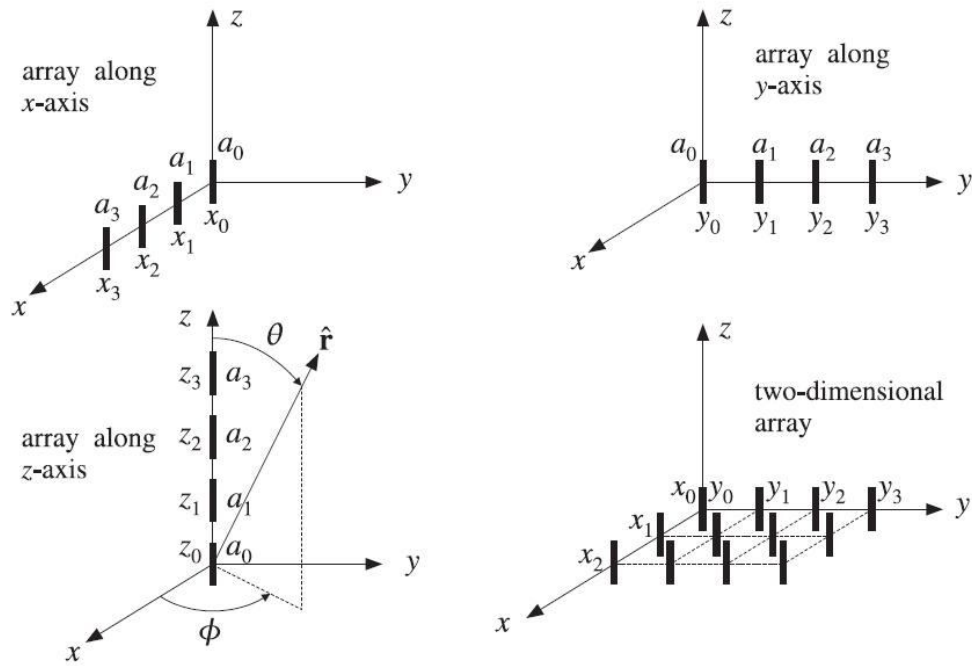
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία, ο τύπος της κεραίας που σχεδιάστηκε ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των CSPA (circular swithced parasitic arrays) με την δυνατότητα για ηλεκτρονική μεταβολή της κατεύθυνσης του διαγράμματος ακτινοβολίας της. Η εν λόγω κεραία αποτελείται ουσιαστικά από 4 διακριτά στοιχεία εκ των οποίων τα 3 λειτουργούν πάντα ως παρασιτικά. Στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των χαρακτηριστικών των CSPA ευφών κεραιών και της λειτουργίας electonical steering, πάνω στις οποίες θα στηριχτεί και η υπό σχεδίαση κεραία της παρούσας εργασίας, η οποία ονομάστηκε SAW3PE, ενώ τέλος υπάρχει και ένα ποιοτικό σχήμα συνοδευόμενα από μια σύντομη περιγραφή της κεραίας

7.2 ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΕΣ

Οι στοιχειοκεραίες χρησιμοποιούνται σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, όπου δεν είναι δυνατή η επίτευξη της επιθυμητής κατευθυντικότητας ή του επιθυμητού εύρους δέσμης με χρήση απλών κεραιών. Στην πιο γενική περίπτωση, πρόκειται για διατάξεις που αποτελούνται από πολλούς όμοιους ακτινοβολητές που έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και ακτινοβολούν ή λαμβάνουν ταυτοχρόνως. Με κατάλληλη επιλογή της ρευματικής διέγερσης επιτυγχάνονται βελτιωμένες ιδιότητες για την στοιχειοκεραία σε σχέση με τις αντίστοιχες ενός απλού στοιχείου της. Αυτό οφείλεται στο ότι τα επιμέρους πεδία των στοιχείων ακτινοβολίας συμβάλλουν στις επιθυμητές διευθύνσεις του χώρου, ενώ αλληλοαναιρούνται σε άλλες.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι διατάξεις τεσσάρων τυπικών στοιχειοκεραιών που αποτελούνται από δίπολα.



Εικόνα 50 - Τέσσερις τυπικές περιπτώσεις στοιχειοκεραίων

Το συνολικό μακρινό πεδίο μιας στοιχειοκεραίας προσδιορίζεται με διανυσματική άθροιση των επιμέρους πεδίων των ακτινοβολητών που την αποτελούν. Η διαδικασία αυτή προϋποθέτει ότι δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ των στοιχείων ακτινοβολίας, δηλαδή η ρευματική διέγερση κάθε στοιχείου δεν επηρεάζεται από την παρουσία των υπολοίπων στοιχείων. Η ισχύς της παραδοχής αυτής εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των στοιχείων. Οι στοιχειοκεραίες βρίσκουν ευρεία εφαρμογή γιατί παρέχουν τις εξής δυνατότητες:

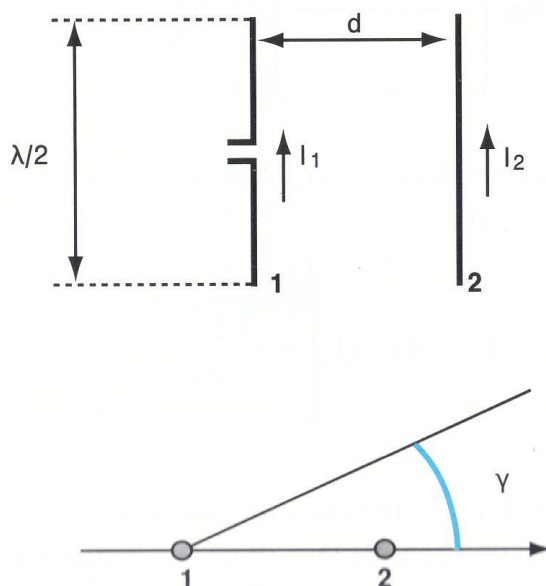
- Αύξηση της κατευθυντικότητας.
- Σύνθεση επιθυμητών διαγραμμάτων ακτινοβολίας.
- Στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας με ηλεκτρονικό τρόπο.

Η μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Γεωμετρία της στοιχειοκεραίας (γραμμική, κυκλική, επίπεδη κλπ.).
- Συχνότητα λειτουργίας.
- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων ακτινοβολίας.
- Σχετική ρευματική διέγερση των στοιχείων ακτινοβολίας.
- Πλήθος στοιχείων ακτινοβολίας.

7.3 ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΕΣ ΜΕ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν στοιχειοκεραίες στις οποίες τροφοδοτούνται όλα τα στοιχεία, μέσω γραμμών μεταφοράς. Είναι όμως δυνατόν να πραγματοποιηθούν κατευθυντικές στοιχειοκεραίες όταν τροφοδοτείται ένα μόνο στοιχείο ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία είναι βραχυκυκλωμένα και διαρρέονται από ρεύματα που επάγονται λόγω της τροφοδότησης του πρωτεύοντος στοιχείου. Τα βραχυκυκλωμένα στοιχεία ονομάζονται παρασιτικά στοιχεία. Ως παράδειγμα στοιχειοκεραίας με παρασιτικό στοιχείο εξετάζεται στην συνέχεια η γεωμετρία του παρακάτω σχήματος.



Εικόνα 51 - Στοιχειοκεραία με ένα παρασιτικό στοιχείο

Αν V_1 η τάση στο ενεργό στοιχείο, και I_1, I_2 τα ρεύματα βάσης των δύο στοιχείων αντίστοιχα, προφανώς ισχύει:

$$V_1 = I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12}$$

$$0 = I_1 Z_{12} + I_2 Z_{22}$$

Από την δεύτερη σχέση προκύπτει ο λόγος του επαγόμενου ρεύματος στο παρασιτικό στοιχείο προς το ρεύμα του ενεργού στοιχείου ως εξής:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{Z_{12}}{Z_{22}} = \left| \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \right| e^{j\phi}$$

όπου,

$$Z_{11} = R_{11} + jX_{11}$$

$$Z_{12} = R_{12} + jX_{12}$$

$$Z_{22} = R_{22} + jX_{22}$$

$$\theta = \pi - \theta_{12} - \theta_{22}$$

$$\theta_{12} = \arctan\left(\frac{X_{12}}{R_{12}}\right)$$

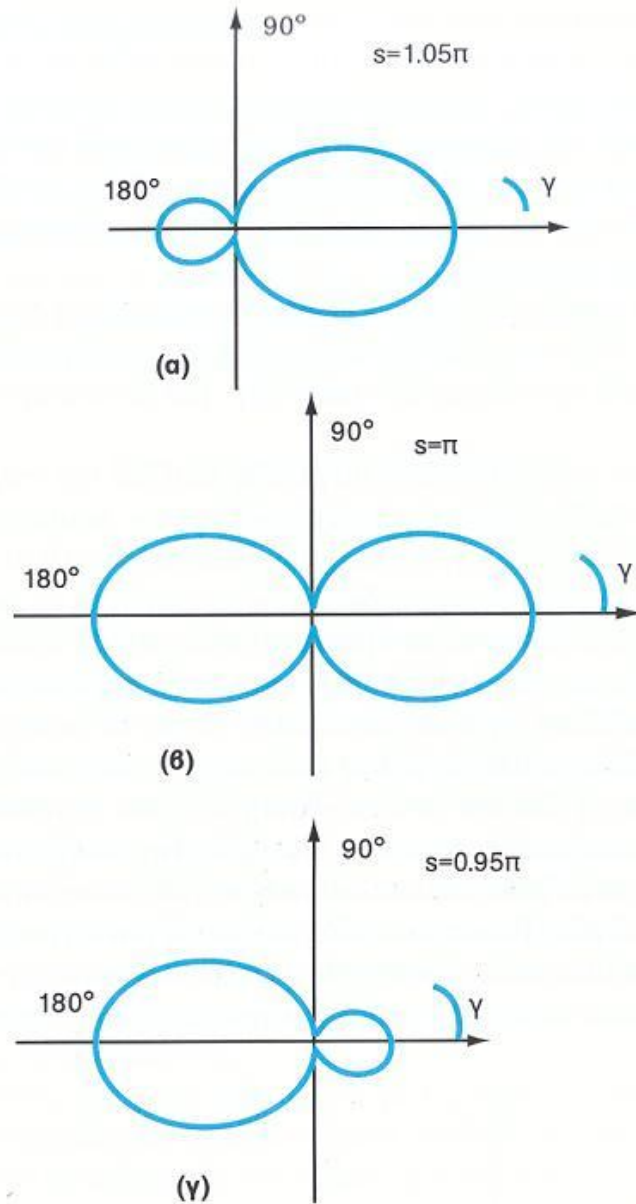
$$\theta_{22} = \arctan\left(\frac{X_{22}}{R_{22}}\right)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει η σύνθετη αντίσταση εισόδου του ενεργού στοιχείου ως εξής:

$$Z_1 = Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22}} = Z_{11} - \frac{|Z_{12}|^2 e^{j2\theta_{12}}}{|Z_{22}| e^{j\theta_{22}}}$$

Το πραγματικό μέρος της αντίστασης εισόδου είναι:

$$R_1 = R_{11} - \frac{|Z_{12}|^2}{|Z_{22}|} \cos(2\theta_{12} - \theta_{22})$$



Εικόνα 52 - Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας με 1 ενεργό και 1 παρασιτικό στοιχείο

Το ρεύμα τροφοδότησης του ενεργού στοιχείου της στοιχειοκεραίας για ισχύ τροφοδότησης W προφανώς δίνεται από την σχέση:

$$I_1 = \sqrt{\frac{W}{R_1}} = \sqrt{\frac{W}{R_{11} - \left| \frac{Z_{12}^2}{Z_{22}} \right| \cos(2s_{12} - s_{22})}}$$

Ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας γράφεται στη μορφή:

$$S(\gamma) = 1 + \frac{I_2}{I_1} e^{jkd \cos(\gamma)} = \left(1 + \left| \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \right| e^{jkd \cos(\gamma) + s} \right)$$

ενώ το μέτρο του παράγοντα διάταξης γράφεται:

$$|S(\gamma)|^2 = \left(1 + \left| \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \right|^2 + 2 \left| \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \right| \cos(kd \cos(\gamma) + s) \right)$$

ή

$$|S(\gamma)|^2 = \left(1 + \left| \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \right|^2 + 2 \left| \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \right| \cos(kd \cos(\gamma) + \pi + s_{12} - s_{22}) \right)$$

Ο παράγοντας διάταξης έχει σχεδιαστεί στο προηγούμενο σχήμα, από το οποίο γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι η κατάλληλη επιλογή της φάσης s έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ακτινοβολίας προς τη μία κατεύθυνση σε σχέση με το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας διπολικής κεραίας.

7.4 ΕΞΥΠΝΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ

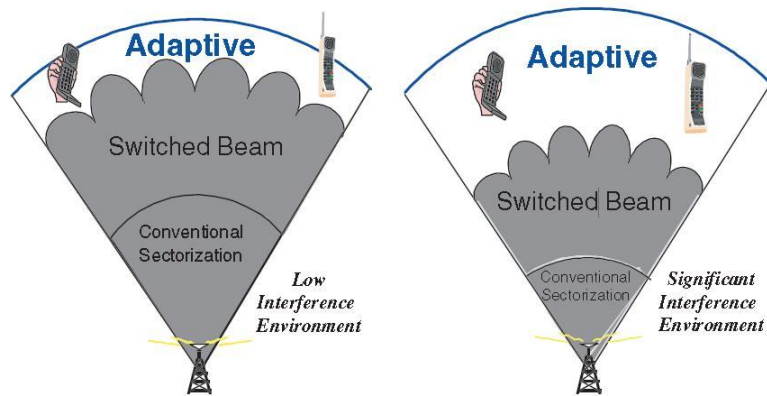
Τα τελευταία χρόνια οι συνεχόμενες αυξανόμενες απαιτήσεις των υπηρεσιών των κινητών τηλεπικοινωνιών για μεγαλύτερες ταχύτητες και εύκολη πρόσβαση, έχει εντατικοποιήσει τις έρευνες και την ανάπτυξη στον τομέα των ευφυών κεραιών.

Η επιλογή της κατευθυντικότητας του διαγράμματος ακτινοβολίας, που προσφέρουν οι ευφυείς κεραιές, ελαχιστοποιώντας τα επίπεδα παρεμβολών, βελτιώνουν σημαντικά τις ικανότητες του συστήματος. Με άλλα λόγια, διευκολύνεται η συνύπαρξη περισσότερων χρηστών στο σύστημα, ενώ αυξάνεται η ταχύτητα σύνδεσης των χρηστών που ήδη υπάρχουν.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των ευφυών κεραιών, είναι η δυνατότητα που δίνουν στον χρήστη να αλλάζει κατά το δοκούν τη διεύθυνση ακτινοβολίας του κυρίως λοβού προς την επιθυμητή κατεύθυνση, αυξάνοντας έτσι το ρυθμό μετάδοσης προς την πλευρά που επιθυμεί. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να μειωθούν κατά πολύ οι όποιες ανεπιθύμητες παρεμβολές έχουν να κάνουν με θόρυβο κάθε είδους.

Τέτοιου τύπου κεραιές μπορούν να ενσωματωθούν τόσο σε σταθμούς βάσης, όσο και σε κινητούς πομποδέκτες, όπως συσκευές κινητών τηλεφώνων, laptop κτλ.

Η τεράστια ανάπτυξη στη βιομηχανία των ασύρματων επικοινωνιών δημιουργεί μια τεράστια ευκαιρία για την αγορά. Οι πάροχοι ασύρματων υπηρεσιών διενεργούν έρευνες αυτήν την περίοδο για τις νέες τεχνολογίες που θα εφαρμοστούν στις υπάρχουσες υποδομές ασύρματων επικοινωνιών, και θα έχουν την δυνατότητα να παρέχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης ανά κανάλι χρηστών, καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών, καθώς και νέες προηγμένες υπηρεσίες. Οι έξυπνες κεραιές (smart antennas) και οι προσαρμοστικές στοιχειοκεραιές (adaptive antenna arrays) έχουν κερδίσει το μεγάλο ενδιαφέρον μεταξύ των ερευνητών. Όταν αυτές εγκαθίστανται στους σταθμούς βάσης των ασύρματων υποδομών, αποφέρουν μια σημαντική βελτίωση όσον αφορά την χωρητικότητα και την εμβέλεια σε ένα σύστημα ραδιοεπικοινωνιών περιορισμένων συχνοτικών πόρων, μέσω ενός αποδοτικού σχεδίου επαναχρησιμοποίησης συχνότητας. Η βελτίωση αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα για περιβάλλοντα με χαμηλές και έντονες παρεμβολές. Όπως φαίνεται, η βελτίωση είναι πολύ πιο σημαντική για την δεύτερη περίπτωση και ιδιαίτερα με την χρήση προσαρμοστικών κεραιών.



Εικόνα 53 - Βελτίωση κάλυψης σε περιβάλλοντα χαμηλών και έντονων παρεμβολών

Νέες προηγμένες υπηρεσίες, όπως οι PL (Position Location) υπηρεσίες για κλήση έκτακτης ανάγκης, η ανίχνευση απάτης (fraud detection), το ευφυές σύστημα μεταφορών (ITS – Intelligent Transportation System) κ.λπ., γίνονται πραγματικότητα με τη δυνατότητα εύρεσης κατεύθυνσης (direction finding) των έξυπνων κεραιών. Οι κεραιές αυτές χρησιμοποιούνται επίσης και στα ad-hoc (αδόμητα) δίκτυα ή τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs), ενσωματωμένες στα κινητά τερματικά (φορητούς υπολογιστές, PDAs, κ.λπ.) ενός ασύρματου δικτύου. Η δυνατότητα εύρεσης κατεύθυνσης ωφελεί ιδιαίτερα την σχεδίαση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης πακέτων (packet routing protocol), το οποίο καθορίζει την μέθοδο της αναμετάδοσης πακέτων. Η δυνατότητα διαμόρφωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας (beamforming), καθώς και η ικανότητα καταστολής των παρεμβολών (interference suppression) καθιστά δυνατή την αύξηση της ρυθμοαπόδοσης (throughput) στους κόμβους των δικτύων (network nodes), σε περιπτώσεις που αυτή περιορίζεται από τις παρεμβολές των γειτονικών κόμβων.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής μελετήθηκε ένας τέτοιος τύπος κεραιάς και πιο συγκεκριμένα τύπου (C-SPA) circular switched parasitic array, μικρού μεγέθους κατάλληλου για συσκευές τύπου handheld .

7.5 CSPA(circular switched parasitic arrays)

Τα τελευταία χρόνια, έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στον σχεδιασμό και την κατασκευή κεραιών τύπου CSPA που εξ αιτίας της συμμετρίας που παρουσιάζουν τα μοντέλα τους, πλεονεκτούν σε σχέση με κεραιές άλλου τύπου. Επίσης το χαμηλό κόστος υλοποίησης τους αποτελεί ένα ακόμα πλεονέκτημα. Η κατεύθυνση του διαγράμματος ακτινοβολίας ορίζεται από την εναλλαγή της θέσης του ενεργού στοιχείου σε σχέση με τα παρασιτικά κάθε φορά ανάλογα με τη δομή της κεραιάς, δίνοντας έτσι στο χρήστη τη δυνατότητα της στροφής του διαγράμματος κατά κυκλικό τρόπο, δηλαδή σε όλο το φάσμα των 360 μοιρών. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας παρουσιάζεται ένας τέτοιος τύπος κεραιάς με plate, με σκοπό την όσο τον δυνατόν μικρότερη απόκλιση της διεύθυνσης μέγιστης ακτινοβολίας σε σχέση με την επιθυμητή που είναι για τις 90 μοίρες. Φυσικά λόγω της συμμετρίας του συστήματος θα διεξαχθούν μετρήσεις μόνο για την διεύθυνση των 0 μοιρών, ενώ με εναλλαγή των θέσεων των παρασιτικών και των ενεργών στοιχείων μέσω ενός κατάλληλου διακόπτη για παράδειγμα, ισχύουν τα ίδια (λόγω της συμμετρίας) και για τις υπόλοιπες κατευθύνσεις 90, 180 και 270 μοιρών.

7.6 ELECTRONICALLY STEERABLE SPA

Οι SPA κεραιές προσφέρονται, λόγω δομής, για την λεγόμενη ηλεκτρονική εναλλαγή της κατεύθυνσης του διαγράμματος ακτινοβολίας, (electronically beam steering), η οποία μπορεί να γίνει δυνατή με την εισαγωγή στον κώδικα, ενός κατάλληλου ψηφίου στο σύστημα τροφοδοσίας της κεραιάς, δίνοντας έτσι τον έλεγχο στον χρήστη να ορίζει κάθε φορά την “πορεία” της κεραιάς προς την επιθυμητή κατεύθυνση ακτινοβολίας.

Πιο συγκεκριμένα, αν θεωρήσουμε 0 και 1 τους αριθμούς που αναπαριστούν τα παρασιτικά και ενεργά στοιχεία αντίστοιχα, είναι προφανές ότι η εναλλαγή τους οδηγεί σε εναλλαγή των ιδιοτήτων των στοιχείων (από παρασιτικά ενεργά και το αντίστροφο).

Η πρακτική θεώρηση της ανωτέρω διαδικασίας στη συγκεκριμένη εργασία που αφορά 4 στοιχεία εκ των οποίων τα 3 πάντα παρασιτικά, μπορεί να γίνει αντιληπτή μέσω της υλοποίησης της με 4 διακόπτες που ανοίγουν και κλείνουν κάθε φορά, ανάλογα με τις τιμές που δίνουμε (0 ή 1) στην τροφοδοσία του συστήματος.

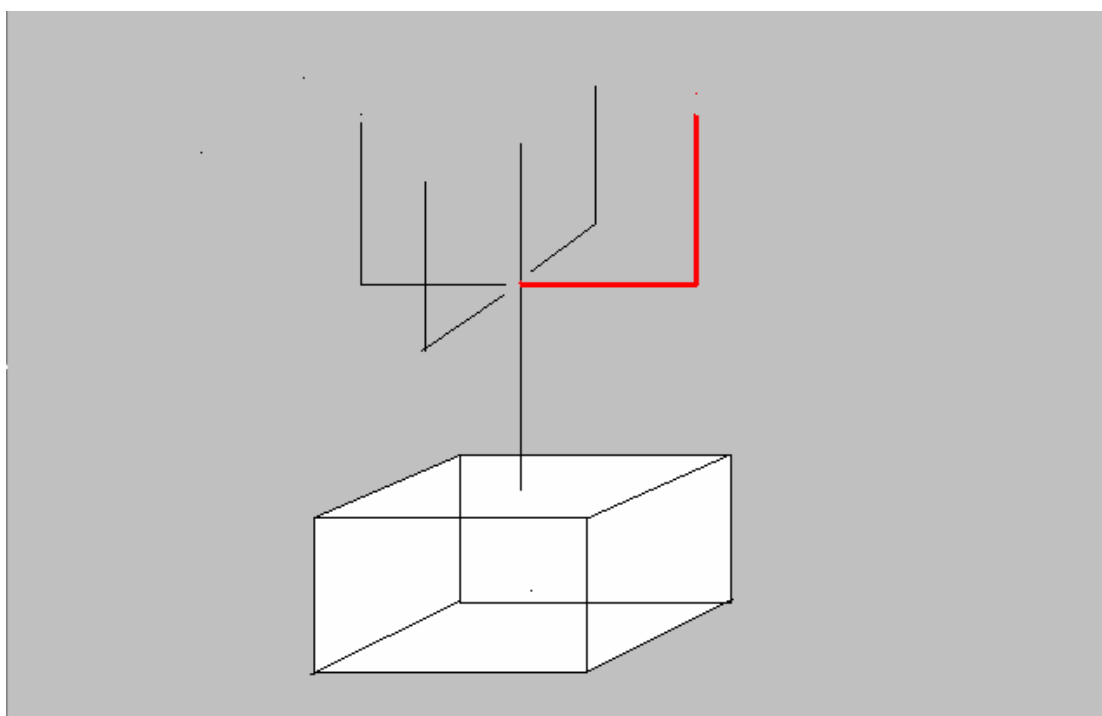
Η ευκολία με την οποία είναι δυνατή η εύρεση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας κεραιών τέτοιου τύπου, σε όλο το φάσμα των 360 μοιρών, μέσω μιας διαδικασίας όπως αυτή που περιγράφηκε, εξηγεί και το λόγο για τον οποίο κεραιές τύπου CSPA τυχάνουν ευρείας αναγνώρισης και ανάπτυξης ειδικότερα τα τελευταία χρόνια.

7.7 SAW3PE(SMART ANTENNA WITH 3 PARASITIC ELEMENTS)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η υπό εξέταση κεραία την οποία ονομάσαμε SAW3PE, είναι τύπου CSPA με δυνατότητα στροφής της κατεύθυνσης του διαγράμματος ακτινοβολίας της με κατάλληλους διακόπτες, με τη μεθοδολογία που περιγράψαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας δεν θα γίνει κάποια περαιτέρω διερεύνηση του μηχανισμού υπό τον οποίο είναι δυνατή μια τέτοια διαδικασία και θα περιοριστεί στην ανάλυση των χαρακτηριστικών της κεραίας για μια μόνο από τις τέσσερις δυνατές και ταυτόσημες, λόγω συμμετρίας, θέσεις του τροφοδοτούμενου καλωδίου.

Πιο συγκεκριμένα, στο ποιοτικό σχήμα που φαίνεται παρακάτω, με κόκκινη γραμμή σχεδιάζουμε το τροφοδοτούμενο wire, και με λεπτές μαύρες γραμμές τα 3 εκάστοτε παρασιτικά στοιχεία(wires), τα οποία είναι ανοιχτοκυκλωμένα, όπως εύκολα διακρίνεται.

Επιπλέον, το παραλληλεπίπεδο που φαίνεται στο σχέδιο, παίζει το ρόλο των 5 plates (η κάτω βάση δεν υφίσταται), τα οποία σχηματίζουν ένα skirt, το οποίο χρησιμοποιήσαμε στη σχεδίαση της κεραίας μας, έτσι ώστε να γίνει δυνατή η μείωση, όσο γίνεται περισσότερο, της γωνίας ανύψωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας(elevation), με απώτερο στόχο το διάγραμμα να είναι όσο το δυνατόν πιο κατευθυντικό στην επιθυμητή διεύθυνση ακτινοβολίας.



Εικόνα 54- Ποιοτικό σχήμα κεραίας SAW3PE

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΕΡΑΙΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η διαδικασία σχεδίασης της προτεινόμενης ευφυούς κεραίας στο πρόγραμμα SuperNEC ενώ η διαδικασία βελτιστοποίησής της έγινε για την συχνότητα των 2,4 GHz με χρήση του λογισμικού γενετικών αλγορίθμων GA Optimizer.

8.1 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΣΤΟ SUPERNEC

Αρχικά για την σχεδίαση μιας νέας διάταξης στο πρόγραμμα SuperNEC, θα πρέπει να ορίσουμε τις μεταβλητές που θα καθορίσουν τα χαρακτηριστικά της υπό εξέταση κεραίας την οποία ονομάσαμε SAW3PE(Smart Antenna With 3 Parasitic Elements). Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω του Assembly Editor, στο παράθυρο του SuperNEC input user interface.

Για την δημιουργία της διάταξης οι παράμετροι που ορίστηκαν φαίνονται στο επόμενο σχήμα.

The screenshot shows the 'Assembly Editor' window. The 'Assembly Name' field contains 'SAW3PE' and the 'Description' field contains 'Smart Antenna with 3 parasitic elements'. The 'Location' and 'Orientation' fields are both set to '[0, 0, 0]'. The 'Segment Length' field is set to '0.025' and the 'Frequency Scale' field is set to '1'. Under the 'User Defined Assembly Input Variables' section, a list of variables is shown on the left, with 'length0' selected. The 'Variable Parameters' for 'length0' are: Name 'length0', Type 'integer', Columns '1', Rows '1', and Value '10'. The 'Range' section shows 'Minimum' as '0' and 'Maximum' as 'inf'. Below the parameters, there is a 'Setup Options' section with 'Option Name' and 'Add'/'Remove' buttons. At the bottom, there are 'Comment', 'Dialog Prompt', and 'Help String' fields, all containing the text 'Mikos trofodotoumenou'. 'Modify' and 'Delete' buttons are also present. At the very bottom of the dialog are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Εικόνα 55- Ορισμός των μεταβλητών της κεραίας SAW3PE μέσω του Assembly Editor

Στα πεδία Location ,Frequency Scale, και Orientation αφήσαμε τις default τιμές του προγράμματος όπως φαίνεται στο σχήμα ,ενώ οι μεταβλητές που ορίστηκαν είναι οι εξής:

- length0 : Το μήκος του τροφοδοτούμενου καλωδίου
- length1 : Το μήκος των κάθετων στο τροφοδοτούμενο καλωδίων
- length2 : Το μήκος των παράλληλων στο τροφοδοτούμενο καλωδίων
- distance : Η απόσταση από το plate του σημείου τομής,του τροφοδοτούμενο καλωδίου, με τα κάθετα σε αυτό καλώδια
- platesize1 : Μήκη πλευρών του plate στους άξονες x,y
- platesize2 :Μήκος πλευράς του plate στον z άξονα(μήκος του skirt)

Όλες οι μεταβλητές είναι τύπου integer(ακέραιοι) θετικοί και στις οποίες δόθηκαν οι ενδεικτικές αρχικές τιμές 10,5,10,8,10,6 αντίστοιχα.

Επίσης οι 2 παράμετροι noOfLengthSegs και noOfWidthSegs που χρησιμοποιήθηκαν, δεν λαμβάνουν μέρος στη βελτιστοποίηση και κατ επέκταση δε λογίζονται ως μεταβλητές .Ο πρακτικός τους ρόλος που θα φανεί αργότερα έχει κυρίως να κάνει με τις συνθήκες που εξασφαλίζουν την ορθότητα της διάταξης σύμφωνα με τους περιορισμούς που θέτει το SNEC και που προέκυψαν κατόπιν ανάλυσης της διάταξης.

Αποθηκεύουμε στην Matlab τη διάταξη ως SAW3PE.m και ανοίγοντας το αρχείο με το wordpad, διαβάζουμε το αυτοματοποιημένο κείμενο σε κώδικα MATLAB που παρήγαγε το SuperNEC, βασισμένο σε όσα ορίσαμε εμείς στο Assembly Editor. Το κείμενο αυτό είναι το εξής:

Το μήκος κάθε segment (segLength) των καλωδίων (wires) ορίζεται 0.025 στο αντίστοιχο πεδίο.

```
function asmb = SAW3PE (modelFreq, obj, editParms)

%-----
% THE FIRST PART OF THIS FILE IS COMPUTER GENERATED - DO NOT
% EDIT IT !!!
% PAGE DOWN TO THE USER DEFINED SECTION WHICH STARTS
% WITH THE SEGMENT
% ROUTINE.
%-----
% USAGE:
% asmb = SAW3PE (modelFreq, obj, editParms)
% DESCRIPTION:
% Smart Antenna with 3 parasitic elements
% INPUTS:
% modelFreq: The frequency at which the SNEC structure is designed
% obj.location: The location of the assembly
% obj.segLength: The segment length in wavelengths
```



```

% obj.orientation: The orientation of the assembly
% obj.freqScale: The factor by which the model freq. is scaled
% obj.length0: Mikos trofodotoumenou
% obj.length1: mikos ka8etou sto trofodotoumeno
% obj.length2: mikos parallhlou sto trofodotoumeno
% obj.distance: apostash tou susthmatos apo to plate
% obj.platesize1: mikos plate x,y
% obj.platesize2: mikos skirt z
% obj.noOfLengthSegs: ru8misths seglength tou plate
% obj.noOfWidthSegs: ru8misths seglength tou plate
%
% OUTPUTS:
% struct assembly
% {
%   name      // the name of the assembly
%   properties // array of structs
%   segments  // cell array of startPt, endPt, radius
%   plates    // cell array of plate data
%   cylinders // cell array of cylinder data
%   assemblies // cell array of structs like this
% }

if (nargin < 1)
    ErrorDlg ('You must specify the model freq when calling SAW3PE','SAW3PE
Usage Error');
    asmb = [];
    return;
end

switch nargin
case 1
    obj.location = [0.000, 0.000, 0.000];
    obj.segLength = 0.025;
    obj.orientation = [0.000, 0.000, 0.000];
    obj.freqScale = 1.000;
    obj.length0 = 10;
    obj.length1 = 5;
    obj.length2 = 10;
    obj.distance = 8;
    obj.platesize1 = 10;
    obj.platesize2 = 6;
    obj.noOfLengthSegs = 6;
    obj.noOfWidthSegs = 6;
    editParms = 1;
case 2
    editParms = 1;
case 3
    % do nothing
otherwise
    asmb = [];

```

```

    ErrorDlg ('Invalid number of inputs to SAW3PE','SAW3PE Usage Error');
    return;
end

commonStruct = struct(...
    'prompt',{'Location';'Segment Length';'Orientation';'Freq. Scaling'}, ...
    'value',{obj.location; obj.segLength; obj.orientation; obj.freqScale}, ...
    'type',{'real';'real';'real';'real'}, ...
    'length',{3; 1; 3; 1}, ...
    'range',{[]; [0.001 0.5]; [0 360]; [1E-5 inf]});

dlgStruct = struct(...
    'prompt', {...
        'Mikos trofodotoumenou', ...
        'mikos ka8etou sto trofodotoumeno', ...
        'mikos parallhlou sto trofodotoumeno', ...
        'apostash tou susthmatos apo to plate', ...
        ' mikos plate x,y ', ...
        ' mikos skirt z ', ...
        ' ru8misths seglength tou plate ', ...
        ' ru8misths seglength tou plate '}, ...
    'value', {obj.length0, obj.length1, obj.length2, obj.distance, obj.platesize1,
obj.platesize2, obj.noOfLengthSegs, obj.noOfWidthSegs}, ...
    'noOfCols', {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, ...
    'noOfRows', {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, ...
    'range', {[ 0 inf], [ 0 inf], [ 0 inf], [ 0 inf], [ 0 inf], [ 0 inf ],
[ 0 inf], [ 0 inf ]}, ...
    'type', {'integer', 'integer', 'integer', 'integer', 'integer', 'integer', 'integer', 'integer',
'integer'}, ...
    'help', {...
        'Mikos trofodotoumenou', ...
        'mikos ka8etou sto trofodotoumeno', ...
        'mikos parallhlou sto trofodotoumeno', ...
        'apostash tou susthmatos apo to plate', ...
        ' mikos plate x,y ', ...
        ' mikos skirt z ', ...
        ' ru8misths seglength tou plate ', ...
        ' ru8misths seglength tou plate '});

obj.type = 'SAW3PE';
obj.commonStruct = commonStruct;
obj.dlgStruct = dlgStruct;

if (editParms)
    [obj,okay] = snasmbdlg (obj);
else
    okay = 1;
end
if (okay)
    location = obj.commonStruct(1).value;

```

```

segLength = obj.commonStruc(2).value;
orientation = obj.commonStruc(3).value;
freqScale = obj.commonStruc(4).value;
length0 = obj.dlgStruc(1).value;
length1 = obj.dlgStruc(2).value;
length2 = obj.dlgStruc(3).value;
distance = obj.dlgStruc(4).value;
platesize1 = obj.dlgStruc(5).value;
platesize2 = obj.dlgStruc(6).value;
noOfLengthSegs = obj.dlgStruc(7).value;
noOfWidthSegs = obj.dlgStruc(8).value;

asmb = Segment (modelFreq, location, segLength, orientation, freqScale,
length0, length1, length2, distance, platesize1, platesize2, noOfLengthSegs,
noOfWidthSegs);

asmb.name = 'SAW3PE';
asmb.properties = struct ('name',{ 'location', 'segLength', 'orientation',
'freqScale', 'length0', 'length1', 'length2', 'distance', 'platesize1', 'platesize2',
'noOfLengthSegs', 'noOfWidthSegs'}, ...
'value',{ location, segLength, orientation, freqScale, length0, length1, length2,
distance, platesize1, platesize2, noOfLengthSegs, noOfWidthSegs});
else
asmb = [];
end

%-----
% WRITE YOUR SEGMENT ROUTINE AFTER THE LINE: freqMHz =
modelFreq.*freqScale;
%-----
function asmb = Segment (modelFreq, ...
location, ...
segLength, ...
orientation, ...
freqScale, ...
length0, ...
length1, ...
length2, ...
distance, ...
platesize1, ...
platesize2, ...
noOfLengthSegs, ...
noOfWidthSegs)
freqMHz = modelFreq.*freqScale;

```

Ο αυτοματοποιημένος κώδικας που δημιουργεί το πρόγραμμα με βάση τις εντολές που δώσαμε στο interface τελειώνει εδώ και ακολουθεί ο δικός μας κώδικας που κατασκευάζει τη δομή της κεραίας που θέλουμε να

εξετάσουμε. Η παρουσίαση του κώδικα γίνεται βήμα βήμα με επεξηγηματικά σχόλια για κάθε μη προφανή εντολή.

