



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

## Σχεδίαση Ευφρών Κεραιών για Ασύρματα Δίκτυα και Συστήματα Εκπομπής

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Θεμιστοκλής Δ. Δημούσιος

Αθήνα, Μάιος 2012





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

## Σχεδίαση Ευφών Κεραιών για Ασύρματα Δίκτυα και Συστήματα Εκπομπής

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Θεμιστοκλής Δ. Δημούσιος

**Συμβουλευτική Επιτροπή:** Χρήστος Καψάλης  
Παναγιώτης Κωττής  
Δήμητρα – Θεοδώρα Κακλαμάνη  
Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την / /2013.

.....  
Χ. Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Π. Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Δ. –Θ. Κακλαμάνη  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....  
Γ. Φικιώρης  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Σ. Κωτσόπουλος  
Καθηγητής Παν. Πατρών

.....  
Ν. Ουζούνoglou  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Α. Παναγόπουλος  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....  
Θεμιστοκλής Δ. Δημούσιος

Υποψήφιος Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Θεμιστοκλής Δ. Δημούσιος, 2012.  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

*Στην οικογένειά μου*



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η μελέτη, σχεδίαση και αξιοποίηση σε ασύρματα συστήματα επικοινωνιών ευφών στοιχειοκεραιών διαφόρων τύπων (Switched Parasitic Arrays (SPAs), Planar Inverted F Antennas (PIFA)). Πρόκειται για τύπους ευφών κεραιών (Smart Antennas), οι οποίες εντάσσονται στην επιμέρους κατηγορία των κεραιών στρεφόμενου λοβού (Switched Beam, SB). Η διατριβή εξειδικεύεται στη σχεδίαση ευφών κεραιοσυστημάτων που διευκολύνουν την εκπομπή και λήψη σήματος ασύρματων τοπικών δικτύων (WiFi, mobile WiMAX) καθώς και δικτύων κινητής τηλεφωνίας (GSM). Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τα ασύρματα τοπικά δίκτυα, λαμβάνεται υπόψη το πρότυπο IEEE 802.11 που χρησιμοποιείται ευρέως και δίνεται περισσότερη έμφαση στην ανάπτυξη ευφών κεραιοδιατάξεων με λειτουργικό εύρος ζώνης που λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων του WiFi, mobile WiMAX και ικανοποιούν κατά βέλτιστο τρόπο τις συνθήκες λήψης (σταθερή, φορητή και κινητή λήψη) που ορίζονται από το εν λόγω πρότυπο.

Αρχικά περιγράφονται τα κύρια χαρακτηριστικά του IEEE 802.11. Ακολούθως παρουσιάζονται τα είδη και οι αρχές λειτουργίας των ευφών κεραιών, καθώς και τα πλεονεκτήματα που συνεπάγεται η ενσωμάτωσή τους στα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Στη συνέχεια αναπτύσσονται οι διατάξεις SPAs που μελετώνται στην παρούσα διατριβή και τονίζεται η σημασία της ηλεκτρονικής στροφής του διαγράμματος ακτινοβολίας. Σχεδιάζονται διατάξεις από ευφείς κεραιές μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων που προορίζονται για εφαρμογές λήψης σήματος WiFi, mobile WiMAX τοπικών δικτύων καθώς επίσης και κινητής τηλεφωνίας. Δίνεται έμφαση σε δομές που περιλαμβάνουν γωνιακό ανακλαστήρα με δίπολα, δύο ενεργά περιφερειακά στοιχεία με τα υπόλοιπα βραχυκυκλωμένα και σε δομές που αποτελούνται στοιχεία τύπου PIFA, ενεργά ή παρασιτικά, συμμετρικά τοποθετημένα πάνω σε αγωγίμο έδαφος. Ακόμη παρατίθενται στοιχεία από τη θεωρία της μεθόδου των ροπών, η οποία χρησιμοποιείται για την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση των SPAs.

Η σχεδίαση των κεραιοσυστημάτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια της στοχαστικής τεχνικής αναζήτησης και βελτιστοποίησης των γενετικών αλγορίθμων (Genetic Algorithms, GAs), η οποία συνίσταται για την επίλυση πολυπαραμετρικών προβλημάτων. Ικανοποιούνται διάφορες σχεδιαστικές απαιτήσεις που αφορούν στη μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας, την τιμή του κέρδους και την αντίσταση εισόδου. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ευελιξία και αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων διαδικασιών σχεδίασης.

Επιπλέον γίνεται αναφορά στην κατασκευή και πειραματική μέτρηση πρωτοτύπων μιας προτεινόμενης ευφούς στοιχειοκεραίας μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων PIFA για μια κατάσταση μεταγωγής.

**Λέξεις Κλειδιά:** Σχεδίαση Ευφών Στοιχειοκεραιών Μεταγωγής Ενεργών και Παρασιτικών Στοιχείων, PIFA, WiFi, WiMAX, Γενετικοί Αλγόριθμοι, Διάγραμμα Ακτινοβολίας, Λειτουργικό Εύρος Ζώνης.





## ABSTRACT

The subject of the present thesis is the study, design and deployment in wireless communication systems of smart antenna arrays of various types (Switched Parasitic Arrays (SPAs), Planar Inverted F Antennas (PIFA)). These are types of smart antennas, which belong to the sub-category of switched beam (SB) antennas. The dissertation focuses on the design of smart antenna systems that facilitate the broadcast and reception of WiFi, mobile WiMAX and mobile telephony (GSM) signal. More specifically, the IEEE 802.11 standard that is widely used is taken into consideration and more attention is paid to the development of smart antenna arrays with extended operational bandwidth that operate at WiFi, mobile WiMAX frequency zones and satisfy the reception conditions (fixed, portable and mobile reception) determined by the above mentioned standard in an optimum manner.

Initially the major characteristics of IEEE 802.11 are described. In the following, the kinds and operation principles of smart antennas are presented, together with the advantages offered by their incorporation in a wireless local network system. Furthermore, SPAs studied in the present thesis are developed and the importance of electronic steering of the radiation pattern is stressed. Emphasis is laid on structures that include a corner reflector and dipoles, two active peripheral elements with the remaining elements being short-circuited, and on structures that consist of PIFAs, active or parasitic, symmetrically placed upon a plate. Moreover, elements from the theory of method of moments (MoM) are provided, as this method is used for the electromagnetic analysis of SPAs.

The design of the antenna arrays is made feasible with the aid of the stochastic search and optimization technique of genetic algorithms (GAs), which is recommended for the resolution of multi-parametric problems. Various design requirements are satisfied, concerning the shape of the radiation pattern, the gain value and the input impedance. The results prove the efficiency of the proposed design procedures.

In addition, reference is made to the construction and experimental measurement of the prototype of a proposed switched parasitic PIFA arrays for a single switching state.

**Keywords:** Design of Switched Parasitic Arrays, Genetic Algorithms, PIFA, WiFi, WiMAX, Genetic Algorithms, Radiation Pattern, Operational Bandwidth.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή εξειδικεύεται στη σχεδίαση ευφών κεραιοσυστημάτων που διευκολύνουν την εκπομπή και λήψη σήματος τοπικών ασύρματων δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνεται υπόψη τα πρότυπα IEEE 802.11, που χρησιμοποιείται ευρέως, και στο 802.16 που θα απασχολήσει μελλοντικά τους χρήστες του mobile WiMAX, και επομένως δίνεται περισσότερη έμφαση στην ανάπτυξη ευφών κεραιοδιατάξεων που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz (WiFi/WAN, Mobile WiMAX) και ικανοποιούν κατά βέλτιστο τρόπο τις συνθήκες λήψης (σταθερή, φορητή και κινητή λήψη) που ορίζονται από το εν λόγω πρότυπα. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται και μια κεραιοδιάταξη κατάλληλη για λειτουργία στις συχνοότητες της κινητής τηλεφωνίας (GSM).

Το πρώτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο σε μια περιεκτική επισκόπηση των ασύρματων συστημάτων ευρυεκπομπής, δίνοντας βάρος σε θέματα κάλυψης, με το δεύτερο κεφάλαιο να επικεντρώνεται στα τοπικά ασύρματα δίκτυα υπολογιστών WiFi και mobile WiMAX και στα πρότυπα που τα διέπουν, με ειδική αναφορά στα επικρατέστερα IEEE 802.11 και 802/16 πρότυπα. Επιπλέον, στόχος των δύο πρώτων κεφαλαίων, είναι να καταστεί εύληπτη η αναγκαιότητα εισαγωγής ευφών κεραιοσυστημάτων στα συγκεκριμένα συστήματα, κάτι βέβαια που θα διαφανεί ιδιαίτερα και στα κεφάλαια που αναπτύσσονται διεξοδικά τα προτεινόμενα κεραιοσυστήματα και αναφέρεται ξεχωριστά για το καθένα από αυτά η συμβολή τους στη βελτίωση των συνθηκών λήψης για τις οποίες προορίζονται. Οι προτεινόμενες ευφείς κεραίες που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια αυτής της διατριβής μπορούν φυσικά να βρουν πεδίο εφαρμογής και σε άλλα επίγεια ψηφιακά συστήματα ευρυεκπομπής, αφού πρώτα γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις στο φυσικό τους μέγεθος, ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία τους στις συχνοτικές ζώνες που καταλαμβάνουν τα διάφορα άλλα ψηφιακά συστήματα ευρυεκπομπής.

Στο πρώτο μισό του τρίτου κεφαλαίου εισάγεται η έννοια των ευφών κεραιών και παρατίθενται στοιχεία που αφορούν στην ιστορική τους εξέλιξη. Ακόμη παρουσιάζονται αναλυτικά τα είδη, οι αρχές λειτουργίας και οι σημαντικότεροι αλγόριθμοι μορφοποίησης του διαγράμματος ακτινοβολίας τους, ενώ αναπτύσσονται και τα βασικά πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την ενσωμάτωσή τους στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών. Στο υπόλοιπο μισό τμήμα του κεφαλαίου περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας των ευφών στοιχειοκεραιών μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων. Εξηγείται η σημασία του ηλεκτρονικού ελέγχου του διαγράμματος ακτινοβολίας μέσω της εναλλαγής μεταξύ των ενεργών και παρασιτικών στοιχείων στο κύκλωμα τροφοδότησης. Επιπλέον γίνεται παράθεση στοιχείων από την πρόσφατη βιβλιογραφία, όπου καταγράφονται παραδείγματα ποικίλων εκδοχών συμμετρικών ευφών στοιχειοκεραιών ενεργών, παρασιτικών βραχυκυκλωμένων και ανοικτοκυκλωμένων στοιχείων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι αρχές και οι μηχανισμοί λειτουργίας της τεχνικής των γενετικών αλγορίθμων. Αναφέρονται τα κύρια πλεονεκτήματά τους έναντι άλλων παραδοσιακών μεθόδων βελτιστοποίησης και εξηγείται η χρησιμότητά τους στην αντιμετώπιση σύνθετων ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων. Πιο συγκεκριμένα, καθίσταται σαφής μέσω βιβλιογραφικών αναφορών η ευελιξία της μεθόδου και οι ποικίλες εφαρμογές της στην επίλυση πολυπαραμετρικών προβλημάτων. Ακόμα, παρουσιάζεται η μέθοδος των ροπών, η οποία χρησιμοποιείται για την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση των προτεινόμενων κεραιών αυτής της διατριβής.

Το κεφάλαιο αυτό καταλήγει με την παρουσίαση μερικών κεραιοσυστημάτων που σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων και της μεθόδου των ροπών, τα οποία εντάσσονται στα ευρύτερα πλαίσια αυτής της διατριβής.

Από το πέμπτο κεφάλαιο αρχίζει η παράθεση αριθμητικών αποτελεσμάτων, τα οποία αναδεικνύουν τις δυνατότητες γενετικής σχεδίασης ευφών στοιχειοκεραιών μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων, κυρίως διπόλων. Ικανοποιούνται διάφορες σχεδιαστικές απαιτήσεις, άλλες ταυτόχρονα και άλλες σε διαφορετικές περιπτώσεις: αυτές είναι η κάλυψη του οριζοντίου επιπέδου με ένα προκαθορισμένο αριθμό διαγραμμάτων ακτινοβολίας συγκεκριμένης μορφής, η επίτευξη επιθυμητών τιμών κέρδους και αποδεκτών τιμών αντίστασης εισόδου. Οι λύσεις που προκύπτουν επιβεβαιώνουν την ευελιξία και αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων διαδικασιών σχεδίασης, οι οποίες εφαρμόζονται σε διάφορες εκδοχές των υπό μελέτη δομών. Το κεφάλαιο αυτό συνεχίζει με την εκτενή παρουσίαση των κεραιών τύπου PIFA και καταλήγει με τη σχεδίαση ενός κεραιοσυστήματος κεραιών PIFA και PIFA-Parasitic όπου τα ενεργά και παρασιτικά στοιχεία πλέον δεν είναι δίπολα, αλλά πολυπλοκότερες δομές (PIFA antennas). Ομοίως, το συγκεκριμένο σύστημα σχεδιάστηκε με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων και της μεθόδου των ροπών, και εντάσσεται στα ευρύτερα πλαίσια αυτής της διατριβής.

Το Κεφάλαιο 6 είναι αφιερωμένο σε μια προσπάθεια εφαρμογής των ESPAR κεραιών (Electronically Steerable Passive Array Radiator Antennas) σε συχνότητες μέσα σε WiFi συστήματα και σε συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Παράλληλα, παρουσιάζεται και μια εξέλιξη ενός SPA κεραιοσυστήματος του κεφαλαίου 5 με γωνιακό ανακλαστήρα, σε ESPAR στοιχεία, δίνοντας παράλληλα την ευκαιρία παρουσίασης συγκριτικών αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο τεχνικών σχεδίασης ευφών κεραιοσυστημάτων.

Η εκπόνηση της διατριβής πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. Η εκπόνηση διήρκεσε έξι χρόνια, συμπεριλαμβανομένου του ενός έτους διακοπής της διατριβής για την εκπλήρωση των στρατιωτικών μου υποχρεώσεων

Ολοκληρώνοντας, πρωτίστως οφείλω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου για την αγάπη και την στήριξή της. Θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου στον καθηγητή μου κ. Χρήστο Καψάλη, για το παράδειγμά του και για την υπομονή του, την στήριξή του, τις πολύτιμες συμβουλές του, την ανεκτίμητη πολύπλευρη επιστημονική καθοδήγηση και πατρική συμπαράσταση καθ' όλη την διάρκεια της διατριβής. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Τσόκα, ηλεκτρονικό και τεχνικό υπεύθυνο του Εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων, για την άριστη συνεργασία και επικοινωνία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στους συναδέλφους οι οποίοι με βοήθησαν όλα αυτά τα χρόνια με τον έναν ή τον άλλο τρόπο για την ολοκλήρωση της διατριβής. Ιδιαίτερης μνείας χρήζει ο φίλος και συνάδελφος Σ. Μυτιληναίος για την βοήθειά του στις μετρήσεις των προτεινόμενων κεραιών, οι οποίες συνιστούν σημαντικό κομμάτι της διατριβής. Η παρότρυνση και οι συμβουλές του Στέλιου ήταν πολύ σημαντικός παράγοντας ώθησης καθ' όλη την διάρκεια της διατριβής. Ξεχωριστά θα ήθελα να αναφέρω τους εξαιρετους φίλους, συνάδελφους και συνεργάτες Χ. Νικολόπουλο και Σ. Παναγιώτου με τους οποίους διατηρούμε άριστη συνεργασία και κυρίως ειλικρινή φιλία όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ευχαριστώ το Θεό που με αξίωσε να περατώσω τις μακρόχρονες σπουδές μου.

Θεμιστοκλής Δ. Δημούσιος  
Αθήνα, Οκτώβριος 2012



# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT.....	9
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	21
ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑ.....	21
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	21
1.2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	22
1.2.1 NARROWBAND WIRELESS LOCAL-LOOP SYSTEMS.....	23
1.2.2 FIRST GENERATION BROADBAND SYSTEMS .....	25
1.2.3 SECOND GENERATION BROADBAND SYSTEMS .....	26
1.2.4 STANDARDS BASED TECHNOLOGIES.....	26
1.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ .....	28
1.3.1 ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ 3 <sup>ΗΣ</sup> ΓΕΝΙΑΣ .....	28
1.3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ WI-FI.....	29
1.3.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ WIMAX .....	30
1.3.4 ΑΛΛΑ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	32
1.4 ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑ.....	33
1.4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ITU-R.....	33
1.4.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ .....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	42
WI-FI.....	42
2.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ΠΡΟΤΥΠΩΝ IEEE 802.11 .....	42
2.1.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ .....	42
2.1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΓΕΝΙΩΝ WLAN .....	46
2.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΝ IEEE 802.11 .....	48
2.2.1 ΤΑ ΤΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΚΤΥΩΣΗΣ.....	48
2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	52
2.3.1 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ.....	53
2.3.2 ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΖΕΥΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	61
WIMAX.....	63
2.4 IEEE 802.16 ΚΑΙ WIMAX .....	63
2.5 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ WIMAX.....	66
2.6 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ WIMAX.....	69

2.6.1 OFDM.....	69
2.6.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ OFDM.....	70
2.6.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ OFDM ΣΤΟ WIMAX.....	71
2.6.4 ΥΠΟΚΑΝΑΛΟΠΟΙΗΣΗ (SUBCHANNELIZATION).....	73
2.6.5 ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΩΝ (FRAME STRUCTURE).....	74
2.6.6 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ WIMAX.....	76
2.6.7 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	77
2.7 ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ MAC.....	77
2.7.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ.....	79
2.7.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ (QOS).....	80
2.7.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	82
2.7.4 ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	83
2.7.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ.....	85
2.7.6 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ MULTICAST ΚΑΙ BROADCAST.....	86
2.8 ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ WIMAX.....	87
2.8.1 ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΕΡΑΙΩΝ.....	87
2.8.2 ΥΒΡΙΔΙΚΟ ARQ.....	88
2.8.3 ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.....	89
2.9 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	89
2.10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1 <sup>ΟΥ</sup> - 2 <sup>ΟΥ</sup> - 3 <sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	94
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ.....	94
3.1 ΒΑΣΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ.....	95
3.1.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ.....	95
3.1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ.....	97
3.1.3 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	98
3.1.4 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΔΕΣΜΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (FIXED BEAMFORMING NETWORKS).....	100
3.1.5 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΜΕ ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΕΣ ΔΕΣΜΩΝ (SPATIAL FILTERING WITH BEAMFORMERS).....	102
3.1.6 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗΣ ΔΕΣΜΗΣ (SWITCHED BEAM SYSTEMS).....	103
3.1.7 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΔΕΣΜΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (MULTIPLE FIXED BEAM SYSTEMS).....	105
3.1.8 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ (ADAPTIVE ARRAYS SYSTEMS).....	105



3.1.9 ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΕΣ ΕΥΦΥΕΙΣ ΚΕΡΑΙΕΣ (WIDEBAND SMART ANTENNAS) – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΧΩΡΟΧΡΟΝΟΥ .....	111
3.1.10 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΣΜΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ (TRANSMISSION BEAMFORMING) .....	113
3.1.11 ΝΕΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΕΥΦΥΕΙΣ ΚΕΡΑΙΕΣ .....	115
3.2 ΕΥΦΥΕΙΣ ΚΕΡΑΙΕΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (SWITCHED PARASITIC ARRAYS, SPAS) .....	115
3.2.1 ΑΠΛΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ SPAS .....	117
3.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3 <sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	125
ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΤΟΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟ, Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΡΟΠΩΝ ΚΑΙ Ο ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ..	125
4.1 ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ .....	125
4.1.1 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ .....	127
4.1.2 ΔΟΜΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ - ΣΧΗΜΑΤΑ .....	128
4.1.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΝΟΣ ΑΠΛΟΥ GA .....	128
4.1.4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ (SELECTION) ΤΩΝ GAS .....	129
4.1.5 ΣΧΗΜΑΤΑ ΖΕΥΓΑΡΩΜΑΤΟΣ (MATING SCHEMES) .....	131
4.1.6 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗΣ (CROSSOVER) .....	131
4.1.7 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΑΞΗΣ (MUTATION) .....	134
4.1.8 ΕΛΙΤΙΣΜΟΣ .....	134
4.1.9 ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ GA .....	134
4.1.10 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ GA ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ .....	135
4.1.11 ΈΝΑ ΒΗΜΑ ΠΡΟΣ ΒΗΜΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ .....	135
4.1.12 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΕΡΑΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ .....	141
4.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΡΟΠΩΝ ΚΑΙ Ο ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ .....	145
4.2.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΡΟΠΩΝ .....	145
4.2.2 Ο ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SUPERNEC .....	150
4.3.3 ΓΕΝΕΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΕΡΑΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΗΣ MOM ΚΑΙ ΤΟΥ SNEC .....	151
4.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4 <sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	153
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	157

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΥΦΥΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΩΝ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ WIFI, MOBILE WIMAX ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	157
5.1 ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΓΩΝΙΑΚΟ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ WIFI, MOBILE WIMAX ΣΥΧΝΟΤΙΚΗ ΖΩΝΗ .....	157
5.1.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ SPA ΓΙΑ ΤΗ WIFI, MOBILE WIMAX ΜΠΑΝΤΑ .....	158
5.1.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ SPA ΓΙΑ ΤΗ WIFI, MOBILE WIMAX ΜΠΑΝΤΑ.....	163
5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΑΣ SPA ΤΕΤΡΑΠΛΗΣ ΡΙΦΑ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ WIFI, MOBILE WIMAX ΣΥΧΝΟΤΙΚΗ ΖΩΝΗ.....	165
5.2.1 Η ΕΠΙΠΕΔΗ ΚΕΡΑΙΑ ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΟΥ F ( PLANAR INVERTED F ANTENNA, ΡΙΦΑ) .....	165
5.2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ SPA QUAD-ΡΙΦΑ .....	167
5.2.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ SPA QUAD-ΡΙΦΑ ΓΙΑ ΤΗ WIFI, MOBILE WIMAX ΜΠΑΝΤΑ.....	170
5.2.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΗΣ SPA QUAD-ΡΙΦΑ ΓΙΑ ΤΗ WIFI, MOBILE WIMAX ΜΠΑΝΤΑ.....	172
5.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5ΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	177
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....	179
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΕΡΑΙΩΝ ESPAR (ELECTRONICALLY STEERABLE PASSIVE ARRAY RADIATOR ANTENNA) ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ WIFI, MOBILE WIMAX ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.....	179
6.1 ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ESPAR.....	182
6.1.1 Η ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ ESPAR .....	183
6.1.2 ΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ESPAR .....	185
6.2 Η ΚΕΡΑΙΑ ESPAR ΣΤΗ ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	186
6.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΕΡΑΙΑΣ ESPAR ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΑ 2.4 GHZ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ.....	188
6.3.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ESPAR .....	189
6.3.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ESPAR 7 & 5 ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	192
6.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ESPAR 7 ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΑ 2.4 GHZ, 1800 ΚΑΙ 1900 MHZ (TRI-BAND ESPAR).....	193
6.4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ TRI-BAND ESPAR ΚΕΡΑΙΑΣ .....	194
6.4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ TRI-BAND ESPAR.....	197
6.5 Η ΚΕΡΑΙΑ CP-ESPAR.....	198
6.5.1 ΔΟΜΗ ΤΗΣ CP-ESPAR .....	199

6.5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	200
6.5.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	205
6.5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	208
6.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6 <sup>ΟΥ</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	209
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	212

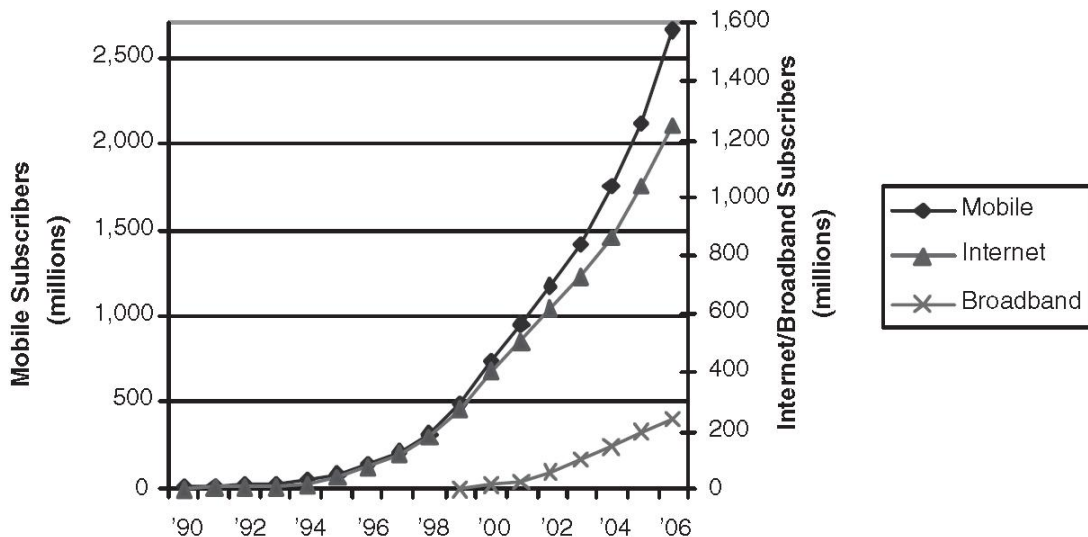


# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο ασύρματη ευρυζωνικότητα (broadband wireless) συνοψίζονται 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 από 11 εκατομμύρια παγκοσμίως το 1990 σε πάνω από 2 δισεκατομμύρια το 2005. Κατά την ίδια περίοδο, το internet (διαδίκτυο) 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. Σε λιγότερο από δέκα χρόνια, οι συνδρομητές δικτύων ευρείας ζώνης έχουν ξεπεράσει τα 200 εκατομμύρια. Μπορεί ο συνδυασμός ασύρματης τεχνολογίας με τις πλούσιες δυνατότητες των ευρυζωνικών δικτύων να αποτελέσει την βάση για ακόμα μεγαλύτερη ανάπτυξη στην βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών; Θα μπορούσε ο συνδυασμός αυτός να καταστεί τεχνολογικά και εμπορικά βιώσιμος; Είναι εφικτό να ανταποκριθεί ένα τέτοιο ασύρματο μοντέλο στις απαιτητικές εφαρμογές που ενδιαφέρουν τους χρήστες δικτύων ευρείας ζώνης. Πολλοί μελετητές είναι θετικοί στα παραπάνω ερωτήματα.



Σχήμα 1.1: Η παγκόσμια αύξηση συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας, διαδικτύου και ευρυζωνικών υπηρεσιών

Προτού αναφέρουμε περισσότερα για την ασύρματη ευρυζωνικότητα, ας δούμε ποια είναι η σημερινή πραγματικότητα για τα δίκτυα ευρείας ζώνης γενικότερα. Η τεχνολογία Digital subscriber line (Ψηφιακή γραμμή συνδρομητή) ή DSL, η οποία παρέχει πρόσβαση υψηλής ταχύτητας στο διαδίκτυο μέσω κοινών τηλεφωνικών

γραμμών, καθώς και η τεχνολογία Cable modem (Καλωδιακό μόντεμ), η οποία χρησιμοποιεί ομοαξονικά καλώδια τηλεόρασης, αποτελούν σήμερα τις δύο επικρατούσες τεχνολογίες ευρυζωνικής πρόσβασης. Και οι δύο αυτές τεχνολογίες παρέχουν στους χρήστες ταχύτητες πρόσβασης που πρακτικά φτάνουν έως έναν μικρό αριθμό megabits το δευτερόλεπτο (Mbps), ενώ με τις συνεχείς βελτιώσεις είναι εφικτές ταχύτητες μέχρι και μερικές δεκάδες megabits το δευτερόλεπτο. Σε σχέση με την αρχική τους εμφάνιση στα τέλη της δεκαετίας του 90 οι υπηρεσίες αυτές έχουν να επιδείξουν σημαντικότερη πρόοδο και ανάπτυξη. Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (Η.Π.Α.) υπήρχαν το 2006 περισσότεροι από 50 εκατομμύρια συνδρομητές δικτύων ευρείας ζώνης, περιλαμβάνοντας περισσότερους από τους μισούς κατ' οίκον χρήστες του διαδικτύου. Παγκοσμίως, ο αριθμός των συνδρομητών για το 2006 ξεπέρασε τα 200 εκατομμύρια και υπολογίζεται ότι έως το τέλος του 2010 θα έχει ξεπεράσει τα 400 εκατομμύρια. Η ύπαρξη μιας ασύρματης λύσης για την ευρυζωνικότητα θα έδινε μια επιπλέον ώθηση σε αυτήν την ανάπτυξη.

Ποιες είναι οι εφαρμογές που δίνουν αυτήν την ώθηση; Οι χρήστες παγκοσμίως παρατηρούν πόσο δραματικά έχει αλλάξει ο τρόπος που μοιραζόμαστε πληροφορίες, πραγματοποιούμε επιχειρηματικές συναλλαγές ή ψυχαγωγούμαστε. Η ευρυζωνικότητα όχι μόνο παρέχει ταχύτερη πλοήγηση στο διαδίκτυο (web surfing) και γρηγορότερο κατέβασμα αρχείων (file downloading), αλλά καθιστά δυνατές διάφορες εφαρμογές πολυμέσων (multimedia applications) όπως μετάδοση εικόνας και ήχου σε πραγματικό χρόνο (real-time audio and video streaming), σύσκεψη πολυμέσων (multimedia conferencing) και παιχνίδια αλληλεπίδρασης (interactive gaming). Ευρυζωνικές συνδέσεις χρησιμοποιούνται επίσης για τηλεφωνικές υπηρεσίες με χρήση της τεχνολογίας VoIP (Voice over Internet Protocol). Τα πιο εξελιγμένα συστήματα ευρυζωνικής πρόσβασης όπως το FTTH (Fiber to the home) και το VDSL (Very high data rate DSL), καθιστούν δυνατές εφαρμογές entertainment-quality video, όπως τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (High-definition TV ή HDTV) και video on demand (VoD). Όσο η ευρυζωνικότητα θα εδραιώνεται στην αγορά, πολλές νέες εφαρμογές είναι πιθανόν να προκύψουν, και είναι δύσκολο να προβλεφθεί ποιες απ' αυτές θα επιτύχουν στο μέλλον.

Τι είναι λοιπόν αυτό που θα προσδώσει η ασύρματη τεχνολογία στα δίκτυα ευρείας ζώνης; Αυτό που θα επιτευχθεί είναι να μεταφερθούν οι πλούσιες δυνατότητες των ευρυζωνικών δικτύων σε ένα ασύρματο πλαίσιο κάτι που θα αποφέρει νέες μεγάλες δυνατότητες σε αυτά καθώς και καλύτερη εκμετάλλευση 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). Το mobile broadband επιχειρεί να μεταφέρει την ευρυζωνική εμπειρία σε νέα σενάρια εφαρμογής, προσφέροντας έτσι μια πολύ διαφορετική και ενδιαφέρουσα πρόταση στον χρήστη.

## 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 ανάπτυξη 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<sup>η</sup> γενιά (First generation - Line of sight (LOS) broadband systems)
- Ασύρματα συστήματα ευρείας ζώνης – 2<sup>η</sup> γενιά (Second generation – Non-line of sight (NLOS) broadband systems)
- Ασύρματα συστήματα ευρείας ζώνης βασισμένα σε πρότυπα (Standards-based broadband wireless systems)

Παρακάτω ακολουθεί μία περιεκτική παρουσίαση των βημάτων αυτών.