Αρχικά, κάτω από το κομμάτι του αυτοματοποιημένου κώδικα, ορίζουμε τη βοηθητική μεταβλητή λ (λ), δηλαδή το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των μηκών και των αποστάσεων, έτσι ώστε η κατασκευή της κεραίας να προσαρμόζεται ανάλογα με την συχνότητα λειτουργίας.

Η εντολή αυτή είναι

```
lambda = 300/freqMHz;
```

Στη δική μας περίπτωση επειδή αναφερόμαστε στη συχνότητα των 2.4GHz, η μεταβλητή λ (μήκος κύματος) θα παίρνει την τιμή $300/2400=0.125\text{m}=12,5\text{cm}$

Πρώτα από όλα ένας βασικός περιορισμός που τίθεται στον κώδικα της υπό εξέτασης κεραίας αφορά στη μεταβλητή *distance*, που εκφράζει το σημείο τομής των κάθετων καλωδίων με το τροφοδοτούμενο καλώδιο, έτσι ώστε να μην μπορεί να έχει τιμή μεγαλύτερη από την τιμή που θα έχει το μήκος του τροφοδοτούμενου καλωδίου κάθε φορά. Αυτός ο προφανής περιορισμός καλύπτεται με την εξής συνθήκη

```
if (distance > length0)
    distance = length0;
end;
```

Εν συνεχεία, καθορίζονται ορισμένες συνθήκες που εξασφαλίζουν την ορθότητα της διάταξης σύμφωνα με τους περιορισμούς που θέτει το πρόγραμμα και έχουν αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα αφορά 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

Δεδομένου λοιπόν ότι το οποιοδήποτε θεωρητικά μικρό λάθος στη σχεδίαση μπορεί να οδηγήσει σε έναν ανακριβή υπολογισμό της κατανομής ρεύματος και σε παραπλανητικά ανακλώμενα πεδία, το μήκος των *segments* των *plates* σχεδιάστηκε έτσι, κατόπιν ανάλυσης του συστήματος, ώστε να προσαρμόζεται ανάλογα, κάθε φορά, στα μεγέθη των μεταβλητών που προκύπτουν από τους γενετικούς αλγόριθμους, με σκοπό η δομή της κεραίας να μην παρουσιάζει λάθη.

Οι 2 παράμετροι που χρησιμεύουν στην εν λόγω διαδικασία είναι τα προαναφερθέντα noOfLengthSegs και noOfWidthSegs που διαδραματίζουν το ρόλο σταθεράς ανάλογα με τα μήκη των μεταβλητών που προκύπτουν από την βελτιστοποίηση, με γνώμονα πάντα να καλύπτονται οι συνθήκες των Trueman και Kubina. Η τιμή των 2 αυτών παραμέτρων, αλλάζει κάθε φορά ανάλογα με τις διαστάσεις που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση. Ως αρχική τιμή και για τις δύο παραμέτρους, έχει δοθεί η τιμή 6.

Οι περιορισμοί λοιπόν που προέκυψαν με βάση την ανάλυση του τύπου κεραίας που χρησιμοποιήθηκε είναι οι εξής:

k=0;

```
if(platesize2>13) & (8>=platesize1)
    noOfLengthSegs=2;
    noOfWidthSegs=2;
end;
if(platesize2>13) & (10>=platesize1) & (platesize1>8)
    noOfLengthSegs=4;
    noOfWidthSegs=4;
end;
if(platesize2>13) & (4>platesize1)
    noOfLengthSegs=1;
    noOfWidthSegs=1;
end;

if(platesize2>11) & (14>platesize2) & (8>=platesize1)
    noOfLengthSegs=2;
    noOfWidthSegs=2;
end;

if(platesize2>11) & (14>platesize2) & (4>platesize1)
    noOfLengthSegs=1;
    noOfWidthSegs=1;
end;

if(platesize2>8) & (12>platesize2) & (6>=platesize1)
    noOfLengthSegs=2;
    noOfWidthSegs=2;
end;

if(platesize2>8) & (12>platesize2) & (4>platesize1)
    noOfLengthSegs=1;
    noOfWidthSegs=1;
end;
```

```

if (platesize2>5) & (9>platesize2) & (6>platesize1)
    noOfLengthSegs=2;
    noOfWidthSegs=2;
end;
if (platesize2>4) & (6>platesize2) & (platesize1>14)
    noOfLengthSegs=8;
    noOfWidthSegs=8;
end;

if (platesize2>4) & (6>platesize2) & (platesize1<4)
    noOfLengthSegs=2;
    noOfWidthSegs=2;
end;

if (platesize2>3) & (5>platesize2) & (platesize1>12)
    noOfLengthSegs=10;
    noOfWidthSegs=10;
end;

if (platesize2>3) & (5>platesize2) & (platesize1<4)
    noOfLengthSegs=2;
    noOfWidthSegs=2;
end;

if (platesize2>2) & (4>platesize2) & (platesize1<10)
    k=3;
    noOfLengthSegs=2;
    noOfWidthSegs=2;
end;

if (platesize2>2) & (4>platesize2) & (platesize1<4)
    k=3;
    noOfLengthSegs=1;
    noOfWidthSegs=1;
end;

if (platesize2>2) & (4>platesize2) & (platesize1>8)
    k=3;
end;

if (platesize2>1) & (3>platesize2) & (platesize1<6)
    k=3;
    noOfLengthSegs=2;
    noOfWidthSegs=2;
end;

if (platesize2>1) & (3>platesize2) & (platesize1>4)
    k=3;
end;

```

Το επόμενο βήμα είναι η καθαυτό κατασκευή της υπό εξέταση κεραίας, δηλαδή η κατασκευή των συρμάτων και των plates. Αυτό γίνεται με την εντολή snwire και snplate και αφού έχουν καθοριστεί όλες οι παράμετροι των εντολών αυτών. Πρώτα καθορίζονται οι συντεταγμένες end1 και end2 και στην συνέχεια καθορίζεται η ακτίνα του σύρματος του διπόλου που στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής ορίστηκε 0.0005 m και ο αριθμός των segments που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή τους

Οι τιμές για τις παραμέτρους location, orientation, freqScale και segLength είναι αυτές που ορίστηκαν προηγουμένως στο user interface του προγράμματος.

Ο κώδικας που κατασκευάζει την ζητούμενη διάταξη με τα plate να χρησιμεύουν ως skirt της κεραίας είναι ο εξής :

Αρχικά ορίζουμε τις συντεταγμένες end1 και end2 μεταξύ των οποίων θα σχεδιαστεί το τροφοδοτούμενο wire, και ακολουθούν οι εντολές σχεδιασμού.

```
end1 = [0 , 0 , 0];
end2 = [0, 0, length0.*(lambda.*segLength)];

wire.coord1 = end1;
wire.coord2 = end2;
wire.radius = 0.0005;
wire.noOfSegs = length0;
wire.location = location;
wire.orientation = orientation;
wire.freqScale = freqScale;
wire.segLength = segLength;

asmb.assemblies{1} = snwire (modelFreq, wire, 0);
```

Αφού κατασκευάσαμε το πρώτο wire πρέπει να τοποθετηθεί η πηγή τάσης που στην παρούσα εργασία είναι η AFVS (Applied Field Voltage Source)

```
source.type = 'AFVS';
source.voltage = 1;
asmb.assemblies{1}.segments{1}.excitation{1} = source;
```

Κατόπιν ακολουθεί ο κώδικας για το κάθετο στο τροφοδοτούμενο wire

```
end1 = [0, 0, distance.*(lambda.*segLength)];
end2 = [length1.*(lambda.*segLength), 0 , distance.*(lambda.*segLength)];
```

```
wire.coord1 = end1;
wire.coord2 = end2;
wire.radius = 0.0005;
wire.noOfSegs = length1;
wire.location = location;
wire.orientation = orientation;
wire.freqScale = freqScale;
wire.segLength = segLength;
```

```
asmb.assemblies{2} = snwire (modelFreq, wire, 0);
```

Ενώ τα υπόλοιπα 3 κάθετα wires, τα οποία θα είναι παρασιτικά κατασκευάζονται έτσι ώστε να μην συνδέονται με το καλώδιο τροφοδοσίας. Αυτό επιτεύχθηκε αφήνοντας κενό της τάξης του ενός segment. Δηλαδή ο σχεδιασμός των 3 παρασιτικών καλωδίων ξεκινά 1 segment πιο μακριά από το θεωρητικό σημείο τομής του συστήματος των κάθετων καλωδίων στο τροφοδοτούμενο.

Ο κώδικας που κατασκευάζει λοιπόν τα 3 παρασιτικά στοιχεία είναι ο εξής:

```
end1 = [-lambda.*segLength, 0, distance.*(lambda.*segLength)];
end2 = [-length1.*(lambda.*segLength), 0, distance.*(lambda.*segLength)];
```

```
wire.coord1 = end1;
wire.coord2 = end2;
wire.radius = 0.0005;
wire.noOfSegs = length1-1;
wire.location = location;
wire.orientation = orientation;
wire.freqScale = freqScale;
wire.segLength = segLength;
```

```
asmb.assemblies{3} = snwire (modelFreq, wire, 0);
```

```
end1 = [0, lambda.*segLength, distance.*(lambda.*segLength)];
end2 = [0, length1.*(lambda.*segLength), distance.*(lambda.*segLength)];
```

```
wire.coord1 = end1;
wire.coord2 = end2;
wire.radius = 0.0005;
wire.noOfSegs = length1-1;
wire.location = location;
wire.orientation = orientation;
wire.freqScale = freqScale;
wire.segLength = segLength;
```

```
asmb.assemblies{4} = snwire (modelFreq, wire, 0);
```



```
end1 = [0, -(lambda.*segLength), distance.*(lambda.*segLength)];
end2 = [0, -length1.*(lambda.*segLength), distance.*(lambda.*segLength)];
```

```
wire.coord1 = end1;
wire.coord2 = end2;
wire.radius = 0.0005;
wire.noOfSegs = length1-1;
wire.location = location;
wire.orientation = orientation;
wire.freqScale = freqScale;
wire.segLength = segLength;
```

```
asmb.assemblies{5} = snwire (modelFreq, wire, 0);
```

Το κυρίως σώμα της υπό εξέταση κεραίας ολοκληρώνεται με τις κάθετες επεκτάσεις των καλωδίων (στον άξονα z)

```
s = distance + length2;
end1 = [length1.*(lambda.*segLength), 0, distance.*(lambda.*segLength)];
end2 = [length1.*(lambda.*segLength), 0, s.*(lambda.*segLength)];
```

```
wire.coord1 = end1;
wire.coord2 = end2;
wire.radius = 0.0005;
wire.noOfSegs = length2;
wire.location = location;
wire.orientation = orientation;
wire.freqScale = freqScale;
wire.segLength = segLength;
```

```
asmb.assemblies{6} = snwire (modelFreq, wire, 0);
```

```
s = distance + length2;
end1 = [-length1.*(lambda.*segLength), 0, distance.*(lambda.*segLength)];
end2 = [-length1.*(lambda.*segLength), 0, s.*(lambda.*segLength)];
```

```
wire.coord1 = end1;
wire.coord2 = end2;
wire.radius = 0.0005;
wire.noOfSegs = length2;
wire.location = location;
wire.orientation = orientation;
wire.freqScale = freqScale;
wire.segLength = segLength;
```

```
asmb.assemblies{7} = snwire (modelFreq, wire, 0);
```

```

s = distance + length2;
end1 = [0, length1.*(lambda.*segLength), distance.*(lambda.*segLength)];
end2 = [0, length1.*(lambda.*segLength), s.*(lambda.*segLength)];

```

```

wire.coord1 = end1;
wire.coord2 = end2;
wire.radius = 0.0005;
wire.noOfSegs = length2;
wire.location = location;
wire.orientation = orientation;
wire.freqScale = freqScale;
wire.segLength = segLength;

```

```

asmb.assemblies{8} = snwire (modelFreq, wire, 0);

```

```

s = distance + length2;
end1 = [0, -length1.*(lambda.*segLength), distance.*(lambda.*segLength)];
end2 = [0, -length1.*(lambda.*segLength), s.*(lambda.*segLength)];

```

```

wire.coord1 = end1;
wire.coord2 = end2;
wire.radius = 0.0005;
wire.noOfSegs = length2;
wire.location = location;
wire.orientation = orientation;
wire.freqScale = freqScale;
wire.segLength = segLength;

```

```

asmb.assemblies{9} = snwire (modelFreq, wire, 0);

```

Αφού ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός των καλωδίων, ακολουθεί ο σχεδιασμός του plate with skirt το οποίο στην ουσία αποτελείται από 5 plate 2 διαστάσεων. Το plate που βρίσκεται στο x,y επίπεδο στο οποίο βρίσκεται και η τροφοδοσία, προσέχουμε η διάσταση του να είναι πάντα ζυγός αριθμός (των segments) ώστε να μην χαλάει η συμμετρία της διάταξης και η τροφοδοσία να βρίσκεται πάντα στο σημείο τομής των διαγωνίων του τετράγωνου plate.

Το plate που αντιστοιχεί στο x,y επίπεδο σχεδιάζεται ως εξής

```

plate.location=[0 0 0];
plate.orientation = orientation;
plate.freqScale = freqScale;
plate.segLength = segLength;
plate.len = platesize1.*(lambda.*segLength);
plate.width = platesize1.*(lambda.*segLength);

```

```

plate.noOfLengthSegs = noOfLengthSegs;
plate.noOfWidthSegs = noOfWidthSegs;
asmb.assemblies{10} = snplate(modelFreq, plate, 0);

```

και ακολουθούν τα υπόλοιπα 4 plate που ολοκληρώνουν το σχεδιασμό της κεραίας

```

plate.location=[platesize1.*(lambda.*segLength)/2 0 -platesize2.*(lambda.*segLength)/2];
plate.orientation = [0 90 0];
plate.freqScale = freqScale;
plate.segLength = segLength;
plate.len = platesize2.*(lambda.*segLength);
plate.width = platesize1.*(lambda.*segLength);
plate.noOfLengthSegs = 4-k;
plate.noOfWidthSegs = noOfWidthSegs;

```

```

asmb.assemblies{11} = snplate(modelFreq, plate, 0);

```

```

plate.location = [-platesize1.*(lambda.*segLength)/2 0 -platesize2.*(lambda.*segLength)/2];
plate.orientation = [0 90 0];
plate.freqScale = freqScale;
plate.segLength = segLength;
plate.len = platesize2.*(lambda.*segLength);
plate.width = platesize1.*(lambda.*segLength);
plate.noOfLengthSegs = 4-k;
plate.noOfWidthSegs = noOfWidthSegs;

```

```

asmb.assemblies{12} = snplate(modelFreq, plate, 0);

```

```

plate.location = [0 platesize1.*(lambda.*segLength)/2 -platesize2.*(lambda.*segLength)/2];
plate.orientation = [90 0 0];
plate.freqScale = freqScale;
plate.segLength = segLength;
plate.len = platesize1.*(lambda.*segLength);
plate.width = platesize2.*(lambda.*segLength);
plate.noOfLengthSegs = noOfLengthSegs;
plate.noOfWidthSegs = 4-k;

```

```

asmb.assemblies{13} = snplate(modelFreq, plate, 0);

```

```

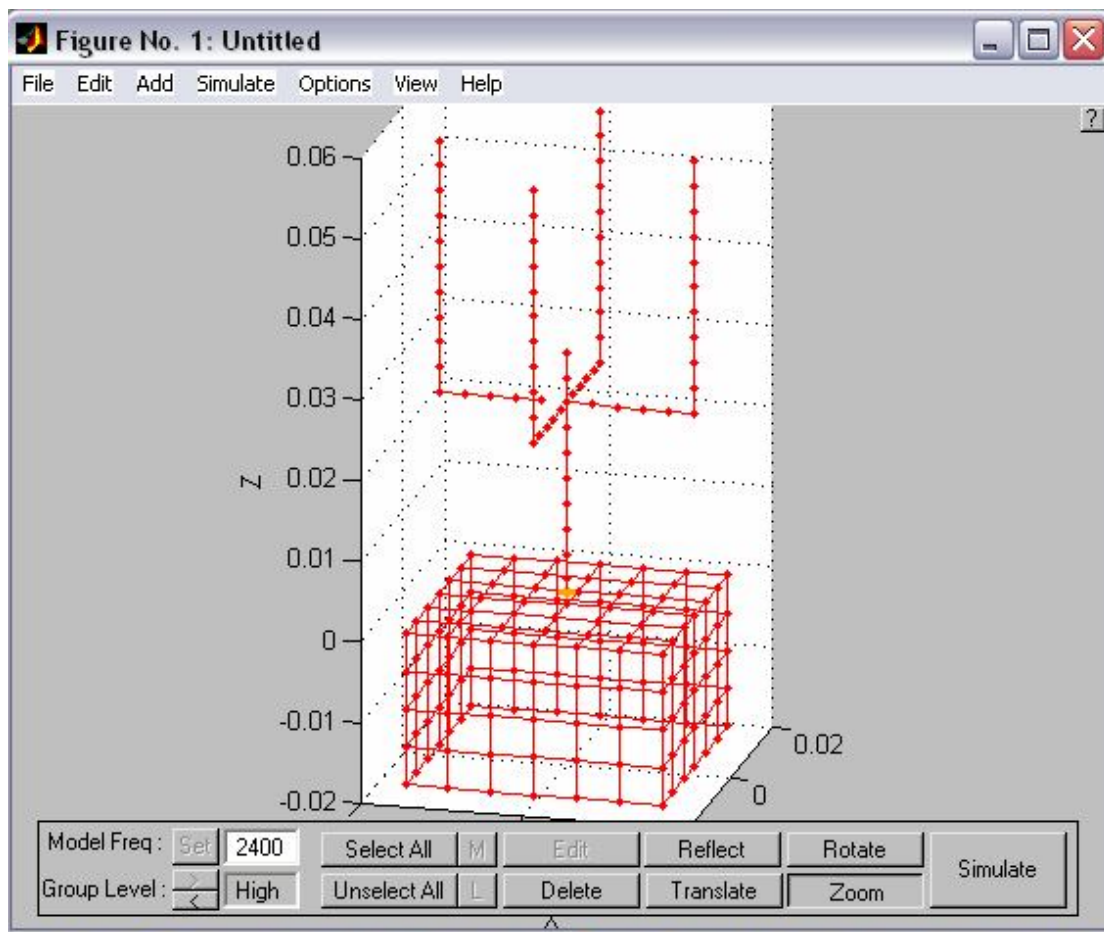
plate.location = [0 -platesize1.*(lambda.*segLength)/2 -platesize2.*(lambda.*segLength)/2];
plate.orientation = [90 0 0];
plate.freqScale = freqScale;
plate.segLength = segLength;
plate.len = platesize1.*(lambda.*segLength);

```

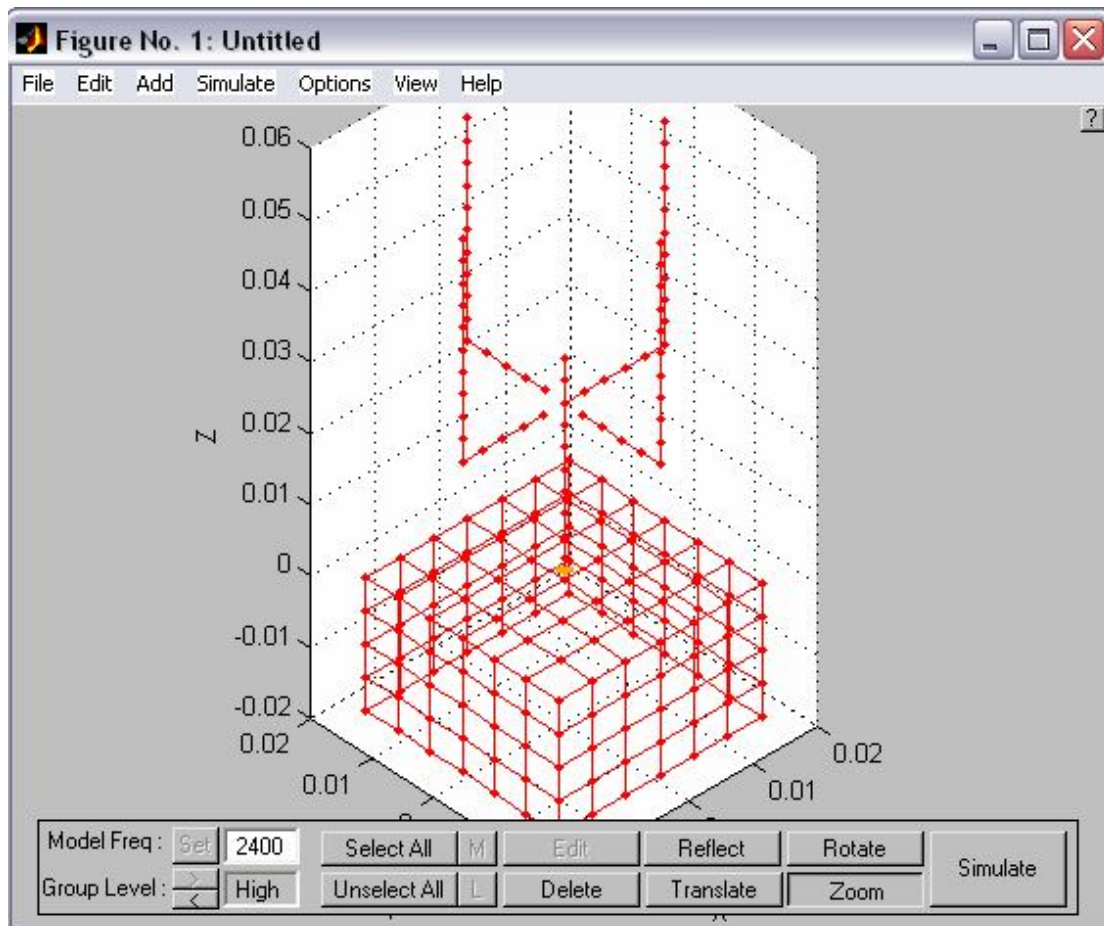
```
plate.width = platesize2.*(lambda.*segLength);  
plate.noOfLengthSegs = noOfLengthSegs;  
plate.noOfWidthSegs = 4-k;
```

```
asmb.assemblies{14} = snplate(modelFreq, plate, 0);
```

Η κατασκευή της διάταξης της κεραίας SAW3PE ολοκληρώθηκε και η κλήση της μέσω του input user interface του προγράμματος, για τις default αρχικές τυχαίες τιμές που δόθηκαν δίνει τη μορφή της κεραίας όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα



Εικόνα 56 – Δομή της SAW3PE



Εικόνα 57 – Δομή της SAW3PE από άλλη προοπτική για να ξεχωρίζουν τα παρασιτικά στοιχεία που δεν τέμνουν το τροφοδοτούμενο καλώδιο

Προς το παρόν η μελέτη θα γίνει για την περίπτωση που παρουσιάστηκε, δηλαδή για το τροφοδοτούμενο καλώδιο στην πλευρά των θετικών x και τα υπόλοιπα παρασιτικά.

8.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΣΩ GA OPTIMIZER

Όπως έχει αναφερθεί ήδη η βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της κεραίας θα γίνει μέσω του ενσωματωμένου στο SNEC λογισμικού GA optimizer μέσω της χρήσης κατάλληλων γενετικών αλγορίθμων.

Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η δημιουργία

- μίας διάταξης που να έχει διάγραμμα ακτινοβολίας με όσο το δυνατόν ευρύτερο κύριο λοβό.
- μίας διάταξης που να έχει διάγραμμα ακτινοβολίας με κύριο λοβό εύρους 3db όσο το δυνατόν μεγαλύτερο (στην περίπτωση που εξετάζουμε βρίσκουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας στην διεύθυνση των 0° ενώ λόγω συμμετρίας του σχήματος υπάρχει δυνατότητα και για την διεύθυνση των 90° 180° και 270° ανάλογα σε ποια κατεύθυνση θέλουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας)
- μίας διάταξης που να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο κατευθυντικό κέρδος.
- μιας διάταξης με όσο το δυνατόν μικρότερο Relative Side Lobe Level(R.S.L.L.)
- και μίας διάταξης με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες συντονισμού αντίστασης στο σημείο τροφοδοσίας .το VSWR (επιθυμητός λόγος στάσιμου κύματος) σε όλες τις περιπτώσεις απαιτήθηκε να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο 1 και όχι μεγαλύτερο του 2.

8.2.1 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΚΟΣΤΟΥΣ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν 3 συναρτήσεις κόστους αλλά μόνο οι 2 κρίθηκαν επαρκείς για τις απαιτήσεις μας..

Η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε και εν τέλει απορρίφθηκε είναι η default συνάρτηση του προγράμματος

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

Σε αυτή ο χρήστης έχει την δυνατότητα επιλογής των τιμών των παραμέτρων Req.Gain και Req.VSWR, που αντιπροσωπεύουν το επιθυμητό κατευθυντικό κέρδος και τον επιθυμητό λόγο στάσιμου κύματος VSWR αντίστοιχα. Ακόμα υπάρχει η επιλογή των παραγόντων gFactor και vFactor, δίνοντας έτσι μεγαλύτερο βάρος στην επίτευξη του επιθυμητού κέρδους ή του επιθυμητού VSWR, ανάλογα με το τι θεωρεί ο ίδιος σημαντικότερο ανά περίπτωση.Αποδείχτηκε ότι η συνάρτηση αυτή δεν

ανταποκρίνεται πλήρως στις απαιτήσεις της κεραίας που παρουσιάζεται και χρησιμοποιήθηκε λιγότερο, ενώ δεν κρίθηκε απαραίτητο να παρουσιαστεί στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Η επόμενη συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιήθηκε είναι δικής μας παραγωγής, και είχε στόχο την βελτίωση του κέρδους του κύριου λοβού ακτινοβολίας με παράλληλη ελαχιστοποίηση του επιπέδου των πλευρικών λοβών και ταίριασμα της αντίστασης εισόδου.

Η συνάρτηση δίνεται από την σχέση

$$\text{Fitness/Cost} = w_1 * G(\text{dbi}) - w_2 * B(\text{dbi}) - w_1 |R_{\text{in}}(\Omega) - 50| - w_2 |X_{\text{in}}(\Omega)|$$

όπου G είναι το forward gain εκφρασμένο σε db, B είναι το backward gain εκφρασμένο σε db, R είναι το πραγματικό μέρος της αντίστασης εισόδου εκφρασμένο σε Ohms και X είναι το φανταστικό μέρος της αντίστασης εισόδου σε Ohms. Ακόμη οι μεταβλητές w1, w2, w3, και w4 είναι κατάλληλα επιλεγμένοι συντελεστές βάρους των παραμέτρων G, B, R και X αντίστοιχα.

Ανάλογα με τους διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών των μεταβλητών των συντελεστών βάρους κάθε φορά, προέκυψαν και διαφορετικά βελτιστοποιημένα μοντέλα της κεραίας .

Τέλος η τρίτη συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε επίσης δημιουργήθηκε με στόχο να βελτιώνει άλλα χαρακτηριστικά του διαγράμματος ακτινοβολίας της διάταξης, πέρα από το κατευθυντικό κέρδος και το VSWR

Η αντικειμενική αυτή συνάρτηση σχηματίζεται ως εξής.

Θεωρώντας D(φ) την κατευθυντικότητα, Dmax τη μέγιστη τιμή της , έχουμε το σφάλμα του κύριου λοβού που είναι,

$$e_1 = \frac{1}{89} \sum_{\phi=-44^\circ}^{44^\circ} \left[\left(\frac{\frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.5}{0.5} \right)^2 u \left(0.5 - \frac{D(\phi)}{D_{\max}} \right) \right]$$

όπου u(x) η βηματική συνάρτηση , και είναι 1 για x >= 0 και 0 για x < 0

Στα άκρα του κυρίως λοβού, όπου το επιθυμητό επίπεδο είναι 3db κάτω από από το μέγιστο κέρδος το σχετικό σφάλμα είναι

$$e_2 = \frac{1}{2} \sum_{\phi=\pm 45^\circ} \left(\frac{\frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.5}{0.5} \right)^2$$

Έξω από τον κύριο λοβό όπου το σχετικό εύρος των πλαινών λοβών δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 6db το σφάλμα είναι,

$$e_3 = \frac{1}{269} \sum_{\phi=46^\circ}^{314^\circ} \left[\left(\frac{\frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.1}{0.1} \right)^2 u \left(\frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.1 \right) \right]$$

ενώ τέλος το σφάλμα που αφορά την αντίσταση εισόδου για impedance = 50Ω που ορίστηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι,

$$e_4 = |(\text{Rin}-50)/50|^2 + |\text{Xin}/50|^2$$

όπου Rin και Xin αντιπροσωπεύουν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της αντίστασης εισόδου αντίστοιχα.

Το συνολικό σφάλμα προκύπτει λοιπόν **err=er1+er2+er3+er4**

Δυνητικά η συνάρτηση μπορεί να δοκιμαστεί και για διαφορετικά βάρη για κάθε όρο σφάλματος ανάλογα με τις απαιτήσεις μας, όπως θα φανεί στις μετρήσεις που έγιναν και παρουσιάζονται στη συνέχεια..

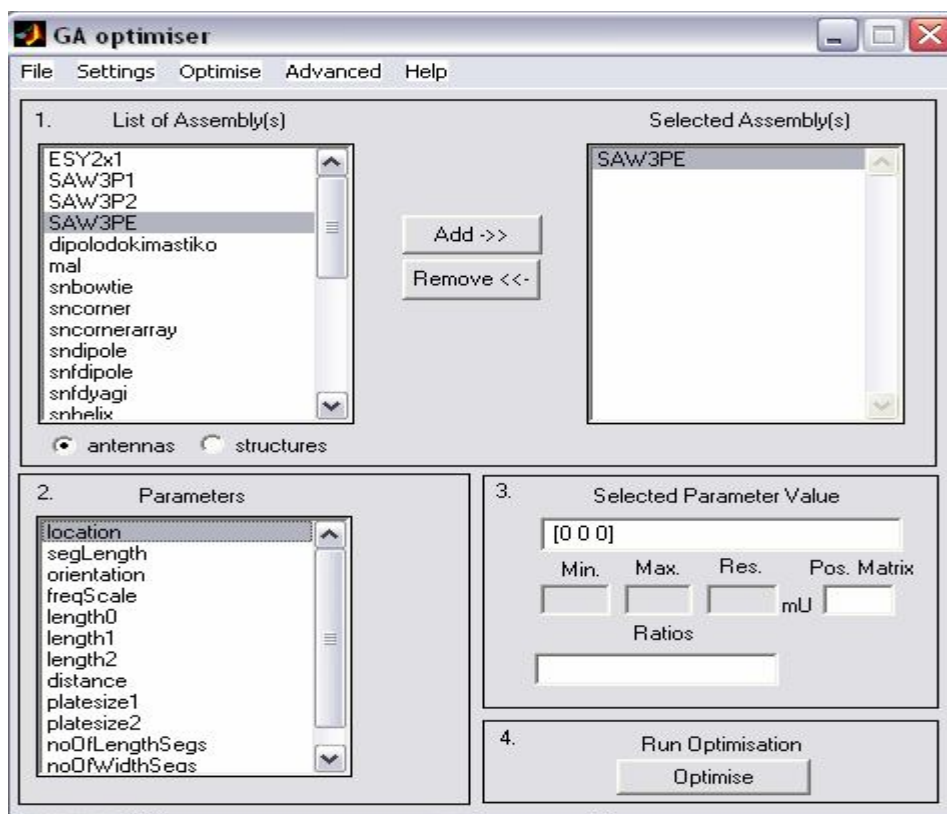
Οπότε το τελικό κόστος κάθε χρωμοσώματος του γενετικού αλγόριθμου προκύπτει από τα επιμέρους σφάλματα μέσω του τύπου

$$\text{OF} = 1 / (1 + \text{sqrt}(\text{err}))$$

Η συνάρτηση αυτή όπως και η προηγούμενη τοποθετείται στο αρχείο cost4.m το οποίο επεκτείνουμε και ενημερώνοντας και κατάλληλα το πρόγραμμα με κάποιες αλλαγές σε παραμέτρους του είμαστε σε θέση να τις καλέσουμε όποια στιγμή θέλουμε.

8.2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ SAW3PE

Αρχικά στο παράθυρο του GA optimizer επιλέγουμε την κεραία που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε όπως φαίνεται στο σχήμα και ορίζουμε τα χαρακτηριστικά βελτιστοποίησης και τη διακύμανση των τιμών



Εικόνα 58 - Επιλογή δομής από τον GA Optimizer

Οι παράμετροι της διάταξης και οι τιμές τους ή το εύρος τιμών τους ανάλογα αν πρόκειται για σταθερά ή μεταβλητή, όπως φαίνονται στο παραπάνω σχήμα είναι οι:

Location = [0 0 0]
Orientation = [0 0 0]
freqScale = 1
segLength = 0.025

που είναι σταθερές (όπως και οι noOfLengthSegs, noOfWidthSegs των οποίων ο ρόλος έχει εξηγηθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο και αρχικοποιούνται στην τιμή 6)

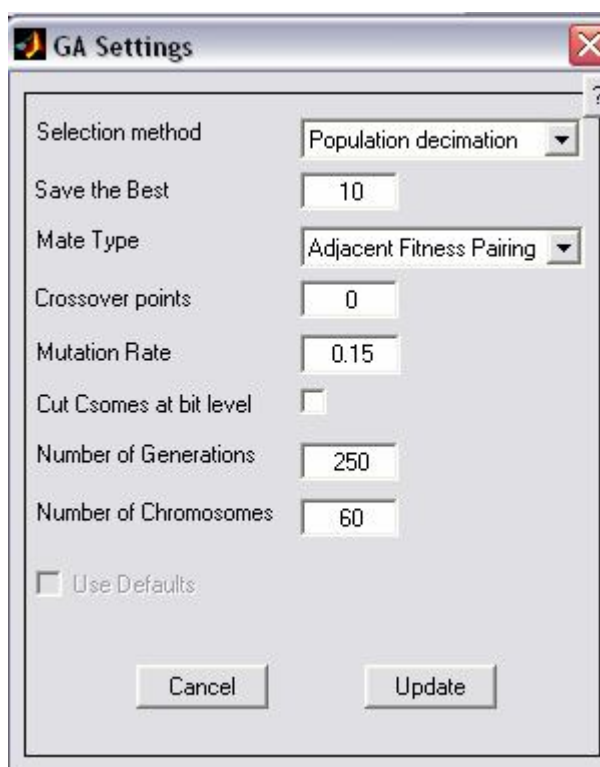
ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι, ορίζονται ως ανεξάρτητες παράμετροι βελτιστοποίησης με ένα συγκεκριμένο πεδίο τιμών και ένα βήμα βελτιστοποίησης. Στην περίπτωση μας, οι τιμές που καθορίστηκαν για τις πέντε παραμέτρους βελτιστοποίησης είναι αυτές που ακολουθούν ενώ να σημειώσουμε ότι οι τιμές που βάζουμε στα αντίστοιχα πεδία του GA Input GUI είναι σε χιλιοστά.

Length0: Min:2 Max:25 Step:1 που σε πραγματικές διαστάσεις είναι [0.625,9.375]cm
Length1: Min:2 Max:18 Step:1 που σε πραγματικές διαστάσεις είναι [0.625,5.625]cm
Length2: Min:1 Max:25 Step:1 που σε πραγματικές διαστάσεις είναι [0.3125,9.375]cm
Distance: Min:1 Max:25 Step:1 που σε πραγματικές διαστάσεις είναι [0.3125,9.375]cm
Platesize1:Min:2 Max:18Step:2 που σε πραγματικές διαστάσεις είναι [0.625,5.625]cm
Platesize2:Min:2 Max:16Step:1 που σε πραγματικές διαστάσεις είναι [0.625,5.000]cm

Τα όρια των τιμών έχουν μπει με τέτοιο τρόπο ώστε η κεραία να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη σε μέγεθος. Ικανοποιητική σε μέγεθος θεωρείται, όταν δεν είναι μεγαλύτερη από 10cm (δηλαδή 32 segments) σε ύψος(χωρίς να υπολογίζεται το plate) και όχι μεγαλύτερη από 6cm σε πλάτος

Σε αυτό το σημείο να υπενθυμίσουμε ότι σε όλες τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ακτίνα σύρματος (wire.radius) ίση με 0.0005, segLength=0.025 και συχνότητα $F=2.4\text{GHz}$, δηλαδή μήκος κύματος $\lambda=0.125\text{m}$.

Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των ρυθμίσεων των γενετικών αλγορίθμων. Για να γίνει αυτό, επιλέγεται στο GA Input GUI από το αναδυόμενο μενού Settings η επιλογή GA Settings. Οι ρυθμίσεις που επιλέχτηκαν στην συγκεκριμένη περίπτωση φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

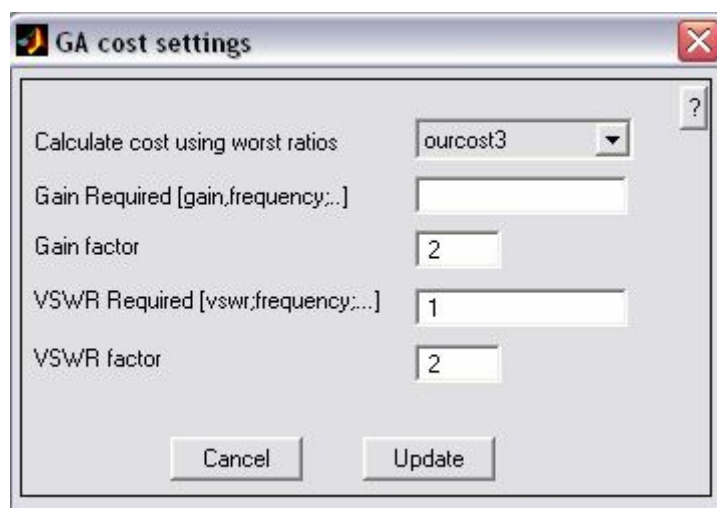


Εικόνα 59 - Το παράθυρο GA Settings

Ο συνολικός πληθυσμός αποτελείται από 250 γενιές και 60 χρωμοσώματα, η μέθοδος επιλογής ορίστηκε ο αποδεκατισμός πληθυσμού (population decimation) που

έχει αποδειχτεί ότι οδηγεί σε ταχύτερη σύγκλιση, ενώ ως τύπος ζευγαρώματος επιλέχθηκε το Adjacent Fitness Pairing. Το σημείο διασταύρωσης επιλέγεται τυχαία(0 στο αντίστοιχο πεδίο) και κάθε χρωμόσωμα χωρίζεται στο επίπεδο του γονιδίου. Τέλος επιλέχτηκε να σώζονται τα 10 καλύτερα χρωμοσώματα από γενιά σε γενιά και το ποσοστό μετάλλαξης ορίστηκε 15%.

Πατώντας την επιλογή update ολοκληρώνεται ο καθορισμός των ρυθμίσεων του GA Settings και ακολουθεί ο ορισμός των cost settings όπως φαίνεται στο σχήμα



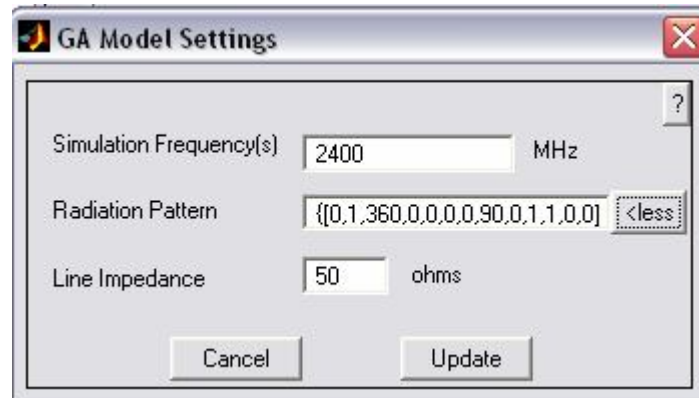
Εικόνα 60 - Το παράθυρο GA cost settings

Όπως ήδη αναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκαν κατά βάση δύο διαφορετικές συναρτήσεις κόστους. Η επιλογή της συνάρτησης γινόταν κάθε φορά στο παράθυρο διαλόγου GA cost settings, στο οποίο αποκτάμε πρόσβαση επιλέγοντας στο GA Input GUI από το αναδυόμενο μενού Settings την επιλογή Cost settings, και πιο συγκεκριμένα στο πεδίο Calculate cost using worst ratios, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Για την χρήση της default συνάρτησης επιλέγουμε Average cost (θα μπορούσαμε να επιλέγαμε και Worst cost ή Multifreq costing χωρίς να αλλάξει τίποτα, αφού η βελτιστοποίηση γινόταν πάντα σε μία συχνότητα), ενώ για την χρήση των δικών μας συναρτήσεων επιλέγαμε ourcost2 και ourcost3.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η default συνάρτηση, όλες οι ρυθμίσεις για τις τέσσερις ελεγχόμενες παραμέτρους της συνάρτησης αυτής γίνεται στα τέσσερα αντίστοιχα πεδία του παραθύρου GA cost settings. Από την άλλη μεριά, στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκαν οι δικές μας συναρτήσεις κόστους ourcost2, ourcost3 όπως και στην περίπτωση που αναλύουμε εδώ, όλες οι ρυθμίσεις για την συνάρτηση γίνονταν με κατάλληλη επεξεργασία του αρχείου cost4.m και όχι από αυτό το παράθυρο

Οι τελευταίες ρυθμίσεις του γενετικού αλγόριθμου γίνονται στο παράθυρο GA Model Settings, στο οποίο αποκτάμε πρόσβαση επιλέγοντας στο GA Input GUI από το αναδυόμενο μενού Settings την επιλογή Model Settings. Το παράθυρο αυτό

φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Για συχνότητα προσομοίωσης (simulation frequency) επιλέξαμε την συχνότητα των 2400 MHz ενώ για αντίσταση της γραμμής μεταφοράς (line impedance) επιλέξαμε την τιμή των 50 Ω. Όσον αφορά το πεδίο Radiation Pattern (Διάγραμμα ακτινοβολίας), ο πίνακας των 13 στοιχείων που επιλέχθηκε ανά περίπτωση, εξαρτήθηκε από την συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά. Στην περίπτωση της default συνάρτησης που εν τέλει δεν χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, ο πίνακας έχει τη μορφή: [0,1,1,0,0,0,1,90,0,0,0,0,0]. Από την άλλη μεριά, για τις δικές μας συναρτήσεις το συγκεκριμένο πεδίο τροποποιήθηκε ως εξής: [0,1,360,0,0,0,0,90,0,1,1,0,0].



Εικόνα 61 - Το παράθυρο GA Model Settings

Αφού γίνουν αυτά ονομάζουμε το αρχείο βελτιστοποίησης *.gaf που υποχρεωτικά θα δημιουργηθεί. Το αρχείο αυτό περιέχει πληροφορίες για όλες τις παραπάνω ρυθμίσεις και μπορούν να γίνουν αλλαγές εντός του, αφού το αρχείο είναι προσβάσιμο και αναγνώσιμο μέσω απλών προγραμμάτων όπως το wordpad.

Στην δική μας περίπτωση το αρχείο που ονομάσαμε SAW3PE.gaf έχει την μορφή :

```
asmb SAW3PE
location [0,0,0]
orientation [0,0,0]
length0 -1 [2000,25000,1000]
length1 -2 [2000,18000,1000]
length2 -3 [1000,25000,1000]
distance -4 [1000,25000,1000]
platesize1 -5 [2000,18000,2000]
platesize2 -6 [2000,16000,1000]
noOfLengthSegs 6
noOfWidthSegs 6
freq 2400
imp 50
sim.radpat {[0,1,360,0,0,0,0,90,0,1,1,0,0]}
ga.chromo 60
ga.gen 250
ga.type [1,10,0,0,0,0,0.15]
cost.vswr 1 2
cost.type 4 ή 5 (ανάλογα ποια από τις 2 συναρτήσεις μας
χρησιμοποιούμε)
```

8.2.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ 1^η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η πρώτη συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής:

$$\text{Fitness/Cost} = w_1 * G(\text{dbi}) - w_2 * B(\text{dbi}) - w_1 |R_{in}(\Omega) - 50| - w_2 |X_{in}(\Omega)|$$

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της κεραίας που προέκυψαν από τους διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών των μεταβλητών των συντελεστών βάρους.

Η στήλη GAIN αντιπροσωπεύει το κατευθυντικό κέρδος, η στήλη 3db το εύρος 3db του κύριου λοβού, το VSWR το λόγο στάσιμου κύματος και το ELEVATION τη γωνία ανύψωσης, δηλαδή πόσες μοίρες μακρύνει από τις 90, εμφανίζεται το μέγιστο κέρδος του διαγράμματος ακτινοβολίας της εκάστοτε βελτιστοποιημένης κεραίας

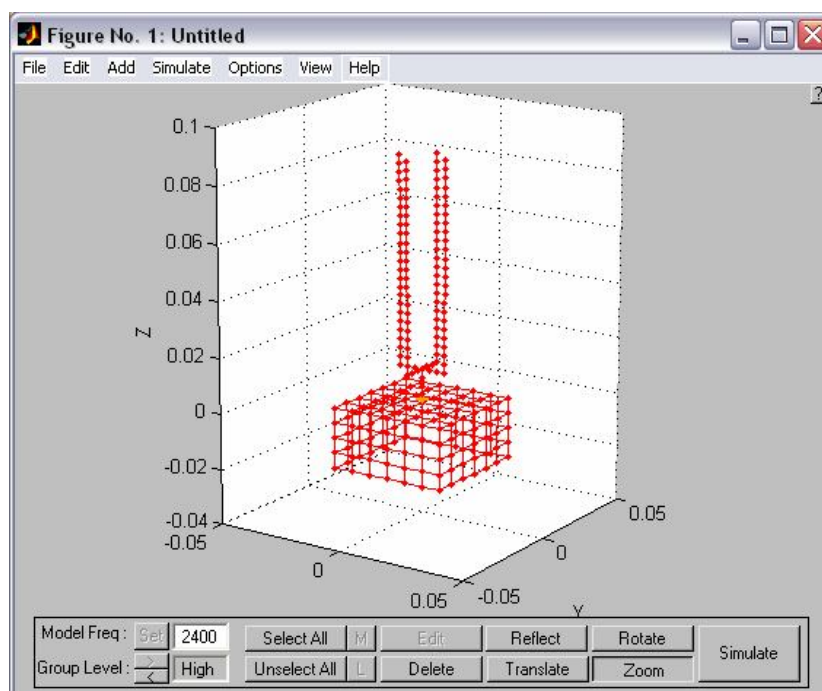
| $W_1 - W_2 - W_3 - W_4$ | <u>GAIN</u> | <u>3db</u> | <u>VSWR</u> | <u>ELEVATION</u> |
|-------------------------|-------------|------------|-------------|------------------|
| 1-1-1-1 | 0,61 | 152 | 1,1065 | -23 |
| 2-1-1-1 | 3,00 | 155 | 1,0225 | -20 |
| 4-1-1-1 | 1,4 | 131 | 1,4356 | -10 |
| 4-1-2-2 | 5,02 | 160 | 1,0855 | -10 |
| 4-2-1-1 | 5,2 | 108 | 11,46 | +10 |
| 4-2-2-2 | 3,0 | 154 | 1,0225 | -20 |
| 5-2-2-2 | 2,4 | 147 | 2,1245 | -19 |
| 6-1-1-1 | 4,6 | 139 | 1,8341 | -9 |
| 6-1-2-2 | 5,9 | 132 | - | -8 |
| 6-2-2-2 | -5,2 | - | - | - |
| 8-1-1-1 | 2,6 | 130 | 2,1534 | -17 |
| 8-1-4-4 | 0,61 | 152 | 1,1065 | -23 |
| 8-2-2-2 | 2,7 | 125 | 1,1465 | -5 |
| 8-2-4-4 | 4,0 | 160 | 1,0855 | -10 |
| 8-4-4-4 | 4,1 | 154 | 1,9876 | -16 |
| 10-1-1-1 | 2,6 | 130 | 33,78 | -14 |
| 10-1-6-6 | 4,0 | 142 | 1,0878 | -16 |
| 10-2-1-1 | 2,5 | 137 | 2,1578 | -17 |
| 10-2-2-2 | 2,2 | 176 | 1,95 | -4 |
| 10-2-4-4 | 5,2 | 138 | 1,75 | -10 |
| 12-2-4-4 | 4,8 | 145 | 15,67 | -19 |
| 12-2-6-6 | 2,7 | 162 | 1,8450 | -14 |

Θα ακολουθήσει μια παρουσίαση των καλύτερων αποτελεσμάτων σύμφωνα με τα κριτήρια που διατυπώθηκαν προηγουμένα, τόσο για την πρώτη όσο και για τη δεύτερη συνάρτηση, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι η παρουσίαση θα γίνει με 6 σχήματα για το κάθε αποτέλεσμα: (1) την διάταξη της κεραίας, όπως αυτή απεικονίζεται στο SuperNEC, (2) τις παραμέτρους της διάταξης, (3) το 2D διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο του αζιμούθιου, (4) το 2D διάγραμμα ακτινοβολίας για το elevation (5) το

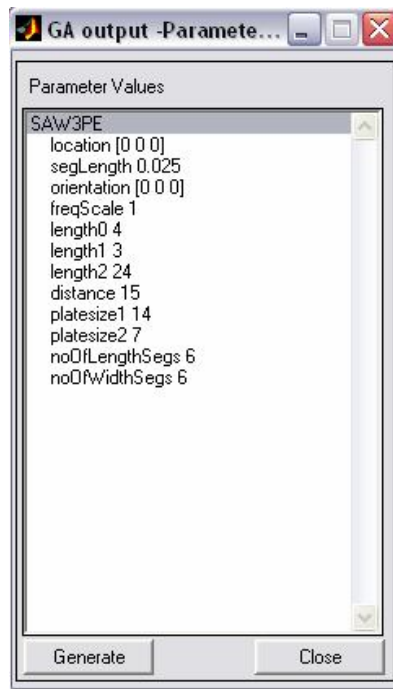
3D διάγραμμα ακτινοβολίας και (6) ο λόγος στάσιμου κύματος(VSWR) στην περιοχή από 2100MHz-2900MHz. Τέλος τονίζεται ότι έχουν παραληφθεί τιμές κέρδους κάτω από -10db ενώ στόχος ήταν η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη συλλογή αποτελεσμάτων με εύρος 3db όσο πιο κοντά γίνεται στις 90°. Ο λόγος που έγινε αυτό είναι πως το συγκεκριμένο εύρος, μέσω της δυνατότητας στροφής του διαγράμματος ακτινοβολίας που έχει η κεραία, της επιτρέπει να καλύψει και τις 360° του αζιμούθιου με τον τρόπο που έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο

Η βελτιστοποιημένη διάταξη της κεραίας ,έτσι όπως προέκυψε μετά τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων για την πρώτη συνάρτηση ,στην πρωτογενή της μορφή, δηλαδή για όλα τα βάρη ίσα με τη μονάδα, έχει ως εξής:

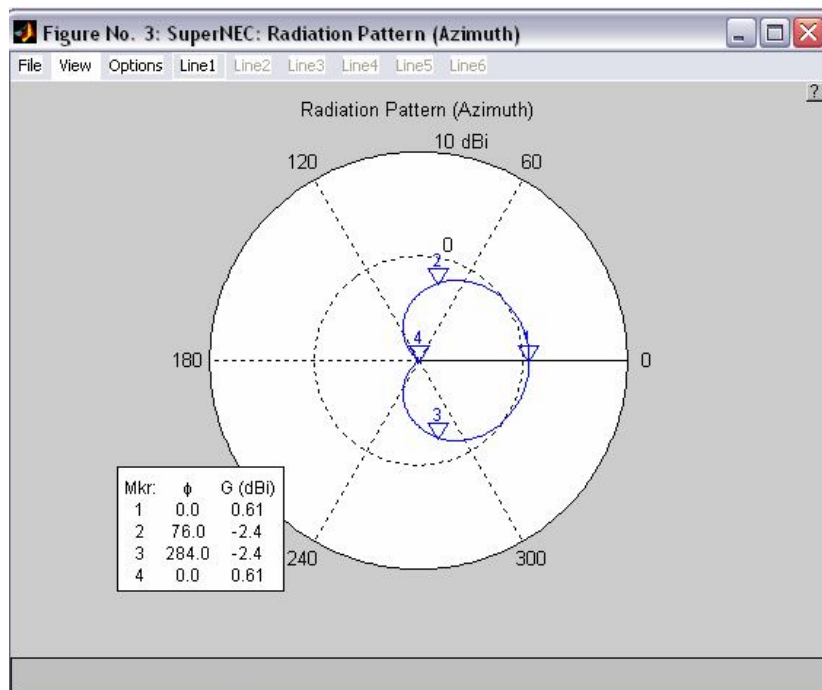
$$W1=W2=W3=W4=1$$



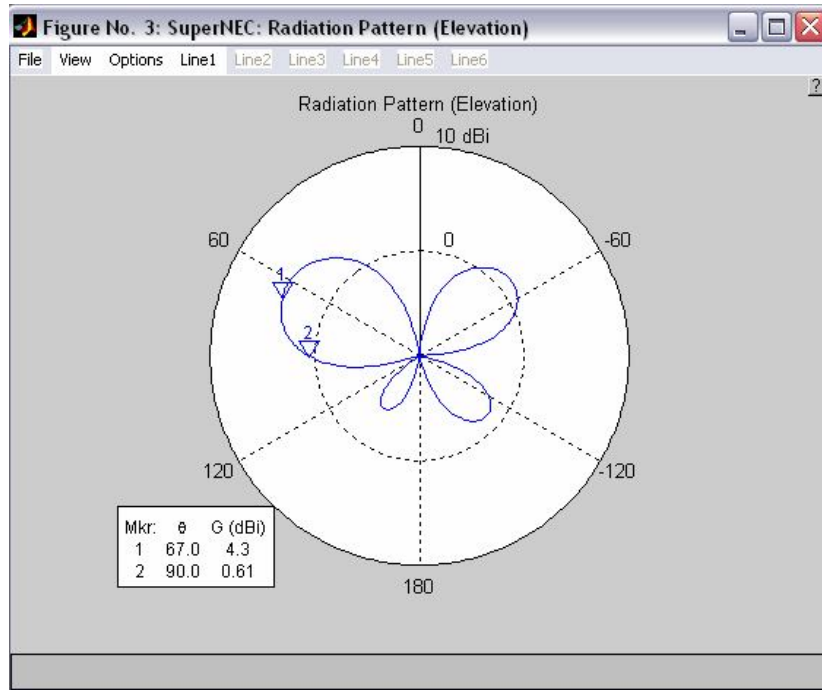
Εικόνα 62 – Διάταξη της κεραίας για βάρη 1-1-1-1



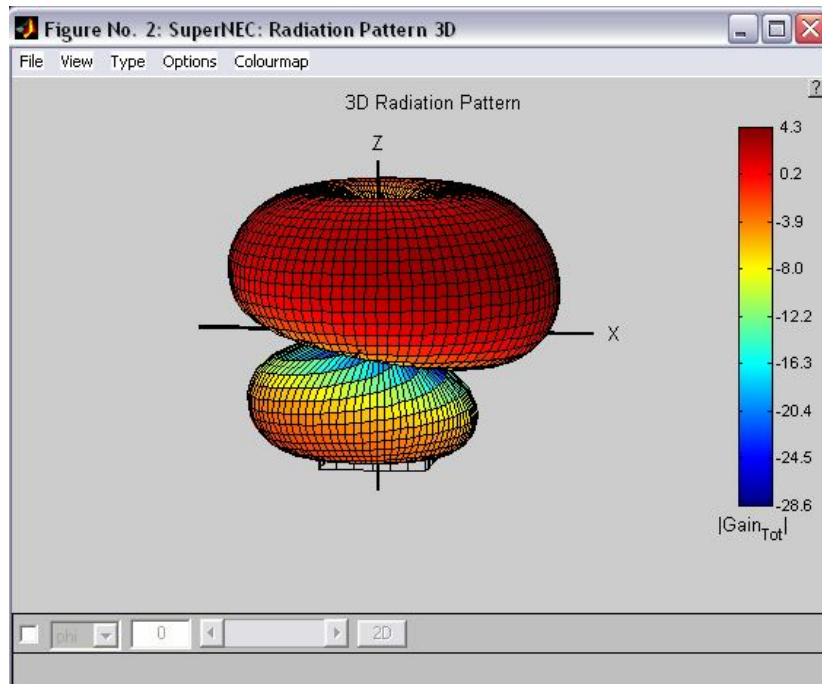
Εικόνα 63 – Οι παράμετροι της διάταξης



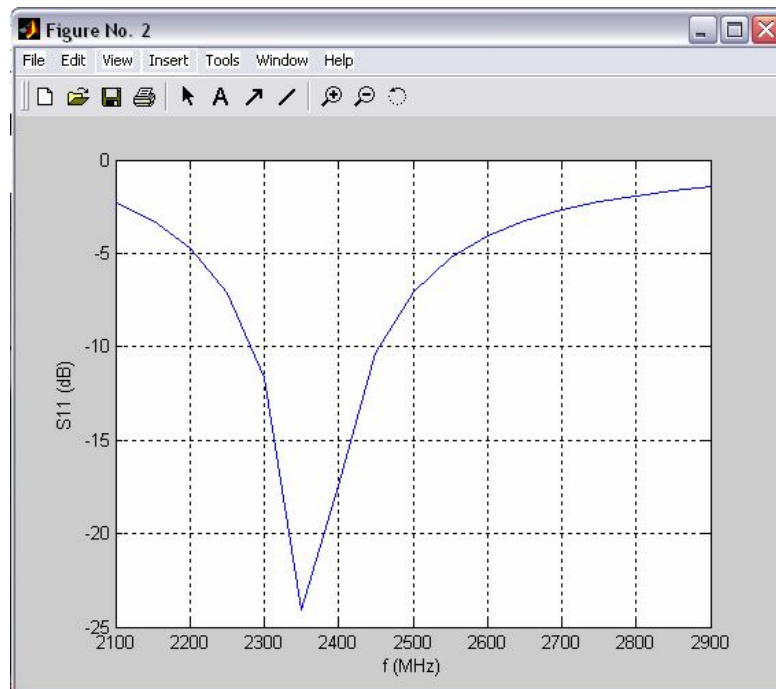
Εικόνα 64 - Το 2D διάγραμμα ακτινοβολίας (Azimuth)



Εικόνα 65- Το 2D διάγραμμα ακτινοβολίας(elevation)



Εικόνα 66- Το 3D διάγραμμα ακτινοβολίας



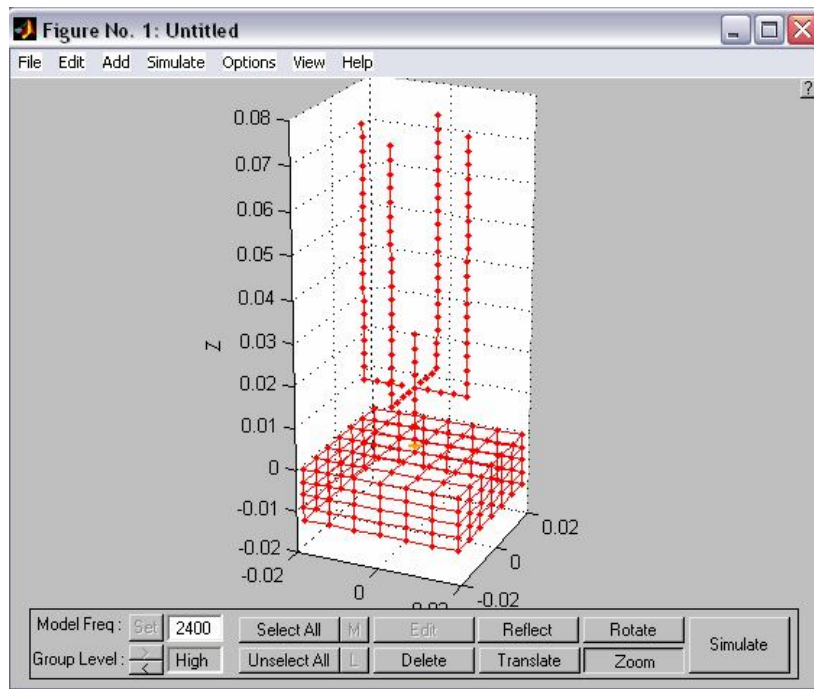
Εικόνα 67- Το VSWR από 2100-2900MHz

Γίνεται αντιληπτό ότι το συγκεκριμένο βελτιστοποιημένο μοντέλο απέχει αρκετά από τις απαιτήσεις μας, τόσο για την κατευθυντικότητα της κεραίας και το κέρδος, όσο και για το συντονισμό περί της συχνότητας των 2,4GHz που όπως φαίνεται από το σχήμα δεν είναι ιδανικός. Ενώ παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση της διεύθυνσης μέγιστης ακτινοβολίας, ως προς τις 90 μοίρες.

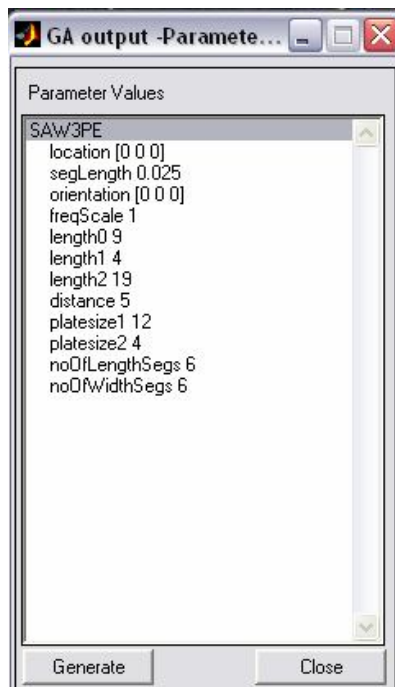
Η παρουσίαση της συγκεκριμένης βελτιστοποίησης έγινε με στόχο να αναδειχθεί η σημασία των συντελεστών βάρους και το πώς οι εναλλαγές των τιμών τους θα οδηγήσουν, σε εμφανώς καλύτερες βελτιστοποιήσεις όπως θα φανεί αμέσως μετά.

Μέσα λοιπόν από το σύνολο των μετρήσεων που φαίνεται στον πίνακα στην αρχή του κεφαλαίου, ξεχωρίζουμε και παρουσιάζουμε τις καλύτερες μετρήσεις.