### **1.2.1 NARROWBAND WIRELESS LOCAL-LOOP SYSTEMS**

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.

**Πίνακας 1.1**  
**Τα γεγονότα-ορόσημα στην ανάπτυξη της ασύρματης ευρυζωνικότητας**

<b>Date</b>	<b>Event</b>
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

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 FIRST GENERATION BROADBAND SYSTEMS**

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 ανάπτυξη 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 αποδείχθηκαν τροχοπέδη για την περαιτέρω ανάπτυξη τους. Εξάλλου, από την στιγμή που μια αρκετά μεγάλη περιοχή εξυπηρετούνταν 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 SECOND GENERATION BROADBAND SYSTEMS**

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 (multi-antenna 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 κεραιάς. Ταχύτητες μέχρι και αρκετά megabits το δευτερόλεπτο με εμβέλειες κυψέλης λίγων χιλιομέτρων, έγιναν εφικτές στα συστήματα δεύτερης γενιάς.

### **1.2.4 STANDARDS BASED TECHNOLOGIES**

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 μπάντες 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 AgrayComm 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<sup>ης</sup> γενιάς. Παρακάτω ακολουθεί μια συνοπτική αναφορά στις τεχνολογίες αυτές.

#### 1.3.1 ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ 3<sup>ΗΣ</sup> ΓΕΝΙΑΣ

Παγκοσμίως, οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας αναβαθμίζουν τα δίκτυά τους με στόχο την υποστήριξη τεχνολογίας 3<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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 (3<sup>rd</sup> 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 υποστηρίξει 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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 πλεονέκτημα του Wi-Fi σε σχέση με τους δύο μεγάλους ανταγωνιστές του, το WiMAX και τα συστήματα 3<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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 διαφορετική 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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 κυψελωτή 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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.

**Πίνακας 1.2**  
**Σύγκριση του WiMAX με τις άλλες τεχνολογίες ασύρματης ευρυζωνικότητας**

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 <sup>a</sup> 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 <sup>b</sup> shared using 802.11a/g; more than
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	100Mbps peak layer 2 throughput using 802.11n
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

Εν κατακλείδι, το WiMAX αποτελεί μια τεχνολογία που θα μπορούσε νοητά να τοποθετηθεί κάπου ανάμεσα σε αυτές των συστημάτων 3<sup>ης</sup> γενιάς και του Wi-Fi, λαμβάνοντας υπόψη τις αποδόσεις τους σε ρυθμοαπόδοση, εμβέλεια, QoS, υποστήριξη κινητικότητας και φυσικά το κόστος τους. Ο Πίνακας 1.2 συνοψίζει τα κυριότερα χαρακτηριστικά των τριών αυτών τεχνολογιών.

#### **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<sup>ης</sup> 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 μπάνα. Η πρόσβαση στο φάσμα συχνοτήτων είναι το κλειδί για την ανάπτυξη των ασύρματων ευρυζωνικών τεχνολογιών.

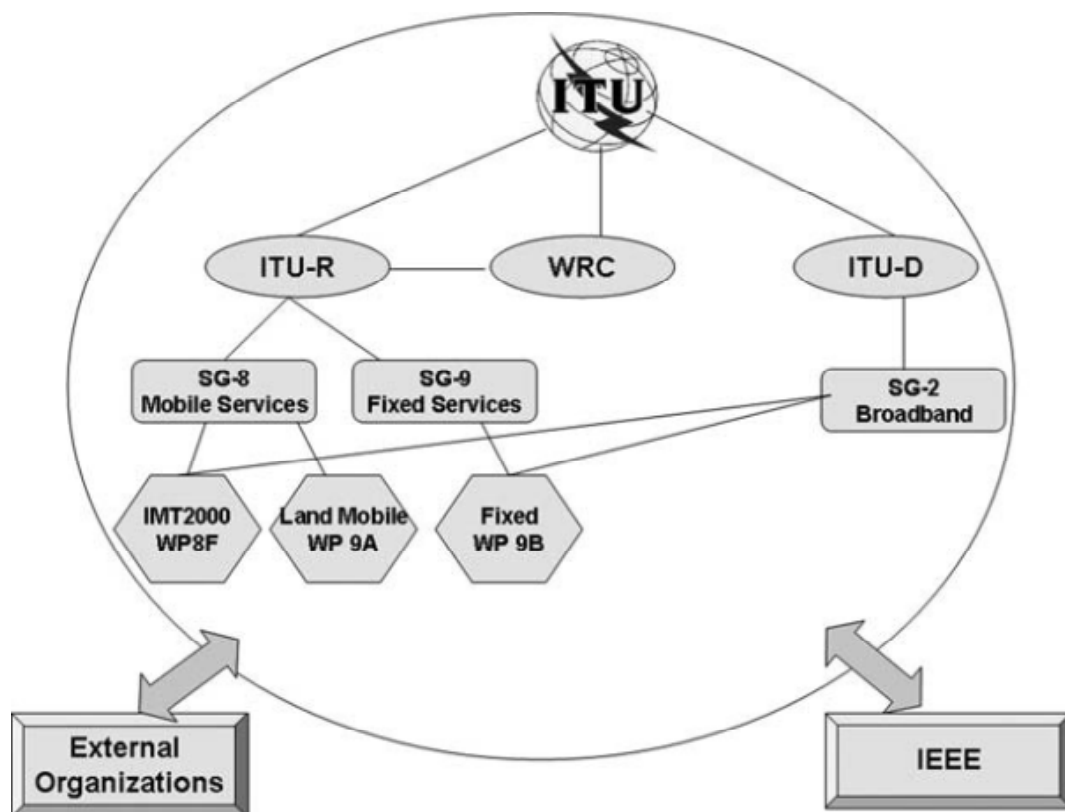
### **1.4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ITU-R**

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 τήρηση 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> γενιάς, είναι οι πιο πρόσφατοι ανταγωνιστές όσον αφορά την κατανομή συχνοτήτων σε αυτές.



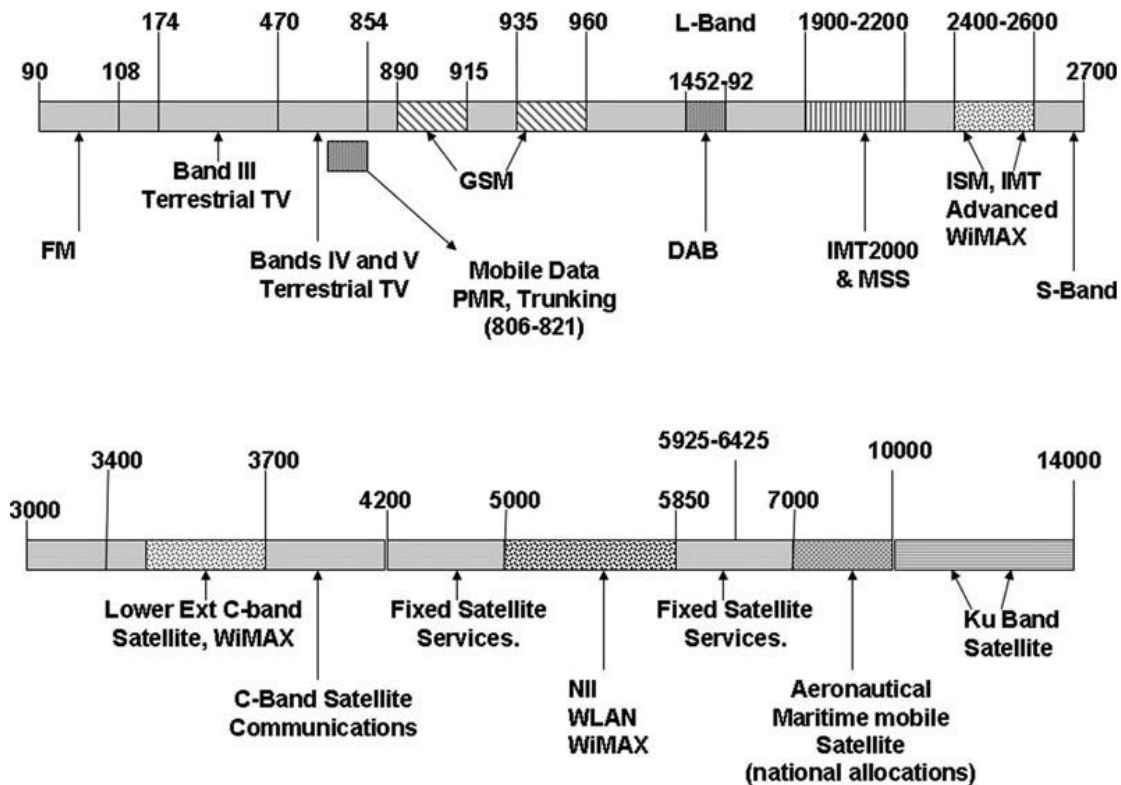
Σχήμα 1.2: Διαδικασία κατανομής συχνοτήτων από το ITU

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<sup>ης</sup> 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 ισχύς εκπομπής, οι εξωσυχνотικές 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 ή 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 τρεις 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.



Σχήμα 1.3: 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<sup>ης</sup> 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 μπάντα των 700 MHz, που έγιναν στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2008, είναι ενδεικτικές αυτής της τάσης. Οι μπάντες 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.

**Πίνακας 1.3:**

**Διεθνής κατανομή συχνοτήτων για υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας**

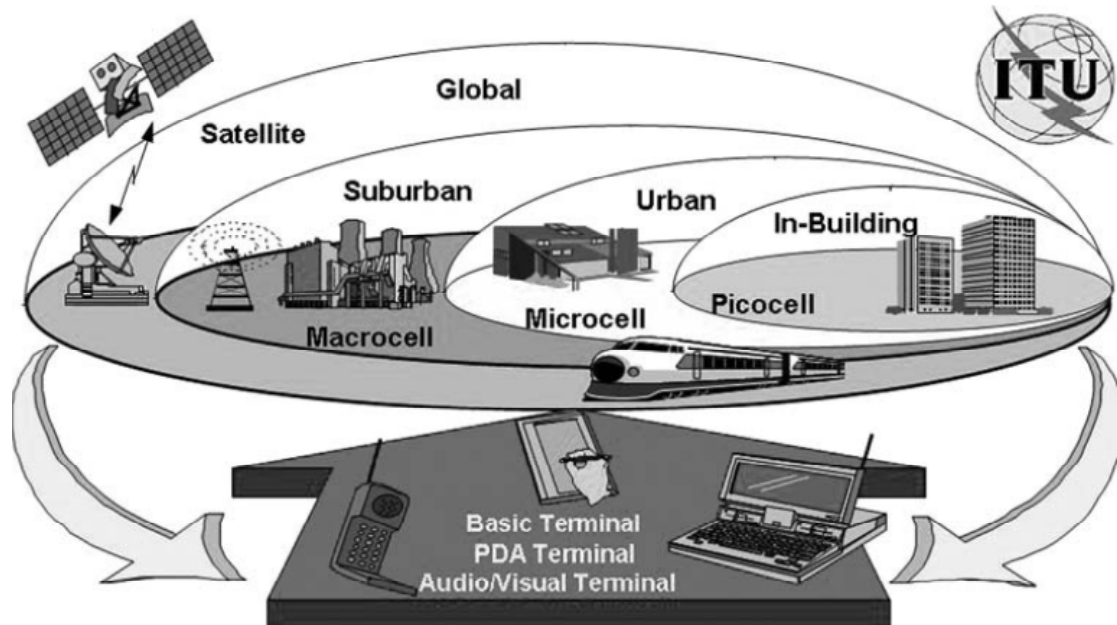
International allocations for 2/2.5G mobile services

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

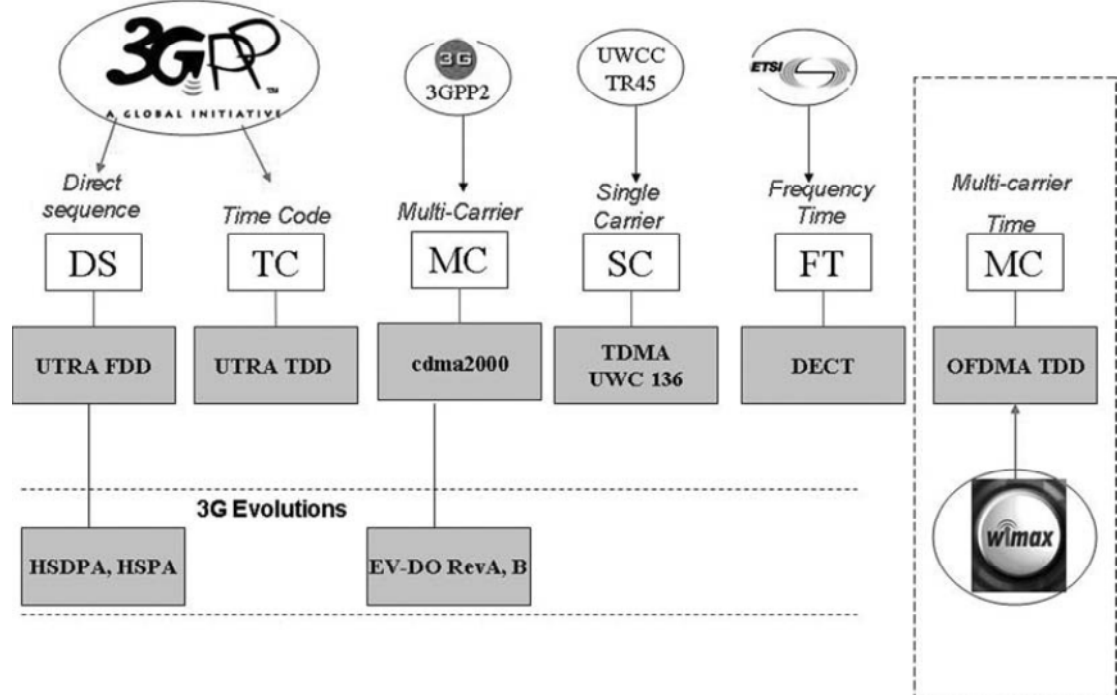
Το φάσμα που πρότεινε η ομάδα IMT 2000 για τα συστήματα 3<sup>ης</sup> γενιάς περιλαμβάνανε πέντε τύπους εναέριας διεπαφής (air interface) αλλά και την πρόνοια τόσο για επίγειες κινητές υπηρεσίες όσο και δορυφορικές.

Οι πέντε τύποι εναέριας 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)



Σχήμα 1.4: Η εναέρια διεπαφή κινητών υπηρεσιών όπως την οραματίζεται η ομάδα IMT 2000

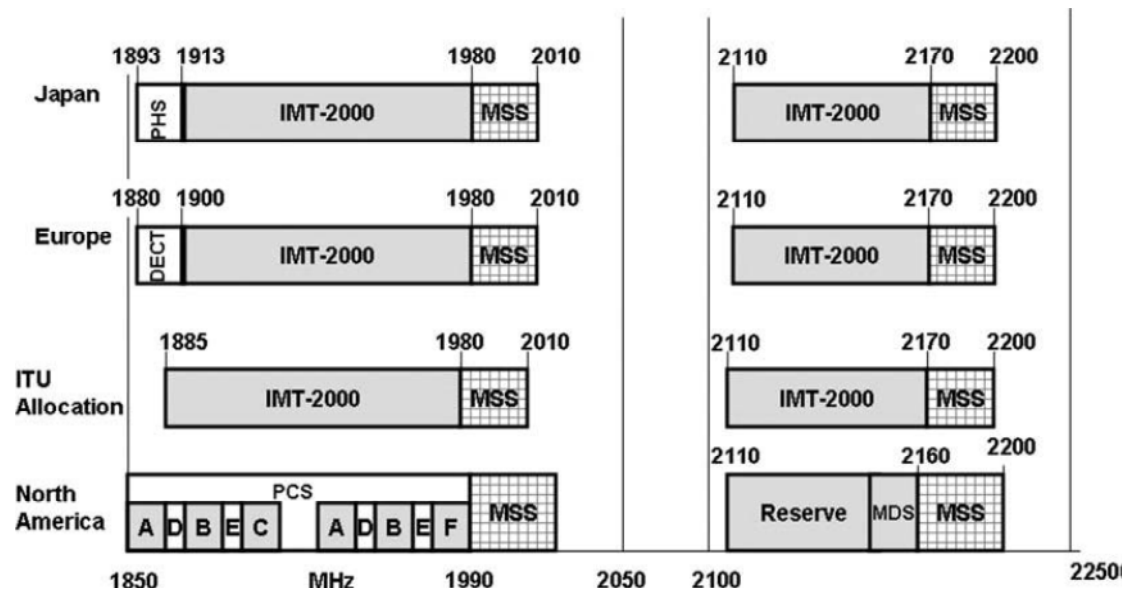


Σχήμα 1.5: Οι εναέριες διεπαφές του IMT 2000

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

Οι προτάσεις του ITU για το IMT 2000 έχουν εφαρμοστεί σε διάφορες χώρες, ανάλογα πάντα με τις τεχνολογίες και τις εναέριες 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.

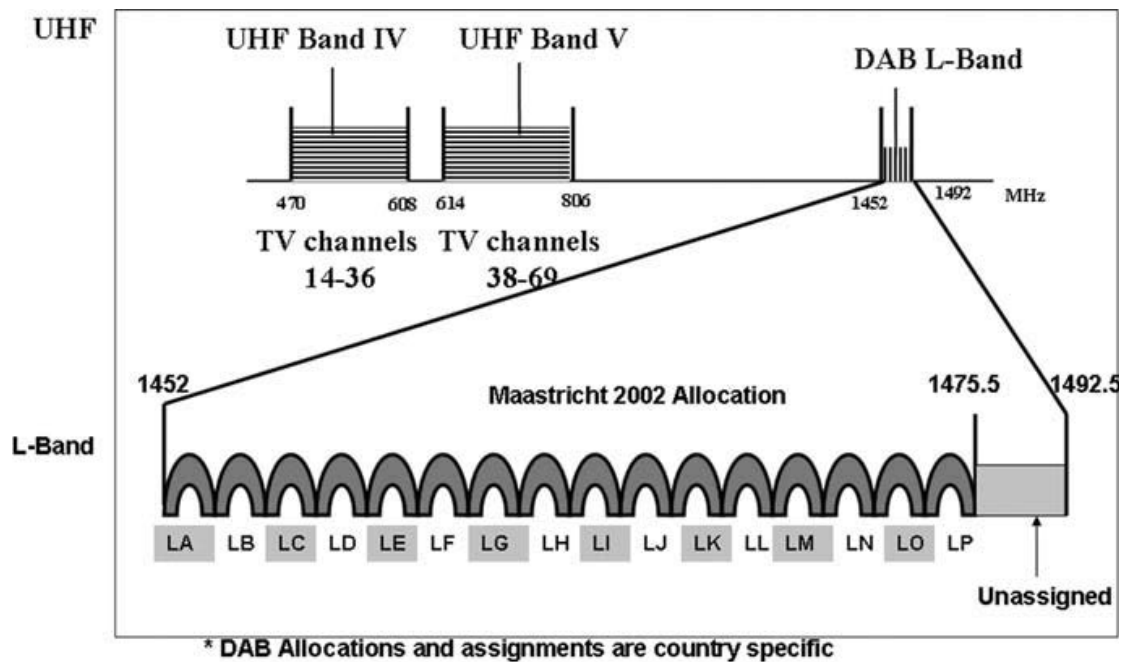


Σχήμα 1.6: Η κατανομή του IMT 2000 σε διάφορες χώρες

#### 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.



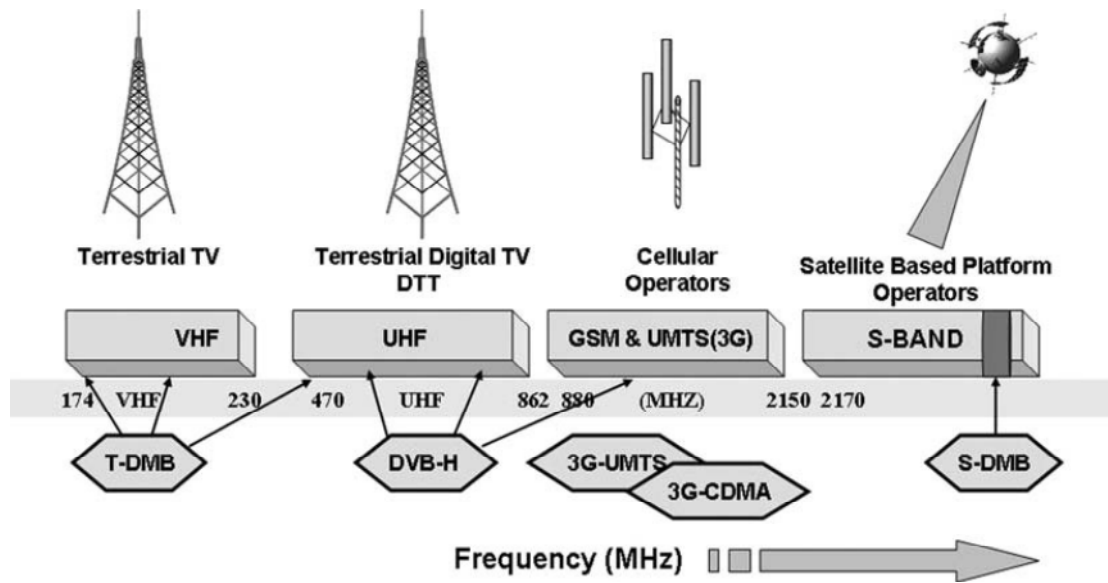
Σχήμα 1.7: Η κατανομή συχνοτήτων στην μάντα L για υπηρεσίες DAB

#### 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 μάντας 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 μάντες των VHF και UHF.





Σχήμα 1.8: Το φάσμα για τις υπηρεσίες κινητής τηλεόρασης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### WI-FI

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.

#### 2.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ΠΡΟΤΥΠΩΝ IEEE 802.11

Το πρότυπο του Wi-Fi (Wireless Fidelity – Ασύρματη Πιστότητα), έχει ήδη αρκετά χρόνια ζωής με φυσικό επακόλουθο να έχει ωριμάσει αρκετά. Παρ' όλα αυτά, οι ομάδες εργασίας των προτύπων του Wi-Fi παραμένουν πολύ ενεργές, ενώ μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι συνέχεια σχηματίζονται νέες ομάδες εργασίας, που ως αντικείμενο έχουν την εξερεύνηση νέων κατευθύνσεων. Επιπρόσθετα, ανεξάρτητες εθνικές ρυθμιστικές επιτροπές επηρεάζουν σημαντικά την εξέλιξη του προτύπου. Για παράδειγμα, στην Ευρώπη, με την απελευθέρωση κάποιων συχνοτήτων στην μπάνα των 5 GHz, το Wi-Fi έχει γίνει ανταγωνιστής άλλων τεχνολογιών ευρείας κλίμακας όπως είναι το WiMAX.

##### 2.1.1 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 μπάνα 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 80.11 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 80.11g. 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.

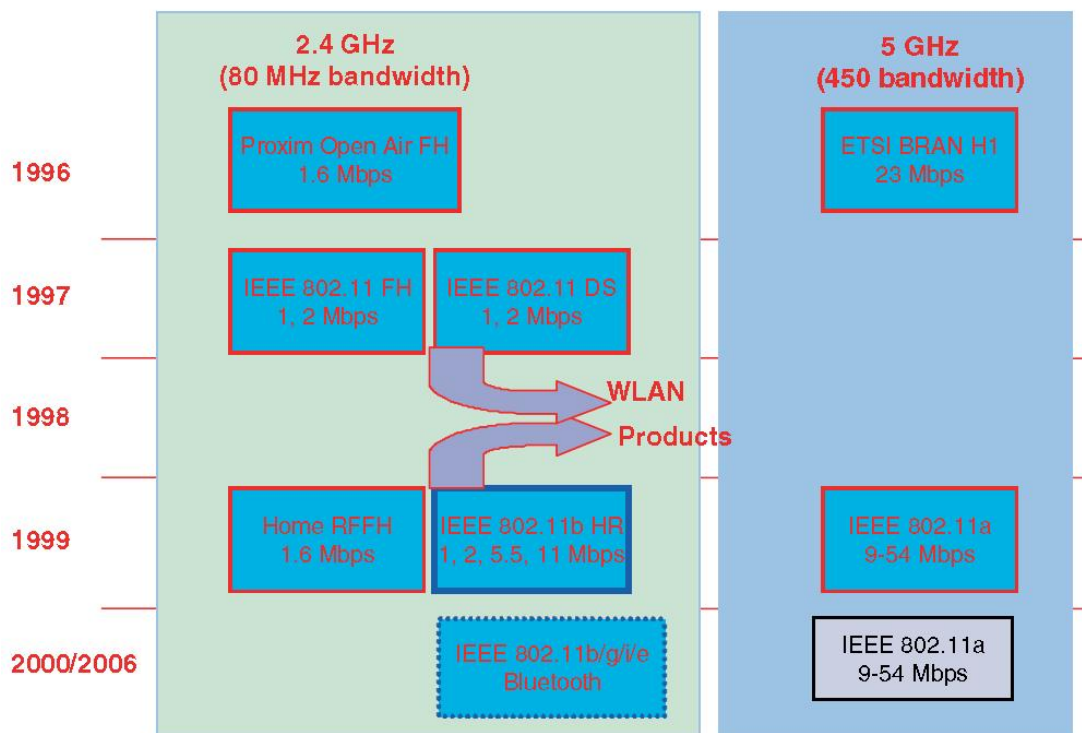
Η λίστα με τα πρότυπα του IEEE 802.11 είναι η παρακάτω.

- IEEE 802.11: το αρχικό πρότυπο ταχυτήτων 1 και 2 Mbps, στην ISM (industrial scientific and medical) μπάνα 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 μπάντες 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<sup>ης</sup> 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.

Η εξέλιξη των προτύπων IEEE 802.11 απεικονίζεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα. Σε αυτό το σχήμα, τα συστήματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στη μία ανήκουν τα συστήματα που λειτουργούν στην μπάντα των 2,4 GHz, και στην άλλη αυτά που λειτουργούν στην μπάντα των 5 GHz.



Σχήμα 2.1: Εξέλιξη των προτύπων IEEE 802.11

## 2.1.2 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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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.

## 2.2 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.

### 2.2.1 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).

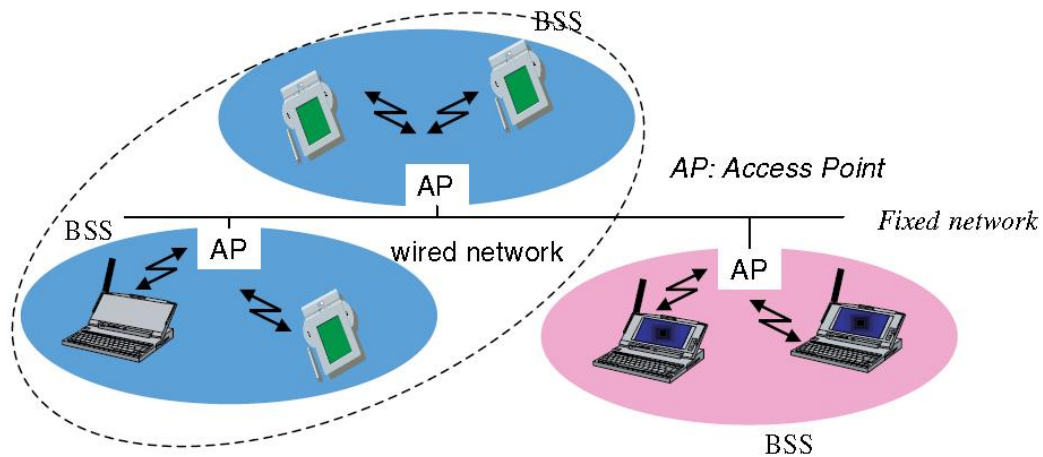
#### 2.2.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΔΟΜΗΣ (INFRASTRUCTURE)

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 επέκταση 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. Το παρακάτω σχήμα δείχνει ένα τέτοιο δίκτυο.



Σχήμα 2.9: Το μοντέλο υποδομής (infrastructure)

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

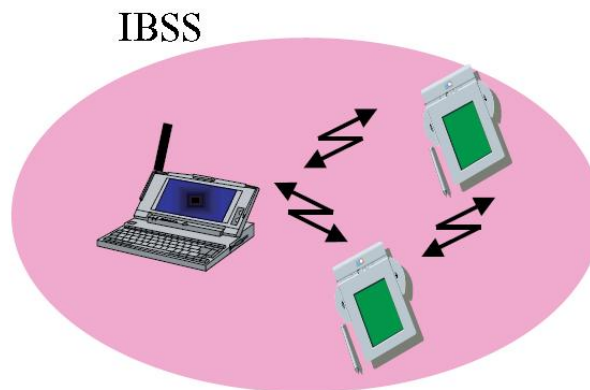
- Τοπική κινητικότητα μέσα σε ένα BSS.
- Κινητικότητα μέσα σε ένα ESS και μεταξύ δύο διαφορετικών BSS.
- Κινητικότητα μεταξύ δύο BSS που ανήκουν σε διαφορετικά ESS.

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

### 2.2.1.2 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 δύσκολη ή απαγορεύεται.



**Σχήμα 2.3: Το αδόμητο (ad-hoc) μοντέλο**

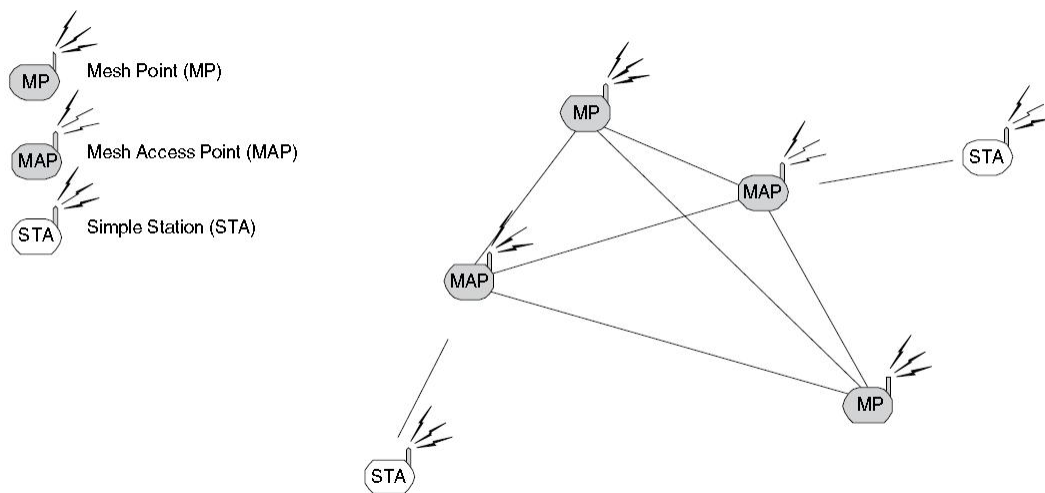
Τα ad hoc ασύρματα δίκτυα είναι μία κατηγορία δικτύων που κάνει χρήση multihop ραδιοφωνικών αναμεταδόσεων και έχει την δυνατότητα λειτουργίας με έναν αυτοοργανούμενο (self-organizing) και αυτορυθμιζόμενο (self-configuring) τρόπο, χωρίς την υποστήριξη σταθερής υποδομής. Η χρήση multihop αναμετάδοσης αποτελεί 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.

### 2.2.1.3 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 κάποιον τρόπο σαν σημεία πρόσβασης για τις άλλες συσκευές, παρέχοντάς τους πρόσβαση στο δίκτυο.



**Σχήμα 2.4: Το πλεγματο (mesh) μοντέλο**

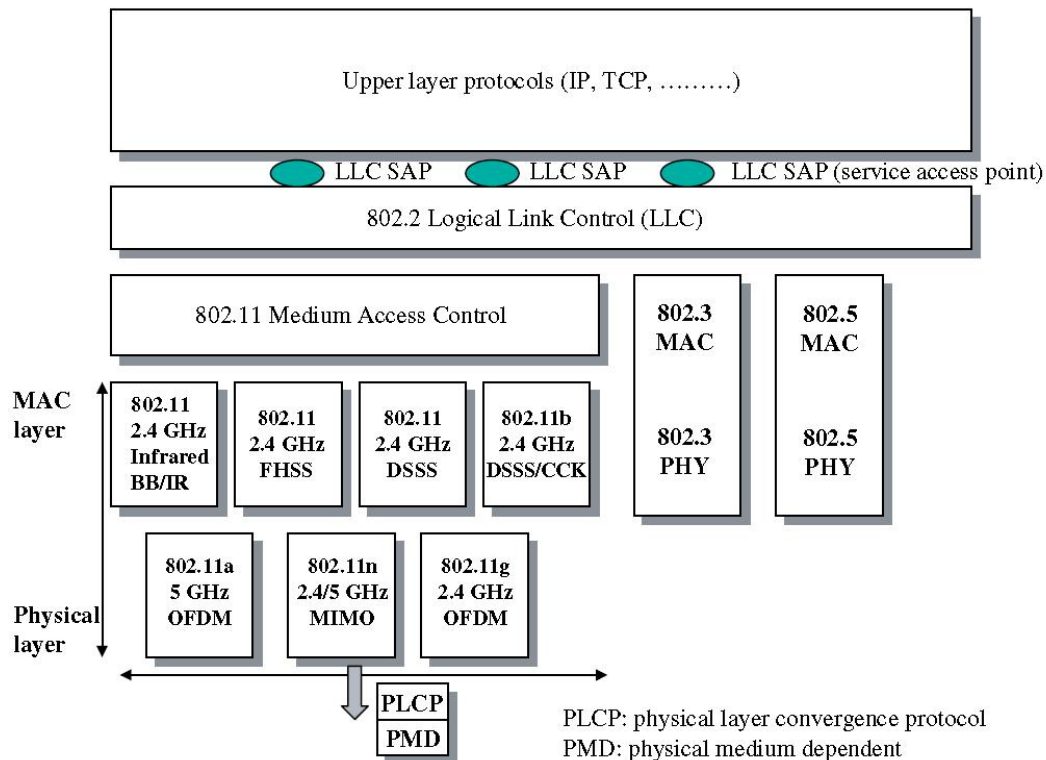
Βάσει των προδιαγραφών του 802.11s, μια τυπική mesh αρχιτεκτονική διαχωρίζει τους κόμβους (nodes) σε δύο κλάσεις. Η μία κλάση είναι αυτή των mesh κόμβων, οι οποίοι έχουν την ικανότητα υποστήριξης mesh υπηρεσιών, ενώ η άλλη (non-mesh class) περιλαμβάνει τους απλούς σταθμούς-πελάτες του δικτύου. Οι κόμβοι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

Ένα ενδεικτικό παράδειγμα WLAN mesh τοπολογίας φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. 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.

## 2.3 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.



Σχήμα 2.5: 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.

### 2.3.1 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<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> 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

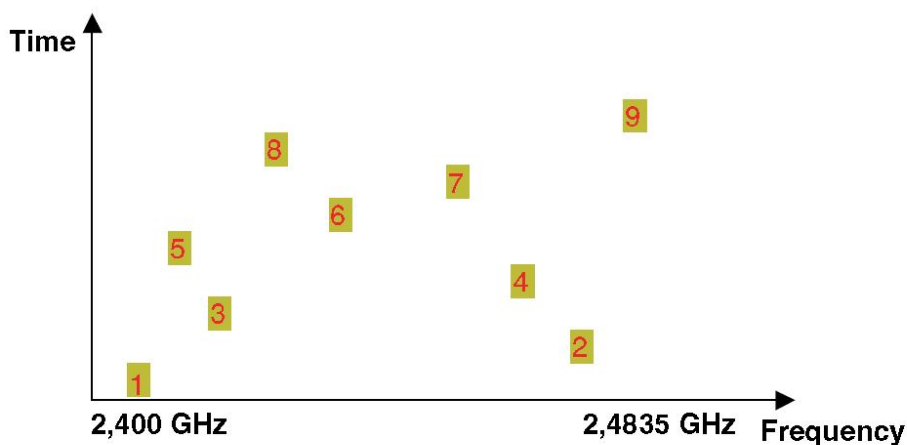
υποστρώματος, που εξαρτάται από το μέσο διάδοσης. Έχει τον ρόλο της εισαγωγής των απαιτούμενων επικεφαλίδων για συγχρονισμό και ταυτοποίηση της χρησιμοποιούμενης διαμόρφωσης στο μέσο. Επιπλέον, επιτρέπει την κατάλληλη επιλογή κεραίας για την λήψη του σήματος (στη περίπτωση ενός σημείου πρόσβασης που 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.



Σχήμα 2.6: Η τεχνική FHSS

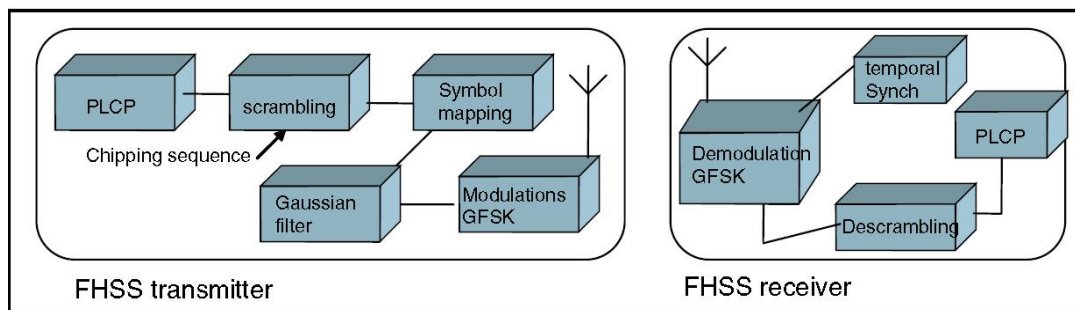
### 2.3.1.1 FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)

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.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει ένα πομπό και ένα δέκτη FHSS.



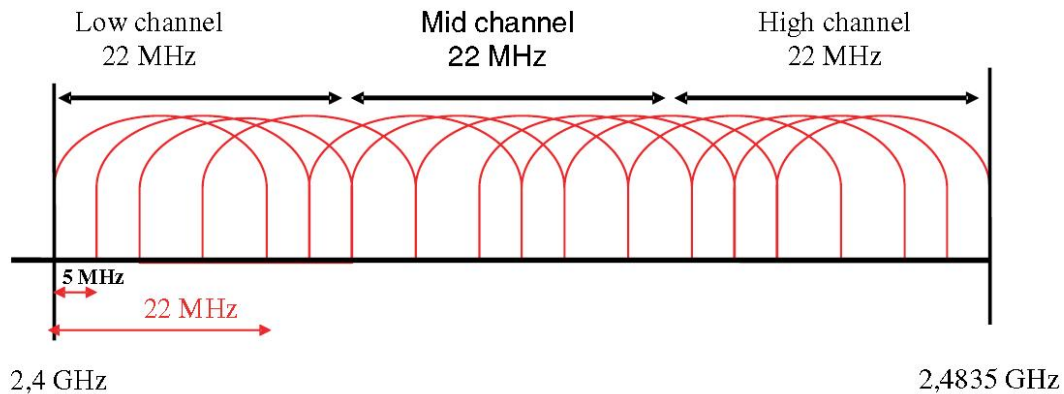
Σχήμα 2.7: Ένας πομπός και ένας δέκτης FHSS

### 2.3.1.2 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 στο Σχήμα 2.8.

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.



Σχήμα 2.8: 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.

Πίνακας 2.1

Η στροφή φάσης στην περίπτωση τετραγωνικής διαμόρφωσης DQPSK

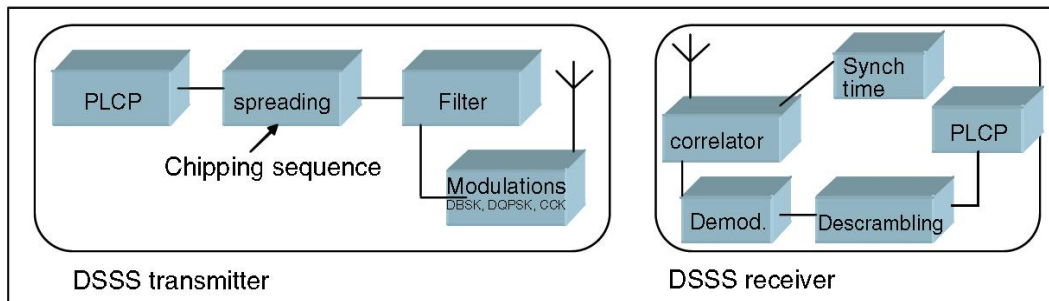
Symbol	Rotation
00	0°
01	90°
11	180°
10	270°

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.

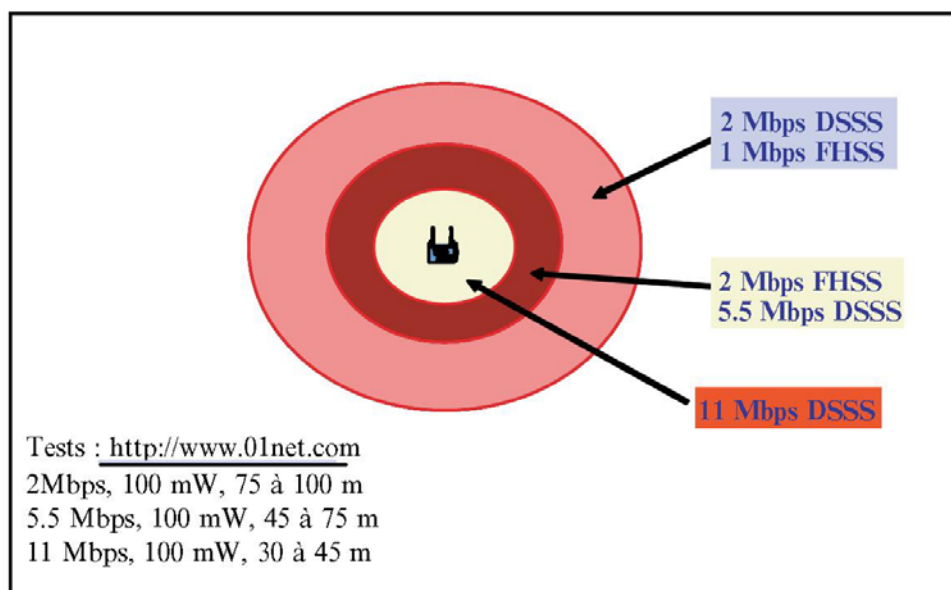
Το Σχήμα 2.9 δείχνει ένα πομπό και ένα δέκτη DSSS, οι οποίοι όπως φαίνεται είναι πιο πολύπλοκοι σε σχέση με τους FHSS.



Σχήμα 2.9: 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.



Σχήμα 2.10: Παραλλαγές ρυθμοαπόδοσης

### 2.3.1.3 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.

### 2.3.1.4 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 Mcchips/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.

### 2.3.1.5 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

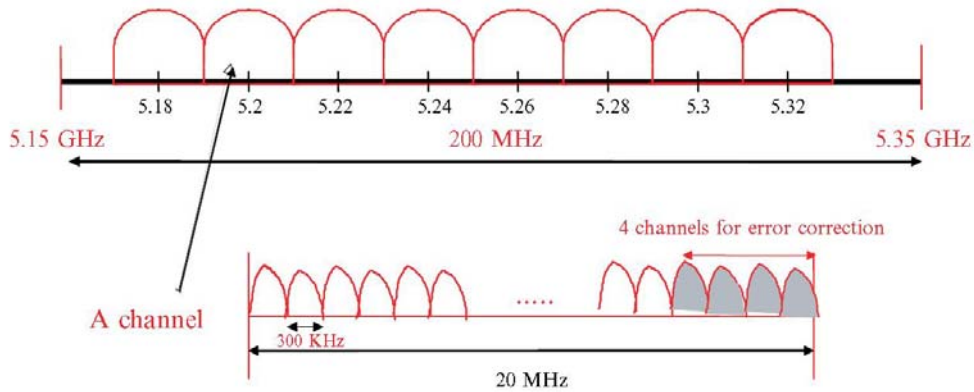
Τα συστήματα IEEE 802.11a και IEEE 802.11g χρησιμοποιούν την διαμόρφωση OFDM στην ISM μπάντα των 2,4 GHz και σε αυτή των 5 GHz. Το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι περίπου 455 MHz, εκ των οποίων τα 200 είναι για χρήση σε εσωτερικό χώρο, ενώ τα υπόλοιπα 255 είναι για χρήση σε εξωτερικό χώρο. Η διαμόρφωση 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

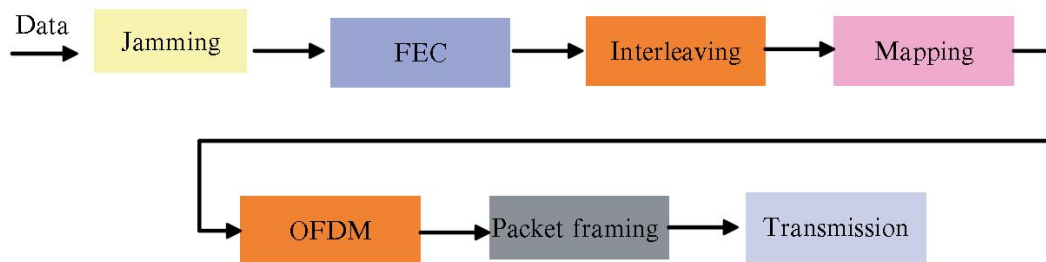
αποτελείται από 52 φέρουσες με εύρος 300 KHz. Οι 48 απ' αυτές είναι για μετάδοση δεδομένων και οι υπόλοιπες 4 είναι πιλοτικές φέρουσες για διόρθωση λαθών. Το OFDM υποστηρίζει μία σειρά από διαφορετικές διαμορφώσεις και κωδικοποιήσεις, δίνοντας έτσι την δυνατότητα υποστήριξης διαφορετικών ρυθμοαποδόσεων.

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.



Σχήμα 2.11: Τα κανάλια OFDM στην χαμηλή μπάντα των 5 GHz

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



Σχήμα 2.12: Αλυσίδα μετάδοσης OFDM

### 2.3.1.6 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 2.2 δείχνει τις μέγιστες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, στην περίπτωση χρήσης τεχνικής MIMO τεσσάρων κεραιών και με εύρος ζώνης 40 MHz.

**Πίνακας 2.2**  
**Οι ταχύτητες μετάδοσης στο IEEE 802.11n**

<b>Modulation</b>	<b>Mbps</b>
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

### 2.3.2 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 το μηχανισμό DCF (Distributed Coordination Function).
- Υπηρεσία κίνησης με χρονικούς περιορισμούς (προαιρετικά), με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
  - ✓ Υποστηρίζει εφαρμογές πραγματικού χρόνου.
  - ✓ Χρησιμοποιεί το μηχανισμό PCF (Point Coordination Function).

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

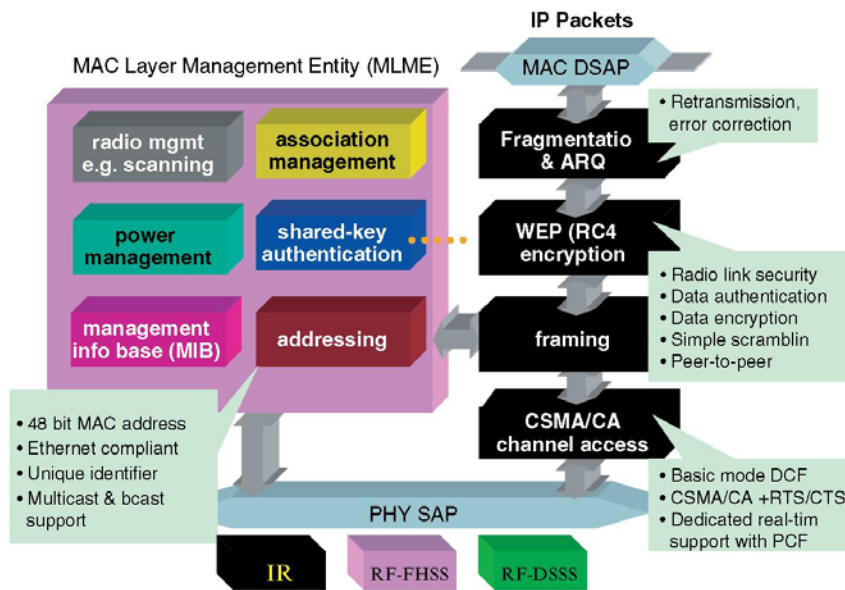
- Συσχετισμός (Association) / Αποσυσχετισμός (Disassociation).
- Ασφάλεια μέσω μηχανισμών όπως ο WEP (Wired Equivalent Privacy).
- Πιστοποίηση (Authentication) και έλεγχος πρόσβασης (access control).
- Κατακερματισμός (Fragmentation) / Ανασυναρμολόγηση (Reassembly).
- Εξοικονόμηση ενέργειας.

Μια συνολική εικόνα του στρώματος MAC φαίνεται στο Σχήμα 2.13. 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.



Σχήμα 2.13: Το στρώμα MAC των συστημάτων IEEE 802.11

## WiMAX

Μετά από αρκετά χρόνια σχεδιασμού αλλά και αβεβαιότητας, μια διαλειτουργική και βασισμένη σε πρότυπα λύση για την ασύρματη ευρυζωνικότητα, έχει κάνει την εμφάνισή της. Μία ευρεία βιομηχανική κοινοπραξία, το WiMAX (Wireless Interoperability for Microwave Access) Forum, έχει αρχίσει να πιστοποιεί προϊόντα ασύρματης ευρυζωνικότητας, για διαλειτουργικότητα και συμμόρφωση με ένα κοινό πρότυπο. Το WiMAX είναι βασισμένο στα πρότυπα που έχουν κατοχυρωθεί από την ομάδα IEEE 802.16 για τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα ή WMANs (Wireless Metropolitan Area Networks), και έχουν υιοθετηθεί τόσο από το IEEE, όσο και από το ETSI HiperMAN group.

### 2.4 IEEE 802.16 ΚΑΙ WiMAX

Η ομάδα IEEE 802.16 δημιουργήθηκε το 1998 με βασικό αντικείμενο τον σχεδιασμό ενός προτύπου εναέριας διεπαφής για τα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα. Η ομάδα επικεντρώθηκε αρχικά στον σχεδιασμό ενός ασύρματου ευρυζωνικού συστήματος με ζεύξη οπτικής επαφής (LOS) και μετάδοση σημείου προς πολλαπλά σημεία (point to multi point), για λειτουργία στις μικροκυματικές συχνότητες μεταξύ 10 και 66 GHz. Το πρότυπο που προέκυψε, το οποίο είναι και το αρχικό 802.16 πρότυπο, ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2001, και βασιζόταν σε ένα φυσικό στρώμα (PHY-physical layer) μονής φέρουσας (single carrier), και ένα στρώμα MAC με χρήση χρονικής πολυπλεξίας (TDM- Time Division Multiplexing). Πολλά στοιχεία του στρώματος MAC υιοθετήθηκαν από το δημοφιλές πρότυπο Cable Modem DOCSIS (Data over cable service interface specification).

Η ομάδα 802.16 παρήγαγε στην συνέχεια το πρότυπο 802.16a, το οποίο ήταν ουσιαστικά μία τροποποίηση του αρχικού προτύπου. Το βασικότερο νέο χαρακτηριστικό ήταν η υποστήριξη εφαρμογών μη οπτικής επαφής (NLOS) στις συχνότητες μεταξύ 2 και 11 GHz, χάρη στην χρήση της τεχνικής OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) στο φυσικό στρώμα. Προσθήκες έγιναν και στο στρώμα MAC, όπως η υποστήριξη της τεχνικής OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Περαιτέρω αναθεωρήσεις που ακολούθησαν, είχαν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός νέου προτύπου το 2004, με την ονομασία IEEE 802.16-2004, το οποίο αντικατέστησε όλα τα προγενέστερα πρότυπα και αποτέλεσε την βάση για την πρώτη ολοκληρωμένη λύση του WiMAX. Η πρώτη αυτή μορφή του WiMAX στόχευε σε σταθερές εφαρμογές και για τον λόγο αυτό αποκαλείται σταθερό WiMAX (fixed WiMAX). Τον Δεκέμβριο του 2005, η ομάδα IEEE ολοκλήρωσε και ενέκρινε το πρότυπο IEEE 802.16e-2005, μία τροποποίηση του προτύπου 802.16-2004, που προσέθετε την υποστήριξη κινητικότητας. Το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 αποτέλεσε την βάση για την υποστήριξη νομαδικών και κινητών εφαρμογών από το WiMAX και για τον λόγο αυτό αποκαλείται και κινητό WiMAX (mobile WiMAX).

Τα βασικά χαρακτηριστικά των διαφόρων προτύπων 802.16 συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. Τα πρότυπα αυτά παρέχουν μια ποικιλία από θεμελιωδώς διαφορετικές σχεδιαστικές επιλογές. Για παράδειγμα, υπάρχουν πολλαπλές επιλογές για το φυσικό στρώμα: ένα φυσικό στρώμα μονής φέρουσας (single carrier) που ονομάζεται Wireless MAN-SCa, ένα φυσικό στρώμα με χρήση τεχνικής OFDM που ονομάζεται Wireless MAN-OFDM και ένα φυσικό στρώμα με χρήση τεχνικής OFDMA που ονομάζεται Wireless-OFDMA. Παρόμοια υπάρχουν διάφορες επιλογές και για την αρχιτεκτονική, την αμφιδρόμηση και τις συχνότητες λειτουργίας του στρώματος MAC. Τα πρότυπα αυτά αναπτύχθηκαν για να υποστηρίξουν μια ποικιλία από εφαρμογές και σχεδιαστικά σενάρια, και για τον λόγο αυτό παρέχουν πληθώρα σχεδιαστικών επιλογών. Στην πραγματικότητα, μπορεί κανείς να πει ότι το πρότυπο IEEE 802.16 είναι μια συλλογή προτύπων και όχι ένα ενιαίο διαλειτουργικό πρότυπο.

**Πίνακας 2.3**  
**Τα βασικά χαρακτηριστικά των προτύπων 802.16**

	802.16	802.16-2004	802.16e-2005
Status	Completed December 2001	Completed June 2004	Completed December 2005
Frequency band	10GHz-66GHz	2GHz-11GHz	2GHz-11GHz for fixed; 2GHz-6GHz for mobile applications
Application	Fixed LOS	Fixed NLOS	Fixed and mobile NLOS
MAC architecture	Point-to-multipoint, mesh	Point-to-multipoint, mesh	Point-to-multipoint, mesh
Transmission scheme	Single carrier only	Single carrier, 256 OFDM or 2,048 OFDM	Single carrier, 256 OFDM or scalable OFDM with 128, 512, 1,024, or 2,048 subcarriers
Modulation	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Gross data rate	32Mbps-134.4Mbps	1Mbps-75Mbps	1Mbps-75Mbps
Multiplexing	Burst TDM/TDMA	Burst TDM/TDMA/ OFDMA	Burst TDM/TDMA/ OFDMA
Duplexing	TDD and FDD	TDD and FDD	TDD and FDD
Channel bandwidths	20MHz, 25MHz, 28MHz	1.75MHz, 3.5MHz, 7MHz, 14MHz, 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8.75MHz	1.75MHz, 3.5MHz, 7MHz, 14MHz, 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8.75MHz
Air-interface designation	WirelessMAN-SC	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA WirelessHUMAN <sup>a</sup>	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA WirelessHUMAN <sup>a</sup>
WiMAX implementation	None	256 - OFDM as Fixed WiMAX	Scalable OFDMA as Mobile WiMAX



Για πρακτικούς λόγους διαλειτουργικότητας, το εύρος δυνατοτήτων του προτύπου πρέπει να μειωθεί, και ένα μικρότερο σύνολο σχεδιαστικών επιλογών πρέπει να καθορισθεί. Το WiMAX Forum δουλεύει σ' αυτήν την κατεύθυνση, καθορίζοντας ένα περιορισμένο αριθμό από προφίλ συστημάτων και πιστοποιήσεων. Ένα προφίλ συστήματος καθορίζει ένα υποσύνολο από υποχρεωτικά και προαιρετικά χαρακτηριστικά για το φυσικό στρώμα και το στρώμα MAC, επιλεγμένα από τα πρότυπα IEEE 802.16-2004 και IEEE 802.16e-2005. Πρέπει να σημειωθεί ότι η υποχρεωτική ή προαιρετική φύση ενός συγκεκριμένου χαρακτηριστικού σε ένα προφίλ συστήματος WiMAX μπορεί να είναι διαφορετική απ' αυτήν που έχει στο αυθεντικό πρότυπο. Αυτήν την στιγμή, το WiMAX Forum έχει καθορίσει δύο διαφορετικά προφίλ συστημάτων. Το ένα βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16-2004, με χρήση τεχνικής OFDM στο φυσικό στρώμα, και αποκαλείται σταθερό προφίλ συστημάτων. Το άλλο βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16e-2005, με χρήση τεχνικής OFDMA στο φυσικό στρώμα, και αποκαλείται κινητό προφίλ συστημάτων.

**Πίνακας 2.4**  
**Τα αρχικά προφίλ πιστοποίησης για το σταθερό και το κινητό WiMAX**

Band Index	Frequency Band	Channel Bandwidth	OFDM FFT Size	Duplexing	Notes
<b>Fixed WiMAX Profiles</b>					
1	3.5 GHz	3.5MHz	256	FDD	Products already certified
		3.5MHz	256	TDD	
		7MHz	256	FDD	
		7MHz	256	TDD	
2	5.8GHz	10MHz	256	TDD	
<b>Mobile WiMAX Profiles</b>					
1	2.3GHz-2.4GHz	5MHz	512	TDD	Both bandwidths must be supported by mobile station (MS)
		10MHz	1,024	TDD	
		8.75MHz	1,024	TDD	
2	2.305GHz-2.320GHz, 2.345GHz-2.360GHz	3.5MHz	512	TDD	
		5MHz	512	TDD	
		10MHz	1,024	TDD	
3	2.496GHz-2.69GHz	5MHz	512	TDD	Both bandwidths must be supported by mobile station (MS)
		10MHz	1,024	TDD	
4	3.3GHz-3.4GHz	5MHz	512	TDD	
		7MHz	1,024	TDD	
		10MHz	1,024	TDD	
5	3.4GHz-3.8GHz, 3.4GHz-3.6GHz, 3.6GHz-3.8GHz	5MHz	512	TDD	
		7MHz	1,024	TDD	
		10MHz	1,024	TDD	

Ένα προφίλ πιστοποίησης αποτελεί μια συγκεκριμένη περίπτωση προφίλ συστήματος, όπου καθορίζονται και τα επιμέρους χαρακτηριστικά του, όπως η συχνότητα λειτουργίας, το εύρος ζώνης του καναλιού και ο τύπος πολυπλεξίας που θα χρησιμοποιηθεί. Οι συσκευές WiMAX πιστοποιούνται για διαλειτουργικότητα με ένα συγκεκριμένο προφίλ πιστοποίησης. Έως τώρα, το WiMAX Forum έχει καθορίσει πέντε σταθερά προφίλ πιστοποίησης και δεκατέσσερα κινητά προφίλ πιστοποίησης, όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα. Από αυτά, μόνο για δύο

σταθερά προφίλ έχουν πιστοποιηθεί συσκευές. Και τα δύο αυτά προφίλ αφορούν σταθερά συστήματα με συχνότητα λειτουργίας 3,5 GHz, εύρος ζώνης καναλιού 3,5 MHz, τα οποία κάνουν χρήση του φυσικού στρώματος IEEE 802.16-2004 OFDM και στρώματος MAC με μετάδοση σημείου προς πολλαπλά σημεία (point to multipoint). Το ένα απ' αυτά, κάνει χρήση της τεχνικής FDD και το άλλο της τεχνικής TDD.

Από την στιγμή που ολοκληρώθηκε το πρότυπο IEEE 802.16e-2005, το ενδιαφέρον μέσα στην ομάδα WiMAX ανέβηκε κατακόρυφα ως προς την κατεύθυνση σχεδιασμού και πιστοποίησης κινητών προφίλ συστημάτων WiMAX, με βάση το πρότυπο αυτό. Όλα αυτά τα προφίλ κάνουν χρήση κλιμακωτού OFDMA στο φυσικό στρώμα, ενώ αρχικά τουλάχιστον, όλα θα κάνουν χρήση μετάδοσης σημείου προς πολλαπλά σημεία στο στρώμα MAC. Επιπλέον, όλα τα υποψήφια προφίλ πιστοποίησης αυτήν την στιγμή κάνουν χρήση αμφιδρόμησης TDD. Αν και η τεχνική TDD είναι γενικά προτιμότερη, στο μέλλον θα χρειαστεί να σχεδιαστούν και προφίλ με χρήση αμφιδρόμησης FDD, ώστε να δίνεται η δυνατότητα συμμόρφωσης με ρυθμιστικούς όρους που ισχύουν σε ορισμένες μπάντες.

## 2.5 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ WiMAX

Το WiMAX είναι μια ασύρματη ευρυζωνική λύση που προσφέρει ένα πολύ ευρύ σύνολο από διαφορετικά χαρακτηριστικά, με μεγάλη ευελιξία όσον αφορά τις σχεδιαστικές επιλογές και τις παρεχόμενες υπηρεσίες. Μερικά από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του είναι τα παρακάτω.