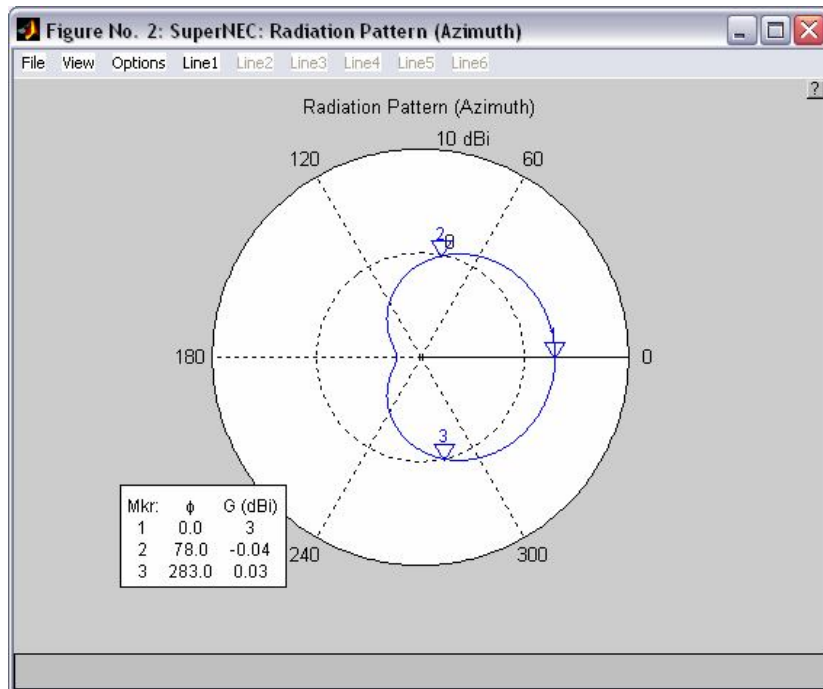
$W1=2, W2=W3=W4=1$



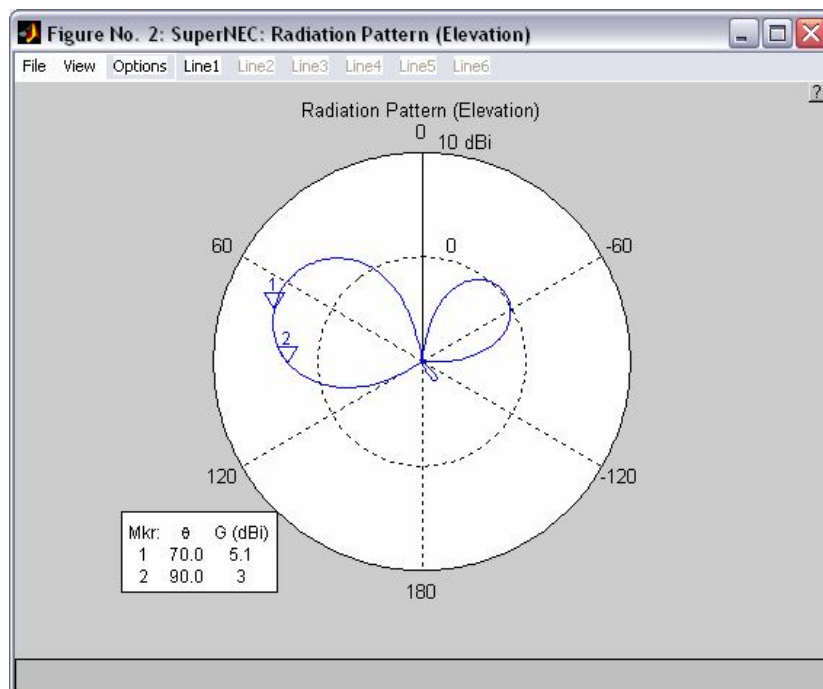
Εικόνα 68- Διάταξη της κεραίας για βάρη 2-1-1-1



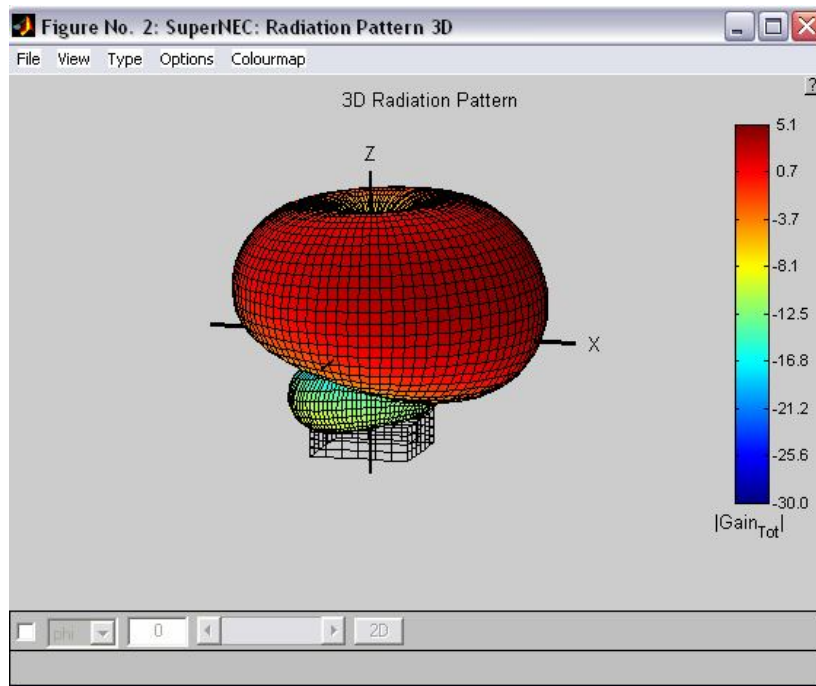
Εικόνα 69-Παράμετροι της διάταξης



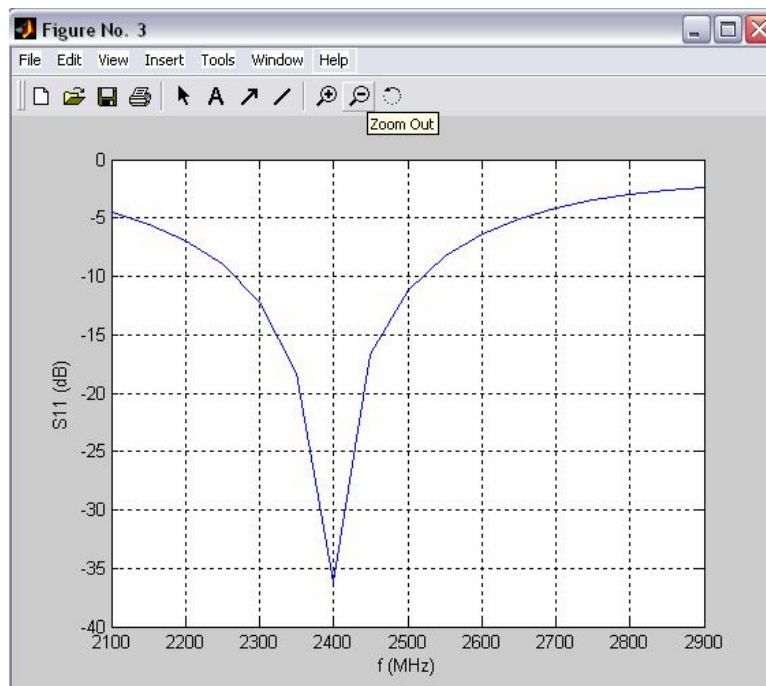
Εικόνα 70 -Το 2D διάγραμμα ακτινοβολίας(azimuth)



Εικόνα 71 – Το 2D διάγραμμα ακτινοβολίας(elevation)



Εικόνα 72 – Το 3D διάγραμμα ακτινοβολίας

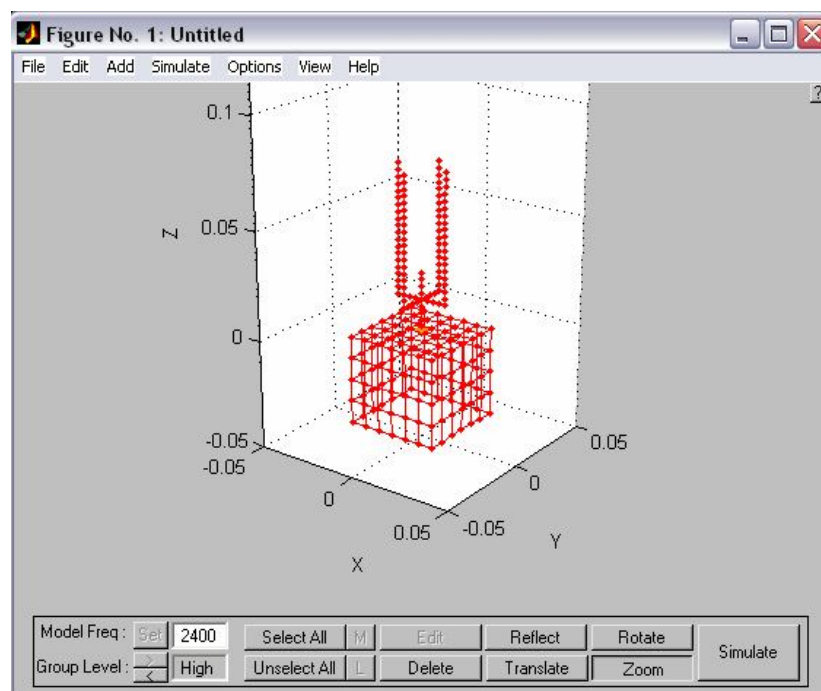


Εικόνα 73 –Το VSWR από 2100-2900MHz

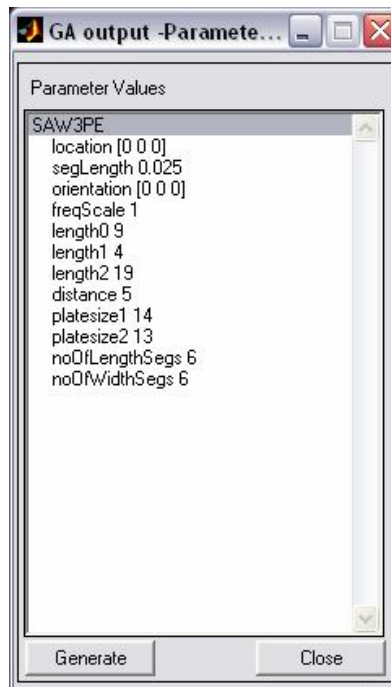
Παρατηρούμε εδώ σε σχέση με την πρώτο μοντέλο που παρουσιάστηκε, σημαντική βελτίωση των χαρακτηριστικών του διαγράμματος ακτινοβολίας, με ταυτόχρονη επιτυχία τέλει VSWR.

Στις επόμενες μετρήσεις στόχος είναι η επίτευξη μεγαλύτερου κέρδους, αλλά και χαμηλότερης γωνίας ανύψωσης, ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά θα επιδιώξουμε να παραμείνουν στα ίδια πολύ καλά επίπεδα.

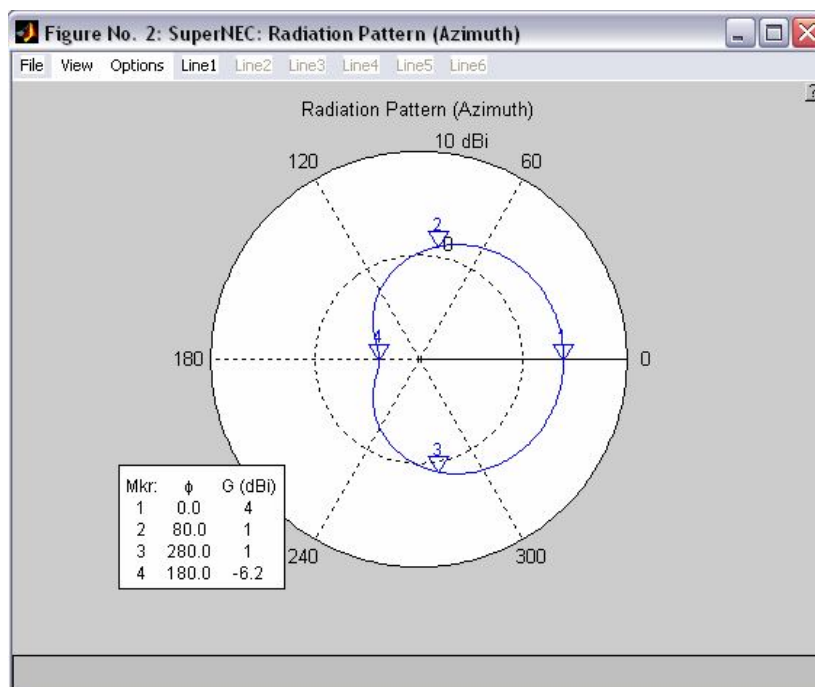
$$W1=4 \quad W2=1 \quad W3=W4=2$$



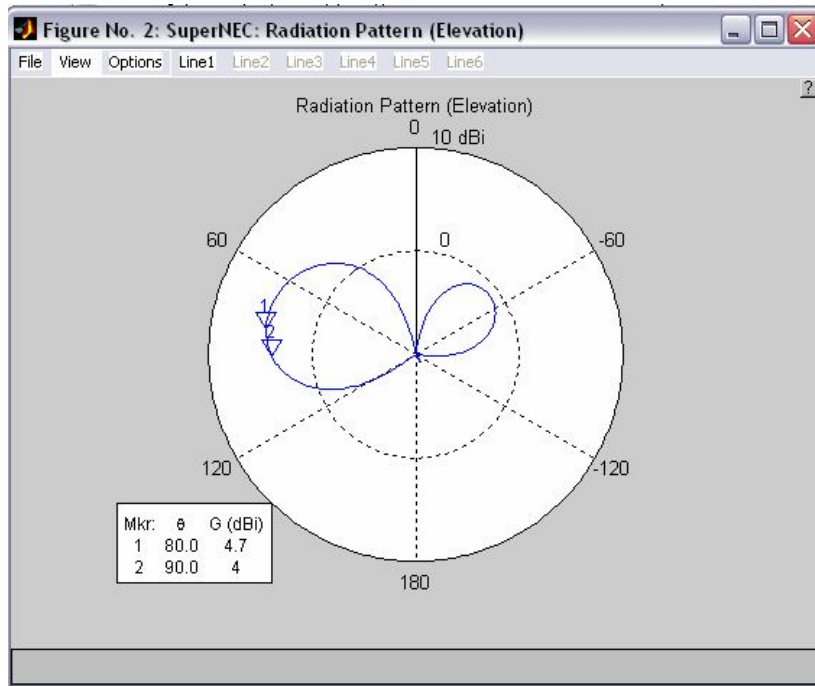
Εικόνα 74 –Διάταξη της κεραίας για βάρη 4-1-2-2



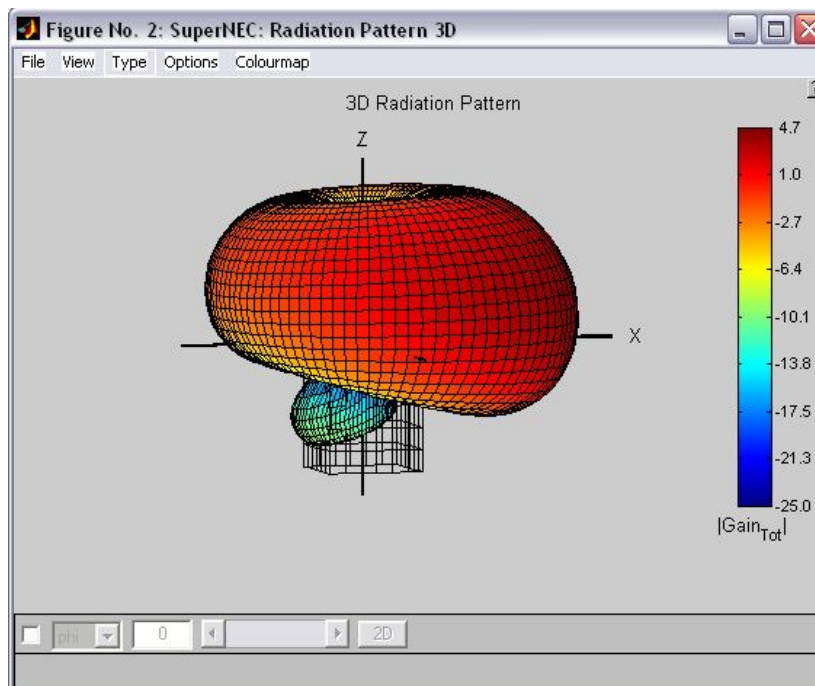
Εικόνα 75 –Παράμετροι της διάταξης



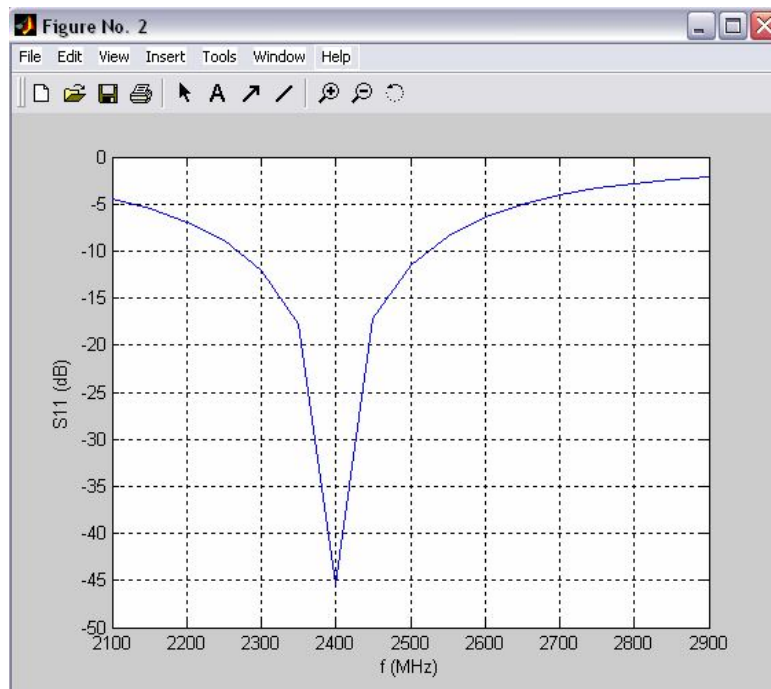
Εικόνα 76 –Το 2D διάγραμμα ακτινοβολίας(azimuth)



Εικόνα 77 –Το 2D διάγραμμα ακτινοβολίας(elevation)



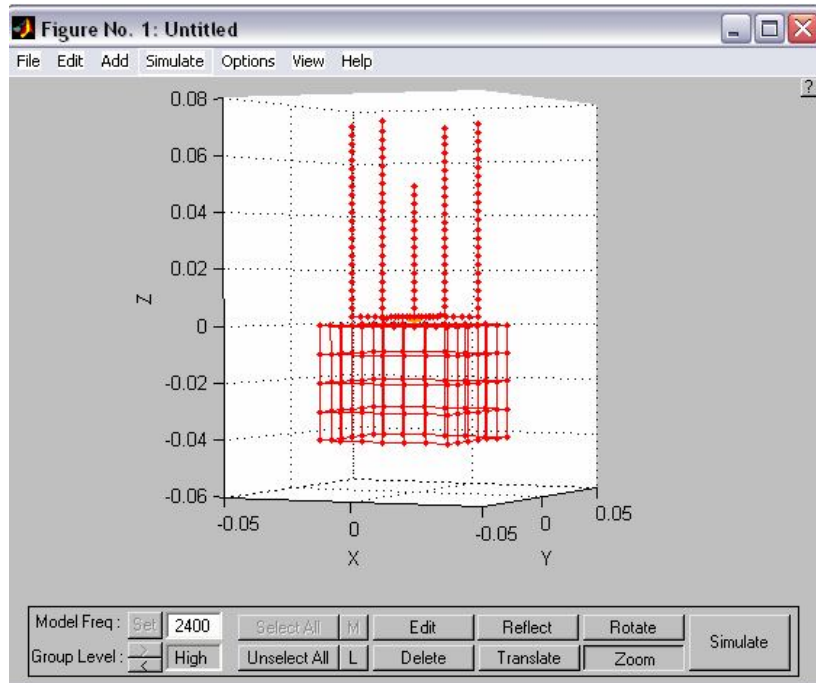
Εικόνα 78 –Το 3D διάγραμμα ακτινοβολίας



Εικόνα 79 –Το VSWR από 2100-2900MHz

Όπως γίνεται εμφανές από τις εικόνες, στη συγκεκριμένη μέτρηση πετύχαμε αισθητή αύξηση του κέρδους που πλέον φτάνει τα 4G(dbi), ενώ το elevation από τις 20 μοίρες μειώθηκε στις 10. Το VSWR παραμένει σε εξαιρετικά καλά επίπεδα ενώ η κατευθυντικότητα του διαγράμματος έχει εν γένει βελτιωθεί. Συνεχίζοντας τις βελτιστοποιήσεις με τους διαφορετικούς συνδιασμούς των τιμών των συντελεστών βάρους της συνάρτησης επιδιώκουμε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα.

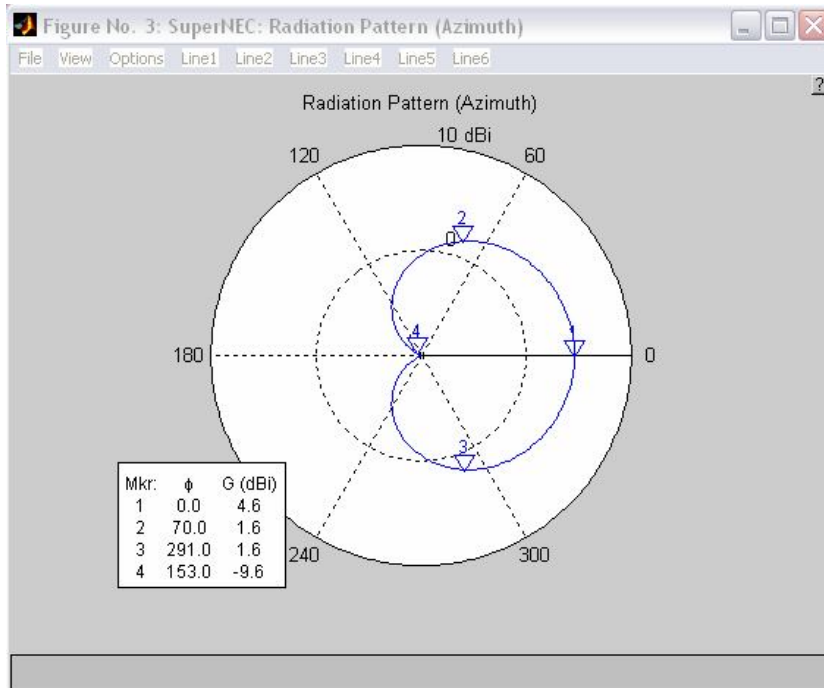
W1=6 W2=W3=W4=1



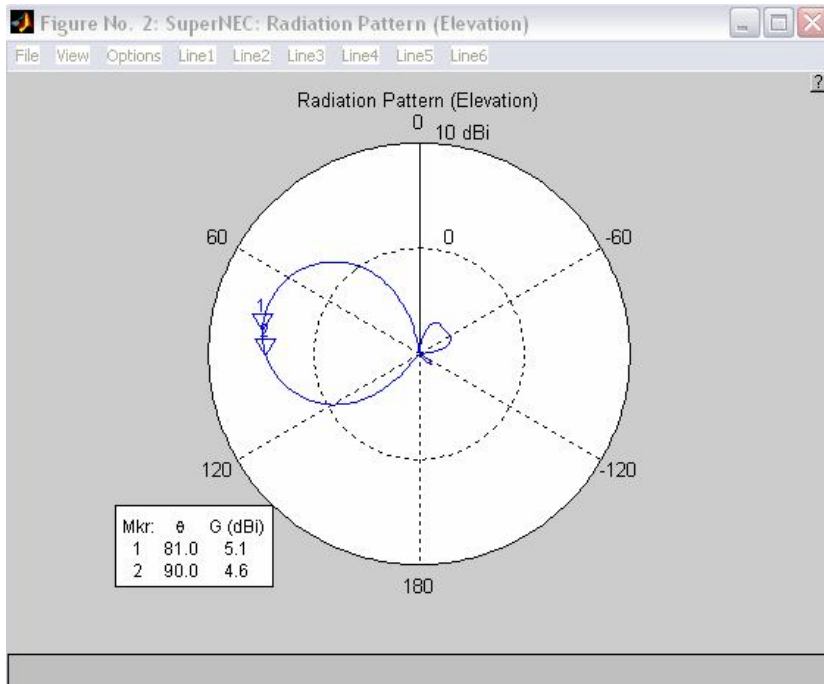
Εικόνα 80 –Η διάταξη της κεραίας για βάρη 6-1-1-1



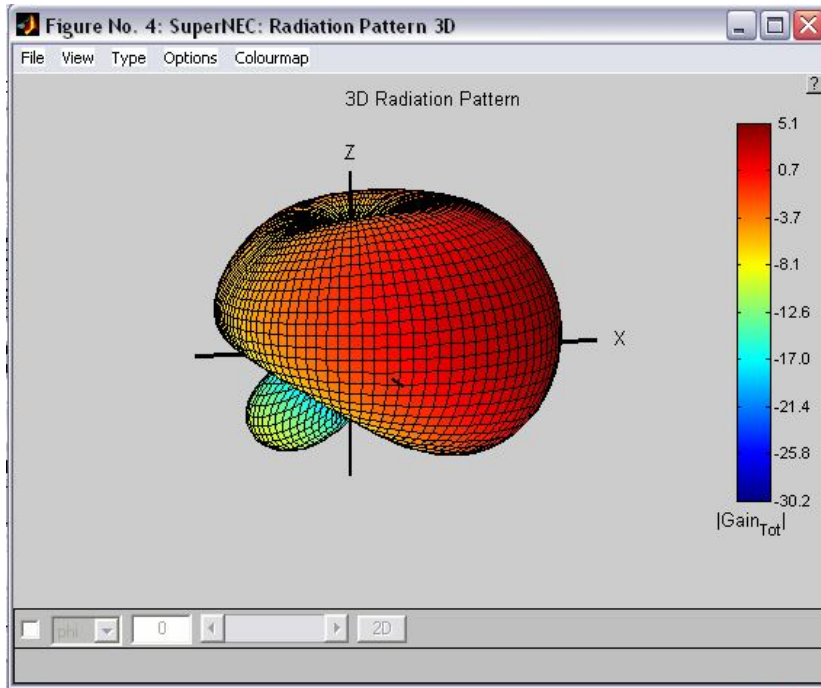
Εικόνα 81 –Παράμετροι της διάταξης



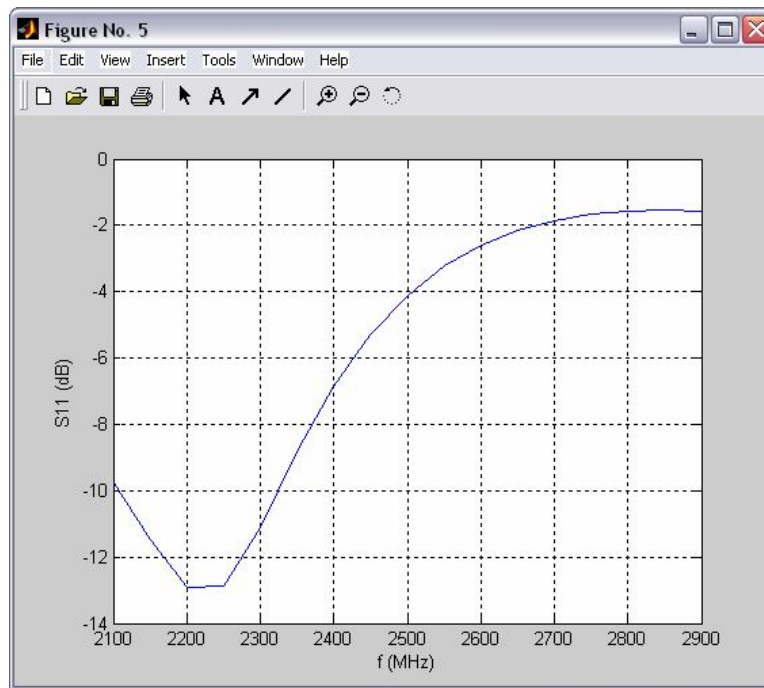
Εικόνα 82 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας(azimuth)



Εικόνα 83 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας(elevation)



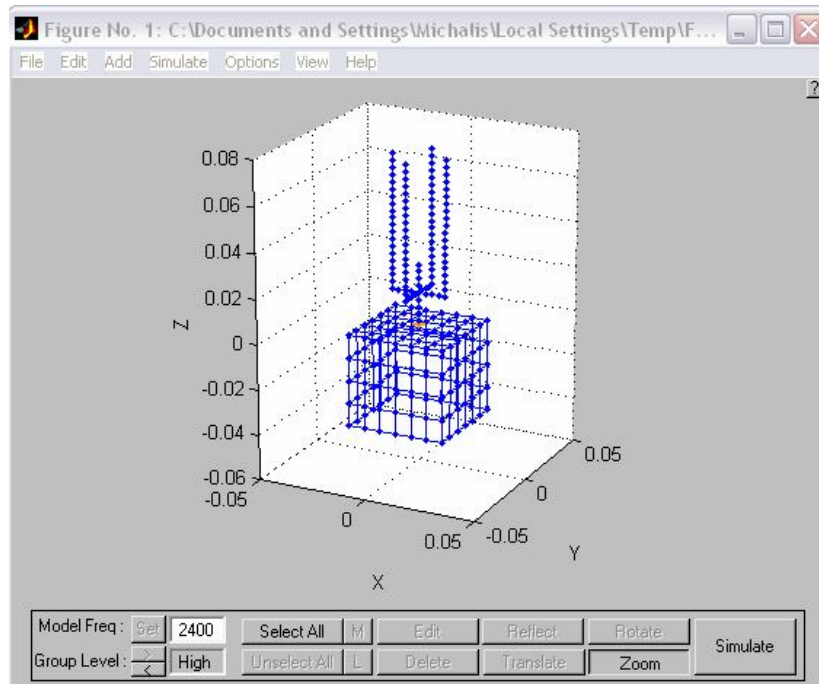
Εικόνα 84 –Το 3D διάγραμμα της κεραίας



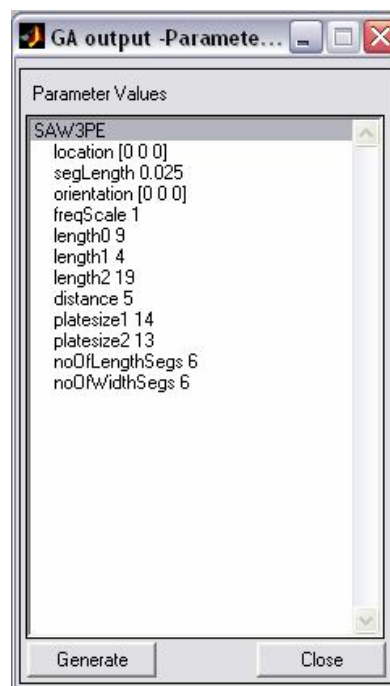
Εικόνα 85 –Το VSWR από 2100-2900MHz

Σε αυτή τη μέτρηση παρατηρούμε ότι ενώ πετύχαμε το μεγαλύτερο μέχρι τώρα κέρδος στην κατεύθυνση των 0 μοιρών και τη μικρότερη δυνατή απόκλιση της γωνίας ανώψωσης από την γωνία των 90, αυτό είχε κόστος στην τιμή του VSWR όπως φαίνεται στην τελευταία εικόνα, που απομακρύνεται από την επιθυμητή συχνότητα συντονισμού στα 2.4GHz.(για κάτω από -10db)

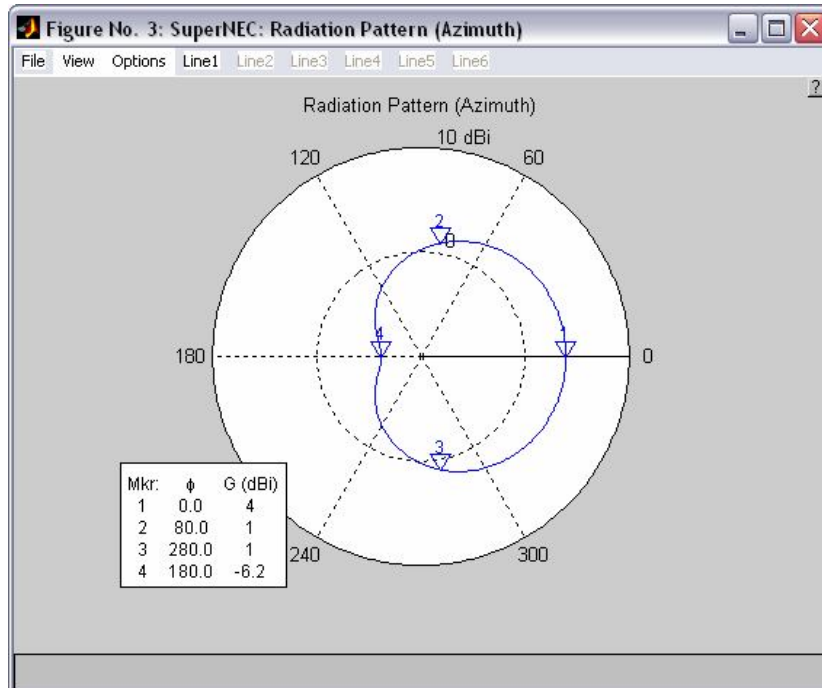
W1=8 W2=2 W3=4 W4=4



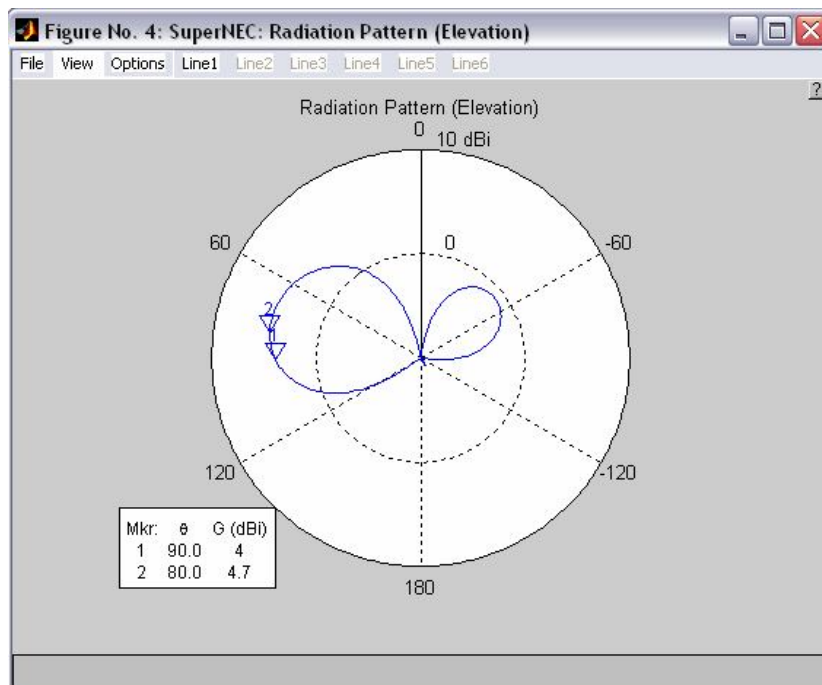
Εικόνα 86 – Η διάταξη της κεραίας για βάρη 8-2-4-4