- **Φυσικό στρώμα βασισμένο σε OFDM:** Το φυσικό στρώμα του WiMAX είναι βασισμένο στην πολυπλεξία ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας ή OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing), μία τεχνική που προσφέρει ικανοποιητική αντοχή σε συνθήκες μετάδοσης πολλαπλών δρόμων και επιτρέπει στο WiMAX να λειτουργεί χωρίς την απαίτηση ζεύξης οπτικής επαφής (LOS). Το OFDM θεωρείται σήμερα ως η απόλυτη επιλογή για την αντιμετώπιση της μετάδοσης πολλαπλών δρόμων στα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα.
- **Πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων:** Το WiMAX έχει την ικανότητα υποστήριξης πολύ υψηλών ταχυτήτων. Στην πράξη, η μέγιστη ταχύτητα (συνολικά για την κάτω και άνω ζεύξη) φτάνει τα 74 Mbps, όταν γίνεται χρήση εύρους ζώνης 20 MHz. Σε πιο τυπικές περιπτώσεις, κάνοντας χρήση εύρους ζώνης 10 MHz και λειτουργώντας με τεχνική TDD με αναλογία 3:1 για την κάτω και άνω ζεύξη, οι μέγιστες ταχύτητες είναι 25 Mbps και 6,7 Mbps για την κάτω και την άνω ζεύξη αντίστοιχα. Οι μέγιστες αυτές ταχύτητες επιτυγχάνονται όταν γίνεται χρήση διαμόρφωσης 64 QAM με 5/6 κωδικοποίηση διόρθωσης λαθών. Σε ιδανικές συνθήκες μετάδοσης, ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες μπορούν να επιτευχθούν με χρήση τεχνικών πολλαπλών κεραιών και χωρικής πολυπλεξίας.
- **Ρυθμιζόμενο εύρος ζώνης και κλιμακωτή ταχύτητα μετάδοσης:** Το WiMAX έχει μία κλιμακωτή αρχιτεκτονική φυσικού στρώματος που επιτρέπει την εύκολη ρύθμιση της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων με την κατάλληλη επιλογή του εύρους ζώνης. Η δυνατότητα αυτή οφείλεται στην χρήση τεχνικής OFDMA, όπου το

μέγεθος του FFT (Fast Fourier Transform) μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Για παράδειγμα, ένα WiMAX σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει FFT των 128, 512 ή 1048 bits ανάλογα με το αν το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι 1,25 MHz, 5 MHz ή 10 MHz αντίστοιχα. Η ρύθμιση αυτή μπορεί να γίνεται και δυναμικά, ώστε να υποστηρίζεται η περιαγωγή χρηστών ανάμεσα σε δίκτυα τα οποία κάνουν χρήση διαφορετικού εύρους ζώνης.

- **Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (AMC – Adaptive modulation and coding):** Το WiMAX υποστηρίζει διάφορες διαμορφώσεις και κωδικοποιήσεις FEC (Forward Error Correction), ενώ επιτρέπει την εναλλαγή τους ανά χρήστη ή ακόμα και ανά πλαίσιο, βάσει των συνθηκών μετάδοσης. Το AMC είναι ένα αποδοτικός μηχανισμός που έχει ως στόχο την μεγιστοποίηση της ρυθμοαπόδοσης σε ένα κανάλι που μεταβάλλεται στο χρόνο. Ο προσαρμοστικός αλγόριθμος τυπικά καθορίζει την χρήση της υψηλότερης διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που μπορεί να υποστηριχθεί από τον σηματοθορυβικό λόγο και τον λόγο σήματος προς παρεμβολές που υπάρχει κάθε στιγμή στον χρήστη. Με τον τρόπο αυτό, σε κάθε χρήστη παρέχεται η μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων.

- **Αναμεταδόσεις στρώματος ζεύξης:** Για συνδέσεις που χρειάζονται ενισχυμένη αξιοπιστία, το WiMAX υποστηρίζει μια τεχνική αυτόματης αναμετάδοσης κατ' αίτησιν στο στρώμα ζεύξης, το ARQ (Automatic Retransmission Request). Οι συνδέσεις που χρησιμοποιούν το ARQ απαιτούν την επιβεβαίωση λήψης από τον δέκτη, κάθε πακέτου που μεταδίδεται από τον πομπό. Ανεπιβεβαίωτα πακέτα θεωρούνται χαμένα και αναμεταδίδονται. Το WiMAX υποστηρίζει επίσης ένα υβριδικό ARQ (hybrid ARQ), το οποίο είναι μια αποδοτική υβριδική τεχνική που συνδυάζει στοιχεία του ARQ και του FEC.

- **Υποστήριξη TDD και FDD:** Τόσο το πρότυπο IEEE 802.16-2004 όσο και το IEEE 802.16e-2005, υποστηρίζουν αμφιδρόμηση διαίρεσης χρόνου και συχνότητας, δηλαδή TDD και FDD αντίστοιχα, καθώς και μία επιπλέον τεχνική, το half-duplex FDD, το οποίο επιτρέπει την εφαρμογή συστημάτων χαμηλού κόστους. Το TDD προτιμάται στις περισσότερες εφαρμογές λόγω των πλεονεκτημάτων του, τα οποία είναι: (1) η ευελιξία στην επιλογή της αναλογίας ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων (data rate ratio) μεταξύ άνω και κάτω ζεύξης (uplink to downlink), (2) η δυνατότητα αξιοποίησης αμοιβαιότητας καναλιού, (3) η δυνατότητα λειτουργίας σε μη ζευγαρωμένο φάσμα και (4) η μικρότερη πολυπλοκότητα στην σχεδίαση του πομποδέκτη. Όλα τα αρχικά προφίλ του WiMAX είναι βασισμένα σε TDD, εκτός από δύο σταθερά προφίλ στα 3,5 GHz.

- **OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access):** Το κινητό WiMAX χρησιμοποιεί το OFDM ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, όπου σε διαφορετικούς χρήστες μπορούν να ανατεθούν διαφορετικά υποσύνολα τόνων OFDM. Το OFDMA διευκολύνει την αξιοποίηση της διαφορικότητας συχνότητας και πολλαπλών χρηστών (frequency and multiuser diversity), με αποτέλεσμα την βελτίωση της χωρητικότητας του συστήματος.

- **Ευέλικτη και δυναμική ανάθεση πόρων στους χρήστες:** Τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη, η ανάθεση πόρων ελέγχεται από έναν προγραμματιστή στον σταθμό βάσης. Η χωρητικότητα διαμοιράζεται σε πολλούς χρήστες κατ'

απαίτηση αυτών και με χρήση τεχνικής burst TDM. Όταν γίνεται χρήση της τεχνικής OFDMA, η πολυπλεξία γίνεται ταυτόχρονα και στο πεδίο της συχνότητας, αναθέτοντας διαφορετικά υποσύνολα OFDM υποφερουσών σε κάθε χρήστη. Οι πόροι μπορούν να διαμοιράζονται και στο πεδίο του χώρου, κάνοντας χρήση προαιρετικών εξελιγμένων κεραιοσυστημάτων (AAS – Advanced Antenna Systems).

- **Υποστήριξη προηγμένων τεχνικών κεραιών:** Το WiMAX έχει πολλές δυνατότητες ενσωματωμένες στο φυσικό του στρώμα, που επιτρέπουν την χρήση τεχνικών πολλαπλών κεραιών, όπως διαμόρφωση φάσματος, κωδικοποίηση χώρου-χρόνου και χωρική πολυπλεξία. Οι τεχνικές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν την συνολική χωρητικότητα του συστήματος και την αποδοτικότητα του φάσματος, κάνοντας χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό ή/και στον δέκτη.
- **Υποστήριξη QoS (Quality of Service):** Το στρώμα MAC του WiMAX έχει μια αρχιτεκτονική προσανατολισμένη στην σύνδεση (connection oriented), που είναι σχεδιασμένη να υποστηρίζει μια σειρά από εφαρμογές, όπως υπηρεσίες μετάδοσης φωνής και πολυμέσων. Ένα σύστημα WiMAX υποστηρίζει σταθερή και μεταβαλλόμενη ταχύτητα μετάδοσης, ροή πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου, καθώς και καλύτερης δυνατής προσπάθειας (best effort traffic). Το στρώμα MAC είναι σχεδιασμένο να υποστηρίζει έναν μεγάλο αριθμό χρηστών, με πολλαπλές συνδέσεις ανά τερματική συσκευή, η κάθε μία με τις δικό της απαιτούμενο επίπεδο QoS.
- **Ισχυρή ασφάλεια:** Το WiMAX υποστηρίζει δυνατή κρυπτογράφηση, κάνοντας χρήση του AES (Advanced Encryption Standard). Ένα σύστημα WiMAX έχει πολύ ευέλικτη αρχιτεκτονική πιστοποίησης, βασισμένη στο πρωτόκολλο EAP (Extensible Authentication Protocol), το οποίο μπορεί να κάνει χρήση διάφορων πιστοποιητικών, όπως όνομα χρήστη/κωδικός χρήστη, ψηφιακά πιστοποιητικά και έξυπνες κάρτες.
- **Υποστήριξη κινητικότητας:** Το κινητό WiMAX εμπεριέχει μηχανισμούς που εξασφαλίζουν μεταγωγές χωρίς διακοπή, που είναι απαραίτητες για εφαρμογές όπως το VoIP (Voice over IP), που δεν είναι ανεκτικές σε καθυστέρηση και εφόσον αυτές πρόκειται να εφαρμοστούν με πλήρη υποστήριξη κινητικότητας. Ένα σύστημα WiMAX έχει επίσης ενσωματωμένη υποστήριξη για μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας, οι οποίοι επιμηκύνουν την διάρκεια ζωής της μπαταρίας στις φορητές συσκευές των συνδρομητών. Αναβαθμίσεις στο φυσικό στρώμα, όπως συχνότερη εκτίμηση του καναλιού, διαίρεση σε υποκανάλια στην άνω ζεύξη και έλεγχος ισχύος εκπομπής έχουν επίσης σχεδιαστεί για την υποστήριξη κινητών εφαρμογών.
- **IP Αρχιτεκτονική:** Το WiMAX Forum έχει καθορίσει μία αρχιτεκτονική δικτύου αναφοράς, η οποία είναι βασισμένη εξολοκλήρου σε μία πλατφόρμα IP. Όλες οι υπηρεσίες απ' άκρη σ' άκρη (end to end services) παρέχονται πάνω σε μία IP αρχιτεκτονική, βασισμένη σε IP πρωτόκολλα για την απ' άκρη σ' άκρη μεταφορά, το QoS, την διαχείριση συνόδων (session management), την ασφάλεια και την κινητικότητα. Η επιλογή του IP επιτρέπει στο WiMAX να εκμεταλλευτεί τις φθίνουσες καμπύλες κόστους (cost curves) της IP επεξεργασίας, να διευκολύνει την σύνδεση και συνεργασία με άλλα δίκτυα και να αξιοποιήσει την πλούσια ποικιλία IP εφαρμογών, που είτε υπάρχουν ήδη είτε σχεδιάζονται ή πρόκειται να σχεδιαστούν.

## 2.6 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ WiMAX

Το φυσικό στρώμα του WiMAX βασίζεται στην ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας ή OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Το OFDM αποτελεί σήμερα την κατεξοχήν επιλογή για επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, βίντεο και πολυμέσων. Χρησιμοποιείται από πολλά εμπορικά ευρυζωνικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των DSL, Wi-Fi, DVB-H (Digital Video Broadcast – Handheld), MediaFLO και φυσικά και από το WiMAX. Το OFDM είναι μια κομψή και αποδοτική τεχνική για μετάδοση υψηλών ταχυτήτων σε περιβάλλοντα πολλαπλής μετάδοσης (multipath) ή ζεύξης μη οπτικής επαφής (NLOS).

### 2.6.1 OFDM

Το OFDM ανήκει σε μια οικογένεια τεχνικών μετάδοσης με την ονομασία multicarrier modulation (διαμόρφωση πολλαπλών φερουσών). Σε αυτή, η βασική ιδέα είναι η διαίρεση μιας δοσμένης ροής δεδομένων υψηλής ταχύτητας σε αρκετές παράλληλες ροές χαμηλής ταχύτητας και η διαμόρφωση αυτών σε ξεχωριστές φέρουσες, οι οποίες συχνά αποκαλούνται υποφέρουσες ή τόνοι. Η διαμόρφωση πολλαπλών φερουσών εξαφανίζει ή ελαχιστοποιεί τις διασυμβολικές παρεμβολές (ISI – Intersymbol interference). Αυτό το πετυχαίνει καθορίζοντας την διάρκεια συμβόλου αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε οι καθυστερήσεις που υπάρχουν στο κανάλι -η εξάπλωση καθυστέρησης (delay spread) αποτελεί ένα καλό μέτρο για αυτές σε ασύρματα κανάλια- να αποτελούν ένα ασήμαντο (τυπικά μικρότερο από ένα δέκατο) τμήμα από την διάρκεια συμβόλου.

Το OFDM είναι μια φασματικά αποδοτική εκδοχή της διαμόρφωσης πολλαπλών φερουσών, όπου οι υποφέρουσες επιλέγονται έτσι ώστε να είναι όλες ορθογώνιες η μία με την άλλη κατά την διάρκεια συμβόλου, διαγράφοντας με τον τρόπο αυτό τον περιορισμό της ύπαρξης μη επικαλυπτόμενων καναλιών για την απάλειψη των διασυμβολικών παρεμβολών. Επιλέγοντας την πρώτη υποφέρουσα να είναι σε μία συχνότητα που έχει ακέραιο αριθμό κύκλων στην διάρκεια συμβόλου, και θέτοντας την απόσταση μεταξύ των γειτονικών υποφερουσών (εύρος ζώνης υποφέρουσας) ίσο με  $B_{sc}=B/L$ , όπου  $B$  είναι το εικονικό εύρος ζώνης και  $L$  ο αριθμός των υποφερουσών, εξασφαλίζεται ότι όλοι οι τόνοι είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους στην διάρκεια συμβόλου. Μπορεί να δειχθεί ότι ένα σήμα OFDM είναι ισοδύναμο με το αντίστροφο διακριτό μετασχηματισμό Fourier (IDFT – Inverse discrete Fourier transform) του τμήματος της ακολουθίας δεδομένων, υπολογίζοντας  $L$  κάθε φορά. Το χαρακτηριστικό αυτό κάνει πολύ εύκολη την σχεδίαση OFDM πομπών και δεκτών σε διακριτό χρόνο, χρησιμοποιώντας IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) και FFT αντίστοιχα.

Για να απαλειφθεί πλήρως η διασυμβολική παρεμβολή, χρησιμοποιούνται διαστήματα προστασίας (guard intervals) μεταξύ των OFDM συμβόλων. Θέτοντας τα διαστήματα αυτά μεγαλύτερα από την αναμενόμενη εξάπλωση καθυστέρησης λόγω μετάδοσης πολλαπλών δρόμων, η διασυμβολική παρεμβολή μπορεί να εξαφανιστεί ολοκληρωτικά. Από την άλλη μεριά, η πρόσθεση των διαστημάτων αυτών επιφέρει απώλεια ισχύος και μειώνει την αποδοτικότητα φάσματος. Το ποσοστό απώλειας ισχύος εξαρτάται από το πόσο μεγάλο τμήμα της διάρκειας συμβόλου είναι το διάστημα προστασίας. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια συμβόλου (για

δοσμένη ταχύτητα μετάδοσης αυτό μεταφράζεται σε περισσότερες υποφέρουσες) τόσο μικρότερη είναι η απώλεια ισχύος και η επιδείνωση της αποδοτικότητας φάσματος.

Το μέγεθος του μετασχηματισμού Fourier (FFT) σε μία OFDM σχεδίαση πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά, βρίσκοντας την χρυσή τομή των αντικρουόμενων κριτηρίων της προστασίας ενάντια στην μετάδοση πολλαπλών δρόμων και στο φαινόμενο Doppler από την μία, και την πολυπλοκότητα και το κόστος σχεδίασης από την άλλη. Για δεδομένο εύρος ζώνης, η επιλογή μεγάλου μεγέθους FFT θα μείωνε την απόσταση των υποφερουσών και θα αύξανε την διάρκεια συμβόλου. Αυτό θα έκανε ευκολότερη την προστασία ενάντια στην εξάπλωση της καθυστέρησης που οφείλεται σε μετάδοση πολλαπλών δρόμων. Από την άλλη μεριά, η μειωμένη απόσταση των υποφερουσών κάνει το σύστημα πιο ευάλωτο σε παρεμβολές μεταξύ των υποφερουσών, λόγω του φαινομένου Doppler σε κινητές εφαρμογές.

## 2.6.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ OFDM

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα του OFDM έναντι των υπολοίπων τεχνικών που χρησιμοποιούνται για μετάδοση υψηλών ταχυτήτων είναι τα εξής:

- **Μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα:** Το OFDM μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα κάνοντας χρήση των μετασχηματισμών Fourier FFT και IFFT. Οι επεξεργαστικές απαιτήσεις αυξάνονται ελάχιστα ταχύτερα από γραμμικά σε σχέση με την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων ή το εύρος ζώνης. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα του OFDM αποδεικνύεται ότι είναι ίση με  $O(\log BT_m)$ , όπου  $B$  είναι το εύρος ζώνης και  $T_m$  είναι η εξάπλωση καθυστέρησης (delay spread). Η πολυπλοκότητα αυτή είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με ένα σύστημα κλασσικού ισοσταθμιστή, το οποίο έχει πολυπλοκότητα  $O(B^2 T_m)$ .
- **Μικρή επιδείνωση απόδοσης σε εκτεταμένη καθυστέρηση:** Η απόδοση ενός OFDM συστήματος επιδεινώνεται συγκρατημένα καθώς η εξάπλωση καθυστέρησης (delay spread) ξεπερνάει την τιμή για την οποία αυτό σχεδιάστηκε. Ισχυρότερη κωδικοποίηση και μικρότερα μεγέθη ομάδας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κάνουν την απόδοση του συστήματος πολύ πιο ανθεκτική σε εξάπλωση καθυστέρησης. Με άλλα λόγια, το OFDM είναι πολύ επιδεκτικό σε προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση, κάτι που του επιτρέπει να προσαρμόζεται πολύ καλά στις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι μετάδοσης. Έτσι, το OFDM υπερτερεί σε αυτόν τον τομέα έναντι των συστημάτων μονής φέρουσας, στα οποία η επιδείνωση της απόδοσης είναι πολύ πιο απότομη όταν η εξάπλωση καθυστέρησης ξεπερνάει την τιμή για την οποία έχει σχεδιαστεί ο ισοσταθμιστής.
- **Αξιοποίηση της διαφορικότητας συχνότητας:** Το OFDM διευκολύνει την κωδικοποίηση και την διαστρωμάτωση (interleaving) στις υποφέρουσες (subcarriers) στο πεδίο της συχνότητας, κάτι που το κάνει πολύ πιο ανθεκτικό έναντι λαθών που θα μπορούσαν να προκληθούν από έντονη σκίαση σε τμήμα του εκπεμπόμενου φάσματος. Στην πραγματικότητα, το WiMAX καθορίζει τις αντιμεταθέσεις των φερουσών που επιτρέπουν στα συστήματα να αξιοποιούν την παραπάνω τεχνική.

- **Πολλαπλή πρόσβαση:** Το OFDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λειτουργία πολλαπλής πρόσβασης, όπου διαφορετικοί τόνοι μοιράζονται στους χρήστες. Η τεχνική αυτή ονομάζεται OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) και χρησιμοποιείται στο κινητό WiMAX. Επιπλέον, η τεχνική αυτή προσφέρει την δυνατότητα παροχής καλής διακριτότητας (granularity) στην κατανομή του καναλιού. Σε σχετικά αργά μεταβαλλόμενα κανάλια, είναι δυνατό να βελτιωθεί σημαντικά η χωρητικότητα προσαρμόζοντας την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων για κάθε συνδρομητή ανάλογα με τον σηματοθορυβικό λόγο (SNR) που έχει αυτός.
- **Ανθεκτικότητα έναντι παρεμβολών στενής ζώνης:** Το OFDM είναι αρκετά ανθεκτικό σε παρεμβολές στενής ζώνης, καθώς τέτοιου είδους παρεμβολές επηρεάζουν μόνο ένα μικρό κομμάτι των υποφερουσών.
- **Δυνατότητα για σύγχρονη αποδιαμόρφωση (coherent demodulation):** Είναι σχετικά εύκολο στα συστήματα OFDM να γίνεται μια πιλοτική εκτίμηση του καναλιού, κάτι που τους δίνει την δυνατότητα για σύγχρονη αποδιαμόρφωση, η οποία είναι πιο αποδοτική ενεργειακά.

Πέρα όμως από τα παραπάνω πλεονεκτήματα, το OFDM έχει και μερικά προβλήματα, τα οποία καλείται να αντιμετωπίσει. Πρώτα απ' όλα, υπάρχει ένα πρόβλημα σχετικά με σήματα τα οποία παρουσιάζουν απότομα μέγιστα σε σχέση με την μέση τιμή, κάτι που προκαλεί μη γραμμικότητες και παραμόρφωση λόγω ψαλιδισμού (clipping distortion). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ενεργειακές αναποδοτικότητες (inefficiencies), οι οποίες θα πρέπει να αντιμετωπιστούν. Ένα δεύτερο πρόβλημα είναι ότι τα σήματα OFDM είναι πολύ επιρρεπή σε θόρυβο φάσης (phase noise) και διασπορά συχνότητας (frequency dispersion), τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν με κατάλληλη σχεδίαση των συστημάτων. Πολύ σημαντικό, στην περίπτωση αυτή, είναι να υπάρχει ακριβής συγχρονισμός συχνοτήτων.

### 2.6.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ OFDM ΣΤΟ WIMAX

Το σταθερό και το κινητό WiMAX έχουν σχετικά διαφορετικές υλοποιήσεις του OFDM στο φυσικό τους στρώμα. Το σταθερό WiMAX, το οποίο βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16-2004, χρησιμοποιεί ένα 256 bit FFT – OFDM φυσικό στρώμα. Το κινητό WiMAX, το οποίο βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16e-2005, χρησιμοποιεί κλιμακωτό OFDMA φυσικό στρώμα. Στην περίπτωση του κινητού WiMAX, το μέγεθος του FFT μπορεί να είναι από 128 έως και 2048 bits.

Ο πίνακας 8 δείχνει τις παραμέτρους του OFDM και για τις δύο περιπτώσεις. Οι παράμετροι που παρατίθενται είναι οι μόνοι οι επικρατέστεροι για χρήση στην πράξη, καθώς η παράθεση όλων των πιθανών συνδυασμών θα ήταν ιδιαίτερα μακροσκελής και ίσως άσκοπη.

**Σταθερό WiMAX – OFDM-PHY:** Στην περίπτωση αυτή το μέγεθος του FFT είναι σταθερό και ίσο με 256, εκ των οποίων 192 υποφέρουσες χρησιμοποιούνται για την μετάδοση δεδομένων, 8 χρησιμοποιούνται ως πιλοτικές υποφέρουσες για εκτίμηση του καναλιού και διαδικασίες συγχρονισμού, ενώ οι υπόλοιπες 56 χρησιμοποιούνται σαν υποφέρουσες προστασίας. Από την στιγμή που το μέγεθος του FFT είναι σταθερό, η απόσταση των υποφερουσών μεταβάλλεται ανάλογα με το

εύρος ζώνης του καναλιού. Όταν χρησιμοποιείται μεγαλύτερο εύρος ζώνης, η απόσταση των υποφερουσών αυξάνεται και η διάρκεια συμβόλου μειώνεται. Η μείωση αυτή της διάρκειας συμβόλου σημαίνει ότι ένα μεγαλύτερο κομμάτι χρόνου θα πρέπει να καθοριστεί ως διάστημα προστασίας, για να αντιμετωπιστεί η εξάπλωση καθυστέρησης. Το WiMAX παρέχει ένα μεγάλο εύρος επιλογής για τον χρόνο προστασίας, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στους σχεδιαστές των συστημάτων να κάνουν τις κατάλληλες ανταλλαγές μεταξύ αποδοτικότητας φάσματος και ανθεκτικότητας σε εξάπλωση καθυστέρησης, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Έτσι, για μέγιστη ανθεκτικότητα σε εξάπλωση καθυστέρησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί διάστημα προστασίας ίσο με 25%, το οποίο μπορεί να ανταπεξέλθει σε καθυστερήσεις μέχρι και 16  $\mu$ s όταν η λειτουργία γίνεται σε κανάλι 3,5 MHz, και μέχρι και 8  $\mu$ s όταν η λειτουργία γίνεται σε κανάλι 7 MHz. Σε κανάλια με ήπια μετάδοση πολλαπλών δρόμων, το διάστημα λειτουργίας μπορεί να μειωθεί χωρίς πρόβλημα μέχρι και σε 3%.

**Πίνακας 2.5**  
**Οι παράμετροι του OFDM στο WiMAX**

Parameter	Fixed WiMAX OFDM-PHY		Mobile WiMAX Scalable OFDMA-PHY <sup>a</sup>		
	256	128	512	1,024	2,048
FFT size	256	128	<b>512</b>	1,024	2,048
Number of used data subcarriers <sup>b</sup>	192	72	<b>360</b>	720	1,440
Number of pilot subcarriers	8	12	<b>60</b>	120	240
Number of null/guardband subcarriers	56	44	<b>92</b>	184	368
Cyclic prefix or guard time (Tg/Tb)	1/32, 1/16, <b>1/8</b> , 1/4				
Oversampling rate (Fs/BW)	Depends on bandwidth: 7/6 for 256 OFDM, 8/7 for multiples of 1.75MHz, and 28/25 for multiples of 1.25MHz, 1.5MHz, 2MHz, or 2.75MHz.				
Channel bandwidth (MHz)	3.5	1.25	<b>5</b>	10	20
Subcarrier frequency spacing (kHz)	15.625		<b>10.94</b>		
Useful symbol time ( $\mu$ s)	64		<b>91.4</b>		
Guard time assuming 12.5% ( $\mu$ s)	8		<b>11.4</b>		
OFDM symbol duration ( $\mu$ s)	72		<b>102.9</b>		
Number of OFDM symbols in 5 ms frame	69		<b>48.0</b>		

a. Boldfaced values correspond to those of the initial mobile WiMAX system profiles.

b. The mobile WiMAX subcarrier distribution listed is for downlink PUSC (partial usage of subcarrier).

**Κινητό WiMAX – OFDMA PHY:** Στο κινητό WiMAX το μέγεθος του FFT είναι κλιμακούμενο μεταξύ 128 και 256 bit. Σε αντίθεση με το σταθερό WiMAX, όταν αυξάνεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης, αυξάνεται και το μέγεθος του FFT έτσι ώστε η απόσταση των υποφερουσών να είναι πάντα ίδια και ίση με 10,94 KHz. Με τον τρόπο αυτό, η διάρκεια συμβόλου, που αποτελεί τον βασικό πόρο σε ένα σύστημα, διατηρείται σταθερή και έτσι η κλιμάκωση του εύρους ζώνης έχει ελάχιστο αντίκτυπο στα ανώτερα στρώματα. Η απόσταση των 10,94 KHz επιλέχθηκε ως η χρυσή τομή ανάμεσα στις απαιτήσεις τόσο για αντιμετώπιση της εξάπλωσης καθυστέρησης όσο και της εξάπλωσης Doppler, έτσι ώστε η απόδοση του συστήματος να είναι ικανοποιητική σε σταθερό αλλά και σε κινητό περιβάλλον. Η απόσταση αυτή μπορεί να υποστηρίξει εξάπλωση καθυστέρησης μέχρι και 20  $\mu$ s και κινητικότητα οχήματος μέχρι και 125 kmph όταν η συχνότητα λειτουργίας είναι



3,5GHz. Επιπρόσθετα, η χρήση της απόστασης αυτής έχει ως αποτέλεσμα το μέγεθος του FFT να είναι 128, 512, 1024 και 2048 bits, όταν το εύρος ζώνης του καναλιού είναι 1,25 MHz, 5 MHz, 10 MHz και 20 MHz αντίστοιχα.

#### **2.6.4 ΥΠΟΚΑΝΑΛΟΠΟΙΗΣΗ (SUBCHANNELIZATION)**

Οι διαθέσιμες υποφέρουσες μπορούν να χωριστούν σε διάφορες ομάδες υποφερουσών, οι οποίες ονομάζονται υποκανάλια. Το σταθερό WiMAX επιτρέπει έναν περιορισμένο αριθμό τύπων υποκαναλοποίησης και μόνο στην άνω ζεύξη. Το πρότυπο καθορίζει 16 υποκανάλια, από τα οποία 1, 2, 4, 8 ή όλα μπορούν να ανατεθούν σε έναν σταθμό συνδρομητή (SS – Subscriber Station) στην άνω ζεύξη. Η υποκαναλοποίηση αυτή στην άνω ζεύξη, δίνει την δυνατότητα στον κάθε σταθμό συνδρομητή να μεταδίδει κάνοντας χρήση ενός μόνο μέρους του εύρους ζώνης που του έχει ανατεθεί από τον σταθμό βάσης, ακόμα και μόνο του 1/16 αυτού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα βελτιώσεις στην οικονομία της ζεύξης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για βελτίωση της εμβέλειας του συστήματος είτε για μεγέθυνση της διάρκειας ζωής στις μπαταρίες των συνδρομητικών σταθμών. Μια υποκαναλοποίηση βαθμού 1/16 παρέχει βελτίωση 12db στον προϋπολογισμό ζεύξης.

Από την άλλη μεριά, το κινητό WiMAX επιτρέπει υποκαναλοποίηση τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη και στην περίπτωση αυτή, τα υποκανάλια αποτελούν τον ελάχιστο συχνοτικό πόρο που μπορεί να ανατεθεί από τον σταθμό βάσης. Έτσι, διαφορετικά υποκανάλια μπορούν να ανατεθούν σε διαφορετικούς χρήστες σε ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης. Ο μηχανισμός αυτός πολλαπλής πρόσβασης ονομάζεται OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), και όπως είδαμε δίνει το όνομα του στο φυσικό στρώμα του κινητού WiMAX.

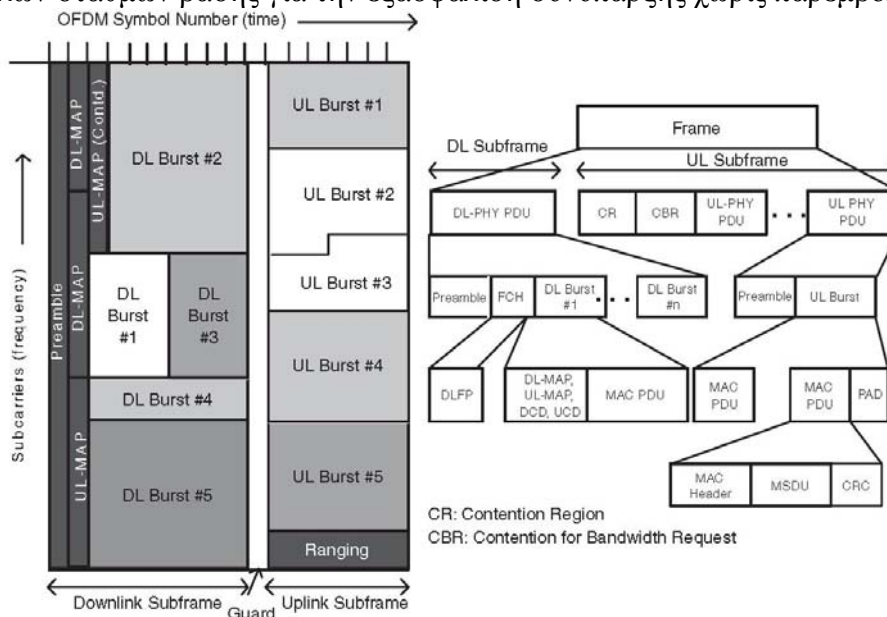
Τα υποκανάλια μπορούν να αποτελούνται από συνεχόμενες υποφέρουσες ή από υποφέρουσες οι οποίες είναι ψευδοτυχαία κατανεμημένες στο φάσμα συχνοτήτων. Υποκανάλια που σχηματίζονται από κατανεμημένες υποφέρουσες παρέχουν μεγαλύτερη διαφορικότητα συχνότητας (frequency diversity), η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε κινητές εφαρμογές. Το WiMAX καθορίζει διάφορα σχήματα υποκαναλοποίησης βασισμένα σε κατανεμημένες φέρουσες τόσο για την άνω όσο και για την κάτω ζεύξη. Το ένα απ' αυτά, με την ονομασία PUSC (Partial usage of subcarriers), είναι υποχρεωτικό σε όλες τις υλοποιήσεις κινητού WiMAX. Τα αρχικά προφίλ του WiMAX καθορίζουν 15 και 17 υποκανάλια στην κάτω και άνω ζεύξη αντίστοιχα, με χρήση του σχήματος PUSC και με εύρος ζώνης 5 MHz. Όταν το εύρος ζώνης είναι 10 MHz, τα υποκανάλια είναι 30 και 35 αντίστοιχα.