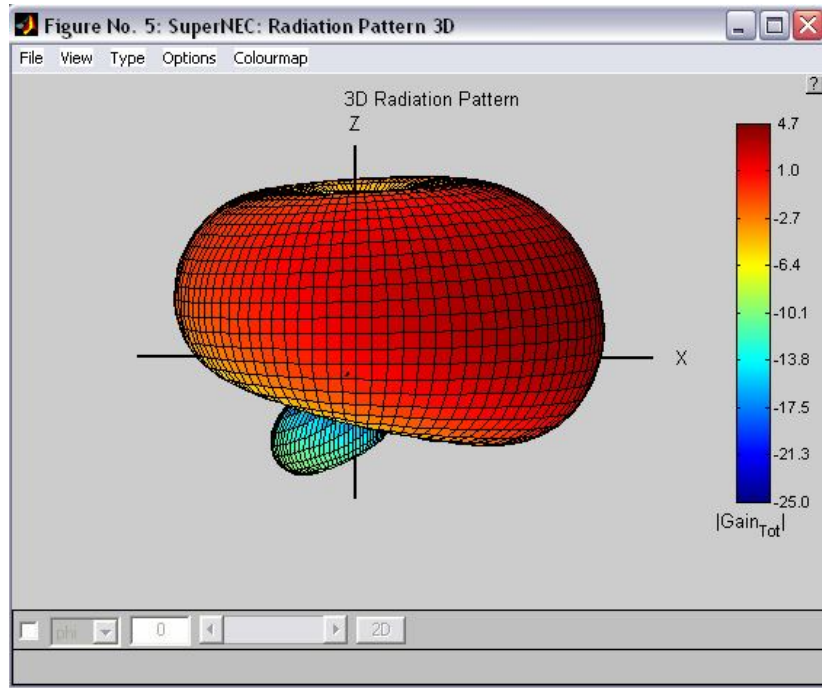
Εικόνα 87 –Οι παράμετροι της διάταξης



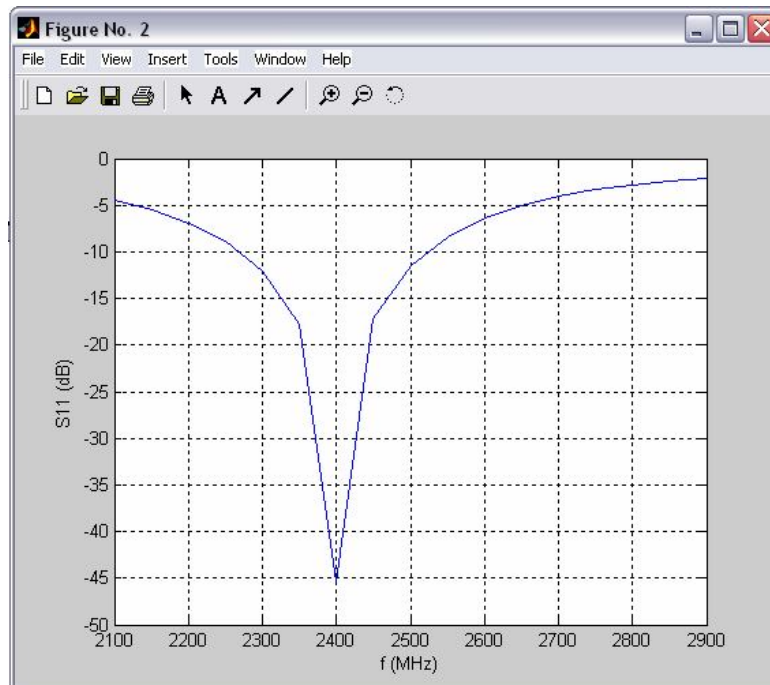
Εικόνα 88 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας (azimuth)



Εικόνα 89 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας (elevation)

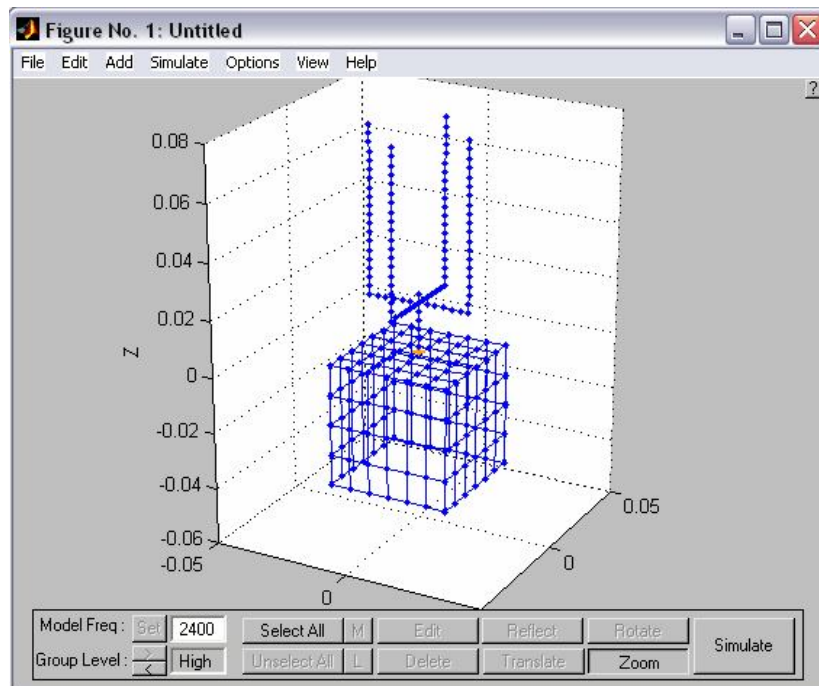


Εικόνα 90 –Το 3D διάγραμμα της κεραίας

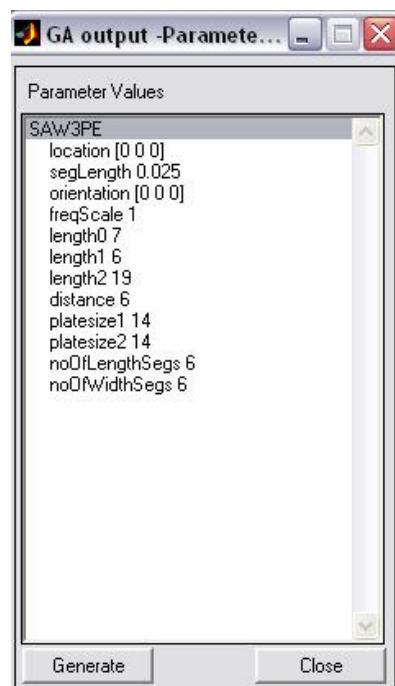


Εικόνα 91 –Το VSWR από 2100-2900MHz

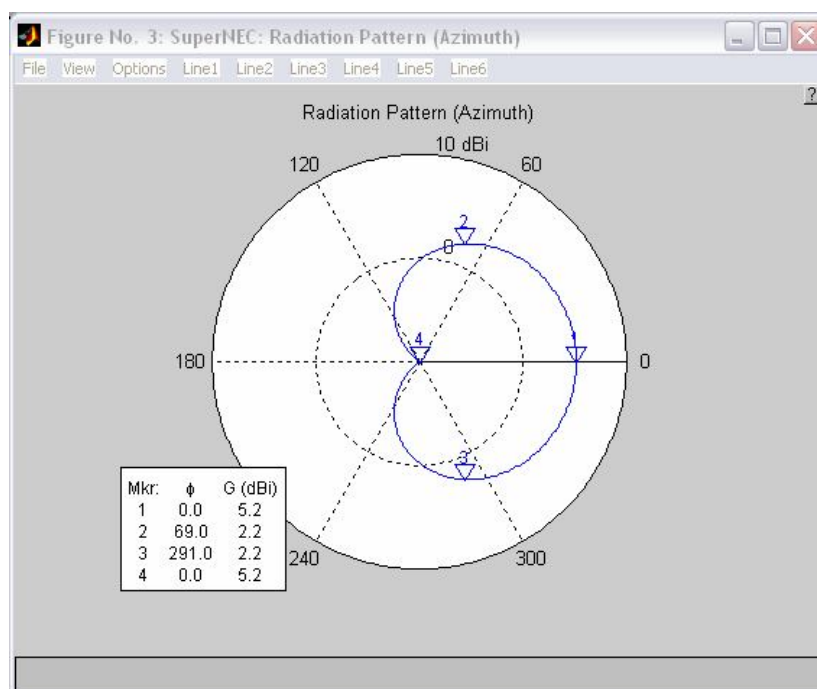
W1=10 W2=2 W3=4 W4=4



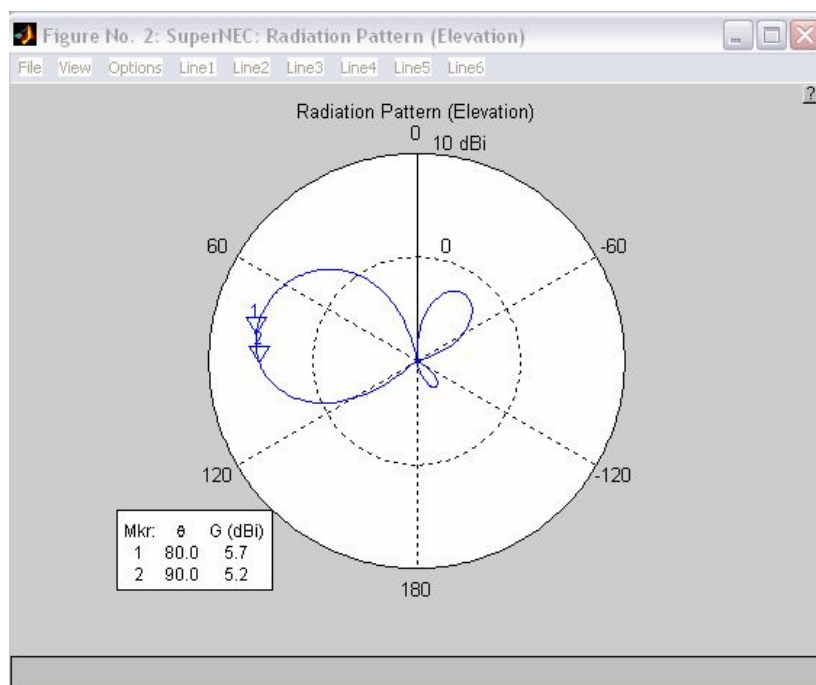
Εικόνα 92 –Η διάταξη της κεραίας για βάρη 10-2-4-4



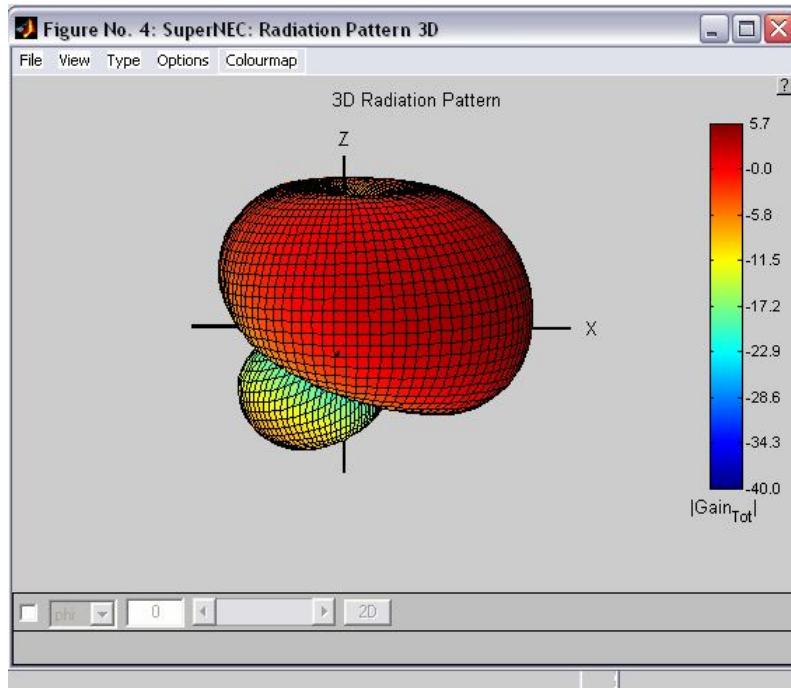
Εικόνα 93 –Οι παράμετροι της διάταξης



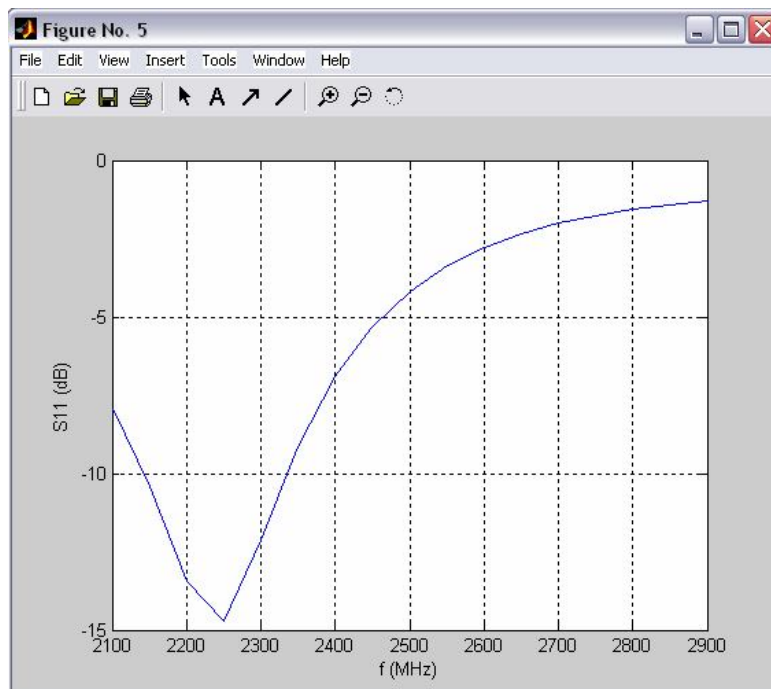
Εικόνα 94 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας (azimuth)



Εικόνα 95 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας (elevation)



Εικόνα 96 –Το 3D διάγραμμα της κεραίας



Εικόνα 97 –Το VSWR από 2100-2900MHz

Στην τελευταία μέτρηση που παρουσιάστηκε για τη πρώτη συνάρτηση, βλέπουμε ότι μεγιστοποιήθηκε κατά το δυνατόν το κέρδος στην κατεύθυνση των 0 μοιρών, φτάνοντας τα 5,2 G(dbi), η γωνία ανύψωσης διατηρήθηκε σε χαμηλά επίπεδα, ενώ το VSWR δεν βελτιώθηκε σημαντικά από την τελευταία μέτρηση.

8.2.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ 2^η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

Η δεύτερη συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε την οποία περιγράψαμε προηγουμένως έχει την εξής μορφή, με βάση το πώς την κατασκευάσαμε στο αρχείο cost4, του οποίου ο κώδικας βρίσκεται στο τέλος της παρούσας εργασίας.

$$er1m=w1*er1/2 +w2*er2/89 +w3*er3/269;$$

$$err=w4*Rinm^2+w5*Xinm^2+w6*er1m;$$

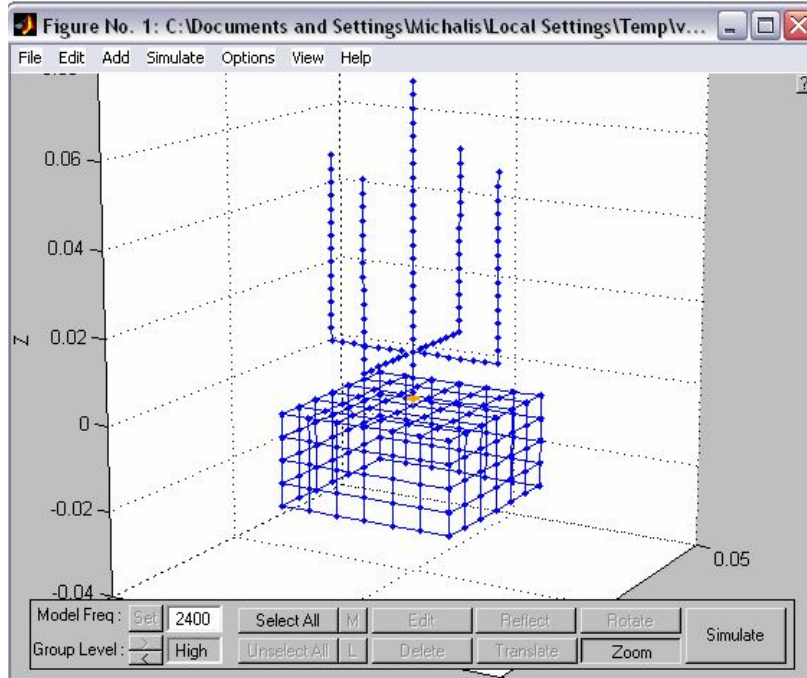
$$COST(1,1)=1/(1+sqrt(err));$$

Οι βελτιστοποιήσεις που έγιναν για τους διαφορετικούς συνδιασμούς των τιμών των μεταβλητών των συντελεστών βάρους $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6$ φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

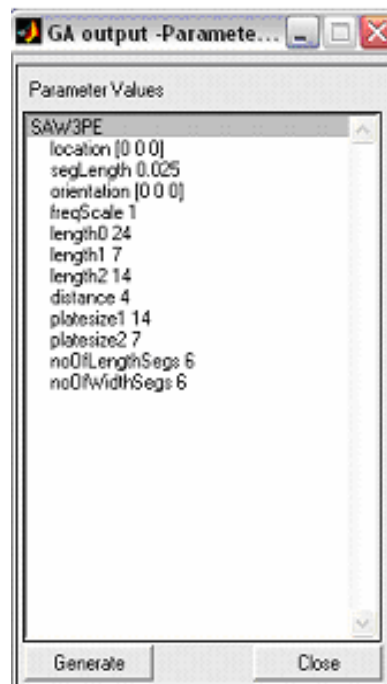
| $W_1 - W_2 - W_3 - W_4 - W_5 - W_6$ | <u>GAIN</u> | <u>3db</u> | <u>VSWR</u> | <u>ELEVATION</u> |
|-------------------------------------|-------------|------------|-------------|------------------|
| 1-1-1-1-1-1 | 5,8 | 114 | 2,0499 | -9 |
| 1-1-1-1-1-2 | 5,3 | 136 | 1,5666 | -13 |
| 1-2-1-1-1-1 | 4,4 | 128 | 1,5315 | -19 |
| 1-2-1-1-1-2 | 5,1 | 132 | 2,3750 | -16 |
| 1-2-1-2-2-1 | 4,5 | 135 | 1,4883 | -12 |
| 1-2-1-2-2-2 | 4,4 | 128 | 1,5315 | -19 |
| 1-2-1-2-2-4 | 5,1 | 132 | 2,3754 | -11 |
| 1-4-1-1-1-1 | 2,8 | 136 | 1,5166 | -19 |
| 1-4-1-2-2-1 | 5,6 | 115 | 7,1888 | -5 |
| 1-4-1-2-2-2 | 2,8 | 136 | 1,5166 | -19 |
| 1-4-1-2-2-4 | 4,9 | 157 | 2,3396 | -14 |
| 1-4-1-4-4-1 | 5,0 | 136 | 1,3881 | -15 |
| 1-4-1-4-4-2 | 5,4 | 114 | 3,192 | -5 |
| 1-6-1-4-4-1 | 4,5 | 144 | 1,5486 | -14 |
| 1-6-1-4-4-2 | 4,6 | 136 | 1,9804 | -10 |
| 1-6-1-6-6-1 | 0,62 | 148 | 1,3465 | -27 |
| 1-8-1-4-4-1 | 2,6 | 142 | 1,6488 | -23 |
| 1-8-1-6-6-2 | 2,8 | 138 | 1,1453 | -22 |
| 1-10-1-6-6-1 | 5,0 | 136 | 1,3881 | -15 |
| 1-10-1-6-6-2 | 2,8 | 158 | 1,4468 | -20 |
| 1-10-1-8-8-1 | 4,5 | 138 | 1,2505 | -12 |
| 1-10-1-8-8-2 | 4,4 | 120 | 1,4882 | 0 |
| 1-10-1-8-8-4 | 2,6 | 142 | 1,6488 | -23 |
| 1-11-1-8-8-1 | 0,1 | 144 | 1,4647 | -26 |
| 1-11-1-8-8-2 | 0,2 | 138 | 1,5818 | -27 |
| 1-12-1-6-6-1 | 4,5 | 134 | 1,3735 | -13 |
| 1-12-1-8-8-1 | 5,2 | 128 | 1,4485 | -9 |
| 1-12-1-8-8-2 | 5,5 | 120 | 2,3317 | -7 |
| 1-14-1-8-8-1 | 4,4 | 130 | 1,3956 | -13 |

Κατά παρόμοιο τρόπο με την παρουσίαση των καλύτερων αποτελεσμάτων της πρώτης συνάρτησης, έχουμε για την δεύτερη:

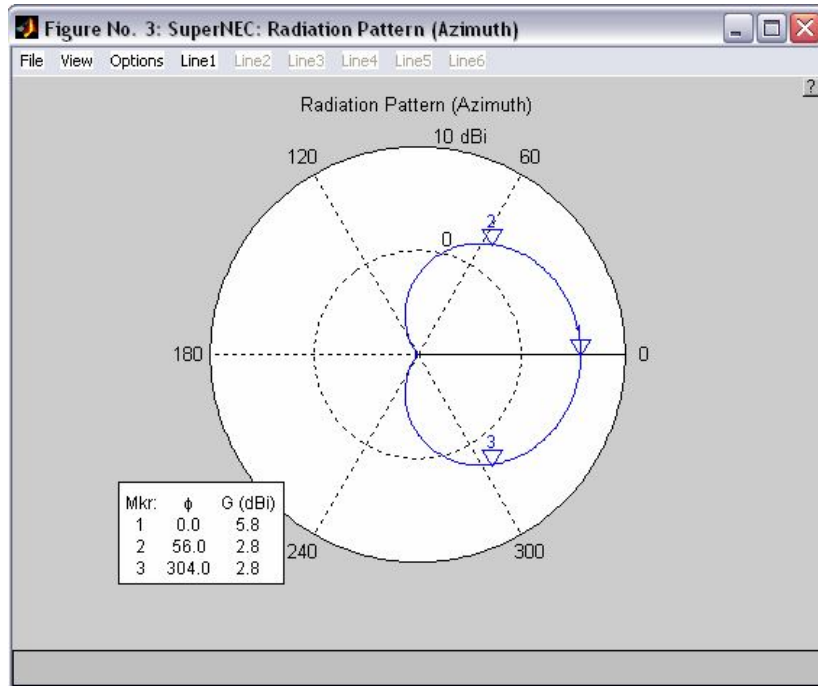
$$W1=W2=W3=W4=W5=W6=1$$



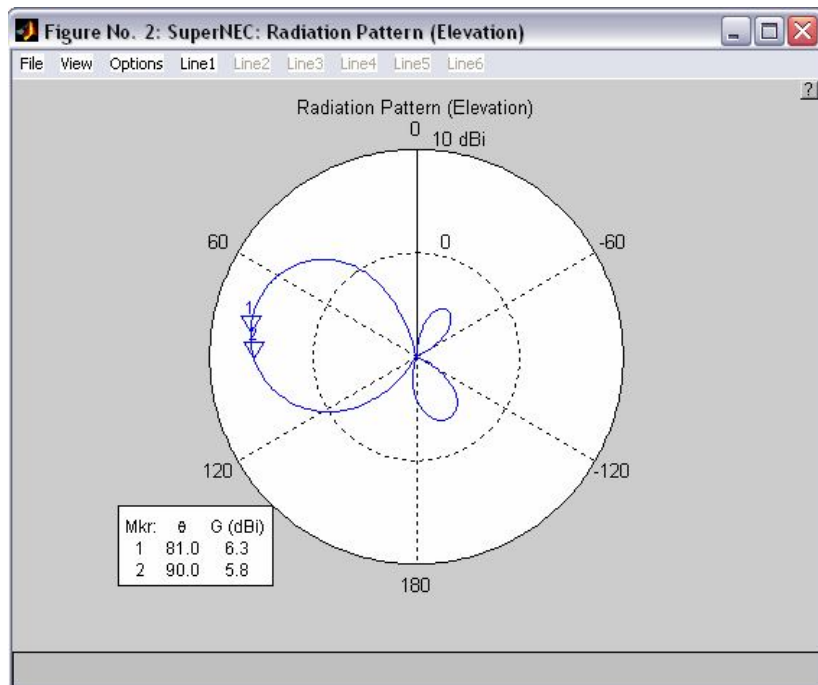
Εικόνα 98 –Η διάταξη της κεραίας για βάρη 1-1-1-1-1



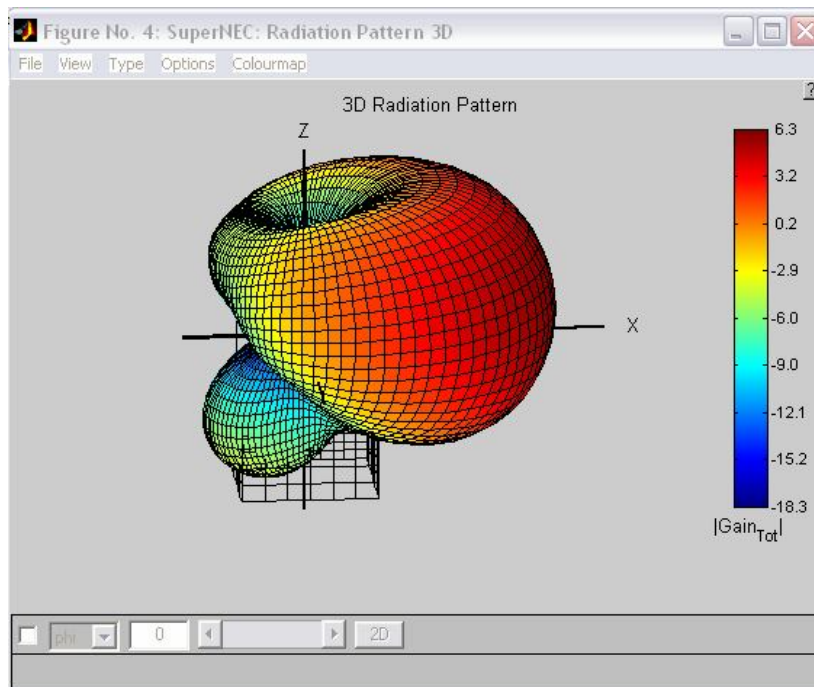
Εικόνα 99 –Οι παράμετροι της κεραίας



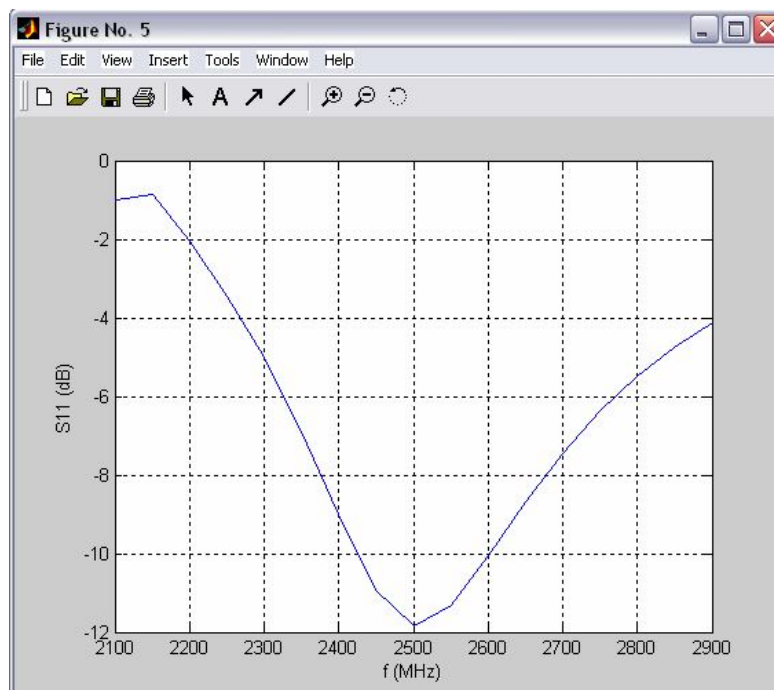
Εικόνα 100 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας(azimuth)



Εικόνα 101 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας(elevation)



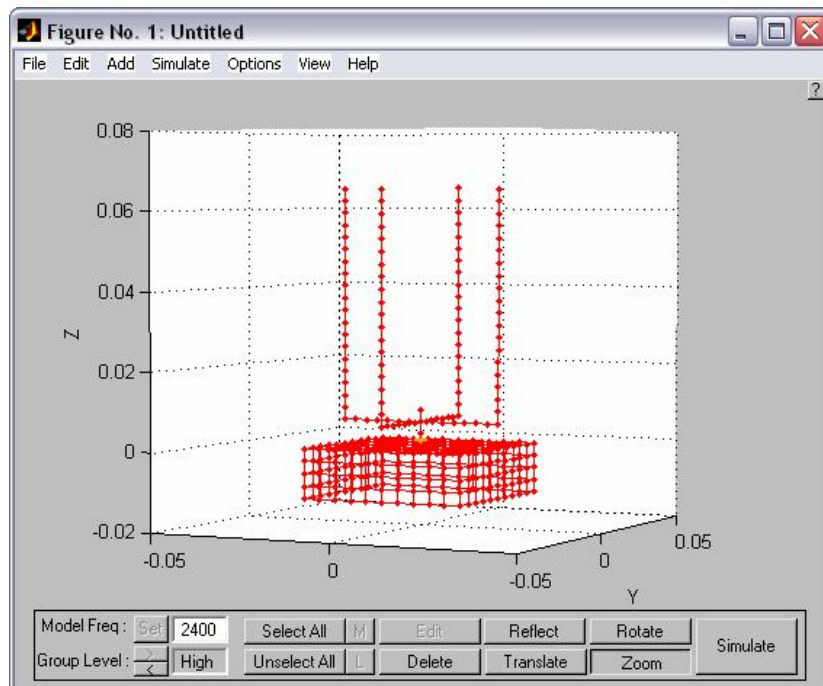
Εικόνα 102 –Το 3D διάγραμμα της κεραίας



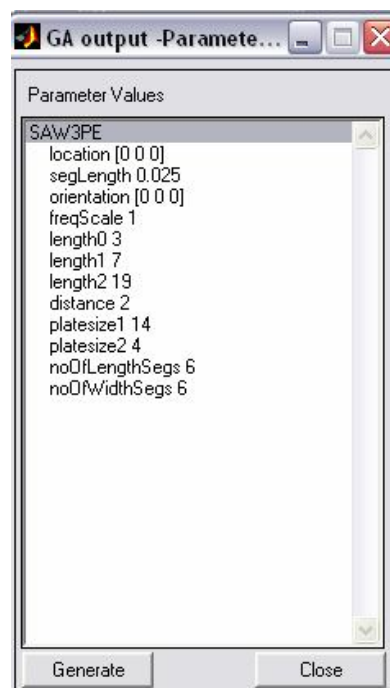
Εικόνα 103 –Το VSWR από 2100-2900MHz

Παρατηρούμε από την πρώτη κιόλας μέτρηση για τη δεύτερη συνάρτηση, για όλους τους συντελεστές βάρους ίσους με τη μονάδα, πετύχαμε πολύ καλά αποτελέσματα, υψηλό κέρδος στην κατεύθυνση των 0 μοιρών, σχετικά μικρό elevation και σχετικά καλό συντονισμό για το φάσμα συχνοτήτων 2400-2480 που μας απασχολεί.(για κάτω από -10db)

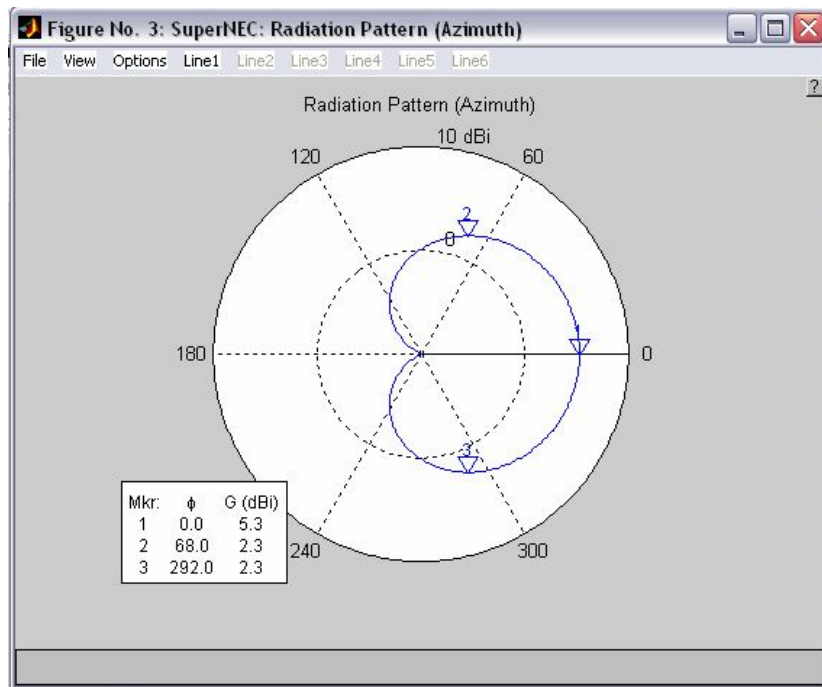
$W1=W2=W3=W4=W5=1, W6=2$



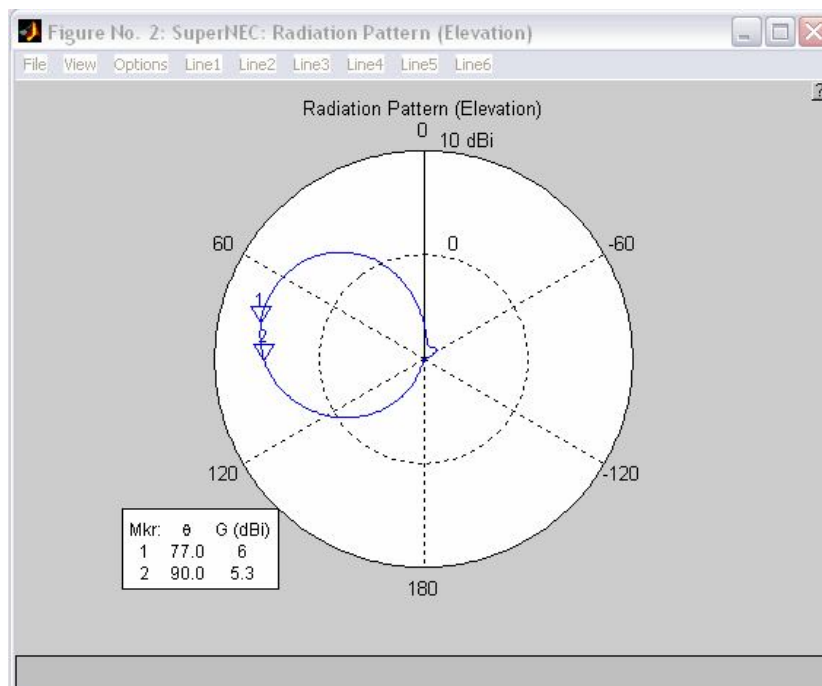
Εικόνα 104 – Η διάταξη της κεραίας για βάρη 1-1-1-1-2



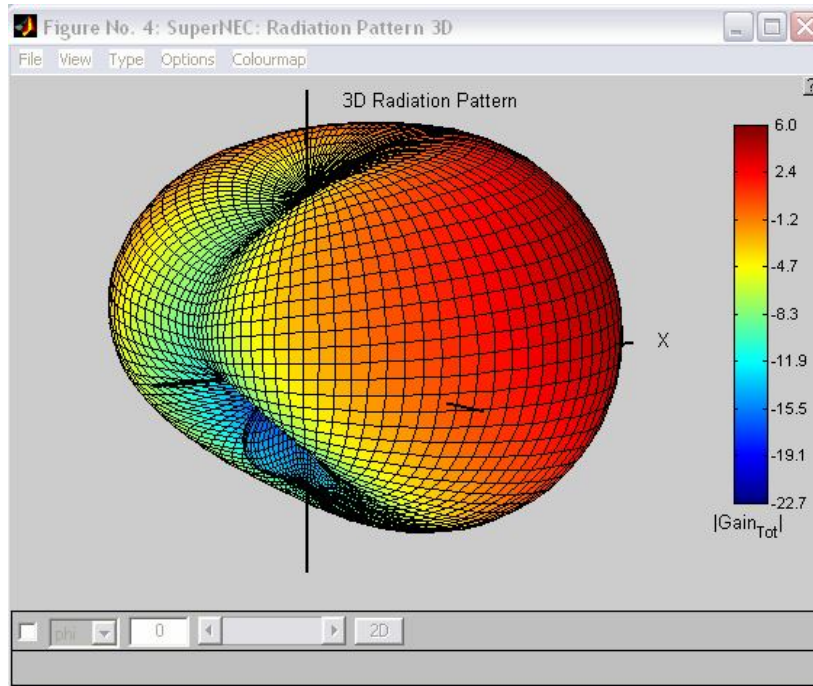
Εικόνα 105 – Οι παράμετροι της διάταξης



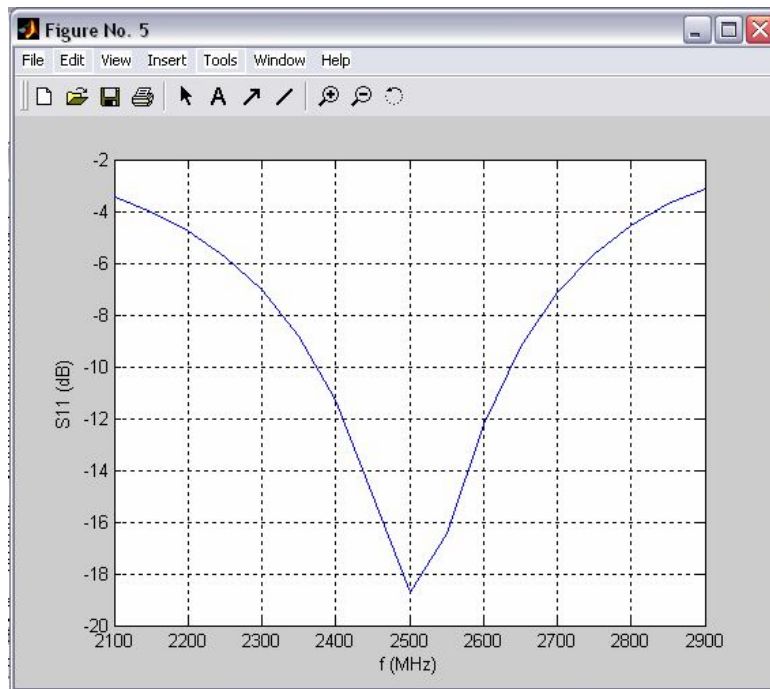
Εικόνα 106 – Το 2D διάγραμμα της κεραίας(azimuth)



Εικόνα 107 – Το 2D διάγραμμα της κεραίας(elevation)



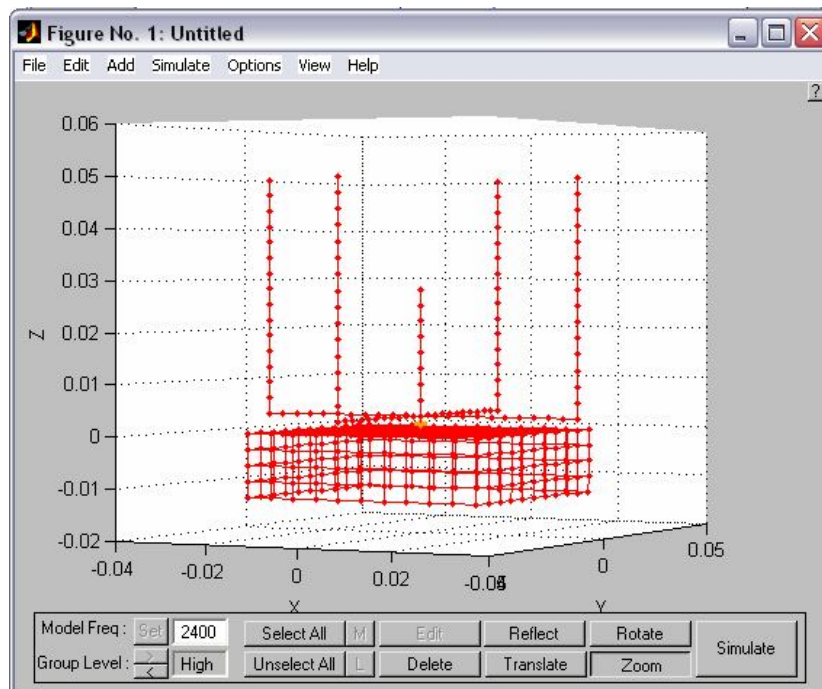
Εικόνα 108 – Το 3D διάγραμμα της κεραίας



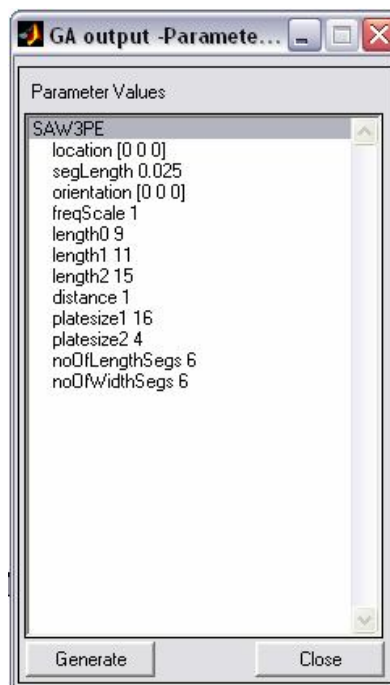
Εικόνα 109 – Το VSWR από 2100-2900MHz

Εδώ πετύχαμε βελτίωση του VSWR, αύξηση του εύρους 3db από 114 στις 136 μοίρες, ωστόσο αυξήθηκε κατά 4 μοίρες το elevation με αποτέλεσμα να έχουμε απώλεια κέρδους της τάξης των 0,5G(dbi) στην κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας(0 μοιρες), σε σχέση με την προηγούμενη μέτρηση.

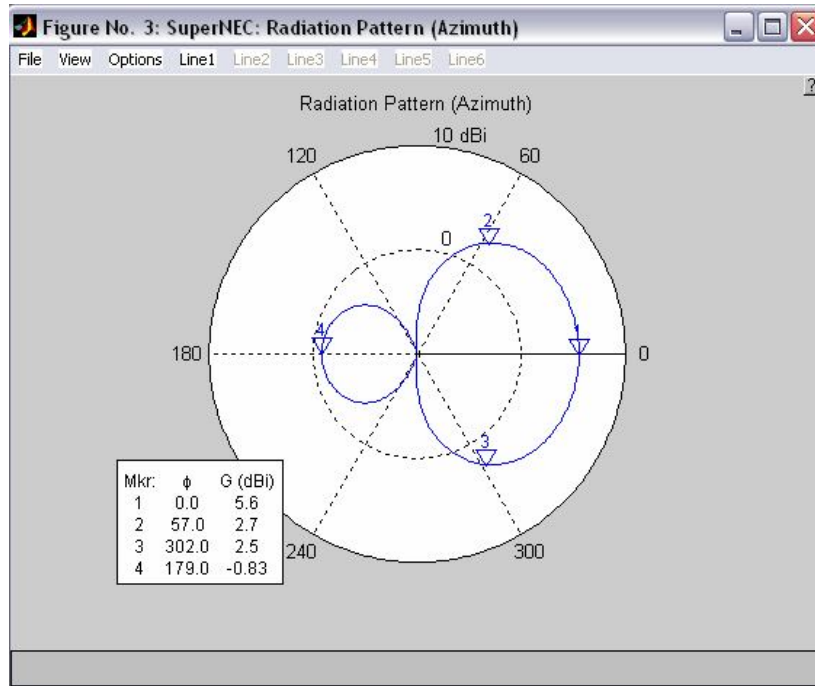
W1=1 W2=4 W3=1 W4=2 W5=2 W6=1



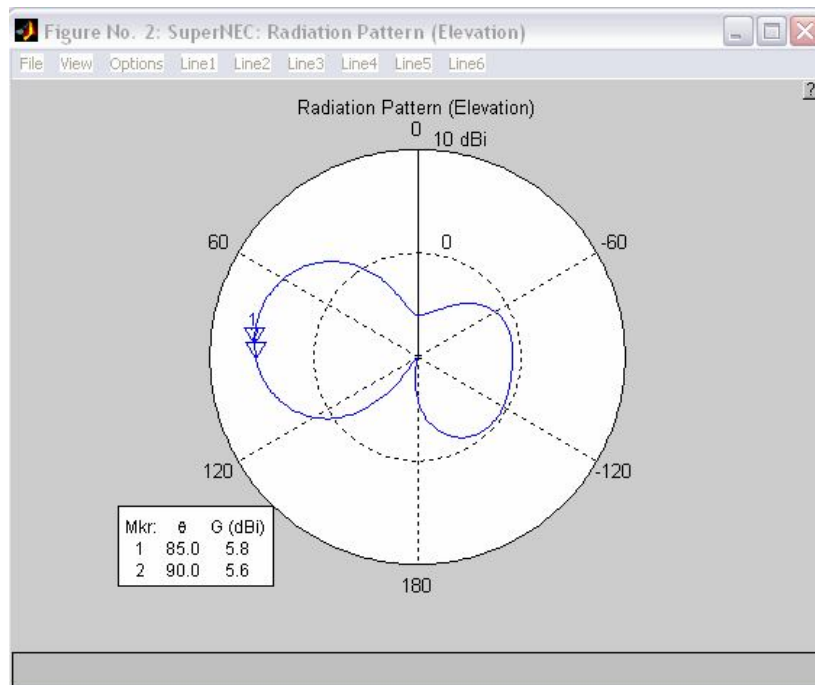
Εικόνα 110 –Η διάταξη της κεραίας για βάρη 1-4-1-2-2-1



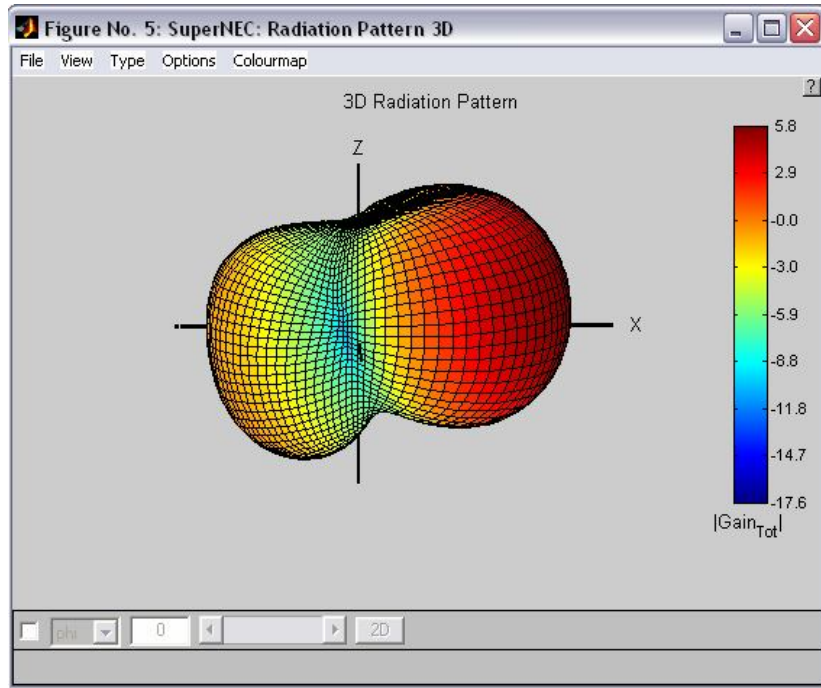
Εικόνα 111 –Οι παράμετροι της διάταξης



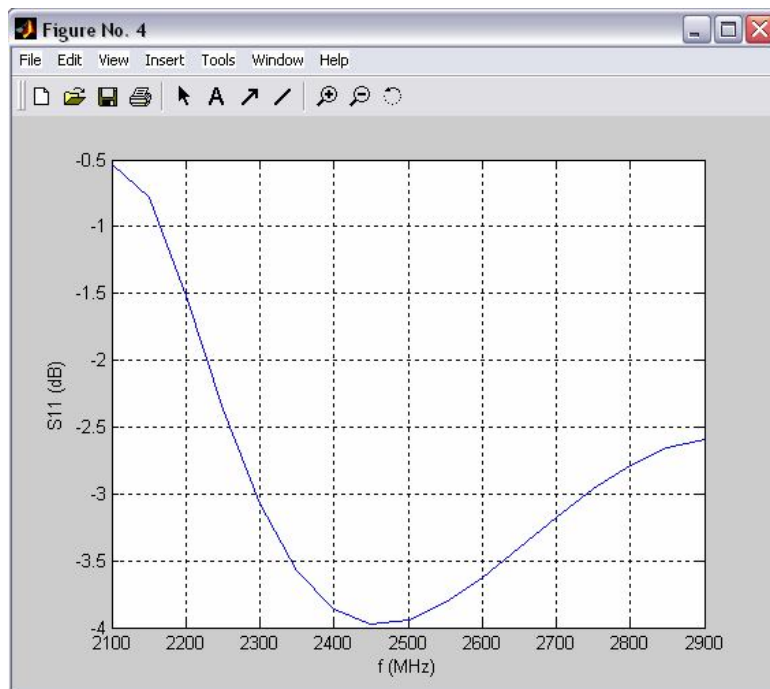
Εικόνα 112 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας(azimuth)



Εικόνα 113 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας(elevation)



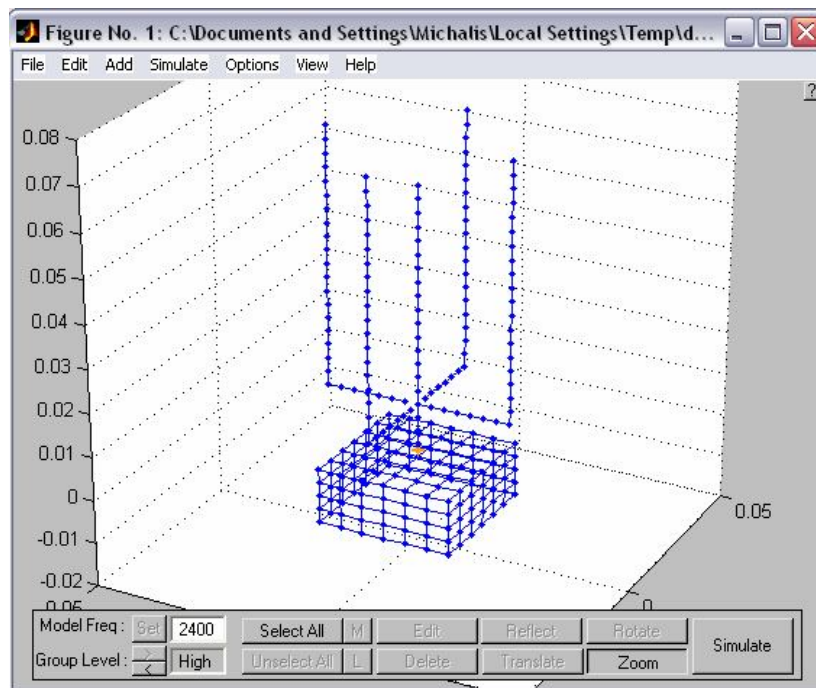
Εικόνα 114 –Το 3D διάγραμμα της κεραίας



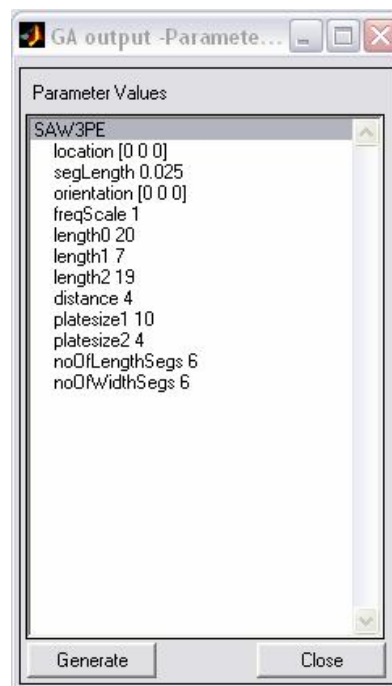
Εικόνα 115 –Το VSWR από 2100-2900MHz

Σε αυτήν την μέτρηση πετύχαμε αρκετά μεγάλο κέρδος, εύρος 3db στις 115 μοίρες, και κυρίως το μικρότερο μέχρι τώρα elevation που φτάνει μόλις 5 μοίρες μακριά από την επιθυμητή διεύθυνση των 90 μοιρών, αλλά παρουσίασε κακό VSWR.

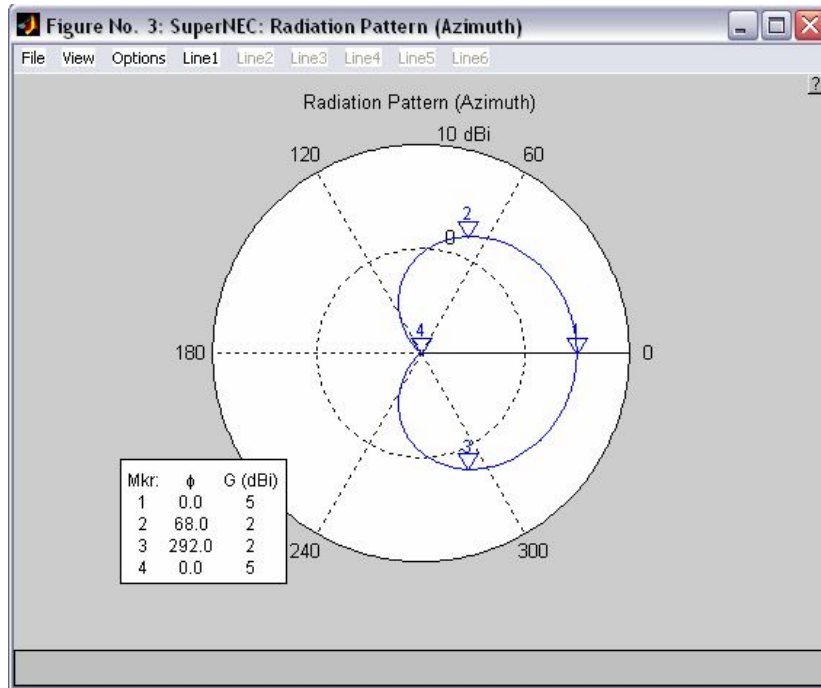
W1=1 W2=4 W3=1 W4=4 W5=4 W6=1



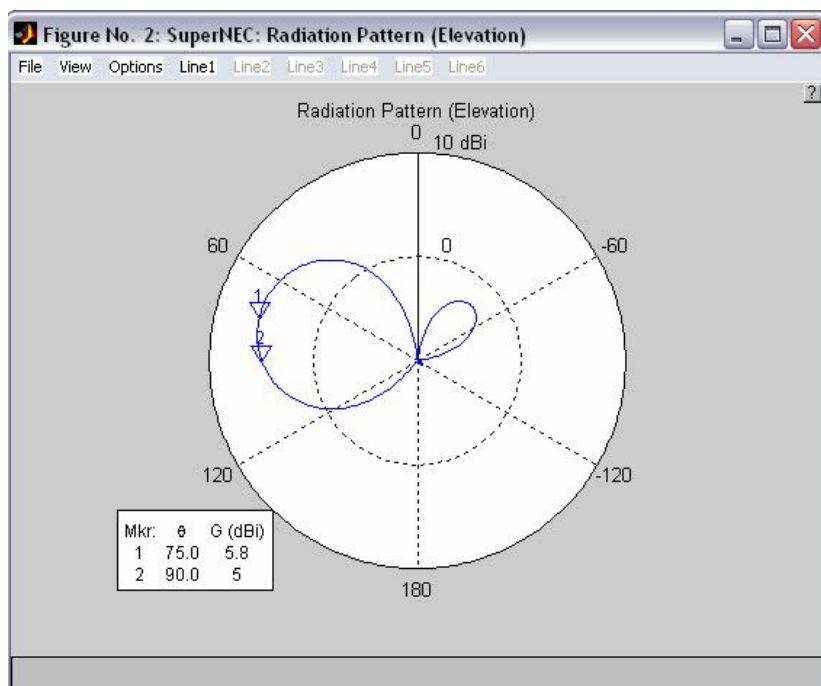
Εικόνα 116 – Η διάταξη της κεραίας για βάρη 1-4-1-4-4-1



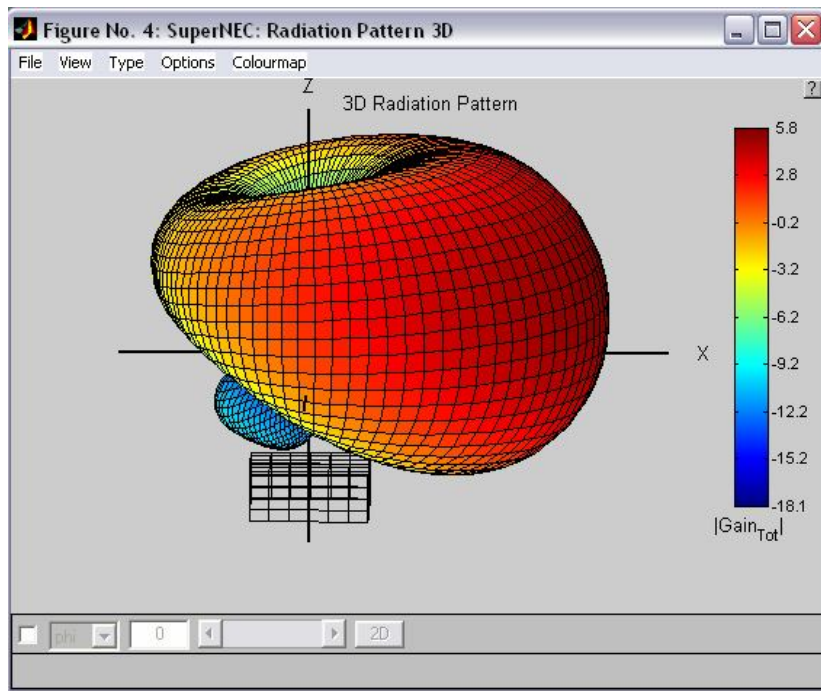
Εικόνα 117 – Οι παράμετροι της διάταξης



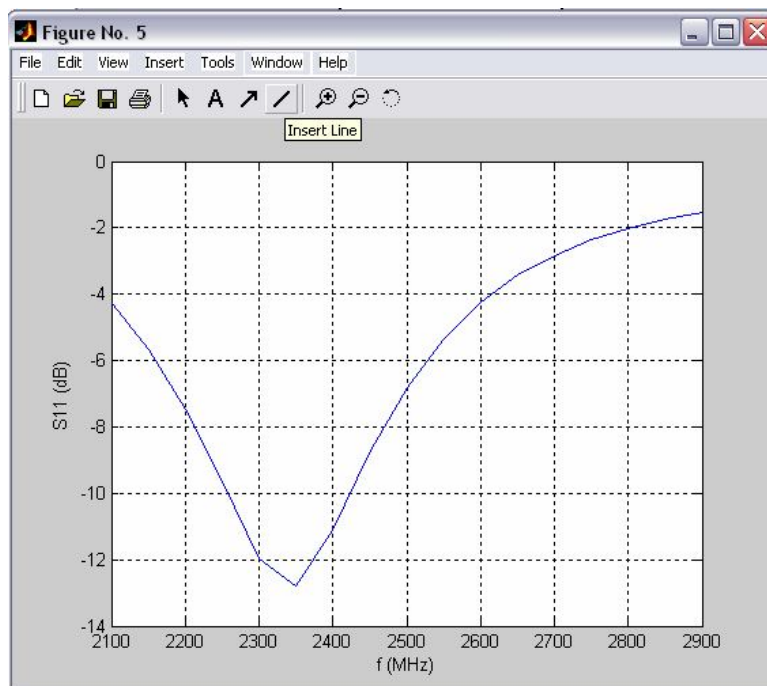
Εικόνα 118–Το 2D διάγραμμα της κεραίας(azimuth)



Εικόνα 119–Το 2D διάγραμμα της κεραίας(elevation)



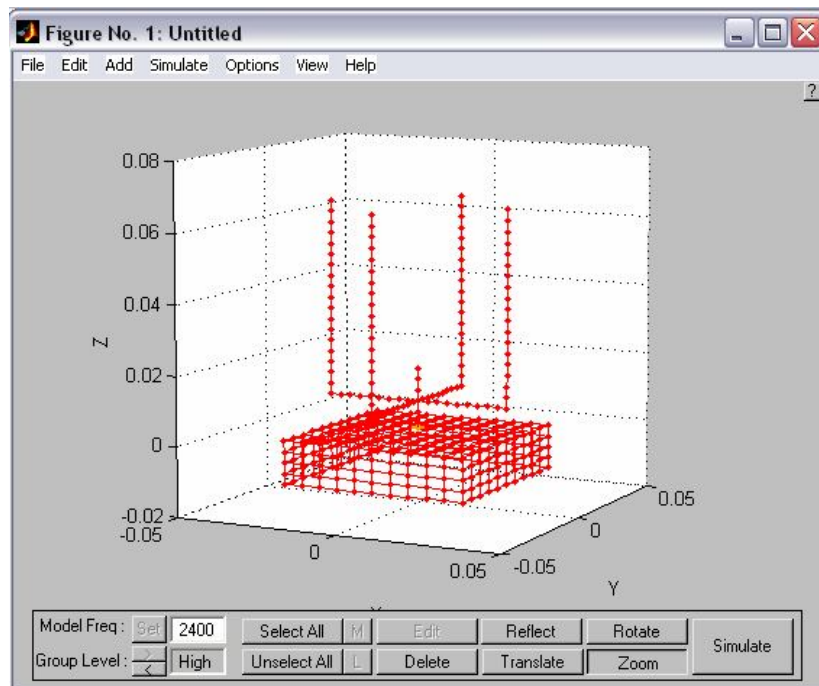
Εικόνα 120 –Το 3D διάγραμμα της κεραίας



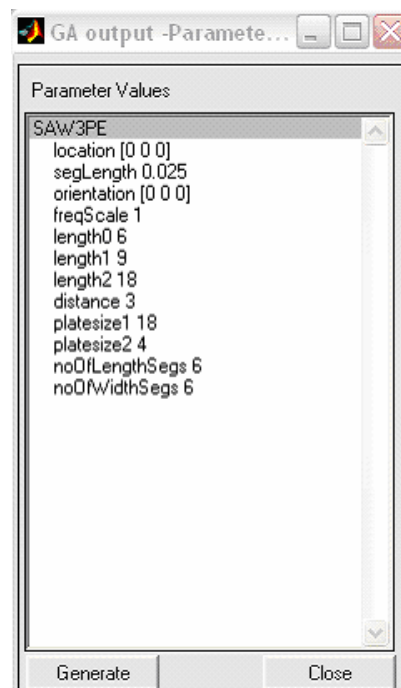
Εικόνα 121 –Το VSWR από 2100-2900MHz

Στην ανωτέρω μέτρηση πετύχαμε σχετικά μεγάλο κέρδος, πολύ κατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας, μέτριο elevation με απόκλιση στις 15 μοίρες και βελτιωμένο VSWR, όχι όμως αρκετά καλό.