Το σχήμα υποκαναλοποίησης που βασίζεται σε συνεχόμενες υποφέρουσες στο WiMAX ονομάζεται AMC (Adaptive Modulation and Coding). Αν και δεν υπάρχει κέρδος σε διαφορικότητα συχνότητας όπως πριν, το AMC δίνει την δυνατότητα στους σχεδιαστές των συστημάτων να αξιοποιήσουν την διαφορικότητα πολλαπλών χρηστών (multiuser diversity), αναθέτοντας τα υποκανάλια στους χρήστες ανάλογα με την απόκριση συχνότητας (frequency response) του καθενός. Η διαφορικότητα πολλαπλών χρηστών μπορεί να προσφέρει σημαντικά κέρδη στην συνολική χωρητικότητα του συστήματος, εάν αυτό καταβάλει προσπάθεια να παρέχει σε κάθε χρήστη το κατάλληλο υποκανάλι που θα μεγιστοποιεί το λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολές ή SINR (Signal to Interference and Noise Ratio). Γενικά, τα συνεχόμενα υποκανάλια ταιριάζουν περισσότερο σε σταθερές και με χαμηλή κινητικότητα εφαρμογές.

## 2.6.5 ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΩΝ (FRAME STRUCTURE)

Το φυσικό στρώμα του WiMAX είναι επίσης υπεύθυνο για την κατανομή των slot (παραθύρων) και το framing (δημιουργία πλαισίων) στην εναέρια διεπαφή. Ο ελάχιστος πόρος χρόνου-συχνότητας που μπορεί να κατανεμηθεί από ένα WiMAX σύστημα σε μία συγκεκριμένη ζεύξη ονομάζεται slot. Το κάθε slot αποτελείται από ένα υποκανάλι με ένα, δύο ή τρία OFDM σύμβολα, ανάλογα με το σχήμα υποκαναλοποίησης που χρησιμοποιείται. Μια σειρά από συνεχόμενα slot που έχουν ανατεθεί σε έναν χρήστη ονομάζεται περιοχή δεδομένων (data region) του χρήστη. Οι αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού (scheduling algorithms) μπορούν να κατανέμουν τις περιοχές δεδομένων με βάση τις απαιτήσεις για QoS και τις συνθήκες στο κανάλι μετάδοσης.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει ένα πλαίσιο OFDM με χρήση λειτουργίας TDD. Το πλαίσιο είναι χωρισμένο σε δύο υποπλαίσια, το πλαίσιο κάτω ζεύξης (downlink frame) ακολουθούμενο από το πλαίσιο άνω ζεύξης (uplink frame) με ένα κενό προστασίας μεταξύ τους. Ο λόγος του μεγέθους των δύο αυτών υποπλαισίων μπορεί να είναι από 3:1 έως 1:1 (downlink to uplink subframe ratio), έτσι ώστε να υποστηρίζονται διαφορετικά προφίλ κίνησης. Το WiMAX υποστηρίζει και αμφιδρόμηση διαίρεσης συχνότητας (FDD – Frequency Division Duplexing), στην οποία η δομή του πλαισίου είναι η ίδια, με μόνη διαφορά ότι τα πλαίσια κάτω και άνω ζεύξης μεταδίδονται ταυτόχρονα σε διαφορετικές φέρουσες. Μερικά από τα σημερινά σταθερά WiMAX συστήματα κάνουν χρήση FDD. Η πλειοψηφία όμως των συστημάτων WiMAX χρησιμοποιούν TDD και αναμένεται να συνεχιστεί αυτό λόγω των συγκριτικών πλεονεκτημάτων του. Το TDD κάνει πιο ευέλικτη την κατανομή του εύρους ζώνης μεταξύ κάτω και άνω ζεύξης, δεν προϋποθέτει την ύπαρξη ζευγαρωμένου φάσματος, έχει ένα αμοιβαίο κανάλι που μπορεί να αξιοποιηθεί για χωρική επεξεργασία (spatial processing), ενώ η σχεδίαση των πομποδεκτών του είναι πολύ πιο απλή. Από την άλλη μεριά, το TDD προϋποθέτει καλό συγχρονισμό πολλαπλών σταθμών βάσης για την εξασφάλιση συνύπαρξης χωρίς παρεμβολές.



Σχήμα 2.14: Ένα πλαίσιο OFDM με χρήση TDD

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, το υποπλαίσιο κάτω ζεύξης ξεκινά με ένα εισαγωγικό κομμάτι (preamble), το οποίο χρησιμοποιείται για διαδικασίες του

φυσικού στρώματος, όπως συγχρονισμός στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας και αρχική εκτίμηση του καναλιού. Στην συνέχεια υπάρχει η επικεφαλίδα ελέγχου πλαισίου ή FCH (Frame Control Header), η οποία παρέχει πληροφορίες για τις ρυθμίσεις του πλαισίου, όπως το μήκος του μηνύματος MAP, την διαμόρφωση και το σχήμα κωδικοποίησης, καθώς και τις χρησιμοποιούμενες υποφέρουσες. Πολλαπλοί χρήστες ανατίθενται με περιοχές δεδομένων μέσα στο πλαίσιο και οι αναθέσεις αυτές καθορίζονται μέσα στα μηνύματα MAP κάτω και άνω ζεύξης, DL-MAP και UL-MAP αντίστοιχα, τα οποία βρίσκονται ακριβώς μετά από το FCH στο υποπλαίσιο κάτω ζεύξης. Τα μηνύματα MAP περιέχουν το προφίλ ροής δεδομένων (burst profile) του κάθε χρήστη, το οποίο καθορίζει την διαμόρφωση και το σχήμα κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται στην κάθε ζεύξη. Επειδή τα μηνύματα MAP περιέχουν πολύ σημαντικές πληροφορίες που πρέπει να φτάσουν σε όλους τους χρήστες, συνήθως στέλνονται μέσω πολύ αξιόπιστων ζεύξεων, όπως BPSK με κωδικοποίηση  $\frac{1}{2}$  και επαναληπτική κωδικοποίηση (repetition coding). Αν και τα μηνύματα MAP είναι φαινομενικά ένας κομψός τρόπος για να ενημερώνει ο σταθμός βάσης τους διάφορους χρήστες για τις αναθέσεις και τα προφίλ ροής σε κάθε πλαίσιο, αυτό μπορεί να προκαλέσει σημαντική επιβάρυνση (overhead), ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλου αριθμού χρηστών με μικρά πακέτα, όπως στο VoIP. Για την αντιμετώπιση της επιβάρυνσης αυτής, τα κινητά WiMAX συστήματα μπορούν επιλεκτικά να χρησιμοποιήσουν πολλαπλά sub-MAP μηνύματα, στα οποία τα μηνύματα ελέγχου σε διαφορετικούς χρήστες αποστέλλονται σε υψηλότερες ταχύτητες, ανάλογα με το προσωπικό SINR του καθενός. Μια άλλη τεχνική είναι η επιλεκτική συμπίεση των μηνυμάτων MAP, με την οποία επιτυγχάνεται βελτίωση της αποδοτικότητας.

Το WiMAX είναι αρκετά ευέλικτο όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο πολλαπλοί χρήστες και πακέτα πολυπλέκονται σε ένα πλαίσιο. Ένα πλαίσιο κάτω ζεύξης μπορεί να περιέχει πολλαπλές ριπές (bursts) ποικίλων μεγεθών και τύπων, οι οποίες μεταφέρουν δεδομένα για διάφορους χρήστες. Το μέγεθος του πλαισίου μπορεί επίσης να αλλάζει από πλαίσιο σε πλαίσιο και μεταξύ 2 ms και 20 ms, ενώ η κάθε ριπή μπορεί να περιέχει πολλαπλά αλυσιδωτά, σταθερού ή μεταβλητού μεγέθους, πακέτα ή κομμάτια πακέτων, τα οποία έχει παραλάβει από τα ανώτερα στρώματα.

Το υποπλαίσιο άνω ζεύξης αποτελείται από διάφορες ριπές από διαφορετικούς χρήστες. Ένα τμήμα του πλαισίου κατακρατείται για διάφορες χρήσεις που έχουν να κάνουν με την ανταγωνιστική πρόσβαση στο μέσον. Η βασική χρήση του τμήματος αυτού είναι ως κανάλι ,το οποίο κάνει κλειστού βρόχου ρυθμίσεις συχνότητας, χρόνου και ισχύος κατά την αρχική εγκατάσταση του δικτύου αλλά και περιοδικά κατά την διάρκεια λειτουργίας του. Το ρυθμιστικό αυτό κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από τους σταθμούς συνδρομητών (SS) στην περίπτωση του σταθερού WiMAX ή τους κινητούς σταθμούς (MS) στην περίπτωση του κινητού WiMAX, για να στέλνουν αιτήματα εύρους ζώνης. Επιπρόσθετα, το κανάλι αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για best effort μετάδοση δεδομένων, ειδικά σε περιπτώσεις που το πλήθος των δεδομένων προς μετάδοση είναι αρκετά μικρό, ώστε να μην δικαιολογείται αίτηση ανάθεσης ξεχωριστού καναλιού. Εκτός από το ρυθμιστικό κανάλι και τις ριπές των διαφόρων χρηστών, το υποπλαίσιο άνω ζεύξης έχει και ένα κανάλι ένδειξης ποιότητας καναλιού ή CQICH (Channel quality indicator channel), το οποίο χρησιμοποιείται για να τροφοδοτούν οι σταθμοί συνδρομητών με πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα του καναλιού, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον προγραμματιστή του σταθμού βάσης, καθώς και ένα κανάλι αναγνώρισης ή ACK (Acknowledgement) για να στέλνουν οι σταθμοί συνδρομητών αναγνώρισεις για την κάτω ζεύξη.

Για να μπορεί να ανταπεξέρχεται στις χρονικές μεταβολές, το WiMAX υποστηρίζει επιλεκτικά επαναλαμβανόμενα preambles. Στην άνω ζεύξη, μικρά preambles, τα οποία στην περίπτωση αυτή ονομάζονται midambles, μπορούν να χρησιμοποιούνται κάθε 8, 16 ή 32 σύμβολα. Στην κάτω ζεύξη, ένα μικρό preamble μπορεί να προστίθεται στη αρχή κάθε burst. Σύμφωνα με υπολογισμούς, έχοντας ένα midambles κάθε 10 σύμβολα μπορεί να υποστηριχθεί κινητικότητα μέχρι και 150 kmph.

## 2.6.6 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ WiMAX

Το WiMAX υποστηρίζει μια ποικιλία από διαμορφώσεις και κωδικοποιήσεις, ενώ επιτρέπει την αλλαγή του σχήματος που χρησιμοποιείται από ριπή σε ριπή για κάθε ζεύξη, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι. Χρησιμοποιώντας το κανάλι CQICH, το κάθε κινητό μπορεί να στέλνει στον σταθμό βάσης πληροφορίες σχετικές με την ποιότητα του καναλιού κάθε δεδομένη στιγμή. Για την άνω ζεύξη, ο σταθμός βάσης μπορεί να εκτιμήσει την ποιότητα του καναλιού, βάσει της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος. Ο προγραμματιστής του σταθμού βάσης μπορεί να λάβει υπόψη του την ποιότητα καναλιού για την άνω και κάτω ζεύξη κάθε χρήστη, και να καθορίσει την κατάλληλη διαμόρφωση και κωδικοποίηση, που θα μεγιστοποιεί την ρυθμοαπόδοση για τον σηματοθορυβικό λόγο (SNR) που έχει κάθε χρήστης. Η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση βελτιώνει σημαντικά την συνολική χωρητικότητα του συστήματος, καθώς επιτρέπει την σε πραγματικό χρόνο προσαρμογή της κάθε ζεύξης, αυξομειώνοντας κατάλληλα την ταχύτητα και την ανθεκτικότητα του συστήματος.

**Πίνακας 2.6**  
**Οι διαμορφώσεις και οι κωδικοποιήσεις που υποστηρίζονται στο WiMAX**

	Downlink	Uplink
Modulation	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM; BPSK optional for OFDMA-PHY	BPSK, QPSK, 16 QAM; 64 QAM optional
Coding	Mandatory: convolutional codes at rate 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 Optional: convolutional turbo codes at rate 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; repetition codes at rate 1/2, 1/3, 1/6, LDPC, RS-Codes for OFDM-PHY	Mandatory: convolutional codes at rate 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 Optional: convolutional turbo codes at rate 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; repetition codes at rate 1/2, 1/3, 1/6, LDPC

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται οι διάφορες διαμορφώσεις και κωδικοποιήσεις που υποστηρίζονται από το WiMAX. Στην κάτω ζεύξη, τα QPSK, 16 QAM και 64 QAM είναι υποχρεωτικά τόσο για το σταθερό όσο και για το κινητό WiMAX. Στην άνω ζεύξη, το 64 QAM είναι προαιρετικό. Η κωδικοποίηση FEC, η οποία κάνει χρήση συνελκτικών κωδίκων, είναι υποχρεωτική. Οι συνελκτικοί κώδικες συνδυάζονται με έναν εξωτερικό κώδικα Read-Solomon στην κάτω ζεύξη για το φυσικό στρώμα OFDM-PHY. Το πρότυπο υποστηρίζει επιλεκτικά και κώδικες turbo και LDPC (Low density parity check), σε διάφορους ρυθμούς κωδικοποίησης (code rates). Συνολικά στο WiMAX καθορίζονται 52 συνδυασμοί διαμόρφωσης και σχήματος κωδικοποίησης και ονομάζονται προφίλ ροής δεδομένων (burst profiles).

## 2.6.7 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Επειδή το φυσικό στρώμα του WiMAX είναι αρκετά ευέλικτο, η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων ποικίλει ανάλογα με τις παραμέτρους λειτουργίας. Οι παράμετροι που έχουν το πιο σημαντικό αντίκτυπο στην ταχύτητα μετάδοσης είναι το εύρος ζώνης καναλιού, η διαμόρφωση και το σχήμα κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται. Άλλες παράμετροι, όπως ο αριθμός των υποκαναλιών, το διάστημα προστασίας OFDM, και ο ρυθμός υπερδειγματοληψίας (oversampling rate), έχουν κι αυτές κάποιο αντίκτυπο.

**Πίνακας 2.7**  
**Οι ταχύτητες μετάδοσης για διάφορα εύρη ζώνης**

Channel bandwidth	3.5MHz	1.25MHz	5MHz	10MHz	8.75MHz <sup>a</sup>					
PHY mode	256 OFDM	128 OFDMA	512 OFDMA	1,024 OFDMA	1,024 OFDMA					
Oversampling	8/7	28/25	28/25	28/25	28/25					
Modulation and Code Rate	PHY-Layer Data Rate (kbps)									
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
BPSK, 1/2	946	326	Not applicable							
QPSK, 1/2	1,882	653	504	154	2,520	653	5,040	1,344	4,464	1,120
QPSK, 3/4	2,822	979	756	230	3,780	979	7,560	2,016	6,696	1,680
16 QAM, 1/2	3,763	1,306	1,008	307	5,040	1,306	10,080	2,688	8,928	2,240
16 QAM, 3/4	5,645	1,958	1,512	461	7,560	1,958	15,120	4,032	13,392	3,360
64 QAM, 1/2	5,645	1,958	1,512	461	7,560	1,958	15,120	4,032	13,392	3,360
64 QAM, 2/3	7,526	2,611	2,016	614	10,080	2,611	20,160	5,376	17,856	4,480
64 QAM, 3/4	8,467	2,938	2,268	691	11,340	2,938	22,680	6,048	20,088	5,040
64 QAM, 5/6	9,408	3,264	2,520	768	12,600	3,264	25,200	6,720	22,320	5,600

a. The version deployed as WiBro in South Korea.

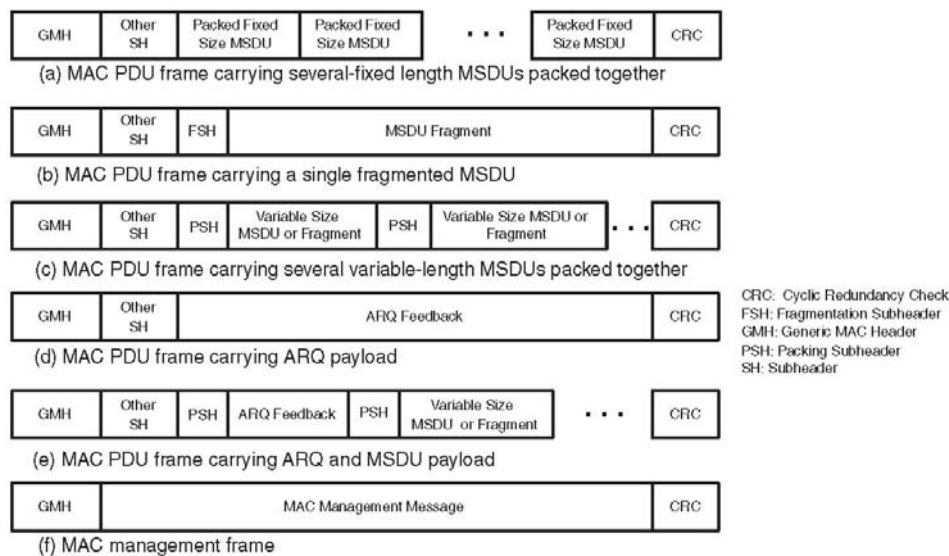
Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται οι ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων για διάφορα εύρη ζώνης, διαμορφώσεις και σχήματα κωδικοποίησης. Οι ταχύτητες που αναγράφονται είναι οι συνολικές για όλο το φυσικό στρώμα, οι οποίες διαμοιράζονται στους διάφορους χρήστες σε έναν τομέα (sector), και αντιστοιχούν στην περίπτωση χρήσης TDD και λόγου εύρων ζώνης downlink to uplink ίσο με 3:1. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει θεωρώντας μέγεθος πλαισίου ίσο με 5 ms, επιβάρυνση 12,5% για το διάστημα προστασίας OFDM, και χρήση του σχήματος αντιμετάθεσης υποφερουσών PUSC. Θα πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι δεν έχει γίνει χρήση χωρικής πολυπλεξίας τοποθετώντας πολλαπλές κεραιές στον πομπό και στον δέκτη. Κάνοντας χρήση αυτής της τεχνικής, μπορούν να αυξηθούν σημαντικά οι μέγιστες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, ειδικά σε περιβάλλοντα με έντονη μετάδοση πολλαπλών δρόμων.

## 2.7 ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ MAC

Η βασική αποστολή του στρώματος MAC (Media Access Control) του WiMAX είναι να παρέχει μια διεπαφή (interface) μεταξύ των υψηλότερων στρωμάτων μεταφοράς και του φυσικού στρώματος. Το στρώμα MAC λαμβάνει πακέτα από τα υψηλότερα στρώματα, τα οποία ονομάζονται MSDUs (MAC service data units), και τα αναδιοργανώνει σε νέα πακέτα με την ονομασία MPDUs (MAC protocol data

units) για μετάδοση μέσω του αέρα. Για μεταδόσεις στην αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή για λειτουργία λήψης, το στρώμα MAC κάνει το αντίστροφο. Τα πρότυπα IEEE 802.16-2004 και IEEE 802.16e-2005 έχουν συμπεριλάβει στην σχεδίαση του στρώματος MAC, ένα υπόστρωμα σύγκλισης (convergence layer) το οποίο μπορεί να συνεργάζεται με μια σειρά από πρωτόκολλα υψηλού στρώματος, όπως το ATM, το TDM Voice, το Ethernet, το IP και φυσικά κάθε άλλο παρόμοιο μελλοντικό πρωτόκολλο. Λόγω της κυριαρχίας που έχουν αυτήν την στιγμή το IP και το Ethernet στην βιομηχανία, το WiMAX Forum αποφάσισε να υποστηρίξει μόνο αυτά τα δύο πρωτόκολλα σε πρώτη βάση. Εκτός από την αντιστοίχιση διευθύνσεων (mapping) από και προς τα υψηλότερα στρώματα, το υπόστρωμα σύγκλισης υποστηρίζει συμπίεση της επικεφαλίδας MSDU, με στόχο την μείωση της επιβάρυνσης των υψηλότερων στρωμάτων σε κάθε πακέτο.

Το στρώμα MAC του WiMAX έχει σχεδιαστεί από την αρχή για να υποστηρίξει πολύ υψηλές μέγιστες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, διατηρώντας την ποιότητα των υπηρεσιών (QoS) στα ίδια επίπεδα με το ATM και το DOCSIS. Χρησιμοποιεί μεταβλητού μήκους πακέτα MPDU και παρέχει μεγάλη ευελιξία που επιτρέπει την αποδοτική μετάδοση τους. Για παράδειγμα, πολλαπλά MPDUs του ίδιου ή διαφορετικού μήκους μπορούν να συνδυαστούν σε μία μόνο ριπή (burst) για να μειωθεί η επιβάρυνση στο φυσικό στρώμα. Παρόμοια, πολλαπλά πακέτα MPDUs από την ίδια υπηρεσία υψηλού στρώματος μπορούν να συνδυαστούν δημιουργώντας ένα μόνο πακέτο MPDU, μειώνοντας έτσι την επιβάρυνση στην επικεφαλίδα MAC. Από την άλλη μεριά, μεγάλα πακέτα MSDU μπορούν να τεμαχιστούν σε μικρότερα MPDU και να μεταδοθούν σε πολλαπλά πλαίσια.



**Σχήμα 2.15: Παραδείγματα πλαισίων MAC PDU.**

Το Σχήμα 2.15 δείχνει διάφορα παραδείγματα πλαισίων MAC PDU (Packet data unit). Κάθε πλαίσιο ξεκινά με μία επικεφαλίδα που έχει την ονομασία GMH (Generic MAC Header) και περιέχει ένα αναγνωριστικό σύνδεσης ή CID (Connection Identifier), το μήκος του πλαισίου, κάποια bits που χαρακτηρίζουν την παρουσία του CRC, υποκεφαλίδων (subheaders), καθώς και την πληροφορία για το αν το ωφέλιμο φορτίο (payload), δηλαδή τα δεδομένα του πλαισίου, είναι κρυπτογραφημένο και αν ναι τότε και ποιο είναι το κλειδί. Το payload μπορεί να είναι είτε μήνυμα μεταφοράς είτε μήνυμα διαχείρισης. Εκτός από MSDUs, το payload μπορεί να περιέχει αιτήσεις

ανάθεσης εύρους ζώνης ή αιτήσεις αναμετάδοσης. Ο τύπος του payload καθορίζεται σε μία υποκεφαλίδα (subheader) που προηγείται αμέσως πριν απ' αυτό. Παραδείγματα τέτοιων υποκεφαλίδων είναι οι υποκεφαλίδες πακεταρίσματος (packing subheaders) και οι υποκεφαλίδες τεμαχισμού (fragmentation subheaders). Το μέγιστο μέγεθος για το μήκος πλαισίου είναι 2047 bytes, το οποίο αναπαρίσταται από 11 bits στην επικεφαλίδα GMH.

### **2.7.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ**

Στο WiMAX, το στρώμα MAC στον σταθμό βάσης έχει την απόλυτη ευθύνη για την κατανομή του εύρους ζώνης σε όλους τους χρήστες τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη. Η μόνη περίπτωση στην οποία ένας κινητός σταθμός (MS) έχει κάποιον έλεγχο στην κατανομή του εύρους ζώνης, είναι όταν αυτός έχει πολλαπλές ενεργές συνόδους (sessions) ή συνδέσεις με τον σταθμό βάσης. Σε αυτήν την περίπτωση, ο σταθμός βάσης κατανέμει ένα συνολικό εύρος ζώνης στον κινητό σταθμό, και είναι στην δικαιοδοσία του τελευταίου το πως θα το διαμοιράσει στις διάφορες συνδέσεις. Όλος ο προγραμματισμός από κει και πέρα γίνεται στον σταθμό βάσης. Για την κάτω ζεύξη, ο σταθμός βάσης μπορεί να κατανέμει το εύρος ζώνης, βάσει των αναγκών της εισερχόμενης κίνησης, χωρίς να εμπλέκει στην διαδικασία της κατανομής τους κινητούς σταθμούς. Για την άνω ζεύξη όμως, οι κατανομές πρέπει να βασίζονται στις αιτήσεις των κινητών σταθμών.

Το WiMAX υποστηρίζει διάφορους μηχανισμούς, με τους οποίους μπορεί ένας κινητός σταθμός να κάνει αίτηση και τελικά να αποκτήσει εύρος ζώνης για την άνω ζεύξη. Ανάλογα με το QoS και της παραμέτρους κίνησης (traffic parameters) σχετικά με την κάθε υπηρεσία, επιλέγεται ένας από τους μηχανισμούς αυτούς από τον κινητό σταθμό. Ο σταθμός βάσης αναθέτει περιοδικά αποκλειστικούς ή διαμοιραζόμενους πόρους σε κάθε κινητό σταθμό, τους οποίους μπορεί αυτός να χρησιμοποιήσει για να αιτηθεί ανάθεση εύρους ζώνης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται polling, και μπορεί να γίνεται είτε μεμονωμένα (unicast) είτε σε ομάδες (multicast). Το multicast polling γίνεται όταν δεν υπάρχει αρκετό διαθέσιμο εύρος ζώνης για να γίνει polling μεμονωμένα σε κάθε κινητό σταθμό. Στην περίπτωση αυτή, το slot που ανατίθεται για αιτήσεις εύρους ζώνης είναι ένα διαμοιραζόμενο slot, το οποίο κάθε κινητός σταθμός στον οποίο έγινε poll μπορεί να επιχειρήσει να χρησιμοποιήσει. Το WiMAX καθορίζει έναν μηχανισμό ανταγωνιστικής πρόσβασης και απόφασης για την περίπτωση που περισσότεροι από ένας κινητοί σταθμοί επιχειρήσουν να χρησιμοποιήσουν το διαμοιραζόμενο slot.

Αν ένας κινητός σταθμός έχει ήδη ανατεθεί με κάποιο εύρος ζώνης για μετάδοση, τότε ο σταθμός βάσης δεν κάνει poll σε αυτόν. Ο κινητός σταθμός μπορεί να αιτηθεί περισσότερο εύρος ζώνης με τους εξής τρόπους: (1) μεταδίδοντας ένα αυτόνομο πακέτο αίτησης εύρους ζώνης MPDU, (2) στέλνοντας μια αίτηση ανάθεσης εύρους ζώνης χρησιμοποιώντας το ranging channel, ή (3) ενσωματώνοντας εμβόλιμες αιτήσεις εύρους ζώνης στα πακέτα MAC.

## 2.7.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ (QoS)

Η υποστήριξη για QoS είναι από τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά της σχεδίασης του στρώματος MAC του WiMAX. Το WiMAX δανείζεται ορισμένες από τις βασικότερες ιδέες για την σχεδίαση του QoS του από το πρότυπο DOCSIS cable modem. Ισχυρός έλεγχος του QoS πετυχαίνεται με την χρήση αρχιτεκτονικής MAC προσανατολισμένης στην σύνδεση (connection oriented), όπου όλες οι συνδέσεις, τόσο στην πάνω όσο και την κάτω ζεύξη, ελέγχονται από τον σταθμό βάσης. Πριν συμβεί οποιαδήποτε μετάδοση δεδομένων, ο σταθμός βάσης και ο κινητός σταθμός εγκαθιστούν μία αμφίδρομη ζεύξη μεταξύ τους, η οποία αποκαλείται σύνδεση (connection). Η κάθε σύνδεση χαρακτηρίζεται από ένα αποκλειστικό αναγνωριστικό σύνδεσης ή CID (Connection Identifier), το οποίο λειτουργεί σαν προσωρινή διεύθυνση για τις μεταδόσεις δεδομένων πάνω στην σύνδεση αυτή. Επιπρόσθετα στις συνδέσεις που γίνονται για μεταφορά δεδομένων, το στρώμα MAC του WiMAX καθορίζει τρεις ακόμα τύπους συνδέσεων διαχείρισης, τις βασικές (basic), τις πρωτεύοντες (primary) και τις δευτερεύοντες (secondary) συνδέσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται για διάφορες λειτουργίες, όπως είναι το ranging.

**Πίνακας 2.8**  
**Οι 5 προγραμματιστικές υπηρεσίες του WiMAX**

Service Flow Designation	Defining QoS Parameters	Application Examples
Unsolicited grant services (UGS)	Maximum sustained rate Maximum latency tolerance Jitter tolerance	Voice over IP (VoIP) without silence suppression
Real-time Polling service (rtPS)	Minimum reserved rate Maximum sustained rate Maximum latency tolerance Traffic priority	Streaming audio and video, MPEG (Motion Picture Experts Group) encoded
Non-real-time Polling service (nrtPS)	Minimum reserved rate Maximum sustained rate Traffic priority	File Transfer Protocol (FTP)
Best-effort service (BE)	Maximum sustained rate Traffic priority	Web browsing, data transfer
Extended real-time Polling service (ErtPS)	Minimum reserved rate Maximum sustained rate Maximum latency tolerance Jitter tolerance Traffic priority	VoIP with silence suppression

Το WiMAX καθορίζει επίσης μια έννοια ροής υπηρεσίας (service flow). Η ροή υπηρεσίας είναι μια αμφίδρομη ροή πακέτων με ένα συγκεκριμένο σεντ παραμέτρων QoS και χαρακτηρίζεται από ένα αναγνωριστικό ροής υπηρεσίας ή SFID (Service flow identifier). Οι παράμετροι QoS μπορούν να περιλαμβάνουν την προτεραιότητα κίνησης (traffic priority), το μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό μεταφοράς, τον μέγιστο ρυθμό ριπής (burst rate), τον ελάχιστο ανεκτό ρυθμό μετάδοσης, τον τύπο προγραμματισμού (scheduling type), τον τύπο ARQ, την μέγιστη καθυστέρηση, το μέγιστο ανεκτό τρεμούλιασμα (jitter), τον τύπο και το μέγεθος των μονάδων δεδομένων υπηρεσίας (service data units), τον μηχανισμό αιτήσεων εύρους ζώνης, τους κανόνες μορφοποίησης μετάδοσης PDU, καθώς και άλλες παραμέτρους. Οι ροές υπηρεσίας μπορούν να παρέχονται από ένα δικτυακό σύστημα διαχείρισης ή να δημιουργούνται δυναμικά μέσα από καθορισμένους μηχανισμούς του προτύπου. Ο



σταθμός βάσης έχει την ευθύνη έκδοσης του αναγνωριστικού SFID και της αντιστοίχισης της διεύθυνσης του σε αποκλειστικά CIDs.