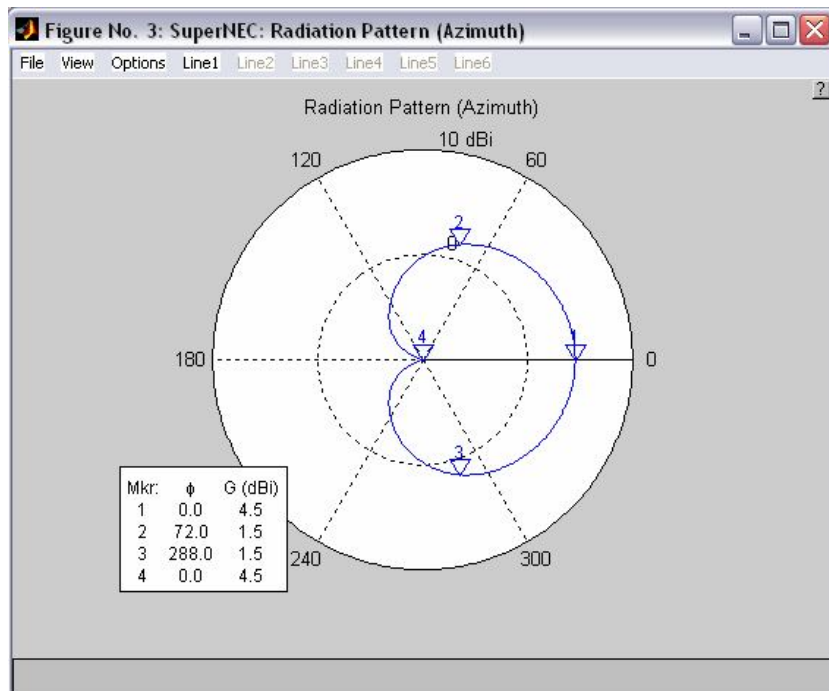
W1=1 W2=6 W3=1 W4=4 W5=4 W6=1



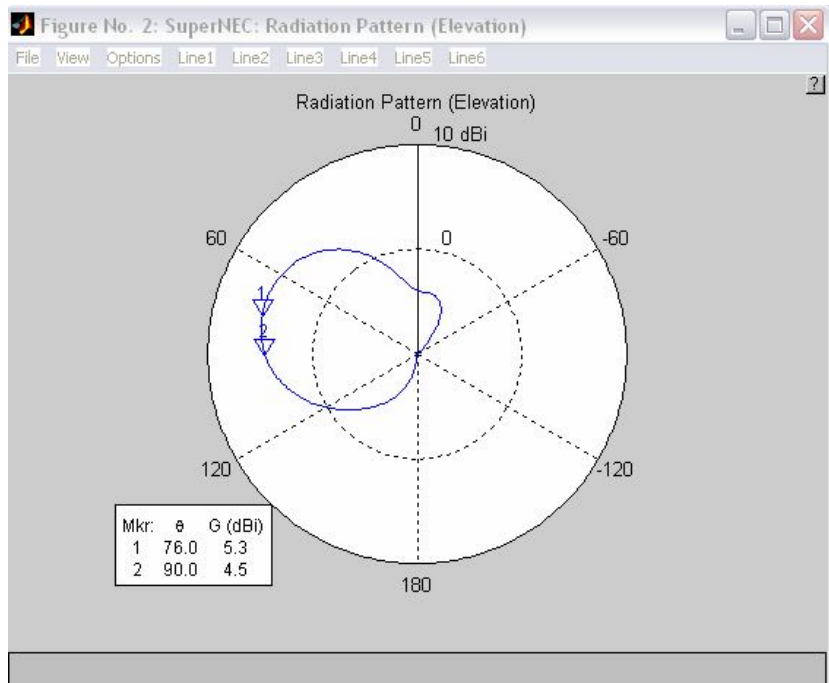
Εικόνα 122 –Η διάταξη της κεραίας για βάρη 1-6-1-4-4-1



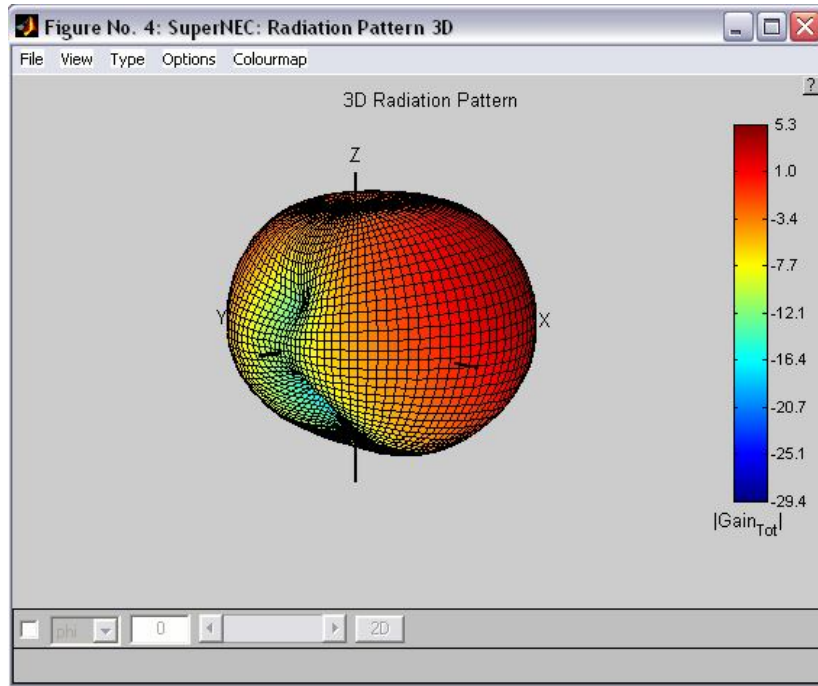
Εικόνα 123 –Οι παράμετροι της διάταξης



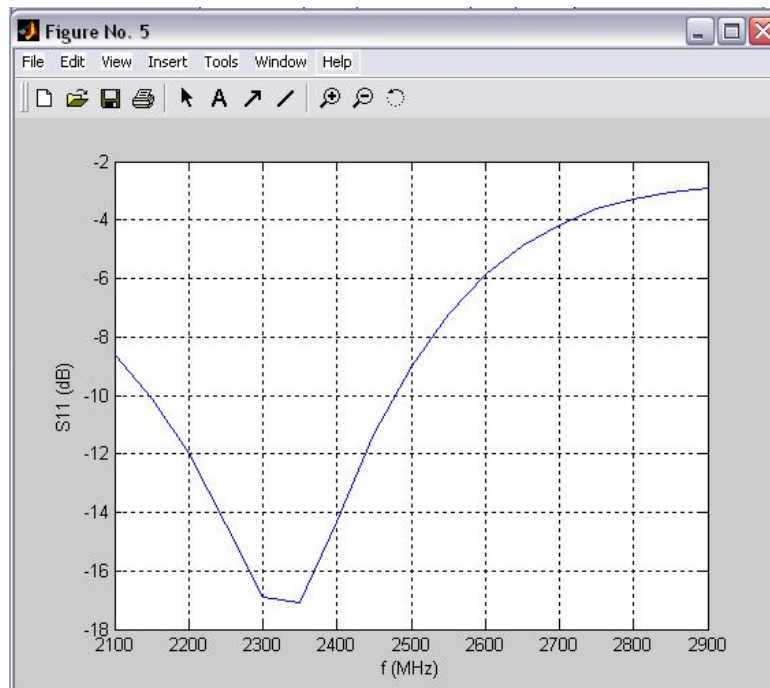
Εικόνα 124 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας (azimuth)



Εικόνα 125 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας (elevation)



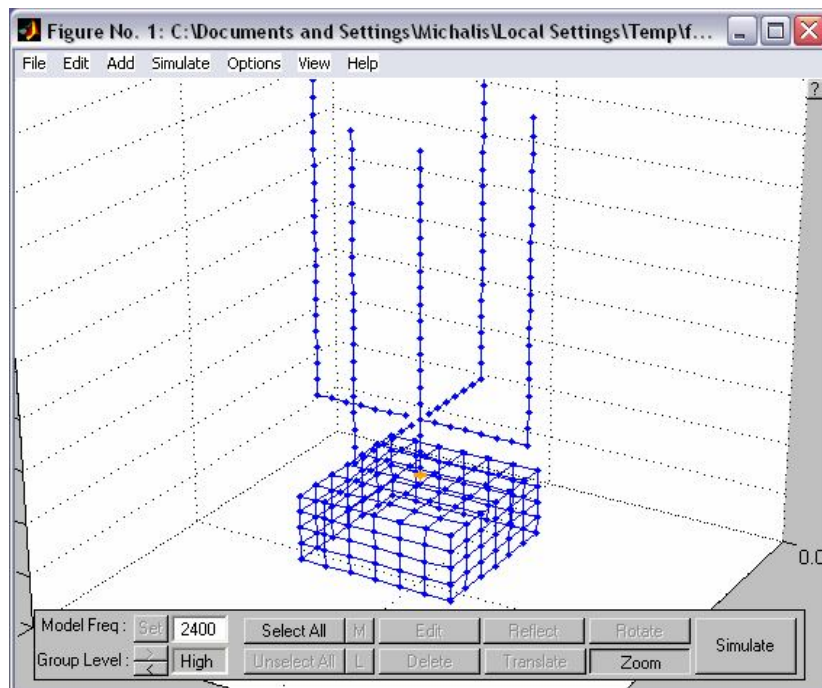
Εικόνα 126 –Το 3D διάγραμμα της κεραίας



Εικόνα 127 –Το VSWR από 2100-2900MHz

Τη μέτρηση αυτή θα μπορούσαμε να τη χαρακτηρίσουμε αρκετά ισορροπημένη με δεδομένο ότι παρουσιάζει σχετικά καλά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας, ικανοποιητικό κέρδος, ανεκτό elevation και επαρκές αλλά όχι τέλειο VSWR

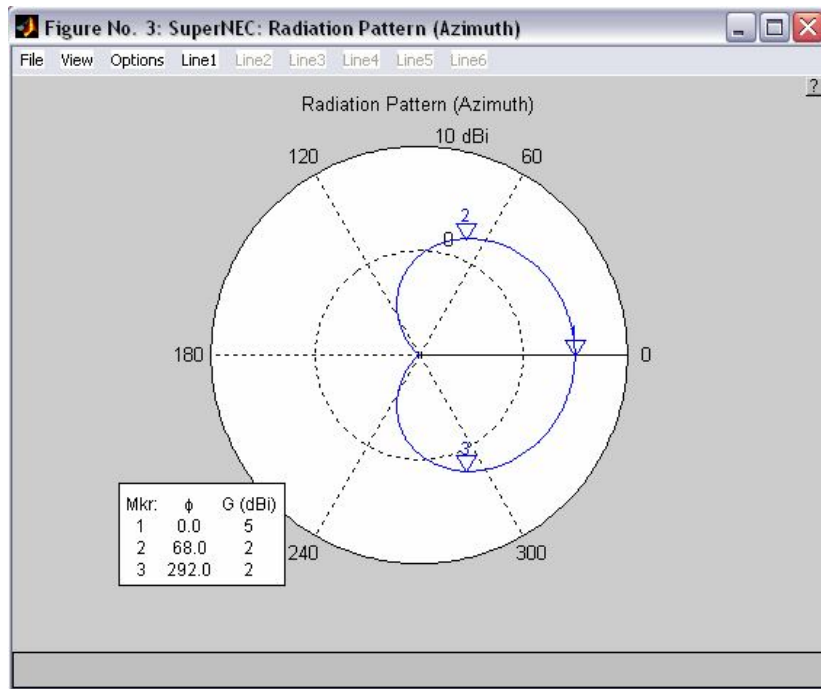
W1=1 W2=10 W3=1 W4=6 W5=6 W6=1



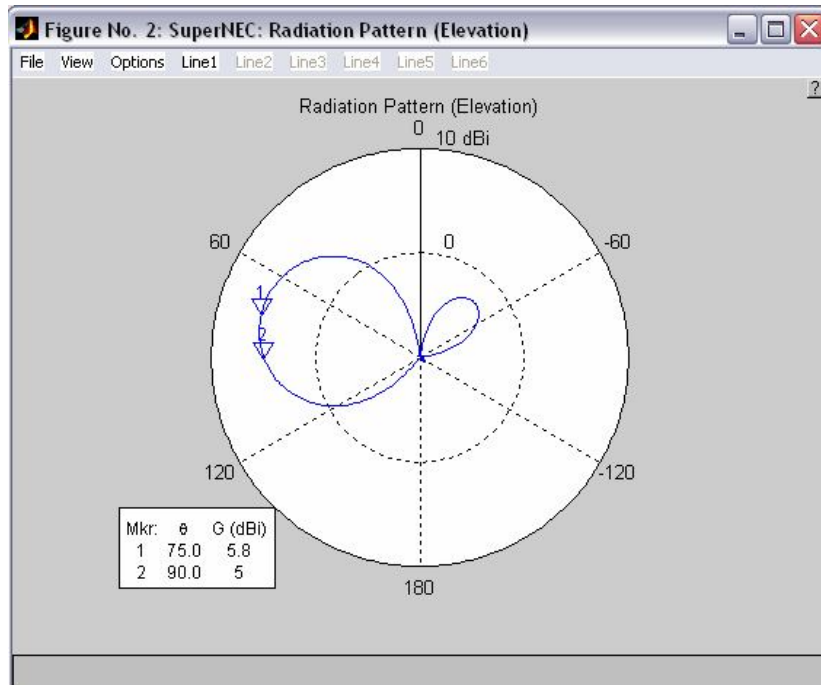
Εικόνα 128 –Η διάταξη της κεραίας για βάρη 1-10-1-6-6-1



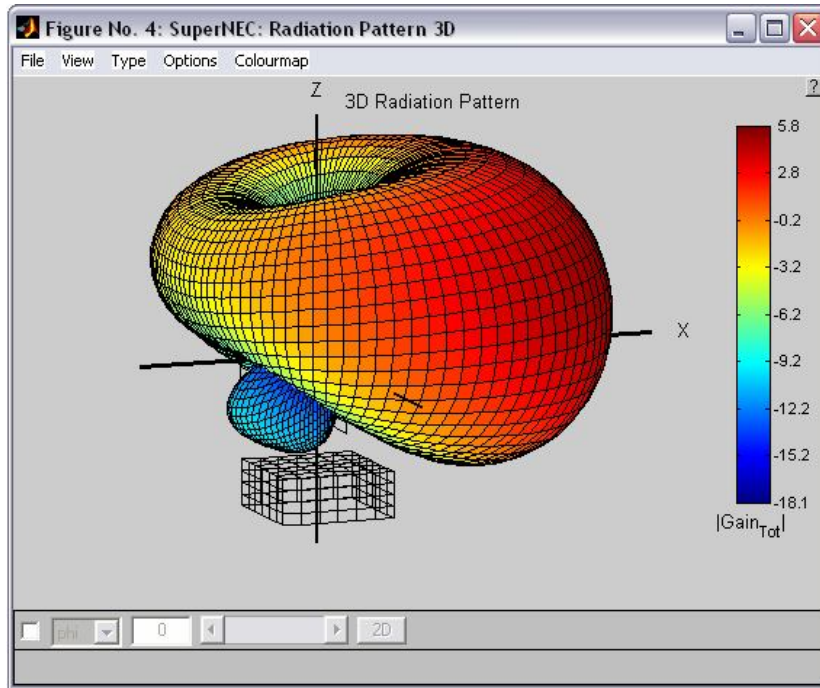
Εικόνα 129 –Οι παράμετροι της διάταξης



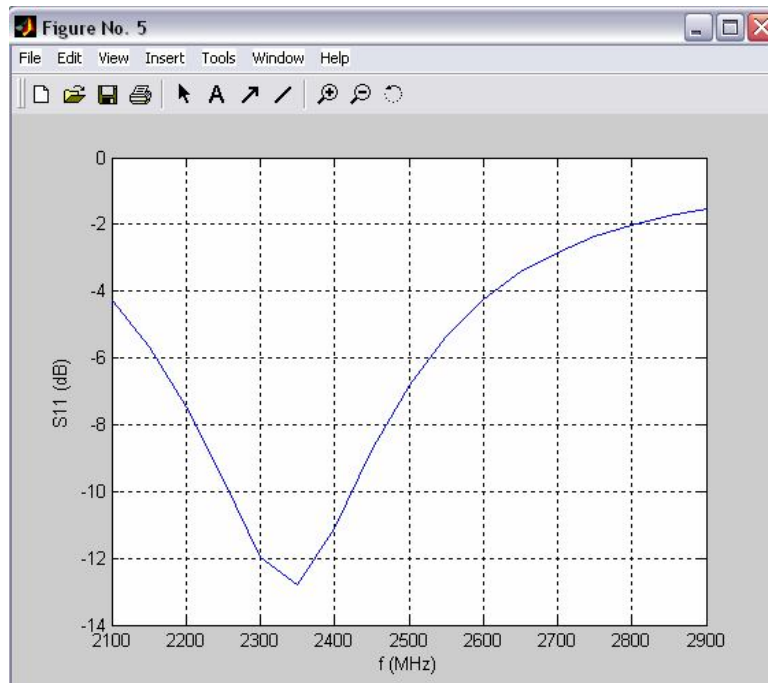
Εικόνα 130 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας(azimuth)



Εικόνα 131 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας (elevation)

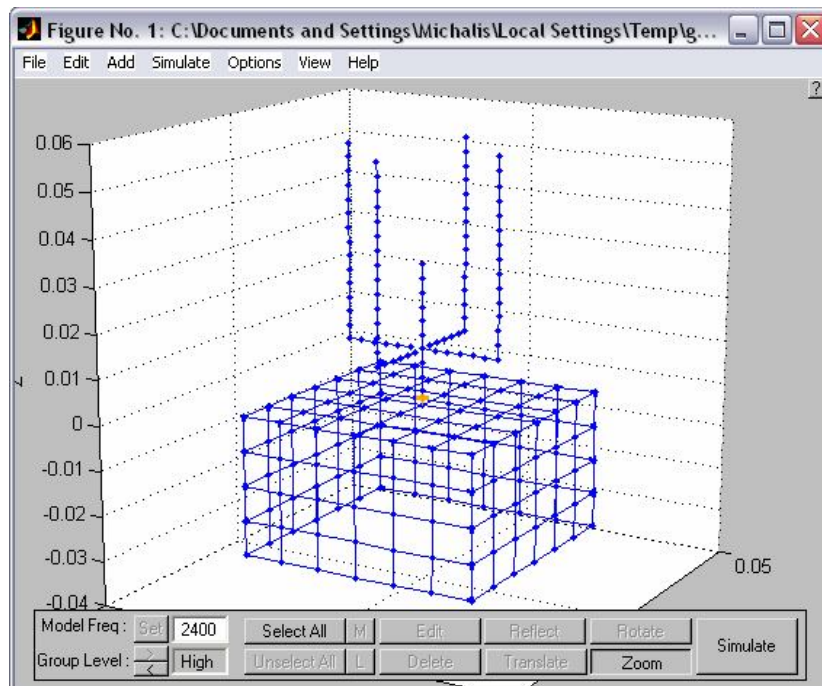


Εικόνα 132 –Το 3D διάγραμμα της κεραίας

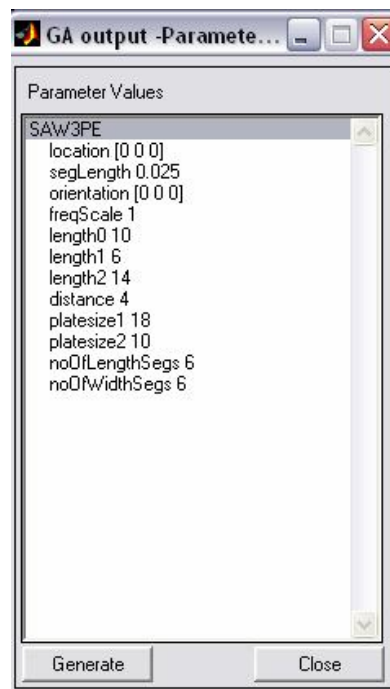


Εικόνα 133 –Το VSWR από 2100-2900MHz

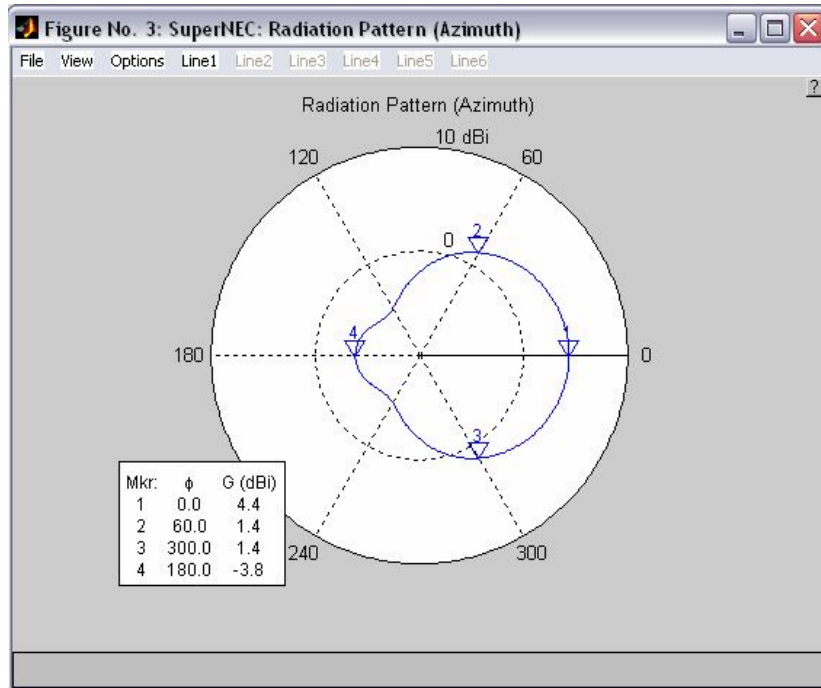
W1=1 W2=10 W3=1 W4=8 W5=8 W6=2



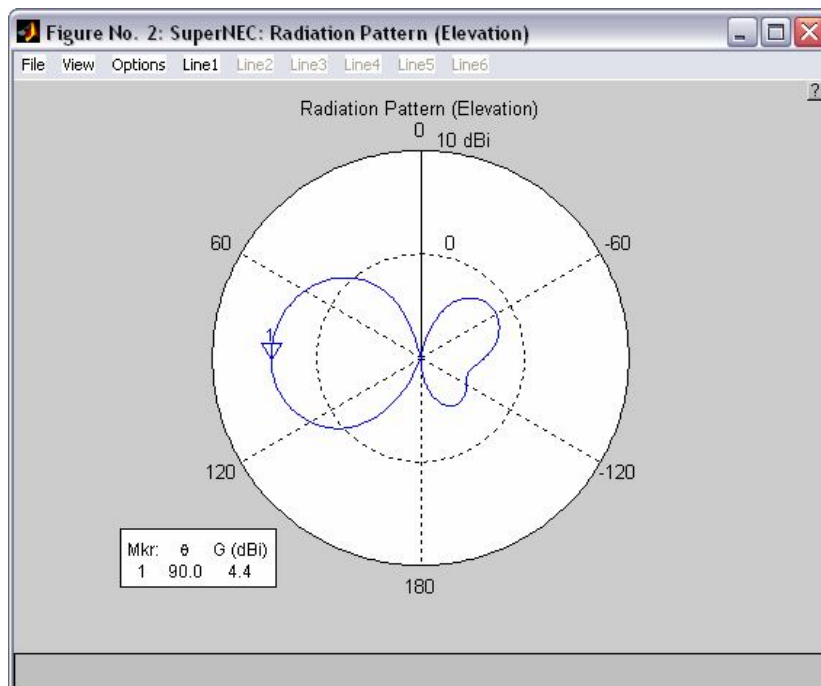
Εικόνα 134 –Η διάταξη της κεραίας για βάρη 1-10-1-8-8-2



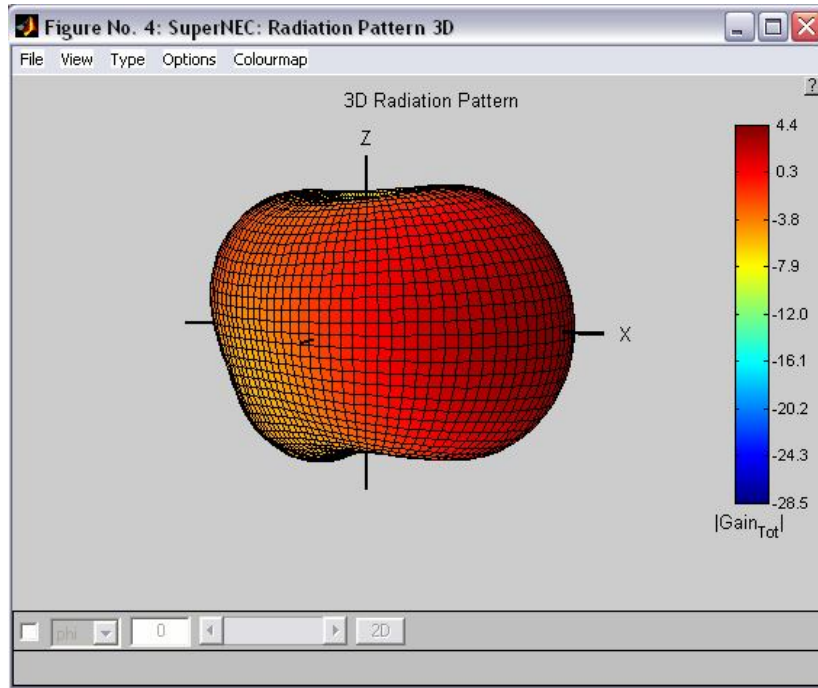
Εικόνα 135 –Οι παράμετροι της διάταξης



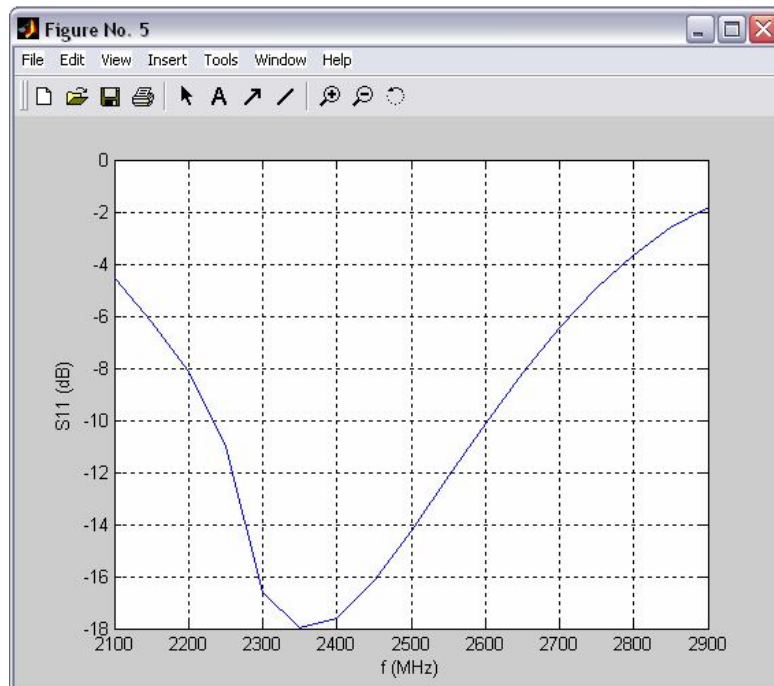
Εικόνα 136 –Το 2D διάγραμμα της κεραίας(azimuth)



Εικόνα 137-Το 2D διάγραμμα της κεραίας (elevation)



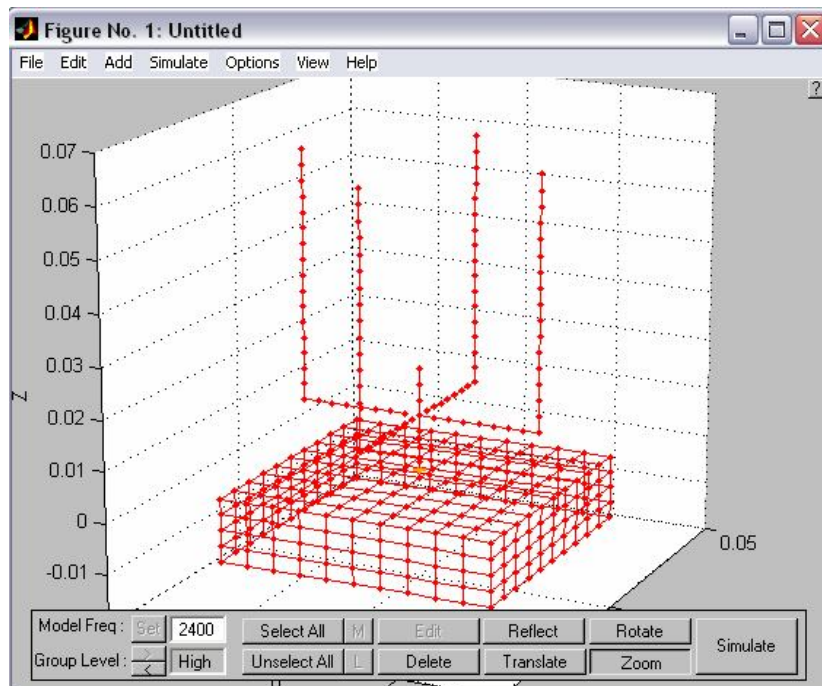
Εικόνα 138-Το 3D διάγραμμα της κεραίας



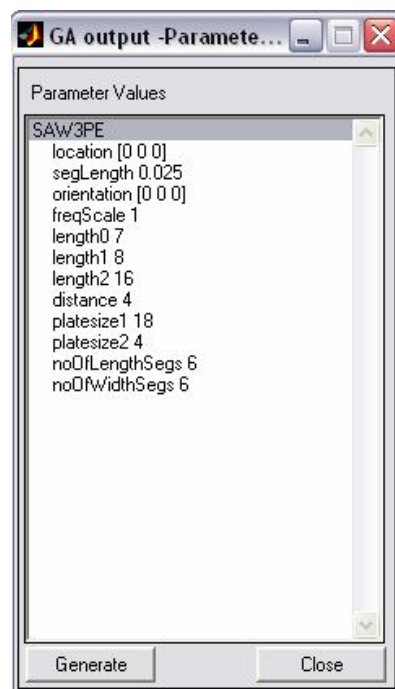
Εικόνα 139 –Το VSWR από 2100-2900MHz

Εδώ πετύχαμε τέλει elevation, δηλαδή μηδενικές απώλειες κέρδους από την γωνία 90 μοιρών και πολύ καλό VSWR. Το κέρδος και η κατευθυντικότητα της κεραίας αντίθετα κυμαίνονται σε μέτρια επίπεδα.

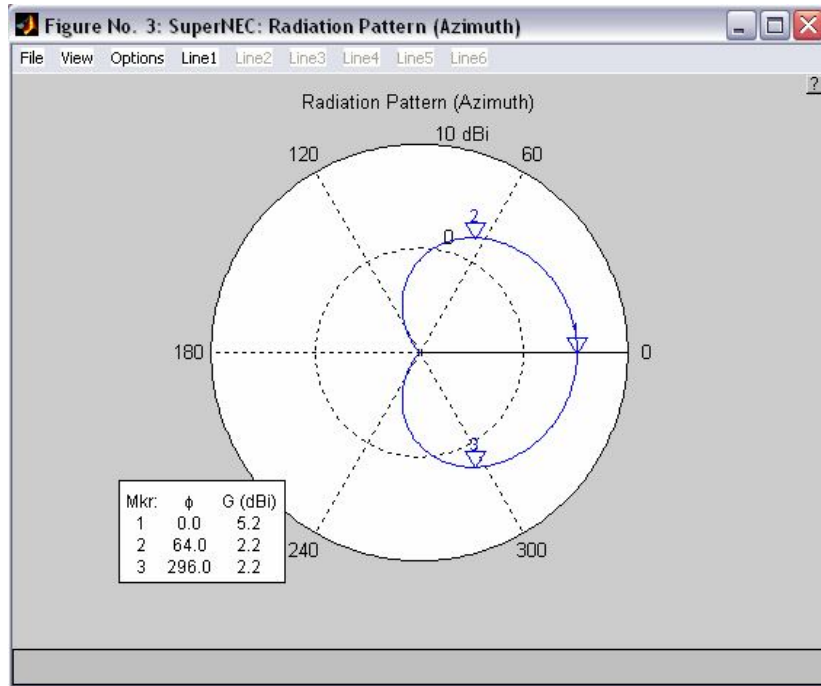
W1=1 W2=12 W3=1 W4=8 W5=8 W6=1



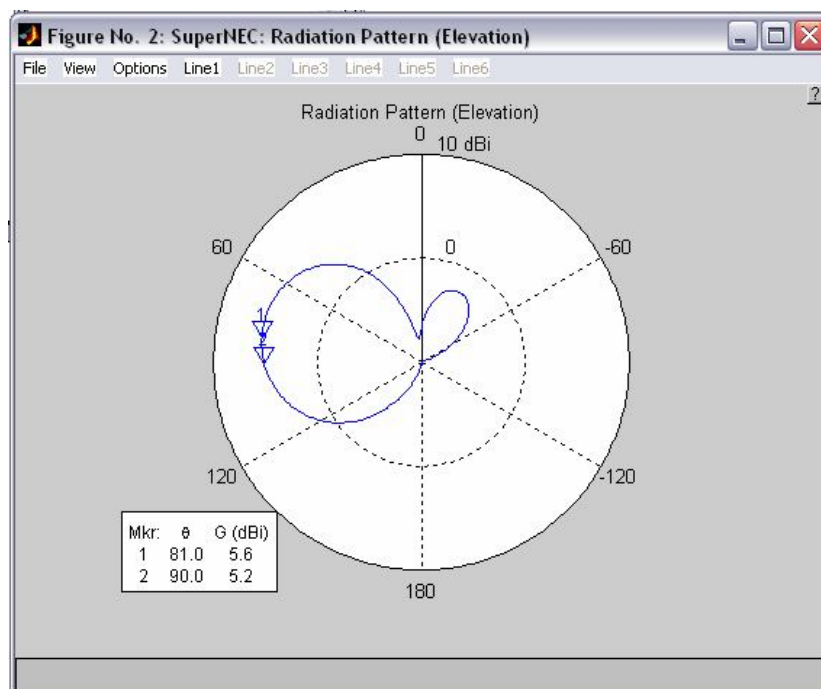
Εικόνα 140–Η διάταξη της κεραίας για βάρη 1-12-1-8-8-1



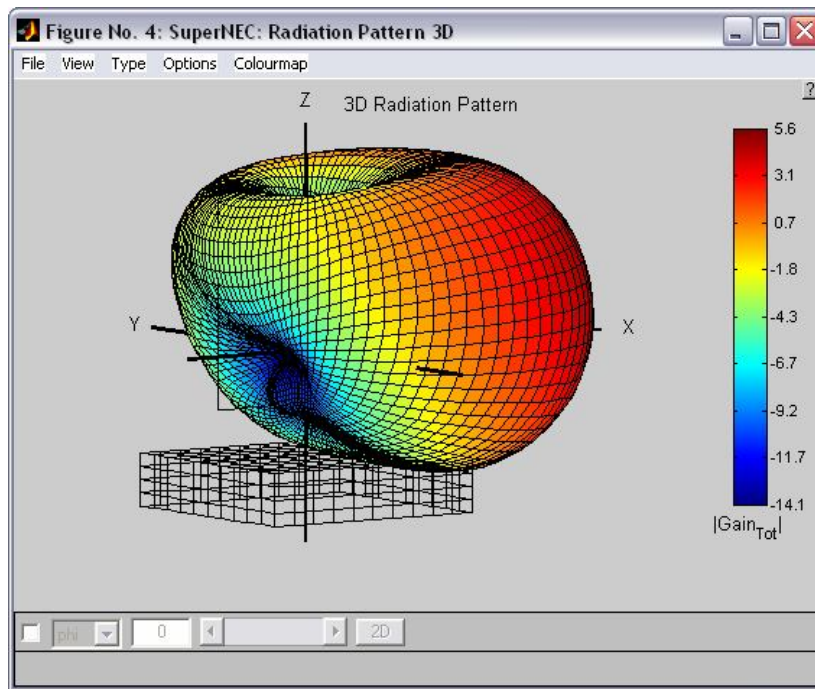
Εικόνα 141–Οι παράμετροι της διάταξης



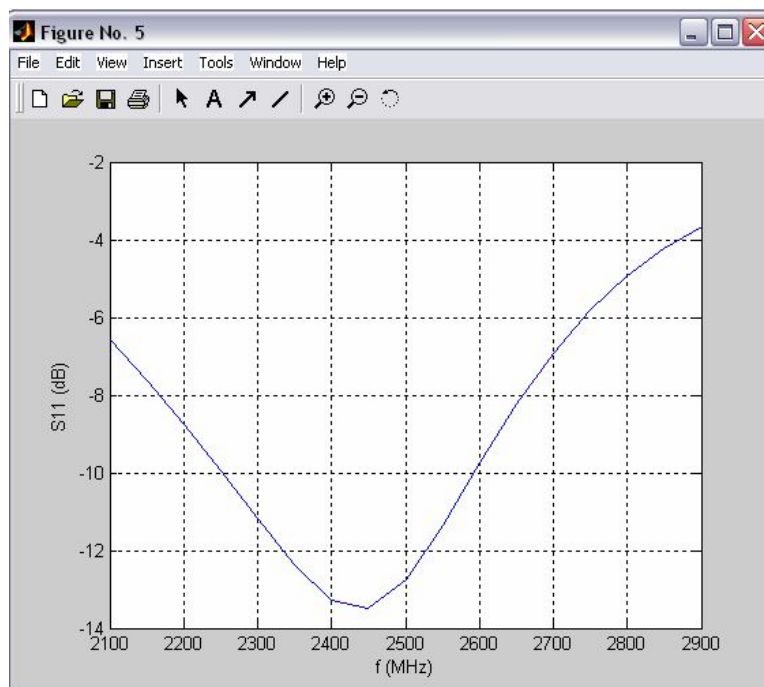
Εικόνα 142–Το 2D διάγραμμα της κεραίας (azimuth)



Εικόνα 143–Το 2D διάγραμμα της κεραίας(elevation)



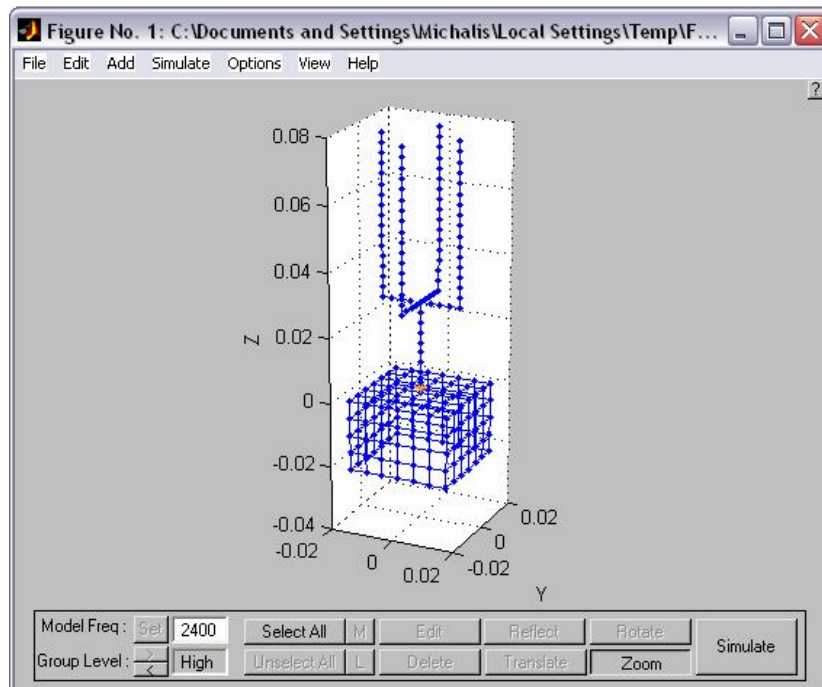
Εικόνα 144–Το 3D διάγραμμα της κεραίας



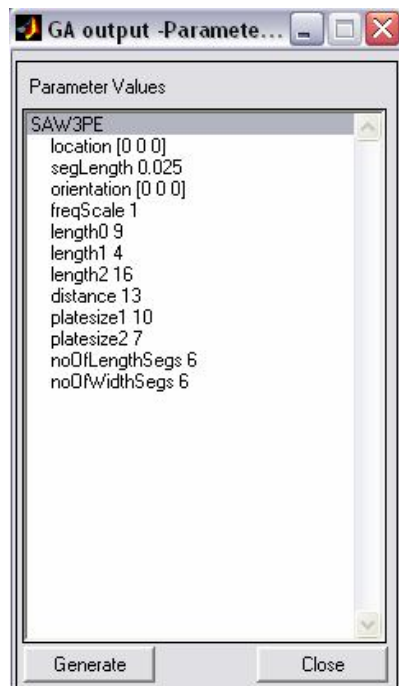
Εικόνα 145 –Το VSWR από 2100-2900MHz

Η μέτρηση αυτή για τη δεύτερη συνάρτηση ξεχωρίζει ως η καλύτερη από όσες έγιναν συνολικά, συμπεριλαμβανομένων των μετρήσεων και της πρώτης συνάρτησης. Συγκεκριμένα πετύχαμε υψηλό κέρδος της τάξης των 5,2G(dbi), ικανοποιητικό elevation, 9 μοίρες μακριά από το επιθυμητό, εξαιρετικά κατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας, εύρος 3db 128 μοίρες και τέλει VSWR για το φάσμα συχνοτήτων 2400-2480 που αφορά το WiFi

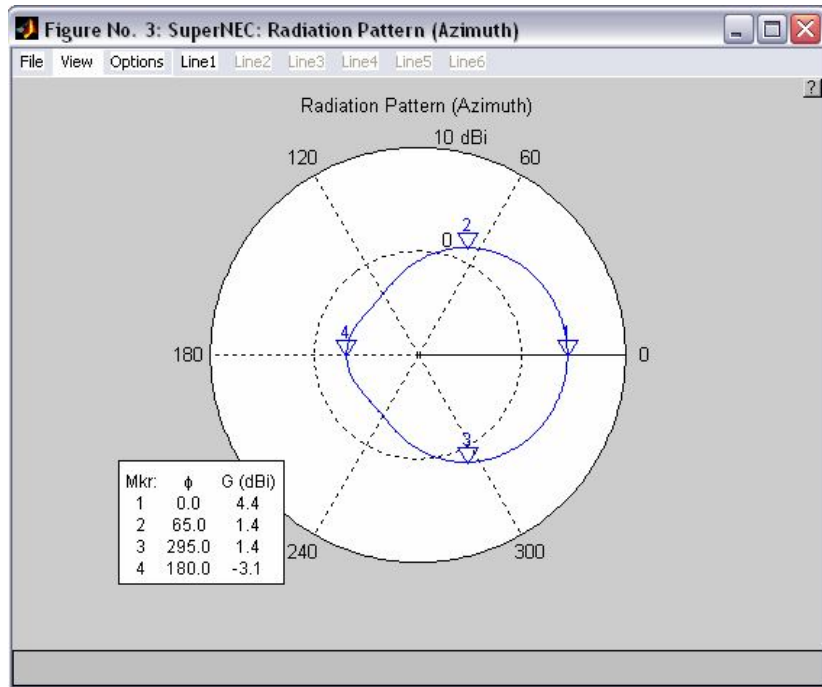
W1=1 W2=14 W3=1 W4=8 W5=8 W6=1



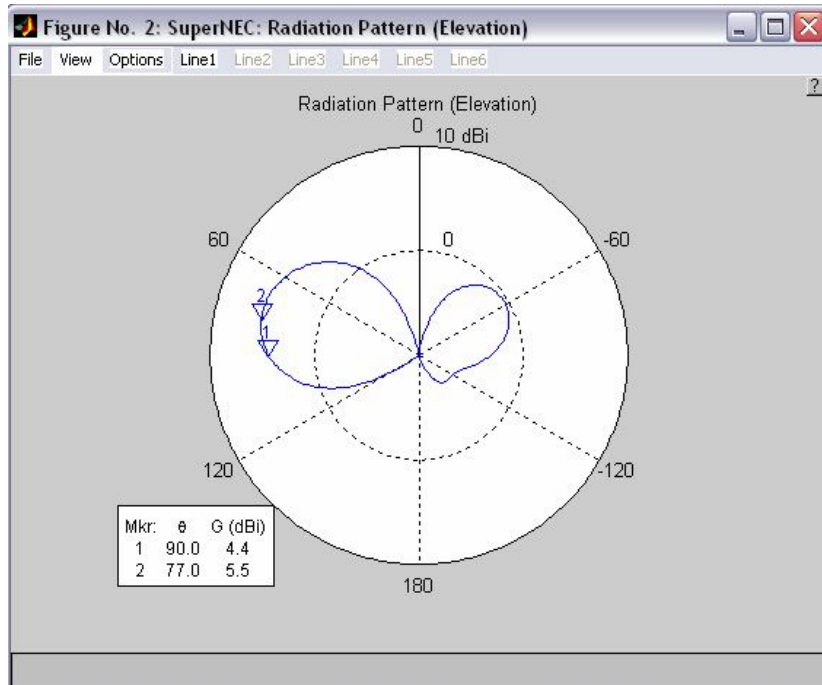
Εικόνα 146-Η διάταξη της κεραίας για βάρη 1-14-1-8-8-1



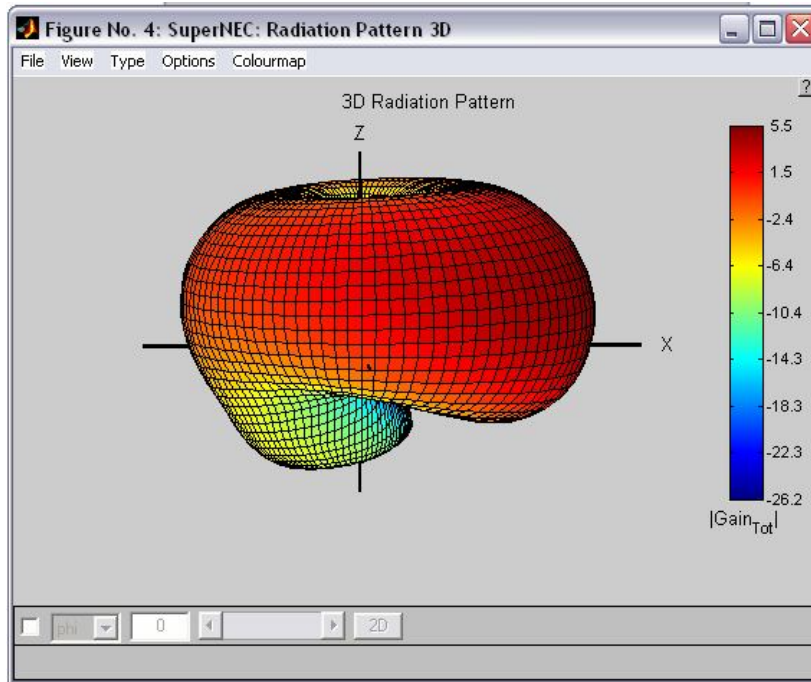
Εικόνα 147-Οι παράμετροι της διάταξης



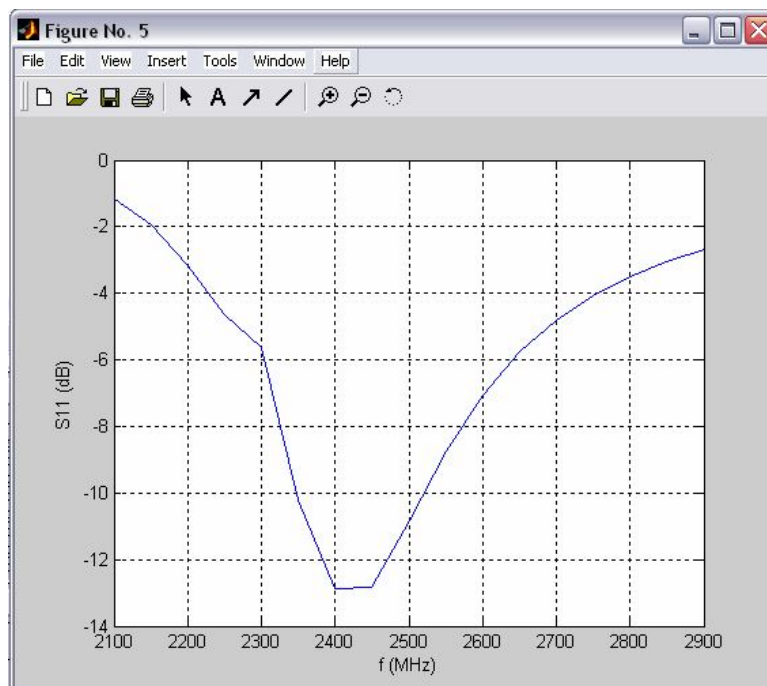
Εικόνα 148–Το 2D διάγραμμα της κεραίας (azimuth)



Εικόνα 149–Το 2D διάγραμμα της κεραίας (elevation)



Εικόνα 150–Το 3D διάγραμμα της κεραίας



Εικόνα 151 –Το VSWR από 2100-2900MHz

Τέλος να σημειωθεί ότι όλες οι μετρήσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω, ικανοποιούν τους περιορισμούς μεγέθους, τους οποίους έχουμε θέσει και έχουν αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, έτσι ώστε να είναι η δυνατή η προσαρμογή μιας κεραίας τέτοιου τύπου με τα βελτιστοποιημένα της χαρακτηριστικά όπως αναλύσαμε, σε συσκευές τύπου handheld για λειτουργία στις συχνότητες του Wi-Fi, ενώ είναι προφανές ότι η κεραία αποδεικνύεται εξ ίσου κατάλληλη τόσο για σταθερές όσο και για κινητές μεταδόσεις.

Για του λόγου το αληθές ενδεικτικά αναφέρουμε τις πραγματικές διαστάσεις σε εκατοστά, του καλύτερου βελτιστοποιημένου μοντέλου που παρουσιάστηκε πολλαπλασιάζοντας τις τιμές των παραμέτρων που μας δίνει το πρόγραμμα επί το μήκος κάθε segment, επί την τιμή του μήκους κύματος.(μέτρηση 1-12-1-8-8-1)

$$\text{Length0}=7 * 0,025 * 0,125= 2,1875 \text{ cm}$$

$$\text{Length1}=8 * 0,025 * 0,125= 2,5 \text{ cm}$$

$$\text{Length2}=16 * 0,025 * 0,125 =5 \text{ cm}$$

$$\text{Distance}= 4 * 0,025 * 0,125 = 1,25 \text{ cm}$$

$$\text{Platesize1}=18 * 0,025 * 0,125=5,625 \text{ cm}$$

$$\text{Platesize2}=4 * 0,025 * 0,125 =1,25 \text{ cm}$$

Δηλαδή η κεραία σε ύψος, με άλλα λόγια στις διαστάσεις του Z άξονα φτάνει τα $1,25+1,25+5=7,5$ cm μαζί με το plate και είναι αρκετά μικρότερη από τα 10 cm που έχουμε θέσει ως όριο για το μέγεθος της(χωρίς να υπολογίζεται το ύψος του plate).

Ενώ τέλος στις διαστάσεις του x,y επιπέδου φτάνει τα 5,625 cm και άρα μικρότερη σε πλάτος από τα 6 cm που είχαμε θέσει ως όριο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας συναρτήσεων του αρχείου cost4.m

```
function
COST=cost4(name,SIMFrq,ChkVSWR,ChkGain,Zo,vfactor,gfactor,costsetup)
% This function determines the fitness/cost after a simulation has run
% INPUTS:
% name -name of the output file that info will be read from
% SIMFrq -the simfrequency matrix
% ChkVSWR-matrix with the required VSWR in the first column and frequency in
the second.
% ChkGain-matrix with the required gain in first column and frequency in the
second column
% -Note for the above matrices if they contain only one value,it will be applied to
all
% -the simulation frequencies, and if the single element=0 then the parameter will
not
% -be optimised for.
% Zo-characteristic impedance-can have any value if not optimising for VSWR
% vfactor -exp factor which can change the significane of VSWR on the fitness
function
% eg if vfactor=2 then cost will be much less if desired value is not obtained
% but also a lot more if the requirements are exceeded
% gfactor -same operation as vfactor
% costsetup =0 -if cost function is calculated by taking average fitness for range
of
% frequencies
% =1 -if cost is calculated by taking the worst fitness
% =2 -if cost is calculated for multi frequency
%
% OUTPUTS:
% COST -of the form : 1st column=cost (fitness) of the chromosomes
% 2nd column=Gain info(if requested
% 3rd column=VSWR -note if VSWR note requested then gain will be
in the 2nd column
% $Author: Brandon Orchard $
% $MSc dissertation titled: Optimising Algorithms for Antenna Design$

%get the output info from the output file
output=sndata(name);
imp=output.imped(1,1);

sizeVSWR=size(ChkVSWR);
sizeGAIN=size(ChkGain);
```

```

NoFrq=size(SIMFrq,2);

%get the imaginary part of the impedance
reactances = imag (imp.impedance);
resistances =real (imp.impedance);

OptCost=2; %variable used to determine how things are being optimized for so
that can fill info in
    %columns in COST (used for output file)
Vcost=0;
Vcost3=0;
MfrCost=0;

COST=[0,0];
var3=1;
while (var3~=NoFrq+1)

    if ~isempty(ChkGain) %if optimising for gain
        gn=output.rpgain(1,var3);
        maxGAIN=max(max(gn.gain(:,3)));
        COST(1,OptCost)=maxGAIN; %store the gain info in COST

        if (sizeGAIN(1,1)>1) %if different Gains specified for various
frequencies
            fl=find(ChkGain(:,2)==gn.freq);
            GaintryGet=ChkGain(fl,1);
        else
            GaintryGet=ChkGain(1,1);
        end

        maxGAIN=10^(maxGAIN/10); %Convert gain into normal units(not in dBs)
        GaintryGet=10^(GaintryGet/10); %Convert gain into normal values(not in
dBs)

        Vcost2=(maxGAIN/GaintryGet)^gfactor;

        if (costsetup(1,1)==0) %if average fitness is to be used

            if (var3==1)
                Vcost3=Vcost2/NoFrq;

            else
                Vcost3=Vcost3+(Vcost2/NoFrq);

            end

        elseif (costsetup(1,1)==1) %if worst fitness is to be used

```



```

    if (var3==1)
        Vcost3=Vcost2;

    elseif (Vcost2<Vcost3)
        Vcost3=Vcost2;
    end

else %if Multi-frequency costing function is to be
used
    MfrCost(1,OptCost-1)=Vcost2;

end
OptCost=OptCost+1;
end %end of loop calculating cost for gain

```

```

if ~isempty(ChkVSWR) %if VSWR is being used to calculate fitness

    if(sizeVSWR(1,1)>1) %if different VSWR's specified for various
frequencies

        f1=find(ChkVSWR(:,2)==SIMFrq(1,var3));
        VSWRtryGet=ChkVSWR(f1,1);
    else
        VSWRtryGet=ChkVSWR(1,1);
    end
    f0=find(imp.freq==SIMFrq(1,var3));
    resistance=resistances(f0,1);
    reactance=reactances(f0,1);
    %get VSWR info
    Zl=resistance+i*reactance; %the impedance at a frequency

    VSWRact=vswr(Zl,Zo); %actual VSWR

    Vcost1=(VSWRtryGet/VSWRact)^vfactor;
    COST(1,OptCost)=VSWRact;

    if (costsetup(1,1)==0) %if average fitness is to be used
        if (var3==1)
            Vcost=Vcost1/NoFrq;

        else
            Vcost=Vcost+(Vcost1/NoFrq);

        end

    elseif (costsetup(1,1)==1) %if worst fitness is to be used

```

```

    if (var3==1)
        Vcost=Vcost1;

    elseif (Vcost1<Vcost)
        Vcost=Vcost1;
    end

    else %if using multifrequency cost
        MfrCost(1,OptCost-1)=Vcost1;
    end

    OptCost=OptCost+1;

end %end of loop for calculating cost using vswr
var3=var3+1;
end %end of while loop

```

```

if (costsetup==2) %if using multifrequency costing function
    TestReqMet=find(MfrCost<1);

    if isempty(TestReqMet) %if all the requirements have been met

    else
        ReqMet=find(MfrCost>1);
        for qt=1:size(ReqMet,2)
            MfrCost(1,ReqMet(1,qt))=1;
        end
    end
    COST(1,1)=sum(MfrCost);
else
    COST(1,1)=Vcost+Vcost3;
end

```

```

%-----
-----
%this is the new part of the cost function which cancels the cost of Orchard
%authors PV and PP
%er1mp=zeros(NoFrq,1);
if (costsetup==3)
    Zin=getfield(imp,'impedance');
    Rin=real(Zin);
    Xin=imag(Zin);

    %Zin=imp.impedance;
    %Rin=real(Zin);
    %Xin=imag(Zin);

```

```
%%%%%%%%%*****%  
%%%%%%%%%
```

```
%nrfld=output.nearh(1,1);  
%Hx=nrfld.data(1,1,1,1);  
%Hy=nrfld.data(1,1,1,3,1);  
%Hz=nrfld.data(1,1,1,5,1);  
%H=sqrt(Hx^2+Hy^2+Hz^2);
```

```
%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%*****%  
%%%%%%%%%
```

```
gn=output.rpgain(1,1);  
%MLv1=[0.5+(0:29)*0.5/29]';  
%MLv2=[1-(1:30)*0.5/30]';  
%MLv=[MLv1;MLv2];
```

```
%SLv=0.5*ones(100,1);
```

```
%MLa1=[1:60]*pi/180;
```

```
%SLa1=[63:3:360]*pi/180;
```

```
%MLv1=[0.5+(0:22)*0.5/22]';  
%MLv2=[1-(1:22)*0.5/22]';  
%MLv=[MLv1;MLv2];
```

```
%SLv=0.5*ones(105,1);
```

```
%MLa1=[1:45]*pi/180;
```

```
%SLa1=[48:3:360]*pi/180;
```

```
%MLv1=[0.5+(0:14)*0.5/14]';  
%MLv2=[1-(1:15)*0.5/15]';  
%MLv=[MLv1;MLv2];
```

```
%SLv=0.5*ones(110,1);
```

```
%MLa1=[1:30]*pi/180;
```

```
%SLa1=[33:3:360]*pi/180;
```

```
%cPos=(NoFrq+1)/2;  
%for indf=1:NoFrq  
% cPos=indf;
```

```

%maxGAIN=(max(gn.gain(:,1,3,cPos)))^2;
%er1=0;

%for ind1m=1:60
%er1=er1+abs((MLv(ind1m)*maxGAIN-
(gn.gain(ind1m,1,3,cPos))^2)/(MLv(ind1m)*maxGAIN))^2;
%end

%for ind1s=63:3:360
% if (SLv(((ind1s-60)/3))>((gn.gain(ind1s,1,3,cPos))^2/maxGAIN))
% er1=er1+0;
%else
%
% er1=er1+abs((SLv(((ind1s-60)/3))*maxGAIN-
(gn.gain(ind1s,1,3,cPos))^2)/(SLv(((ind1s-60)/3))*maxGAIN))^2;
%end
%end

%er1m=er1/160;
%er1mp(indf,1)=er1m;
%end
%er1m=max(er1mp);

% err=(abs(Rin1-75)/75)^2+abs(Xin1/75)^2+(abs(Rin2-
75)/75)^2+abs(Xin2/75)^2+4*er1m;

%Rinm=sum(Rin)/NoFrq;
%Xinm=sum(Xin)/NoFrq;
%Rinm=max(abs(Rin-75)/75);
%Xinm=max(abs(Xin)/75);
Rinm=sum(abs(Rin-75)/75)/NoFrq;
Xinm=sum(abs(Xin)/75)/NoFrq;
%err=Rinm^2+Xinm^2;
%err=(abs(Rinm-75)/75)^2+abs(Xinm/75)^2+1*er1m;
GAINback1=zeros(90,180);
GAINfront1=zeros(90,180);
GAINback2=zeros(90,180);
GAINfront2=zeros(90,180);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for indT=1:180,
for indP=91:180,
GAINback1(indP-90,indT)=gn.gain(indP,indT,3,1);
GAINback1(indP-90,indT)=10^(GAINback1(indP-90,indT)/10);
GAINback2(indP-90,indT)=gn.gain(indP,indT,3,NoFrq);
GAINback2(indP-90,indT)=10^(GAINback2(indP-90,indT)/10);
end
end

```

```

tempGAINback1=sum(GAINback1,2);
avgGAINback1=sum(tempGAINback1,1);
tempGAINback2=sum(GAINback2,2);
avgGAINback2=sum(tempGAINback2,1);

for indT=1:180,
    for indP=1:90,
        GAINfront1(indP,indT)=gn.gain(indP,indT,3,1);
        GAINfront1(indP,indT)=10^(GAINfront1(indP,indT)/10);
        GAINfront2(indP,indT)=gn.gain(indP,indT,3,NoFrq);
        GAINfront2(indP,indT)=10^(GAINfront2(indP,indT)/10);
    end
end

tempGAINfront1=sum(GAINfront1,2);
avgGAINfront1=sum(tempGAINfront1,1);
tempGAINfront2=sum(GAINfront2,2);
avgGAINfront2=sum(tempGAINfront2,1);

err=Rinm^2+Xinm^2+(avgGAINback1/avgGAINfront1)^2+(avgGAINback2/avgGAINfront2)^2;
    COST(1,1)=1/(1+sqrt(err));
end
%-----
-----

if (costsetup==4)

    gn=output.rpgain(1,1);
    err=0;

    Zin=getfield(imp,'impedance');
    Rin=real(Zin);
    Xin=imag(Zin);

    for indf=1:NoFrq
        cPos=indf;

        GAINdB=gn.gain(1,1,3,cPos);
        GAIN=10^(GAINdB/10);
        BACKdB=max(gn.gain(45:315,1,3,cPos));
        BACK=10^(BACKdB/10);
        %err=(abs(Rin-50)/50)^2+(abs(Xin)/50)^2+(BACK/GAIN)^2;

        err=err + 1 *GAINdB-1.*BACKdB;
    end
end

```

```

fc=err./NoFrq;
Rinm=sum(Rin)./NoFrq;
Xinm=sum(Xin)./NoFrq;

    COST(1,1)=fc -1.*abs(50-Rinm)-1.*abs(Xinm);

% COST(1,1)=40*GAINdB-2*BACKdB;
% COST(1,1)=1/(1+sqrt(err));
% GAINfront1=zeros(11,21);
% for indT=1:21,
%   for indP=1:11,
%     GAINfront1(indP,indT)=gn.gain(indP,indT,3,1);
%     GAINfront1(indP,indT)=10^(GAINfront1(indP,indT)/10);
%   end
% end

% tempGAINfront1=sum(GAINfront1,2);
% avgGAINfront1=sum(tempGAINfront1,1)/231;
% COST(1,1)=GAIN^2;

end

if (costsetup==5)

    Zin=getfield(imp,'impedance');
    Rin=real(Zin);
    Xin=imag(Zin);

%% %% %% %% %% ***** %% %%
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %%

    gn=output.rpgain(1,1);
    MLv1=[0.5+(0:59)*0.5/59].';
    MLv2=[1-(1:60)*0.5/60].';

    SLv1=0.1*ones(240,1);

    MLv=[MLv2;SLv1;MLv1];

    MLa1=[1:60].'*pi/180;

    SLa1=[63:3:360].'*pi/180;

    % MLv1=[0.5+(0:22)*0.5/22]';
    % MLv2=[1-(1:22)*0.5/22]';
    % MLv=[MLv1;MLv2];

    % SLv=0.5*ones(105,1);

```

```

%MLa1=[1:45]*pi/180;

%SLa1=[48:3:360]*pi/180;

%MLv1=[0.5+(0:14)*0.5/14]';
%MLv2=[1-(1:15)*0.5/15]';
%MLv=[MLv1;MLv2];

%SLv=0.5*ones(110,1);

%MLa1=[1:30]*pi/180;

%SLa1=[33:3:360]*pi/180;

%cPos=(NoFrq+1)/2;
for indf=1:NoFrq
    cPos=indf;

%maxGAIN=(max(gn.gain(:,1,3,cPos)))^2;
maxGAIN=max(gn.gain(:,1,3,cPos));
%er0 = abs((1-maxGAIN/10)/10)^2;
maxGAIN=10^(maxGAIN/10);
er1=0;
er2=0;
er3=0;
for ind1m=1:1:44
    radpat=10^((gn.gain(ind1m,1,3,cPos))/10);
%    er1=er1+abs((MLv(ind1m)*maxGAIN-radpat)/(MLv(ind1m)*maxGAIN))^2;

    if (0.5-radpat/maxGAIN)<0
        er2=er2+0;
    else
        er2=er2+((radpat/maxGAIN -0.5)/0.5)^2;
    end
end

for ind1m=45:1:45
    radpat=10^((gn.gain(ind1m,1,3,cPos))/10);
%    er1=er1+abs((MLv(ind1m)*maxGAIN-radpat)/(MLv(ind1m)*maxGAIN))^2;

    er1=er1+((radpat/maxGAIN -0.5)/0.5)^2;

end

for indls=46:1:314

```

```

radpat=10^((gn.gain(indls,1,3,cPos))/10);
if (radpat/maxGAIN-0.1)<0
    er3=er3+0;
else
    er3=er3+((radpat/maxGAIN -0.1)/0.1)^2;
end
end

for ind1m=315:1:315
    radpat=10^((gn.gain(ind1m,1,3,cPos))/10);
%     er1=er1+abs((MLv(ind1m)*maxGAIN-radpat)/(MLv(ind1m)*maxGAIN))^2;

    er1=er1+((radpat/maxGAIN -0.5)/0.5)^2;

end

for ind1m=316:1:360
    radpat=10^((gn.gain(ind1m,1,3,cPos))/10);
%     er1=er1+abs((MLv(ind1m)*maxGAIN-radpat)/(MLv(ind1m)*maxGAIN))^2;

    if (0.5-radpat/maxGAIN)<0
        er2=er2+0;
    else
        er2=er2+((radpat/maxGAIN -0.5)/0.5)^2;
    end
end

er1m=er1/2 +1*er2/89 +er3/269;

er1mp(indf,1)=er1m;
end % frequency

er1m=sum(er1mp)/NoFrq;
Rinm=sum(abs(Rin-50)/50)/NoFrq;
Xinm=sum(abs(Xin)/50)/NoFrq;

err=1*Rinm^2+1*Xinm^2+1*er1m;

%+1*er0; %err=(abs(Rin-75)/75)^2+abs(Xn/75)^2+1*er1m;
COST(1,1)=1/(1+sqrt(err));
end

snres('Exit');
clear snres;

```


ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. X. Καψάλης, Π. Γ. Κωττής, “*Κεραίες – Ασύρματες Ζεύξεις*”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003
2. SuperNEC GUI Input User Reference Manual, Version 2.4, Poynting Antennas Software (Pty) Ltd
3. SuperNEC GUI Output User Reference Manual, Version 2.4, Poynting Antennas Software (Pty) Ltd
4. SuperNEC GA Optimiser User Manual, Version 1.10, Poynting Antennas Software (Pty) Ltd
5. Chen Sun, Akifumi Hirata, Takashi Ohira, Nemaï C. Karmakar, “*Fast Beamforming of Electronically Steerable Parasitic Array Radiator Antennas: Theory and Experiment*”, IEEE transactions on antennas and propagation, Vol.52, No.7, 2004
6. Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory, Analysis and Design*”, John Wiley and Sons, 1997
7. Constantine A. Balanis, Panayiotis I. Ioannides, “*Introduction to Smart Antennas*”, Morgan & Claypool, 2007
8. Randy L. Haupt , Douglas H. Werner, *Genetic Algorithms in Electromagnetics*, A. John Wiley & Sons
9. Stylianos C.Panagiotou, Themistoklis D. Dimousios, Christos N.Capsalis, *Analysis and Design of a broadband Circular Switched Parasitic Array above finite plate and finite plate with skirt*, 2007
10. T. D. Dimousios and C. D. Nikolopoulos , *A NEW LOW-PROFILE AND COST SPA-PIFA FOR MOBILE 2.4GHZ ISM APPLICATIONS*

11. Pantelis K. Varlamos, Panagiotis J. Papakanellos, and Christos N. Capsalis, *Design of Circular Switched Parasitic Dipole Arrays Using a Genetic Algorithm*, vol. 11, No 4, October 2004
12. P. K. Varlamos and C. D. Capsalis, *ELECTRONIC BEAM STEERING USING SWITCHED PARASITIC SMART ANTENNA ARRAYS*, 2002
13. Stylianos C. Panagiotou, Stelios A. Mitilineos, Themistoklis D. Dimousios, and Christos N. Capsalis, *A BROADBAND, CIRCULAR SWITCHED PARASITIC ARRAY FOR PORTABLE AND VEHICULAR MOBILE DVB-T APPLICATIONS AT THE V UHF BAND*, 2007
14. Ευπολιάς Δημήτριος, *Σχεδίαση ευφρών κεραιοσυστημάτων για λειτουργία στις συχνότητες του Wi-Fi και του WiMAX με χρήση του λογισμικού πακέτου SuperNEC και βελτιστοποίηση τους με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων*, 2009
15. Κόλλια Α. Ελένη, *Σχεδίαση και ανάλυση UWB κεραιών με τη χρήση του λογισμικού πακέτου προσομοίωσης SuperNEC. Βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της κεραίας με τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων*, 2010