Για να μπορεί να υποστηρίζει μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών, το WiMAX καθορίζει πέντε προγραμματιστικές υπηρεσίες, οι οποίες πρέπει να υποστηρίζονται από τον προγραμματιστή MAC του σταθμού βάσης για μεταφορά δεδομένων πάνω σε μια σύνδεση. Οι υπηρεσίες αυτές φαίνονται στον πίνακα 11 και στην συνέχεια αναλύονται ξεχωριστά η κάθε μία.

- **UGS (Unsolicited grant services):** Η υπηρεσία αυτή έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει μετάδοση πακέτων δεδομένων σταθερού μεγέθους και σε σταθερό ρυθμό μετάδοσης (CBR – Constant Bit Rate). Παραδείγματα εφαρμογών που κάνουν χρήση της υπηρεσίας αυτής είναι το T1/E1 και το VoIP χωρίς συμπίεση σιωπής. Οι υποχρεωτικές service flow παράμετροι που καθορίζουν την υπηρεσία αυτή είναι ο μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός μεταφοράς, η μέγιστη καθυστέρηση, το μέγιστο ανεκτό τρεμούλιασμα (jitter), και την πολιτική αιτήσεων και μετάδοσης.
- **rtPS (Real time polling services):** Η υπηρεσία αυτή έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει service flows πραγματικού χρόνου, όπως είναι η μετάδοση MPEG video, που κάνουν χρήση πακέτων μεταβλητού μεγέθους σε περιοδική βάση. Οι υποχρεωτικές service flow παράμετροι που καθορίζουν την υπηρεσία αυτή είναι ο ελάχιστος ρυθμός αντίστροφης κίνησης, ο μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης, η μέγιστη καθυστέρηση και η πολιτική αιτήσεων και μετάδοσης.
- **nrtPS (Non real time polling services):** Η υπηρεσία αυτή έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει ροές δεδομένων με ανεκτικότητα καθυστέρησης, όπως στο FTP, οι οποίες κάνουν χρήση πακέτων μεταβλητού μεγέθους και απαιτούν έναν ελάχιστο εξασφαλισμένο ρυθμό μετάδοσης. Οι υποχρεωτικές service flow παράμετροι που καθορίζουν την υπηρεσία αυτή είναι ο ελάχιστος ρυθμός αντίστροφης κίνησης, ο μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης, η προτεραιότητα κίνησης και η πολιτική αιτήσεων και μετάδοσης.
- **BE (Best effort) service:** Η υπηρεσία αυτή έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει ροές δεδομένων, όπως το web browsing, οι οποίες δεν έχουν απαίτηση ενός ελάχιστου εξασφαλισμένου επιπέδου υπηρεσίας. Οι υποχρεωτικές service flow παράμετροι που καθορίζουν την υπηρεσία αυτή είναι ο μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης, η προτεραιότητα κίνησης και η πολιτική αιτήσεων και μετάδοσης.
- **ERT-VR (Extended real time – variable rate) service:** Η υπηρεσία αυτή έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως το VoIP με συμπίεση σιωπής, οι οποίες κάνουν χρήση ποικίλων ρυθμών μετάδοσης, αλλά απαιτούν έναν εξασφαλισμένο ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης και μια εξασφαλισμένη μέγιστη καθυστέρηση. Η υπηρεσία αυτή υπάρχει μόνο στο πρότυπο IEEE 802.16e-2005 και όχι στο IEEE 802.16-2004. Συχνά αναφέρεται και σαν ERT-PS (Extended real time – Polling service)

Αν και το WiMAX δεν καθορίζει εξ' ολοκλήρου τον χρησιμοποιούμενο προγραμματιστή (scheduler), καθορίζει εντούτοις αρκετές παραμέτρους και χαρακτηριστικά που διευκολύνουν την υλοποίηση ενός αποδοτικού προγραμματιστή. Ορισμένα απ' αυτά είναι τα ακόλουθα.

- Υποστήριξη για λεπτομερή παραμετρικό καθορισμό των απαιτήσεων QoS, καθώς και μιας ποικιλίας από μηχανισμούς αποδοτικής ρύθμισης των συνθηκών μετάδοσης σήματος.
- Υποστήριξη για δυναμική κατανομή πόρων τριών διαστάσεων στο στρώμα MAC. Οι πόροι μπορούν να κατανομούνται στο πεδίο του χρόνου (time slots), της συχνότητας (subcarriers) και του χώρου (multiple antennas) και σε περιοδική βάση ανά πλαίσιο.
- Υποστήριξη για γρήγορη ανατροφοδότηση πληροφοριών για την ποιότητα των καναλιών, έτσι ώστε να δίνεται η δυνατότητα στον προγραμματιστή να επιλέγει την κατάλληλη κωδικοποίηση και διαμόρφωση (το burst profile δηλαδή) για κάθε ανάθεση που κάνει.
- Υποστήριξη για συνεχείς αντιμεταθέσεις υποφερουσών, όπως στο AMC, οι οποίες επιτρέπουν στον προγραμματιστή να αξιοποιεί την διαφορικότητα πολλαπλών χρηστών (multiuser diversity) αναθέτοντας σε κάθε συνδρομητή το καλύτερο για εκείνον υποκανάλι.

Θα πρέπει τέλος να τονιστεί ότι η υλοποίηση ενός αποδοτικού προγραμματιστή είναι εξέχουσας σημασίας για την συνολική χωρητικότητα και την απόδοση ενός WiMAX συστήματος.

### **2.7.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Για να υποστηρίξει την χρήση φορητών συσκευών που λειτουργούν με μπαταρίες, το κινητό WiMAX έχει κάποια χαρακτηριστικά εξοικονόμησης ενέργειας που επιτρέπουν στους φορητούς σταθμούς συνδρομητών να λειτουργούν για μεγαλύτερη διάρκεια χωρίς την ανάγκη φόρτισης της μπαταρίας τους. Η εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται σβήνοντας ορισμένα τμήματα του κινητού σταθμού με έναν ελεγχόμενο τρόπο, όταν αυτός δεν είναι ενεργός, δηλαδή δεν μεταδίδει ή λαμβάνει δεδομένα. Το κινητό WiMAX καθορίζει μεθόδους σηματοδότησης που επιτρέπουν στους κινητούς σταθμούς να μεταβαίνουν σε κατάσταση νάρκης (sleep mode) ή κατάσταση αδράνειας (idle mode), όταν είναι ανενεργοί.

Το sleep mode είναι μία κατάσταση στην οποία ο κινητός σταθμός αναστέλλει αποδοτικά την λειτουργία του και γίνεται μη διαθέσιμος για προκαθορισμένες χρονικές περιόδους. Οι περίοδοι απουσίας διαπραγματεύονται με τον σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί. Το WiMAX καθορίζει τρεις κλάσεις εξοικονόμησης ενέργειας, βάσει του τρόπου με τον οποίο εκτελείται η λειτουργία sleep mode. Στην πρώτη κλάση, η χρονική περίοδος που ο κινητός σταθμός παραμένει σε κατάσταση sleep mode ξεκινάει από μία ελάχιστη τιμή και αυξάνεται μέχρι να φτάσει μια μέγιστη τιμή. Αυτό συμβαίνει συνήθως σε περιπτώσεις που ο κινητός σταθμός χρησιμοποιεί μεταδόσεις μη πραγματικού χρόνου και καλύτερης δυνατής προσπάθειας (best effort). Στην δεύτερη κλάση, η παραπάνω χρονική περίοδος είναι σταθερή. Αυτό συμβαίνει σε υπηρεσίες UGS. Στην τρίτη κλάση η μετάβαση στην κατάσταση sleep mode γίνεται μεμονωμένα και για μια καθορισμένη χρονική περίοδο. Αυτό συνήθως συμβαίνει σε μεταδόσεις multicast ή διαχείρισης, όπου ο κινητός σταθμός γνωρίζει εκ

των προτέρων πότε θα γίνει η επόμενη μετάδοση. Πέρα από ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος στους κινητούς σταθμούς, η κατάσταση sleep mode εξοικονομεί πόρους και για τον σταθμό βάσης. Για να διευκολύνεται η μεταγωγή σταθμού εξυπηρέτησης κατά την διάρκεια παραμονής σε κατάσταση sleep mode, ο κινητός σταθμός έχει την δυνατότητα συλλογής πληροφοριών μεταγωγής από διάφορους σταθμούς βάσης.

Το idle mode επιτρέπει ακόμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και η υποστήριξή του είναι προαιρετική στο WiMAX. Η κατάσταση αυτή δίνει την δυνατότητα στον κινητό σταθμό να αναστέλλει πλήρως την λειτουργία του και να μην είναι καταχωρημένος σε κανέναν σταθμό βάσης, αλλά να διατηρεί την δυνατότητα λήψης broadcast κίνησης στην κάτω ζεύξη. Όταν καταφθάνει η κίνηση κάτω ζεύξης σε έναν κινητό σταθμό που βρίσκεται σε κατάσταση idle mode, αυτός καλείται από μια ομάδα σταθμών βάσης που σχηματίζουν το αποκαλούμενο paging group. Ο κινητός σταθμός είναι καταχωρημένος σε ένα paging group από τον σταθμό βάσης πριν μπει σε κατάσταση idle mode, ενώ περιοδικά βγαίνει από την κατάσταση αυτή για να ανανεώσει το paging group του. Η κατάσταση idle mode εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια, καθώς ο κινητός σταθμός δεν χρειάζεται καν να είναι καταχωρημένος σε έναν σταθμό εξυπηρέτησης ή να εκτελεί μεταγωγές. Επιπρόσθετα, επωφελείται και το δίκτυο και οι σταθμοί βάσης καθώς απαλλάσσονται από την άσκοπη κίνηση μεταγωγών (handover traffic) στους ανενεργούς κινητούς σταθμούς.

#### **2.7.4 ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

Πέρα από την σταθερή ευρυζωνική πρόσβαση, το WiMAX έχει προνοήσει για τέσσερα σενάρια πρόσβασης με μικρή ή μεγάλη κινητικότητα. Αυτά είναι τα εξής:

- **Νομαδική πρόσβαση:** Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να μεταφέρει έναν σταθερό σταθμό συνδρομητή και να επανασυνδεθεί στο δίκτυο από ένα διαφορετικό σημείο.
- **Φορητή πρόσβαση:** Η νομαδική πρόσβαση παρέχεται σε μία κινητή συσκευή, όπως μια κάρτα υπολογιστή, με προσδοκία μεταγωγής καλύτερης δυνατής προσπάθειας (best effort handover).
- **Πρόσβαση με απλή κινητικότητα:** Ο συνδρομητής μπορεί να κινείται με ταχύτητα έως και 60 kmph και η διαδικασία μεταγωγής επιφέρει μία σύντομη διακοπή σύνδεσης, μικρότερη από ένα δευτερόλεπτο.
- **Πρόσβαση με πλήρη κινητικότητα:** Υποστηρίζεται κινητικότητα μέχρι και 120 kmph και μεταγωγή χωρίς διακοπή σύνδεσης, με καθυστέρηση μικρότερη των 50 ms και απώλεια δεδομένων μικρότερη του 1%.

Το πιθανότερο σενάριο είναι τα δίκτυα WiMAX να σχεδιαστούν αρχικά για σταθερές και νομαδικές εφαρμογές, και στην συνέχεια να εξελιχτούν σταδιακά ώστε να υποστηρίζουν φορητότητα και πλήρη κινητικότητα.

Το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 καθορίζει ένα πλαίσιο για υποστήριξη της διαχείρισης κινητικότητας. Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο καθορίζει μηχανισμούς σηματοδότησης (signaling mechanisms) για την ανίχνευση των συνδρομητικών

σταθμών καθώς αυτοί κινούνται από την περιοχή εμβέλειας ενός σταθμού βάσης σε περιοχή άλλου σταθμού βάσης, στην περίπτωση που είναι ενεργοί, ή από το ένα ranging group σε ένα άλλο, στην περίπτωση που βρίσκονται σε κατάσταση idle mode. Το πρότυπο επίσης εμπεριέχει πρωτόκολλα που εξασφαλίζουν μεταγωγές από ένα σταθμό βάσης σε άλλον, χωρίς την διακοπή της σύνδεσης. Το WiMAX Forum έχει χρησιμοποιήσει το πλαίσιο που καθορίστηκε στο πρότυπο IEEE 802.16e-2005 για να αναπτύξει περαιτέρω την διαχείριση της κινητικότητας μέσα σε ένα πλαίσιο αρχιτεκτονικής δικτύου απ' άκρη σ' άκρη (end to end). Η αρχιτεκτονική υποστηρίζει επίσης κινητικότητα IP στρώματος, κάνοντας χρήση του mobile IP.

Τρεις μέθοδοι μεταγωγής υποστηρίζονται στο πρότυπο IEEE 802.16e-2005, με την μία να είναι υποχρεωτική και τις άλλες δύο προαιρετικές. Η υποχρεωτική μέθοδος αποκαλείται HHO (Hard handover) και είναι η μοναδική που απαιτείται για την αρχική σχεδίαση του WiMAX. Το HHO είναι ουσιαστικά μία απότομη μεταφορά της σύνδεσης από ένα σταθμό βάσης σε έναν άλλο. Οι αποφάσεις για την μεταγωγή γίνονται από τον σταθμό βάσης, τον κινητό σταθμό ή κάποια άλλη μονάδα, πάντα όμως βάσει των μετρήσεων που διενεργεί ο κινητός σταθμός. Ο κινητός σταθμός σαρώνει περιοδικά το φάσμα σε όλο τον χώρο και υπολογίζει την ποιότητα σήματος από τους γειτονικούς σταθμούς βάσης. Η σάρωση (scanning) γίνεται σε χρονικά διαστήματα που αποκαλούνται scanning intervals και ανατίθενται από τον σταθμό βάσης. Κατά την διάρκεια των scanning intervals, ο κινητός σταθμός μπορεί να προχωρήσει σε ένα αρχικό ranging και σε συσχέτιση (association) με έναν ή περισσότερους γειτονικούς σταθμούς. Αφού παρθεί η απόφαση για μεταγωγή, ο κινητός σταθμός ξεκινάει τον συγχρονισμό με την μετάδοση κάτω ζεύξης του νέου σταθμού βάσης, εκτελεί διαδικασίες ranging σε περίπτωση που αυτές δεν είχαν γίνει κατά την διάρκεια της σάρωσης και τερματίζει την σύνδεση με τον προηγούμενο σταθμό βάσης. Όσα πακέτα MPDU δεν είχαν παραδοθεί, παραμένουν στον σταθμό βάσης έως ότου περάσει ένας προκαθορισμένος χρόνος.

Οι δύο προαιρετικές μέθοδοι μεταγωγής που υποστηρίζονται από το πρότυπο IEEE 802.16-2005 είναι το FBSS (Fast base station switching) και το MDHO (Macro diversity handover). Στις δύο αυτές μεθόδους, ο κινητός σταθμός διατηρεί ενεργές συνδέσεις με παραπάνω από έναν σταθμούς βάσης. Στην περίπτωση του FBSS, ο κινητός σταθμός διατηρεί μια λίστα με τους ενεργούς σταθμούς βάσης, η οποία αποκαλείται active set. Ο κινητός σταθμός παρακολουθεί συνεχώς το active set, διενεργεί ranging, και διατηρεί ένα ενεργό connection ID για κάθε σταθμό που βρίσκεται στο active set. Ο κινητός σταθμός όμως επικοινωνεί μόνο με έναν σταθμό βάσης, ο οποίος αποκαλείται anchor base station. Όταν χρειάζεται η αλλαγή του anchor base station, η σύνδεση μεταφέρεται από τον έναν σταθμό βάσης σε έναν άλλο, χωρίς την ανάγκη διενέργειας αναλυτικής σηματοδότησης μεταγωγής. Το μόνο που κάνει ο κινητός σταθμός στην περίπτωση αυτή, είναι να αναφέρει τον επιλεγμένο νέο anchor BS στο CQICH.

Το MDHO μοιάζει αρκετά με το FBSS, με την βασική όμως διαφορά ότι ο κινητός σταθμός επικοινωνεί ταυτόχρονα, τόσο στην κάτω όσο και στην άνω ζεύξη, με όλους τους σταθμούς βάσης που βρίσκονται στο active set, το οποίο στην περίπτωση αυτή ονομάζεται diversity set. Στην κάτω ζεύξη, πολλαπλά αντίγραφα που λαμβάνονται από τον κινητό σταθμό συνδυάζονται με μία από τις γνωστές διαφορικές τεχνικές συνδυασμού. Στην άνω ζεύξη, όπου ο κινητός σταθμός αποστέλλει δεδομένα σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης, γίνεται χρήση διαφορικής επιλογής για την ανάδειξη της καλύτερης άνω ζεύξης.

Τόσο το FBSS όσο και το MDHO παρέχουν καλύτερη απόδοση από το HHO, αλλά προϋποθέτουν τον συγχρονισμό, την χρήση ίδιας συχνότητας φέρουσας και την

ανταλλαγή πληροφοριών δικτύου σε όλους τους σταθμούς βάσης του active set ή του diversity set αντίστοιχα. Η υποστήριξη των δύο αυτών μεθόδων στα δίκτυα WiMAX δεν έχει σχεδιαστεί ακόμα πλήρως και δεν αποτελεί μέρος των προδιαγραφών δικτύων WiMAX Forum Release 1.

### 2.7.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Αντίθετα με τα συστήματα Wi-Fi, τα συστήματα WiMAX σχεδιάστηκαν από την αρχή με βασικό στοιχείο την ισχυρή ασφάλεια. Το πρότυπο περιλαμβάνει σύγχρονες και προηγμένες μεθόδους που εξασφαλίζουν την ασφάλεια των δεδομένων και αποτρέπουν την μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε αυτά, με επιπρόσθετη βελτιστοποίηση πρωτοκόλλων για κινητικότητα. Η ασφάλεια των δικτύων διαχειρίζεται σε ένα ξεχωριστό υπόστρωμα, που αποκαλείται privacy sublayer και βρίσκεται ενσωματωμένο στο στρώμα MAC του WiMAX. Τα βασικά χαρακτηριστικά της ασφάλειας του WiMAX είναι τα ακόλουθα.

- **Υποστήριξη προστασίας προσωπικών δεδομένων:** Τα δεδομένα των χρηστών κρυπτογραφούνται με δοκιμασμένα για την ισχύ τους σχήματα που παρέχουν προστασία. Τόσο το AES (Advanced Encryption Standard) όσο και το 3DES (Triple Data Encryption Standard) υποστηρίζονται από το WiMAX. Οι περισσότερες υλοποιήσεις συστημάτων WiMAX αναμένεται να χρησιμοποιούν το AES καθώς είναι νεότερο πρότυπο, για το οποίο έχει εγκριθεί η συμμόρφωση του με το πρότυπο FIPS (Federal Information Processing Standard), ενώ είναι και ευκολότερη η υλοποίησή του. Το κλειδί των 128 ή 256 bit, που χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση, παράγεται κατά την διάρκεια της φάσης πιστοποίησης (authentication phase) και ανανεώνεται περιοδικά για επιπλέον προστασία.
- **Πιστοποίηση Συσκευής / Χρήστη:** Το WiMAX παρέχει έναν ευέλικτο τρόπο για την πιστοποίηση των συνδρομητικών σταθμών και την αποφυγή πρόσβασης χωρίς πιστοποίηση. Το συνολικό πλαίσιο πιστοποίησης είναι βασισμένο στο IETF (Internet Engineering Task Force) EAP, το οποίο υποστηρίζει την χρήση μιας ποικιλίας από πιστοποιητικά, όπως είναι το όνομα και ο κωδικός χρήστη (username/password), τα ψηφιακά πιστοποιητικά, και οι έξυπνες κάρτες. Οι τερματικές συσκευές του WiMAX κατασκευάζονται με ενσωματωμένα ψηφιακά πιστοποιητικά X.509, τα οποία περιέχουν το public key και το MAC address τους. Οι πάροχοι υπηρεσιών WiMAX μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτά τα ψηφιακά πιστοποιητικά για πιστοποίηση συσκευής (device authentication), ενώ για την πιστοποίηση χρήστη (user authentication) μπορούν να χρησιμοποιήσουν το όνομα και τον κωδικό χρήστη ή έξυπνες κάρτες.
- **Ευέλικτο πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιού (key management):** Το πρωτόκολλο PKMv2 (Key management protocol version 2) χρησιμοποιείται για την μεταφορά των κλειδιών από τον σταθμό βάσης στον κινητό σταθμό, καθώς και την περιοδική ανανέωση της πιστοποίησης και των κλειδιών. Το PKM είναι ένα πρωτόκολλο πελάτη-εξυπηρετητή (client-server), με τον κινητό σταθμό να έχει τον ρόλο του πελάτη και τον σταθμό βάσης τον ρόλο του εξυπηρετητή. Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιεί ψηφιακά πιστοποιητικά και αλγόριθμους public key

κρυπτογράφησης RSA (Rivest Shamer Adleman) για την διενέργεια ανταλλαγής κλειδιών μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού σταθμού.

- **Προστασία μηνυμάτων ελέγχου:** Η ακεραιότητα των εναέριων μηνυμάτων ελέγχου προστατεύεται με την χρήση σχημάτων κωδικοποίησης μηνύματος, όπως τα AES-based CMAC (Cipher based message authentication code) και MD5-based HMAC (Hash based message authentication code).
- **Υποστήριξη γρήγορης μεταγωγής:** Για την υποστήριξη γρήγορων μεταγωγών, το WiMAX επιτρέπει στον κινητό σταθμό να κάνει χρήση προ-πιστοποίησης (pre-authentication) με ένα συγκεκριμένο σταθμό βάσης για να διευκολυνθεί η επιτάχυνση της επαναφοράς της σύνδεσης κατά την μεταγωγή. Ένα σχήμα χειραψίας τριών βημάτων χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση του μηχανισμού ανανέωσης της πιστοποίησης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η γρήγορη μεταγωγή, αποφεύγοντας ταυτόχρονα πιθανές κακόβουλες ενδιάμεσες επιθέσεις.

## **2.7.6 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ MULTICAST ΚΑΙ BROADCAST**

Το στρώμα MAC του κινητού WiMAX υποστηρίζει υπηρεσίες multicast και broadcast (MBS – Multicast broadcast services). Οι λειτουργίες και τα χαρακτηριστικά σχετικά με τις υπηρεσίες MBS είναι τα ακόλουθα:

- Μηχανισμοί σηματοδότησης για τον κινητό σταθμό, έτσι ώστε να μπορεί να αιτείται και να εγκαθιστά υπηρεσίες MBS.
- Πρόσβαση συνδρομητικών σταθμών μέσω ενός ή περισσότερων σταθμών βάσης, ανάλογα με την χωρητικότητα και τις επιθυμίες των χρηστών.
- Υποστήριξη QoS για τις υπηρεσίες MBS και κρυπτογράφησης με χρήση ενός παγκόσμια καθορισμένου και αναγνωρισμένου κλειδιού κρυπτογράφησης.
- Ξεχωριστό τμήμα μέσα στο πλαίσιο MAC με την δική του πληροφορία MAP για τις υπηρεσίες MBS.
- Μέθοδοι απόδοσης των υπηρεσιών MBS σε συνδρομητικούς σταθμούς που βρίσκονται σε κατάσταση idle mode.
- Υποστήριξη μάκρο-διαφορικότητας (macro-diversity) για βελτίωση της απόδοσης όσον αφορά την παροχή των υπηρεσιών MBS.

## 2.8 ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ WiMAX

Το WiMAX καθορίζει έναν αριθμό από προαιρετικά προηγμένα χαρακτηριστικά για την βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων. Ανάμεσα στα σημαντικότερα από αυτά, είναι η υποστήριξη τεχνικών πολλαπλών κεραιών (multiple antenna techniques), το υβριδικό ARQ και η ενισχυμένη αναχρησιμοποίηση συχνοτήτων.

### 2.8.1 ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΕΡΑΙΩΝ

Το πρότυπο του WiMAX παρέχει εκτεταμένη υποστήριξη για υλοποίηση προηγμένων λύσεων πολλαπλών κεραιών για την βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων. Σημαντικά κέρδη για την συνολική χωρητικότητα του συστήματος και την αποδοτικότητα φάσματος μπορούν να επιτευχθούν με την χρήση προαιρετικών προηγμένων συστημάτων κεραιών ή AAS (Advanced Antenna Systems), τα οποία καθορίζονται στο WiMAX. Τα AAS περιλαμβάνουν υποστήριξη για μια ποικιλία από τεχνικές πολλαπλών κεραιών, όπως διαφορικότητα μετάδοσης (transmit diversity), διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας (beamforming) και χωρική πολυπλεξία (spatial processing). Οι τρεις αυτές τεχνικές παρουσιάζονται παρακάτω.

- **Διαφορικότητα μετάδοσης (transmit diversity):** Το WiMAX καθορίζει έναν αριθμό από σχήματα κωδικοποίησης χώρου-χρόνου, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν διαφορικότητα μετάδοσης στην κάτω ζεύξη. Η διαφορικότητα μετάδοσης προϋποθέτει την ύπαρξη δύο ή περισσότερων κεραιών εκπομπής και μίας ή περισσότερων κεραιών λήψης. Οι κώδικες χώρου-χρόνου ή STBC (Space time block code) που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση 2x1 κεραιών (2 κεραίες εκπομπής x 1 κεραία λήψης) είναι οι κώδικες Alamouti, οι οποίοι είναι ορθογωνικοί και ιδιαίτερα επιδεκτικοί σε ανίχνευση μέγιστης πιθανότητας. Οι κώδικες Alamouti STBC είναι σχετικά εύκολοι στην υλοποίηση τους και παρέχουν το ίδιο διαφορικό κέρδος με την περίπτωση διαφορικότητας λήψης 1x2 με συνδυασμό μέγιστου λόγου (maximum ratio combining), αν και αυτό γίνεται με μία απώλεια 3db λόγω των περιττών μεταδόσεων. Το μεγάλο όμως πλεονέκτημα της διαφορικότητας μετάδοσης είναι ότι η πολυπλοκότητα της σχεδίασης και της λειτουργίας μεταφέρεται στον σταθμό βάσης, κάτι που αποφέρει μείωση στο κόστος των κινητών σταθμών. Πέρα από την περίπτωση 2x1, το WiMAX έχει καθορίσει κώδικες STBC και για τις περιπτώσεις 3x1 και 4x1 κεραιών.
- **Διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας (beamforming):** Πολλαπλές κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο WiMAX και για την μετάδοση του ίδιου σήματος από πολλά στοιχεία (π.χ. δίπολα) με το κατάλληλο βάρος για το κάθε στοιχείο, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να είναι η στροφή του λοβού ακτινοβολίας στην κατεύθυνση του δέκτη και μακριά από παρεμβολές, βελτιώνοντας έτσι τον λόγο SINR. Το beamforming μπορεί να αποφέρει πολύ σημαντικά οφέλη για την εμβέλεια, την χωρητικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος. Για να μπορεί να πραγματοποιηθεί το beamforming στην εκπομπή, πρέπει ο πομπός να έχει ακριβή εικόνα για τις συνθήκες στο κανάλι μετάδοσης, κάτι που στην περίπτωση χρήσης τεχνικής TDD είναι εύκολο λόγω της αμοιβαιότητας καναλιού αλλά στην περίπτωση χρήσης FDD προϋποθέτει την ύπαρξη ενός καναλιού ανατροφοδότησης (feedback

channel) για την ενημέρωση σχετικά με τα χαρακτηριστικά του καναλιού. Το WiMAX υποστηρίζει την χρήση beamforming τόσο στην κάτω όσο και στην άνω ζεύξη.

- **Χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing):** Το WiMAX υποστηρίζει επίσης χωρική πολυπλεξία, στην οποία πολλαπλές ροές δεδομένων (streams) μεταδίδονται μέσω πολλαπλών κεραιών. Στην περίπτωση που και ο δέκτης έχει πολλαπλές κεραιές, τα streams μπορούν να διαχωριστούν με χρήση επεξεργασίας χώρου-χρόνου (space-time processing). Αντί να χρησιμοποιούνται για αύξηση της διαφορικότητας, στην περίπτωση αυτή οι πολλαπλές κεραιές χρησιμοποιούνται για αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων ή της χωρητικότητας του συστήματος. Θεωρώντας ένα περιβάλλον με έντονα φαινόμενα μετάδοσης πολλαπλών δρόμων, η χωρητικότητα του συστήματος μπορεί να αυξηθεί γραμμικά με τον αριθμό των κεραιών όταν χρησιμοποιείται χωρική πολυπλεξία. Έτσι, ένα σύστημα 2x2 MIMO διπλασιάζει την μέγιστη υποστηριζόμενη ρυθμοαπόδοση. Αν οι κινητοί σταθμοί έχουν μόνο μία κεραιά, το WiMAX μπορεί ακόμα να εφαρμόσει χωρική πολυπλεξία, κάνοντας χρήση κωδικοποίησης σε πολλαπλούς χρήστες στην άνω ζεύξη. Η τεχνική αυτή αποκαλείται συνεργατική χωρική πολυπλεξία πολλαπλών χρηστών (multiuser collaborative spatial multiplexing). Αντίθετα με την διαφορικότητα μετάδοσης και το beamforming, η χωρική πολυπλεξία μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε καλές συνθήκες SINR.

### 2.8.2 ΥΒΡΙΔΙΚΟ ARQ

Το υβριδικό ARQ (hybrid ARQ) είναι μια τεχνική ARQ (Automatic repeat request), η οποία υλοποιείται στο φυσικό στρώμα σε συνδυασμό με το FEC (Forward Error Correction), παρέχοντας βελτιωμένη απόδοση της ζεύξης έναντι του παραδοσιακού ARQ, με το κόστος της αυξημένης πολυπλοκότητας υλοποίησης. Η πιο απλή έκδοση του hybrid ARQ είναι ο απλός συνδυασμός των τεχνικών ARQ και FEC, όπου τα μπλοκ δεδομένων (data blocks) μαζί με έναν κώδικα CRC, κωδικοποιούνται με χρήση ενός κωδικοποιητή FEC πριν την μετάδοσή τους. Η αναμετάδοση ζητείται όταν ο αποκωδικοποιητής δεν μπορεί να αποκωδικοποιήσει σωστά ένα ληφθέν μπλοκ. Όταν λαμβάνεται ένα μπλοκ από αναμετάδοση, συνδυάζεται με το προηγούμενο μπλοκ και τροφοδοτείται στην είσοδο του αποκωδικοποιητή FEC. Ο συνδυασμός των δύο ληφθέντων εκδοχών του μπλοκ αυξάνει τις πιθανότητες να γίνει τελικά σωστή αποκωδικοποίηση. Ο τύπος αυτός του H-ARQ αποκαλείται συνήθως type 1 chase combining.

Το πρότυπο του WiMAX υποστηρίζει τον παραπάνω τύπο, συνδυάζοντας μια τεχνική N-channel stop and wait ARQ με μια ποικιλία από υποστηριζόμενους κώδικες FEC. Έχοντας πολλαπλά παράλληλα κανάλια H-ARQ σε ταυτόχρονη λειτουργία, μπορεί να αυξηθεί η συνολική ρυθμοαπόδοση, διότι όταν μια διεργασία H-ARQ περιμένει αναγνώριση, μία άλλη μπορεί να χρησιμοποιεί το κανάλι για να στείλει δεδομένα. Το WiMAX υποστηρίζει μηχανισμούς σηματοδότησης που επιτρέπουν ασύγχρονη λειτουργία H-ARQ, καθώς και ένα αποκλειστικό κανάλι αναγνώρισης (acknowledgement channel) στην άνω ζεύξη για σηματοδότηση ACK/NACK. Οι ασύγχρονες λειτουργίες επιτρέπουν μεταβλητές καθυστερήσεις μεταξύ των αναμεταδόσεων, κάτι που παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στον προγραμματιστή.

Για την περαιτέρω βελτίωση της αξιοπιστίας της αναμετάδοσης, το WiMAX υποστηρίζει προαιρετικά το type 2 H-ARQ, το οποίο αποκαλείται και incremental



redundancy (αυξητικός πλεονασμός). Στην τεχνική αυτή, αντίθετα με το type 1 HARQ, η κάθε μετάδοση ή αναμετάδοση χρησιμοποιεί διαφορετική κωδικοποίηση για βελτίωση της απόδοσης. Τυπικά, ο ρυθμός κωδικοποίησης μειώνεται αποδοτικά σε κάθε αναμετάδοση.

### **2.8.3 ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ**

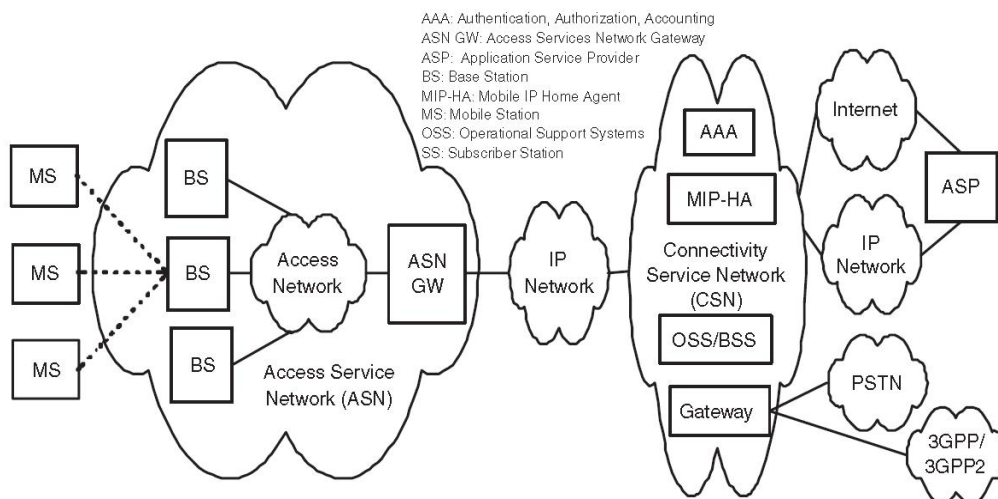
Αν και θα ήταν δυνατό να λειτουργούν όλα τα συστήματα WiMAX με ένα κοινό παγκόσμιο σχέδιο επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (frequency reuse plan), αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την ύπαρξη πολύ έντονων παρεμβολών, ειδικά στα σύνορα των κυψελών (cells) και των τομέων (sectors). Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού, το WiMAX επιτρέπει τον συντονισμό της κατανομής υποκαναλιών στους χρήστες που βρίσκονται στα σύνορα των κυψελών, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η επικάλυψη. Αυτό επιτρέπει μια πιο δυναμική κατανομή συχνοτήτων στους τομείς, η οποία βασίζεται στις εκάστοτε συνθήκες πιθανής υπερφόρτωσης ή παρεμβολών, αντίθετα με το παραδοσιακό σταθερό σχέδιο κατανομής. Οι χρήστες που έχουν καλό SINR θα έχουν πρόσβαση σε όλο το εύρος ζώνης του καναλιού και θα λειτουργούν με συντελεστή επαναχρησιμοποίησης συχνότητας ίσο με 1. Αντίθετα, στους χρήστες με κακό SINR θα ανατίθενται μόνο μη επικαλυπτόμενα υποκανάλια, και θα λειτουργούν έτσι με συντελεστή επαναχρησιμοποίησης συχνότητας ίσο με 2, 3 ή 4, ανάλογα με τις ομάδες μη επικαλυπτόμενων υποκαναλιών που έχουν καθοριστεί για χρήση από τους χρήστες αυτούς. Αυτός ο τύπος κατανομής υποκαναλιών αποφέρει τιμές ενεργού συντελεστή επαναχρησιμοποίησης λίγο μεγαλύτερες της μονάδας. Η ποικιλία σχημάτων υποκαναλοποίησης που υποστηρίζονται από το WiMAX, επιτρέπει την ευέλικτη υλοποίηση της τεχνικής αυτής. Προφανώς, η αρνητική πλευρά στην τεχνική αυτή είναι το γεγονός ότι οι χρήστες που βρίσκονται στα σύνορα των κυψελών δεν μπορούν να έχουν πρόσβαση σε όλο το εύρος ζώνης του καναλιού, με αποτέλεσμα οι ταχύτητες μετάδοσης να είναι μειωμένες.

## **2.9 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ**

Το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 καθορίζει μια εναέρια διεπαφή για το WiMAX, δεν καθορίζει όμως το δίκτυο απ' άκρη σ' άκρη (end to end). Το WiMAX Forum's Network Working Group (NWG), έχει επωμιστεί την αρμοδιότητα σχεδίασης των end to end δικτυακών απαιτήσεων, της αρχιτεκτονικής και των πρωτοκόλλων για το WiMAX, χρησιμοποιώντας το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 για εναέρια διεπαφή.

Το WiMAX NWG έχει αναπτύξει ένα δικτυακό μοντέλο αναφοράς, το οποίο αποτελεί το αρχιτεκτονικό πλαίσιο για τις διάφορες υλοποιήσεις WiMAX συστημάτων και εξασφαλίζει την διαλειτουργικότητα μεταξύ των διάφορων συσκευών και των παρόχων υπηρεσιών WiMAX. Το δικτυακό μοντέλο αναφοράς χρησιμοποιεί μια ενιαία αρχιτεκτονική για την υποστήριξη σταθερών, νομαδικών και κινητών εφαρμογών και βασίζεται σε ένα μοντέλο IP υπηρεσιών. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την απλοποιημένη απεικόνιση μιας αρχιτεκτονικής δικτύου WiMAX βασισμένη στο IP πρωτόκολλο. Το συνολικό δίκτυο μπορεί νοητά να χωριστεί σε τρία τμήματα: (1) τους κινητούς σταθμούς που χρησιμοποιούν οι τερματικοί χρήστες

για την πρόσβαση στο δίκτυο, (2) το δίκτυο υπηρεσιών πρόσβασης ή ASN (Access service network), το οποίο αποτελείται από έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης και μία ή περισσότερες ASN πύλες (gateways), και (3) το δίκτυο υπηρεσιών συνδεσιμότητας ή CSN (Connectivity service network), το οποίο παρέχει την IP συνδεσιμότητα και όλες τις λειτουργίες IP δικτύου πυρήνα.



Σχήμα 2.16: Η αρχιτεκτονική του δικτύου αναφοράς

Το πλαίσιο αρχιτεκτονικής του WiMAX έχει καθοριστεί έτσι ώστε να δίνει την δυνατότητα σε πολλούς διαφορετικούς φορείς να αποτελούν μέρος της αλυσίδας των WiMAX υπηρεσιών. Πιο συγκεκριμένα, η αρχιτεκτονική καθορίζει τρεις ξεχωριστές επιχειρησιακές μονάδες: (1) τους πάροχους πρόσβασης στο δίκτυο ή NAPs (Network Access Providers), οι οποίοι κατέχουν και λειτουργούν τα δίκτυα ASN, (2) τους πάροχους υπηρεσιών δικτύου ή NSPs (Network Service Providers), οι οποίοι παρέχουν IP συνδεσιμότητα και WiMAX υπηρεσίες στους συνδρομητές, κάνοντας χρήση της υποδομής των δικτύων ASN ενός ή περισσότερων NAPs, και (3) τους πάροχους εφαρμογών ή ASPs (Application Service Providers), οι οποίοι παρέχουν αναβαθμισμένες υπηρεσίες, όπως εφαρμογές πολυμέσων, κάνοντας χρήση IP υποσυστημάτων πολυμέσων (IMS – IP Multimedia Subsystems) και εταιρικών εικονικών δικτύων (VPN – Virtual Private Networks) που λειτουργούν πάνω σε IP αρχιτεκτονική. Ο διαχωρισμός αυτός μεταξύ NAP, NSP και ASP έχει σχεδιαστεί για την παραγωγή ενός πλουσιότερου οικοσυστήματος για τις επιχειρήσεις WiMAX υπηρεσιών, που οδηγεί σε μεγαλύτερο συναγωνισμό και τελικά σε καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών.

Το δικτυακό μοντέλο αναφοράς που σχεδιάστηκε από το WiMAX Forum NWG καθορίζει έναν αριθμό από λειτουργικές μονάδες και διεπαφές μεταξύ των μονάδων αυτών. Οι διεπαφές αναφέρονται και ως σημεία αναφοράς (reference points). Το παραπάνω σχήμα δείχνει μερικές από τις σημαντικότερες λειτουργικές μονάδες, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικότερα στην συνέχεια.

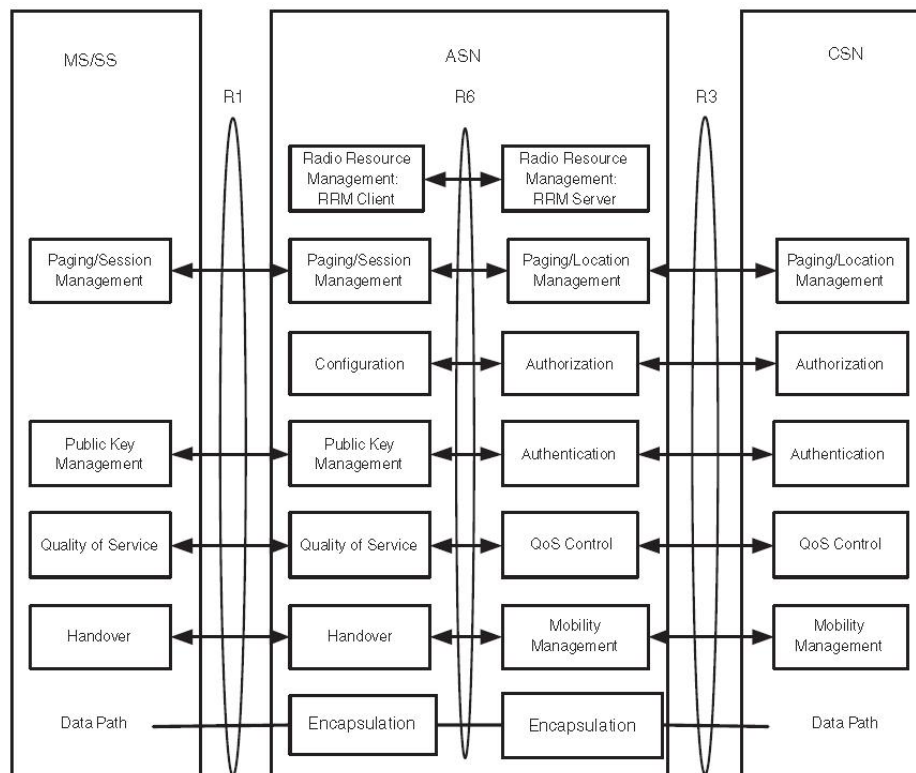
- **Σταθμός βάσης (BS – Base Station):** Ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος να παρέχει την εναέρια διεπαφή στον κινητό σταθμό. Επιπρόσθετες λειτουργίες του σταθμού βάσης μπορεί να είναι η διαχείριση μικρο-κινητικότητας (micro-mobility management), η επιβολή της πολιτικής QoS (QoS policy enforcement), η κατηγοριοποίηση της κίνησης (traffic classification), η εξουσιοδότηση DHCP

(Dynamic Host Control Protocol), η διαχείριση κλειδιών, η διαχείριση συνόδων (sessions) και διαχείριση ομάδων multicast.

- **Πύλη ASN (ASN-GW – Access Service Network Gateway):** Η πύλη ASN λειτουργεί ως σημείο συνάθροισης κίνησης 2<sup>ου</sup> στρώματος (layer 2 traffic aggregation point) μέσα σε ένα δίκτυο ASN. Επιπρόσθετες λειτουργίες της πύλης ASN μπορεί να είναι η διαδικτυακή διαχείριση τοποθεσιών (intra-ASN location management) και η σελιδοποίηση (paging), η διαχείριση εναέριων πόρων (radio resource management) και ο έλεγχος εισόδου (admission control), η απόκρυψη των συνδρομητικών προφίλ caching of subscriber profiles) και των κλειδιών κρυπτογράφησης (encryption keys), η λειτουργικότητα πελάτη AAA, η εγκατάσταση και διαχείριση σήραγγας κινητικότητας (mobility tunnel) με τους σταθμούς βάσης, η επιβολή της πολιτικής QoS, η λειτουργικότητα ξένων agent για το κινητό IP και η δρομολόγηση (routing) στο επιλεγμένο δίκτυο CSN.
- **Δίκτυο υπηρεσιών συνδεσιμότητας (CSN – Connectivity Service network):** Το CSN παρέχει συνδεσιμότητα με το διαδίκτυο (internet), τους πάροχους ASP, και άλλα δημόσια και εταιρικά δίκτυα. Το δίκτυο CSN ανήκει σε έναν πάροχο NSP και περιέχει εξυπηρετητές (servers) AAA, οι οποίοι υποστηρίζουν την πιστοποίηση των συσκευών, των χρηστών και συγκεκριμένων υπηρεσιών. Επιπλέον παρέχει διαχείριση ασφάλειας και QoS ανά χρήστη, και είναι υπεύθυνο για την διαχείριση διευθύνσεων IP, την υποστήριξη της περιαγωγής μεταξύ διαφορετικών NSPs, την διαχείριση τοποθεσιών μεταξύ των ASNs, καθώς και την υποστήριξη κινητικότητας και περιαγωγής μεταξύ των ASNs. Το δίκτυο CSN έχει επίσης την δυνατότητα να παρέχει πύλες και διαλειτουργικότητα με άλλα δίκτυα, όπως το τηλεφωνικό δίκτυο PSTN (Public Switched Telephone Network) και τα δίκτυα 3<sup>ης</sup> γενιάς 3GPP και 3GPP2.

Το αρχιτεκτονικό πλαίσιο του WiMAX επιτρέπει την σύνθεση ή/και την αποσύνθεση των λειτουργικών μονάδων κατά την κατασκευή των φυσικών μονάδων. Για παράδειγμα, το δίκτυο ASN μπορεί να αποσυντεθεί σε πομποδέκτες σταθμού βάσης (BST – Base station transceivers), ελεγκτές σταθμού βάσης (BSC – Base station controllers) και μία πύλη ASN (ASN-GW), ανάλογα με το μοντέλο των δικτύων GSM το οποίο αποτελείται από BST, BSC και ένα SGSN (Serving GPRS Support Node). Υπάρχει επίσης η δυνατότητα σύνθεσης του σταθμού βάσης και της πύλης ASN σε μία ενιαία μονάδα, η οποία θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν ένα WiMAX router. Η σχεδίαση αυτή αποκαλείται συνήθως καταναεμημένη ή επίπεδη αρχιτεκτονική. Ο μη καθορισμός μιας υποχρεωτικής τοπολογίας ASN ή CSN, επιτρέπει την διαφοροποίηση των υλοποιήσεων ανά κατασκευαστή ή πάροχο υπηρεσιών.

Πέρα από λειτουργικές μονάδες, η αρχιτεκτονική αναφοράς καθορίζει και διεπαφές μεταξύ των λειτουργικών μονάδων, οι οποίες αποκαλούνται σημεία αναφοράς (reference points). Οι διεπαφές κάνουν χρήση πρωτοκόλλων ελέγχου και διαχείρισης, και κυρίως πρωτοκόλλων δικτύων βασισμένα σε IETF και πρωτοκόλλων στρώματος μεταφοράς. Με την χρήση των πρωτοκόλλων αυτών, επιτυγχάνεται η υποστήριξη διάφορων λειτουργιών, όπως κινητικότητα, ασφάλεια και QoS, πέρα από την μεταφορά δεδομένων. Το παρακάτω σχήμα δείχνει μερικές από αυτές τις λειτουργίες



**Σχήμα 2.17: Λειτουργίες που επιτελούνται στα σημεία αναφοράς**

Το δικτυακό μοντέλο αναφοράς του WiMAX καθορίζει σημεία αναφοράς μεταξύ: (1) κινητού σταθμού και δικτύου ASN, το οποίο αποκαλείται R1 και πέρα από την εναέρια διεπαφή περιέχει και πρωτόκολλα διαχείρισης, (2) κινητού σταθμού και δικτύου CSN, το οποίο αποκαλείται R2 και παρέχει πιστοποίηση, εξουσιοδότηση υπηρεσιών, διαμόρφωση IP και διαχείριση κινητικότητας, (3) δικτύου ASN και δικτύου CSN, το οποίο αποκαλείται R3 και υποστηρίζει επιβολή της πολιτικής QoS και διαχείριση της κινητικότητας, (4) δύο δικτύων ASN, το οποίο αποκαλείται R4 και υποστηρίζει διαδικτυακή κινητικότητα, (5) δύο δικτύων CSN, το οποίο αποκαλείται R5 και υποστηρίζει περιαγωγή μεταξύ διαφορετικών NSPs, (6) σταθμού βάσης και πύλης ASN-GW, το οποίο αποκαλείται R6 και αποτελείται από διαδικτυακά μονοπάτια μετάδοσης και σήραγγες IP, και τέλος (7) δύο σταθμών βάσης, το οποίο αποκαλείται R7 και διευκολύνει την γρήγορη και χωρίς διακοπή σύνδεσης μεταγωγή.

## 2.10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1<sup>ου</sup> - 2<sup>ου</sup> - 3<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed, “*Fundamentals of WiMAX*”, Pearson Education Inc, 2007
- [2] Amitabh Kumar, “*Mobile Broadcasting with WiMAX*”, Focal Press, 2008
- [3] Houda Labiod, Hossam Afifi, Constantino De Santis, “*Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and WiMAX*”, Springer, 2007
- [4] Marcos D. Katz, Frank H.P. Fitzek, “*WiMAX Evolution*”, John Wiley and Sons, 2009
- [5] Yang Xiao, “*WiMAX / MobileFi: Advanced research and technology*”, Auerbach Publications, 2008
- [6] Yan Zhang, “*WiMAX Network Planning and Optimization*”, Auerbach Publications, 2009
- [7] Walton C. Gibson, “*The Method of Moments in Electromagnetics*”, Chapman & Hall, 2008
- [8] Mike Golio, “*The RF and microwave handbook*”, CRC Press LLC, 2001
- [9] David B. Davidson, “*Computational Electromagnetics for RF and Microwave Engineering*”, Cambridge University Press, 2005
- [10] Lal Ghand Godara, “*Handbook of Antennas in Wireless Communications*”, CRC Press LLC, 2002
- [11] Randy L. Haupt, Douglas H. Werner, “*Genetic Algorithms in Electromagnetics*”, John Wiley and Sons, 2007
- [12] Sophocles J. Orfanidis, “*Electromagnetic Waves & Antennas*”, 2008
- [13] Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory, Analysis and Design*”, John Wiley and Sons, 1997
- [14] Constantine A. Balanis, Panayiotis I. Ioannides, “*Introduction to Smart Antennas*”, Morgan & Claypool, 2007
- [15] 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
- [16] SuperNEC GUI Input User Reference Manual, Version 2.4, Poynting Antennas Software (Pty) Ltd.
- [17] SuperNEC GUI Output User Reference Manual, Version 2.4, Poynting Antennas Software (Pty) Ltd.
- [18] SuperNEC GA Optimiser User Manual, Version 1.10, Poynting Antennas Software (Pty) Ltd.
- [19] X. Καψάλης, Π. Γ. Κωπτής, “*Κεραίες – Ασύρματες Ζεύξεις*”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ

Την τελευταία δεκαετία έχει σημειωθεί σημαντική ανάπτυξη των συστημάτων ευφυών κεραιών (Smart Antennas, SAs), με στόχο την κάλυψη των ραγδαία αυξανόμενων αναγκών ζήτησης τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Τα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών νέας γενιάς (κυβελωτά δίκτυα 3<sup>ης</sup> και 4<sup>ης</sup> γενιάς, τοπικά δίκτυα, ολοκληρωμένα δίκτυα) απαιτούν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, με ευρύτερη κάλυψη, για έναν αυξανόμενο αριθμό χρηστών. Η χρήση του ραδιοφάσματος επεκτείνεται προς υψηλότερες φέρουσες συχνότητες, όπου είναι μεν διαθέσιμο μεγαλύτερο εύρος ζώνης αλλά η εξασθένηση διάδοσης είναι μεγαλύτερη. Η αύξηση της ισχύος εκπομπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί έμμεσα για την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης (μέσω της παρεπόμενης καταστολής των παρεμβολών, της πολυδιαδρομικής διάδοσης, του λόγου σήματος προς θόρυβο κλπ.), αλλά είναι οικονομικά ασύμφορη, ενώ προσκρούει στην νομοθεσία περί ασφάλειας πληθυσμού. Η αδυναμία των παραδοσιακών τεχνολογικών συστημάτων να ανταποκριθούν σε τέτοιου είδους απαιτήσεις, καθώς και σε υψηλές ταχύτητες δεδομένων σε χαμηλό κόστος και στην αυξημένη κινητικότητα των χρηστών με τη χρήση φορητού μέσου οδήγησε στην ανάπτυξη των συστημάτων ευφυών κεραιών.

Η τεχνολογία ευφυών κεραιών αποδεδειγμένα προσφέρει τη δυνατότητα υψηλότερης χωρητικότητας στα ασύρματα δίκτυα, μειώνοντας αποτελεσματικά τις πολλαπλές διαδρομές και τη διασυμβολική παρεμβολή, χωρίς να είναι απαραίτητοι περισσότεροι φασματικοί ή ενεργειακοί πόροι. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συγκέντρωση της ακτινοβολίας στην επιθυμητή μόνο κατεύθυνση, και την προσαρμογή της στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος και της ζήτησης. Οι ευφυείς κεραιές (smart antennas) οφείλουν λοιπόν την ονομασία τους στον ευφυή τρόπο δυναμικού προσανατολισμού του κύριου λοβού ακτινοβολίας, μεταβάλλοντας το σχήμα και την κατεύθυνση του διαγράμματος ακτινοβολίας ανάλογα με τη θέση του χρήστη.

Στην περίπτωση ενός συστήματος εκπομπής WiFi, mobile WiMAX ή, κυρίως, κινητής τηλεφωνίας, μια ευφυής κεραία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από την πλευρά του δέκτη. Σε μια τέτοια περίπτωση ο δέκτης θα μπορούσε να ρυθμίσει το διάγραμμα λήψης του έτσι ώστε να επιλέξει να εξυπηρετηθεί από το σημείο εκπομπής του δικτύου εκείνου που του προσφέρει καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας, να μειώσει τις παρεμβολές που πιθανόν να προέρχονται από άλλα σημεία εκπομπής και να περιορίσει τις αρνητικές συνέπειες της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Στην περίπτωση μάλιστα φορητού ή κινητού δέκτη μια ευφυής κεραία εξασφαλίζει την αδιάκοπη ποιοτική λήψη ανεξαρτήτως της θέσης του χρήστη, καθώς τώρα ο δέκτης δύναται να προσαρμόζει δυναμικά το διάγραμμα λήψης του ώστε αυτό πάντα να στοχεύει προς το κατάλληλο σημείο εκπομπής.

Στο πρώτο μισό αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται κάποια βασικά θέματα της τεχνολογίας ευφυών κεραιών και γίνεται κάποια νύξη στις σύγχρονες τάσεις που εμφανίζονται στον κλάδο αυτό. Στο δεύτερο μισό του κεφαλαίου περιγράφεται αναλυτικά μια ιδιαίτερη κατηγορία ευφυών κεραιών, οι ευφυείς στοιχειοκεραίες

μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων, καθώς τέτοια κεραιοσυστήματα σχεδιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο αυτής της διατριβής.

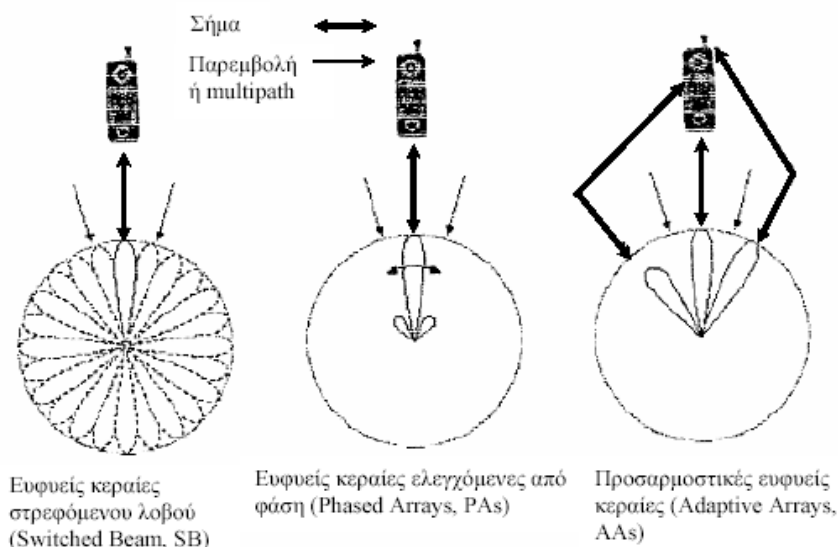
### 3.1 ΒΑΣΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ

Στην ουσία, οι ευφυείς κεραιές είναι στοιχειοκεραίες με ηλεκτρονικά προσαρμοζόμενα και ελεγχόμενα χαρακτηριστικά. Τα ακτινοβολούντα στοιχεία δεν διαθέτουν ευφυΐα, αλλά η ψηφιακή επεξεργασία του σήματος καθιστά το σύστημα ευφύες. Ο ορισμός αυτός είναι πολύ ευρύς και περιλαμβάνει τόσο την μορφοποίηση του διαγράμματος-λοβού ακτινοβολίας (beamforming) όσο και τις περιπτώσεις διαφορισιμότητας κεραιάς (antenna diversity) ή τα συστήματα MIMO. Ένας πιο στενός ορισμός για τις έξυπνες κεραιές περιλαμβάνει μόνο τις κεραιές μορφοποίησης διαγράμματος ακτινοβολίας, και είναι ο ορισμός που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

Οι ευφυείς κεραιές μορφοποίησης διαγράμματος ακτινοβολίας αποτελούνται από ένα σύνολο ακτινοβολητών, με τα σήματα τους να συνδυάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν ένα κινούμενο ή μετατρέψιμο επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας [1]. Εν γένει, οι κεραιές αυτές αποτελούνται από στοιχεία τοποθετημένα σε κοντινές θέσεις μεταξύ τους, σε αποστάσεις της τάξης του μισού μήκους κύματος. Αντίθετα, τα στοιχεία των κεραιών που χρησιμοποιούνται για διαφορισιμότητα ή συστήματα MIMO είναι τοποθετημένα σε πιο μακρινές αποστάσεις μεταξύ τους, αφού απαιτείται ασυσχέτιστη λήψη [2].

#### 3.1.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ

Οι ευφυείς κεραιές διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες (επίπεδα), που σχετίζονται με τον τρόπο υλοποίησής τους (Σχήμα 3.1). Τα επίπεδα αυτά, επειδή είναι αντιπροσωπευτικά της απόδοσης μιας ευφυούς κεραιάς σε σχέση με τις συμβατικές διατάξεις, χαρακτηρίζονται ως επίπεδα ευφυΐας (intelligence) [3] και παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 3.1: Είδη ευφυών κεραιών [3].

Η πρώτη κατηγορία είναι οι κεραιές στρεφόμενου λοβού (Switched Lobe, SL) ή στρεφόμενης δέσμης ακτινοβολίας (Switched Beam, SB), που είναι και το

χαμηλότερο επίπεδο. Πρόκειται για έξυπνες κεραιές που παρέχουν έναν πεπερασμένο αριθμό από προκαθορισμένες μορφές του διαγράμματος ακτινοβολίας. Ο λοβός που επιλέγεται κάθε φορά είναι εκείνος που εξασφαλίζει την υψηλότερη στάθμη του προσπίπτοντος σήματος. Συγκεκριμένα, εντοπίζεται η μέγιστη στάθμη λήψης ενός σήματος που αντιστοιχεί σε ένα χρήστη, επιλέγεται και χρησιμοποιείται ο λοβός εκείνος που εξυπηρετεί βέλτιστα τη ζεύξη με αυτό το χρήστη. Καθώς αυτός ο χρήστης μπορεί να μετακινείται από μία περιοχή σε μια άλλη, η κεραιά εγκαταλείπει τον παλιό λοβό και χρησιμοποιεί κάποιον άλλο (από το πλήθος των προκαθορισμένων λοβών που διαθέτει), ο οποίος μετά τη μετακίνηση προσφέρει καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας. Η μεταγωγή από τον ένα λοβό στον άλλο γίνεται απλά αλλάζοντας τις διεγέρσεις των στοιχείων που αποτελούν τη στοιχειοκεραία, γεγονός που καθιστά χαμηλή την πολυπλοκότητα ενός τέτοιου συστήματος. Το βασικό μειονέκτημα αυτών των συστημάτων εμφανίζεται όταν ένα σήμα παρεμβολής προσπίπτει από διεύθυνση κοντινή με τη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας του λοβού που χρησιμοποιείται τη δεδομένη στιγμή. Τότε, ενισχύεται σημαντικά το ανεπιθύμητο σήμα και καθίσταται δύσκολος ο διαχωρισμός του από το επιθυμητό σήμα. Επιπλέον, λόγω της χρησιμοποίησης ενός προκαθορισμένου διαγράμματος ακτινοβολίας, δεν είναι εφικτή η καταστολή των πολυδιαδρομικών συνιστωσών του λαμβανομένου σήματος που καταφθάνουν από γωνίες άφιξης πλησίον της κύριας συνιστώσας.

Η δεύτερη κατηγορία είναι οι ευφυείς κεραιές ελεγχόμενες από φάση (Phased Arrays, PAs). Στο επίπεδο αυτό μορφοποιείται ψηφιακά ο λοβός ακτινοβολίας και δημιουργείται ένα διαρκώς κινούμενο διάγραμμα, που κάθε φορά στρέφεται στην κατεύθυνση του ισχυρότερου σήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διαρκή μεταβολή των φάσεων των βαρών (weights) των στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Σε αντίθεση με τις έξυπνες κεραιές στρεφόμενου λοβού, εδώ ο αριθμός των διαγραμμάτων δεν είναι προκαθορισμένος. Και πάλι το κριτήριο για την επιλογή ενός διαγράμματος είναι η αύξηση της ισχύος του σήματος. Τα μειονεκτήματα των Phased Arrays είναι η αδυναμία τους να καταστείλουν τις παρεμβολές και να αντιμετωπίσουν το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης.

Η τρίτη κατηγορία είναι η προσαρμοστική έξυπνη κεραιά (Adaptive Array, AA). Η δέσμη ακτινοβολίας διαμορφώνεται ψηφιακά, με τον κύριο λοβό να παράγεται στην κατεύθυνση της ισχυρότερης συνιστώσας του επιθυμητού σήματος, με πλευρικούς λοβούς στις κατευθύνσεις των πολυδιαδρομικών συνιστωσών του κύριου σήματος και με μηδενισμούς στις κατευθύνσεις των παρεμβαλλόντων σημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διαρκή βελτιστοποίηση των πλατών και των φάσεων των βαρών των στοιχείων της στοιχειοκεραίας [4]. Η τεχνική αυτή μεγιστοποιεί το λόγο του σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SINR). Η προσαρμοστική έξυπνη κεραιά προσαρμόζεται δυναμικά στις απαιτήσεις του ραδιοδιαύλου και μπορεί να διαχωρίσει το επιθυμητό σήμα (Signal of Interest, SOI) από τα ανεπιθύμητα σήματα (Signals of Non-Interest, SNOI). Το ουσιαστικότερο μειονέκτημα αυτού του κεραιοσυστήματος είναι το κόστος υλοποίησης και λειτουργίας του, εξαιτίας του αλγορίθμου ψηφιακής επεξεργασίας [5]. Επιπλέον, οι λοβοί των προσαρμοστικών κεραιών είναι αρκετά στενοί ώστε να σημαδεύουν με το μέγιστό τους απευθείας το χρήστη. Αυτό είναι πολύ επιθυμητό αλλά εισάγει και κάποια δυσκολία ταχέως κινούμενων χρηστών προκαλώντας κάποιες απώλειες στην επαφή του κινητού τερματικού με το σταθμό βάσης.



### **3.1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ**

Η χρησιμοποίηση ευφύων κεραιών σε ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνιών συντελεί στην αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Αυτό αντιστοιχεί είτε σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης για τους υπάρχοντες χρήστες, είτε σε περισσότερους χρήστες για τους ίδιους ρυθμούς μετάδοσης. Μέσω της επιλεκτικής ενίσχυσης επιθυμητών σημάτων και απόρριψης των παρεμβολών, επιτυγχάνεται η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης χωρίς να απαιτείται αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος. Οι ευφυείς επιτρέπουν στο χρήστη και στο σταθμό βάσης να επικοινωνούν στην ίδια εμβέλεια με τα συμβατικά συστήματα, αλλά με χαμηλότερη ισχύ εκπομπής. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στα FDMA και TDMA συστήματα να μειώσουν τις αποστάσεις επαναχρησιμοποίησης και ως εκ τούτου να μπορούν να υποστηρίξουν περισσότερους συνδρομητές. Όσον αφορά στα CDMA συστήματα, η μείωση της ισχύος εκπομπής από πλευράς των χρηστών μειώνει σημαντικά την παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Interference, MAI), αυξάνοντας και πάλι τον αριθμό των χρηστών μέσα σε μια κυψέλη. Επίσης, στα συστήματα CDMA οι ευφυείς κεραιές μπορούν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση του φαινομένου near-far που προκύπτει όταν ένας χρήστης είναι πολύ κοντά στον σταθμό βάσης σε σχέση τους υπόλοιπους [1]. Ένα άλλο ουσιαστικό όφελος από τη χρησιμοποίηση ευφύων κεραιών είναι η ικανότητα διαχωρισμού των σημάτων στο χώρο, με αποτέλεσμα περισσότεροι του ενός χρήστες να εξυπηρετούνται στην ίδια κυψέλη στον ίδιο συχνοτικό δίαυλο και ή στην ίδια χρονοσχισμή (Space Division Multiple Access, SDMA). Αυτή η τεχνική διαχειρίζεται βέλτιστα τους διαθέσιμους φασματικούς πόρους (συχνότητα, χρόνο) [1].

Ένα θέμα που συχνά προκύπτει στα νέας γενιάς τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, είναι όταν σποραδικά κάποιοι χρήστες απαιτούν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (π.χ. μεταφορά video), ενώ οι υπόλοιποι χρήστες χρειάζονται χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Σε αυτήν την περίπτωση οι ευφυείς κεραιές μπορεί να χρησιμοποιηθούν για βελτιστοποίηση της εξισορρόπησης του φορτίου ζήτησης (load balancing), κατευθύνοντας το διάγραμμα ακτινοβολίας προς τους χρήστες με υψηλές απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης. Με αυτόν τον τρόπο και δεν επηρεάζεται η μέση χωρητικότητα του δικτύου και βελτιώνεται το επίπεδο της παρεχόμενης υπηρεσίας και η ποιότητα της υπηρεσίας (Quality of Service – QoS).

Μια άλλη ιδιότητα των ευφύων κεραιών είναι η αυξημένη ικανότητα τους για ραδιοκάλυψη, αφού προσφέρουν μεγαλύτερο κέρδος στις επιθυμητές κατευθύνσεις. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αγροτικές και αραιοκατοικημένες περιοχές με στόχο την γεωγραφική επέκταση των κυψελών, όπου για οικονομικούς λόγους απαιτείται ένα πιο αραιό δίκτυο, χωρίς αύξηση της μεταδιδόμενης ισχύος, αλλά με την αντίστοιχη μείωση της χωρητικότητας [5]. Εναλλακτικά, η αυξημένη κατευθυντικότητα των SAs μπορεί να μεταφραστεί σε περιορισμένη κατανάλωση ισχύος από τον κινητό σταθμό, και επομένως στην επιμήκυνση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας του [5].

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των ευφύων κεραιών είναι η δυνατότητα καταστολής των πολυδιαδρομικών συνιστωσών. Αυτές είναι καθυστερημένες εκδοχές του κύριου σήματος που καταφθάνουν στο δέκτη από διαφορετικές γωνίες άφιξης με διαφορετικά πλάτη και φάσεις. Η υπέρθεση τους στο δέκτη οδηγεί συνήθως σε βαθιές διακυμάνσεις (διαλείψεις) του τελικού λαμβανομένου σήματος. Οι ευφυείς κεραιές μπορούν να τροποποιούν το διάγραμμα με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται μέγιστο κύριο λοβού στην επιθυμητή κατεύθυνση και μηδενισμοί σε άλλες, ώστε να απορρίπτονται οι ανεπιθύμητες συνιστώσες σκέδασης [4]. Έτσι, καθίσταται εφικτή η εξομάλυνση των διαλείψεων μικρής κλίμακας, με ορατές ευεργετικές συνέπειες στις διακυμάνσεις της ισχύος, την

διασυμβολική παρεμβολή, τις επιλεκτικές διαλείψεις, την διασπορά του φάσματος Doppler κλπ [4].

Τέλος, οι ευφυείς κεραιές προτείνονται στην ανίχνευση της γωνίας άφιξης του σήματος (Direction of Arrival – DoA) [1]. Η εύρεση της γωνίας άφιξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την βέλτιστη μορφοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας είτε για τον εντοπισμό της ασύρματης συσκευής [1]. Η πληροφορία για την θέση της ασύρματης συσκευής εφαρμόζεται σε διάφορες υπηρεσίες, όπως ο εντοπισμός των κλήσεων έκτακτης ανάγκης, ο εντοπισμός κλεμμένων τερματικών, οχημάτων και η κοστολόγηση με βάση την περιοχή πραγματοποίησης μιας κλήσης.

Στα μειονεκτήματα τώρα των ευφύων κεραιών συγκαταλέγονται το αυξημένο κόστος ανάπτυξης και χρήσης λόγω των ακριβών ισχυρών επεξεργαστών σήματος στο κύκλωμα υποστήριξης τους (ειδικότερα στις AAs), η πολυπλοκότητα στην επεξεργασία του σήματος που αυξάνει το υπολογιστικό φορτίο (computational load) και το αυξημένο φυσικό μέγεθος τους. Για να έχει μια ευφυής κεραιά λογικό κέρδος, χρειάζεται μια στοιχειοκεραία με αρκετά στοιχεία. Για τα εξωτερικά περιβάλλοντα χρησιμοποιούνται συστοιχίες που αποτελούνται από έξι ως δέκα στοιχεία. Η απαραίτητη απόσταση των στοιχείων είναι της τάξης του μισού μήκους κύματος, οπότε προκύπτει ένα θέμα διαθεσιμότητας χώρου. Η πολυπλοκότητα μάλιστα της ευφούς κεραιάς είναι μια μεγάλη πρόκληση καθώς οι πιο προηγμένες υλοποιήσεις περιλαμβάνουν ταυτόχρονη μεγιστοποίηση του χρήσιμου σήματος και μηδενισμό των πηγών παρεμβολής. Επιπροσθέτως η μορφοποίηση διαγράμματος 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 πραγματοποίηση αυτού σε πραγματικό χρόνο είναι μια μεγάλη πρόκληση. Τέλος, σημαντικό θέμα αποτελεί η ενσωμάτωση των αλγορίθμων και των νέων δυνατοτήτων των ευφύων κεραιών στα πρότυπα τηλεπικοινωνιών.

### 3.1.3 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Οι κεραιές ελεγχόμενες από φάση και οι προσαρμοστικές κεραιές έχουν σαν βασική ιδιότητα της λειτουργίας τους όπως αναφέρθηκε προηγουμένως την ψηφιακή μορφοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας. Αποτελούνται από στοιχεία χαμηλού κέρδους, τα οποία συνδέονται και σχηματίζουν ένα δίκτυο που επεξεργάζεται κατάλληλα τα εκπεμπόμενα ή τα λαμβανόμενα σήματα. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται ένας δέκτης γραμμικής στοιχειοκεραίας  $M$  ισαπεχόντων στοιχείων και επεξηγούνται οι γεωμετρικοί συμβολισμοί που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω. Ας υποθεθεί ότι προσπίπτει στη διάταξη ένα επίπεδο κύμα από την κατεύθυνση  $(\theta, \varphi)$ . Έστω  $s(t)$  η μιγαδική περιβάλλουσα βασικής ζώνης του σήματος. Κάθε κλάδος της διάταξης έχει έναν συντελεστή βάρους  $w_m$ , που εν γένει μεταβάλλεται και κατά πλάτος και κατά φάση. Το σήμα που λαμβάνει κάθε στοιχείο  $m$  της στοιχειοκεραίας είναι :

$$x_m(t) = A s(t) e^{-j\beta(m-1)\Delta x \cos \varphi \sin \theta}, \quad (3.1)$$

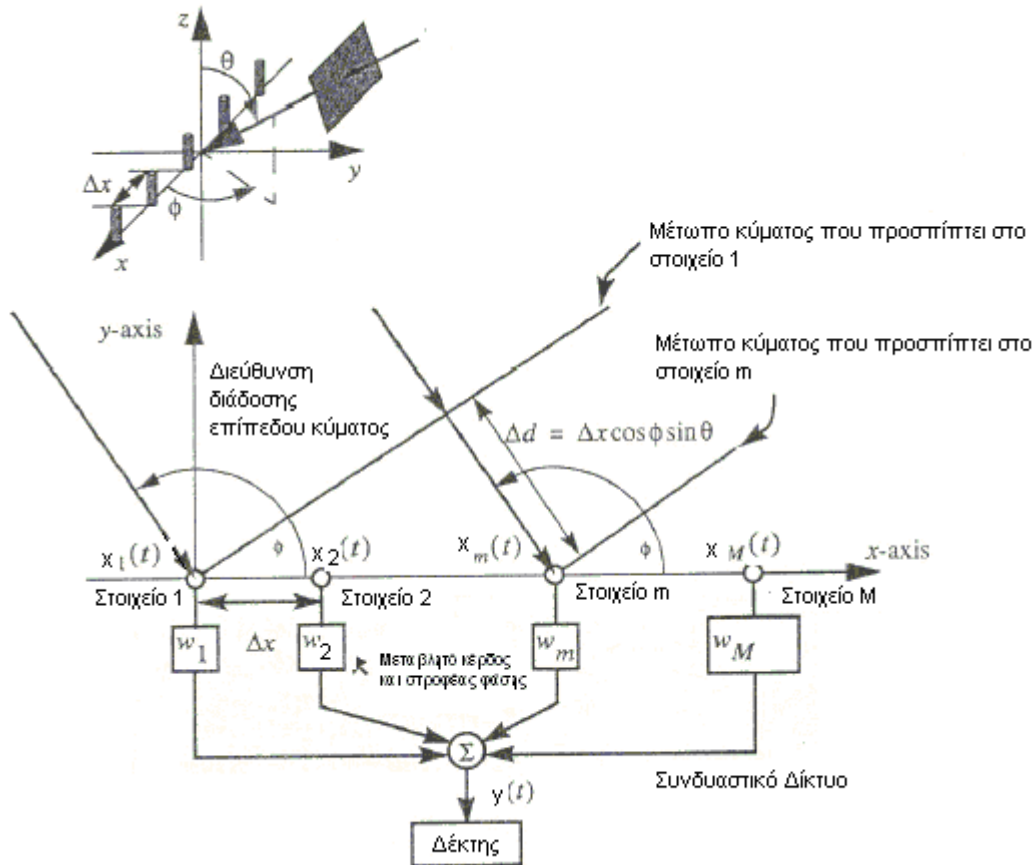
όπου  $A$  είναι μια τυχαία σταθερά κέρδους και  $\beta$  ο κυματαριθμός. Το σήμα στην έξοδο του αθροιστή είναι

$$y(t) = \sum_{m=1}^M w_m x_m(t) = A s(t) \sum_{m=1}^M w_m e^{-j\beta(m-1)\Delta x \cos \varphi \sin \theta} = A s(t) f(\theta, \varphi) \quad (3.2)$$

Ο όρος  $f(\theta, \varphi)$  ονομάζεται παράγοντας διάταξης. Προσαρμόζοντας τα σεν των βαρών καθίσταται εφικτή η στροφή του μέγιστου του κυρίου λοβού του παράγοντα διάταξης

προς οποιαδήποτε επιθυμητή κατεύθυνση. Αν λόγω χάρη η ζητούμενη κατεύθυνση ήταν  $(90^\circ, \varphi_0)$ , η κατάλληλη τιμή για τα βάρη είναι :

$$w_m = e^{j\beta(m-1)\Delta x \cos \varphi_0} \quad (3.3)$$



Σχήμα 3.2: Προσαρμοστική γραμμική στοιχειοκεραία [1, σελ. 85].

Μέχρι τώρα έχει υιοθετηθεί η υπόθεση ότι τα στοιχεία που απαρτίζουν τη στοιχειοκεραία είναι ομοιοκατευθυντικά (omnidirectional) και ότι δεν υπάρχει αμοιβαία αλληλεπίδραση (coupling) μεταξύ τους. Αν κάθε στοιχείο έχει ένα διάγραμμα πεδίου  $g_a(\theta, \varphi)$ , τότε το συνολικό διάγραμμα πεδίου της διάταξης δίνεται από τον τύπο :

$$F(\vartheta, \varphi) = f(\theta, \varphi) g_a(\theta, \varphi) \quad (3.4)$$

Επιπλέον, όταν χρησιμοποιούνται διατάξεις στοιχειοκεραιών, είναι πολύ χρήσιμη η αναπαράσταση των μεγεθών σε διανύσματα. Το διάνυσμα των βαρών ορίζεται ως

$$w = [w_1 \dots w_M]^H, \quad (3.5)$$

όπου το σύμβολο H δηλώνει τον αναστροφосуζυγή πίνακα. Τα σήματα που επάγονται σε κάθε στοιχείο ομαδοποιούνται στο διάνυσμα δεδομένων

$$x = [x_1(t) \dots x_M(t)]^T \quad (3.6)$$

Τότε η έξοδος του αθροιστή εκφράζεται ως

$$y(t) = w^H x(t) \quad (3.7)$$

Ο παράγοντας διάταξης ισούται με :

$$f(\theta, \varphi) = \mathbf{w}^H a(\theta, \varphi), \quad (3.8)$$

όπου το διάνυσμα  $a(\theta, \varphi)$  ονομάζεται το steering vector στην κατεύθυνση  $(\theta, \varphi)$ . Το διάνυσμα αυτό περιγράφει τη φάση του σήματος σε κάθε στοιχείο σχετικά με τη φάση του σήματος στο στοιχείο αναφοράς (το στοιχείο 1). Ένα σετ από steering vectors υπολογισμένο για όλες τις τιμές των  $(\theta, \varphi)$  ονομάζεται array manifold [1].

### 3.1.4 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΔΕΣΜΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (FIXED BEAMFORMING NETWORKS)

Ας υποθεθεί πως μια γραμμική στοιχειοκεραία συνδέεται με μια πηγή σήματος (ή έναν δέκτη). Όπως προειπώθηκε, το αποτέλεσμα θα είναι ένας κύριος λοβός σε μια συγκεκριμένη γωνία και μηδενισμοί στις υπόλοιπες διευθύνσεις. Επομένως, για να παραχθούν πολλαπλές δέσμες ακτινοβολίας, χρειάζεται να συνδεθεί η κεραιοδιάταξη σε πολλαπλές πηγές σήματος (ή πολλαπλούς δέκτες αντίστοιχα). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του διαμορφωτή δέσμης (beamformer), που απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Σε έναν  $M \times M$  διαμορφωτή δέσμης,  $M$  θύρες εισόδου συνδέονται σε  $M$  κεραίες και  $M$  θύρες εξόδου συνδέονται στις πηγές σήματος (ή στους δέκτες). Η παρουσία ενός σήματος σε κάθε πύλη εξόδου θα επάγει μια διαφορά φάσης μεταξύ γειτονικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας και επομένως των γειτονικών πυλών εισόδου, καταλήγοντας έτσι σε ένα διάγραμμα ακτινοβολίας με κύριο λοβό και μηδενισμούς κατά μήκος συγκεκριμένων διευθύνσεων.

Όταν τώρα, διαφορετικά σήματα εφαρμοστούν σε όλες τις θύρες εξόδου, τα αντίστοιχα διαγράμματα ακτινοβολίας θα παραχθούν, η υπέρθεση των οποίων καταλήγει σε πολλαπλές ταυτόχρονες δέσμες ακτινοβολίας σε διαφορετικές διευθύνσεις [6]. Όταν το μέγιστο ενός διαγράμματος εμφανίζεται σε θέση μηδενισμών των υπόλοιπων διαγραμμάτων, ο διαμορφωτής δεσμών ακτινοβολίας ονομάζεται ορθογωνικός. Σημειώνεται ότι ένας  $M \times M$  beamformer παράγει  $M$  δέσμες. Σε ένας συμμετρικό beamformer παράγονται  $M/2$  δέσμες σε κάθε πλευρά του μετώπου της διάταξης, ενώ σε έναν ασύμμετρο παράγονται μια μετωπική δέσμη,  $M/2-1$  δέσμες στη μια πλευρά του μετώπου της διάταξης και  $M/2$  στην άλλη. Η διαφορά φάσης μεταξύ των γειτονικών στοιχείων είναι

$$\beta_b = (b\pi / M)(2 - 1/|b|), \quad \text{όπου } b = -M/2, \dots, 1, \dots, M/2 \quad (3.9)$$

για συμμετρικό beamformer και

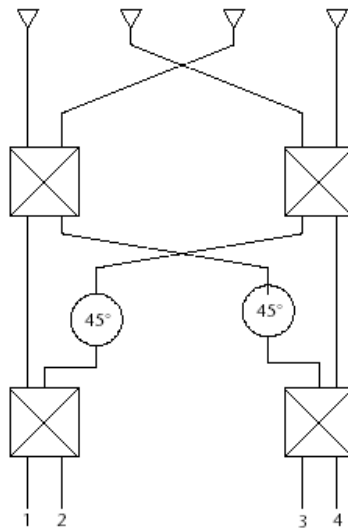
$$\beta_b = (2b\pi / M), \quad \text{όπου } |b| \leq M/2 \quad (3.10)$$

για ασύμμετρο beamformer. Αν επιπλέον υποθεθεί ότι οι κεραίες απέχουν  $\lambda/2$  μεταξύ τους, τότε η γωνία από τον άξονα της συστοιχίας προς την οποία δείχνει η  $b$ -οστή δέσμη είναι:

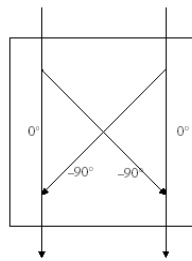
$$\mathcal{G}_b = \cos^{-1} \left( \frac{\beta_b}{\pi} \right) \quad (3.11)$$

Ο Πίνακας Butler είναι το πιο διαδεδομένο δίκτυο διαμόρφωσης σταθερών δεσμών, το οποίο σε συμβατική μορφή, είναι ικανό να παράγει  $M$  δέσμες, όπου  $M$  είναι μια ακέραια δύναμη του 2. Χρησιμοποιεί παθητικούς υβριδικούς διαιρέτες ισχύος και σταθερούς στροφείς φάσης για να πετύχει τις επιθυμητές προοδευτικές ολισθήσεις φάσεως μεταξύ των γειτονικών στοιχείων της διάταξης που είναι απαραίτητες για τη δημιουργία ταυτόχρονων πολλαπλών δεσμών ακτινοβολίας [7- 9]. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται ένα τέτοιο σύστημα που παράγει 4 ορθογωνικές δέσμες. Οι διαιρέτες ισχύος έχουν εξόδους ίσες σε ισχύ, αλλά με διαφορά φάσης  $90^\circ$ ,

όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Έτσι, από το Σχήμα 3.3 διαπιστώνεται πως αν σε κάθε θύρα εξόδου εφαρμοστεί ένα σήμα  $e^{j\theta}$ , οι φάσεις στα στοιχεία είναι αυτές που δίνονται στον Πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.3: 4x4 Πίνακας Butler.



Σχήμα 3.4: Υβριδικός Διαιρέτης.

Πίνακας 3.1  
Φάσεις στα στοιχεία ενός 4x4 Butler Matrix [6, σελ. 108]

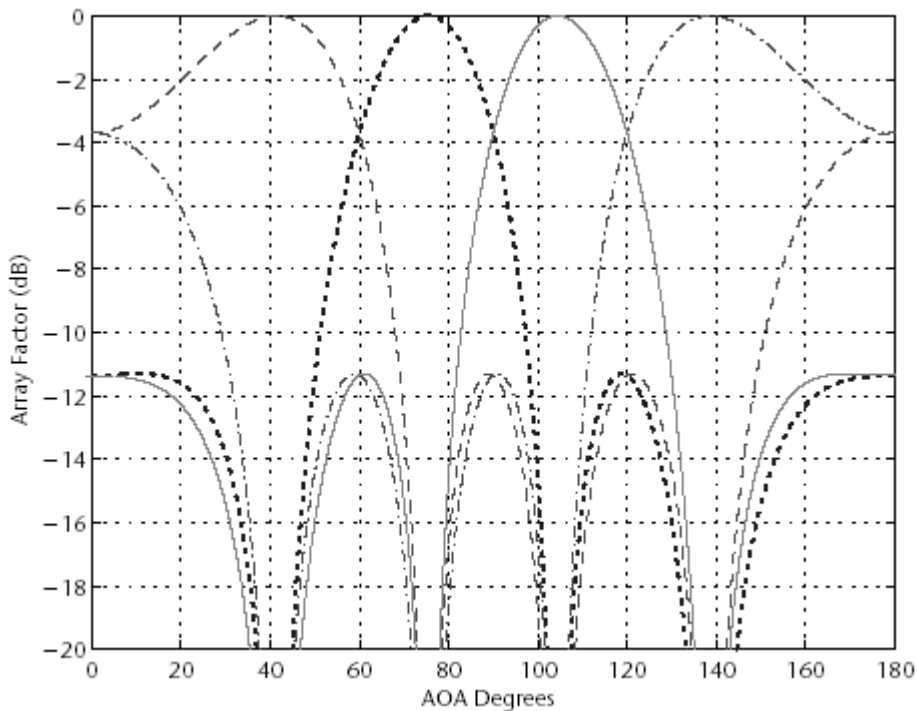
		Input Port			
Output Port		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
P <sub>1</sub>		0°	-45°	-90°	-135°
P <sub>2</sub>		-90°	45°	-180°	-45°
P <sub>3</sub>		-45°	-180°	45°	-90°
P <sub>4</sub>		-135°	-90°	-45°	0°

Για έναν συμμετρικό διαμορφωτή δεσμών, οι θέσεις των δεσμών και οι αντίστοιχες φάσεις των στοιχείων δίνονται από τον κάτωθι πίνακα.

Πίνακας 3.2  
Θέσεις δεσμών ενός 4x4 Butler Matrix [6, σελ. 108]

Beam Index $b$	Phase Shift $\beta_b$	Beam Location $\theta_b$
-2	-135°	138.6°
-1	-45°	104.5°
1	45°	75.6°
2	135°	41.4°

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας αυτού του συστήματος.



Σχήμα 3.5: Διαγράμματα ακτινοβολίας ενός 4x4 Butler Matrix Beamformer [6, σελ. 109].

Σε έναν ορθογωνικό διαμορφωτή δεσμών, η θέση μεγίστου για μια δέσμη συμπίπτει με θέσεις μηδενισμού για τις υπόλοιπες δέσμες. Στο παράδειγμα που αναπτύχθηκε προηγουμένως, αν τροφοδοτείται μόνο η θύρα 1 και οι υπόλοιπες είναι τερματισμένες, θα διαμορφωθεί ένα διάγραμμα ακτινοβολίας με το μέγιστο του κυρίου λοβού να βρίσκεται σε γωνία 104.5° και με μηδενισμούς στις γωνίες 41.4°, 75.6° και 138.6°. Ομοίως τώρα αν το σύστημα λειτουργούσε ως δέκτης και προσέπιπτε επίπεδο κύμα από γωνία 104.5°, τότε σήμα θα εμφανιζόταν μόνο στη θύρα 1. Ακόμα και αν όλα τα σήματα μεταφέρονταν από τις θύρες εισόδου στις θύρες εξόδου, το σήμα που προέρχεται από το επίπεδο κύμα που προσπίπτει σε έναν λοβό εμφανίζεται μόνο στην αντίστοιχη θύρα εξόδου.

### 3.1.5 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΜΕ ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΕΣ ΔΕΣΜΩΝ (SPATIAL FILTERING WITH BEAMFORMERS)

Ας υποθεθεί πως υπάρχουν τέσσερις πηγές σήματος στο χώρο,  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$ ,  $s_3(t)$  και  $s_4(t)$ , τοποθετημένες κατά μήκος των διευθύνσεων των κυρίων λοβών ενός 4x4 διαμορφωτή δεσμών και  $L$  παρεμβάλλουσες πηγές  $I_l(t)$  σε τυχαίες γωνίες  $\theta_l$ .

Έστω  $G_i$  οι συναρτήσεις μεταφοράς μεταξύ των σημάτων των πηγών που βρίσκονται στα μέγιστα των κύριων λοβών και των αντίστοιχων θυρών εξόδου και  $G_{li}$  η συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ της παρεμβάλλουσας πηγής  $l$  και της θύρας εξόδου  $i$ . Ας υποθεθεί ακόμα ότι όλα τα σήματα είναι ασυσχέτιστα. Το σήμα που προκύπτει στη θύρα εξόδου  $i$  θα είναι :

$$y_i(t) = s_i(t)G_i + \sum_{l=1}^L I_l(t)G_{li}(\theta_l) \quad (3.12)$$

Και επειδή τα σήματα είναι ασυσχέτιστα, η αντίστοιχη ισχύς εκφράζεται ως :

$$|y_i(t)|^2 = |s_i(t)|^2 |G_i|^2 + \sum_{l=1}^L |I_l(t)|^2 |G_{li}(\theta_l)|^2 \quad (3.13)$$

Ας υποθεθεί τώρα ότι υπάρχουν  $L$  σήματα σε τυχαίες γωνίες που αναπαρίστανται από το διάνυσμα  $s(t) = [s_1(t) \dots s_L(t)]^T$ . Έστω ότι υπάρχει ένας  $M \times M$  διαμορφωτής δεσμών, οπότε τα σήματα που επάγονται στα  $M$  στοιχεία της κεραίας δηλώνονται από το διάνυσμα  $x(t) = [x_1(t) \dots x_M(t)]^T$ . Τα σήματα από τις θύρες εισόδου θα μεταφερθούν στις θύρες εξόδου τροποποιημένα από τις συναρτήσεις μεταφοράς μεταξύ των θυρών εισόδου και εξόδου. Έστω  $T$  ο πίνακας που εκφράζει τις συναρτήσεις μεταφοράς :

$$T = [w_1 \dots w_M]^H \quad (3.14)$$

Όταν τα βάρη ή οι συναρτήσεις είναι σταθερές ποσότητες, η περίπτωση αυτή αναφέρεται ως διαμόρφωση σταθερών δεσμών ακτινοβολίας (fixed beamforming). Η έξοδος του συστήματος είναι [6, 9]

$$y(t) = T^H x(t) \quad (3.15)$$

Αφού τα σήματα από τις κεραίες μεταφέρονται στις θύρες εξόδου, ένα σχήμα πρέπει να αναπτυχθεί για την εξαγωγή του επιθυμητού σήματος και την αντιμετώπιση των παρεμβολών (περιορισμός των παρεμβαλλόντων σημάτων ή ακόμα και καταστολή αυτών). Με αυτό το είδος διαμόρφωσης σταθερών δεσμών ακτινοβολίας, υπάρχουν δύο γενικές προσεγγίσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν: τα συστήματα στρεφόμενης δέσμης (switched beam systems) και τα συστήματα πολλαπλών σταθερών δεσμών ακτινοβολίας (multiple fixed beam systems).

### 3.1.6 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗΣ ΔΕΣΜΗΣ (SWITCHED BEAM SYSTEMS)

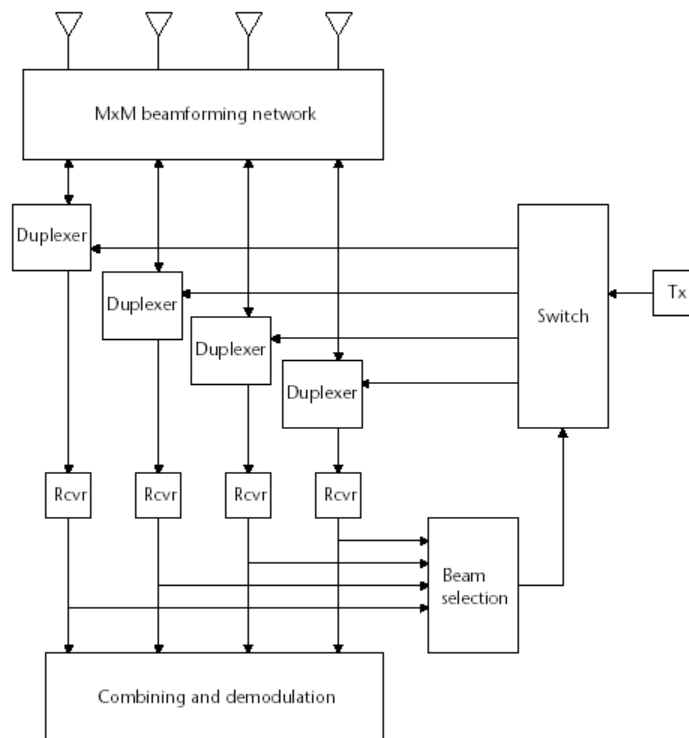
Σε μία τέτοια προσέγγιση, η κάλυψη του τομέα μιας κυψέλης επιτυγχάνεται από πολλαπλά προκαθορισμένα σταθερά διαγράμματα δέσμης με το μέγιστο του διαγράμματος στο κέντρο της δέσμης [1, 6]. Όταν ένας κινητός χρήστης βρίσκεται στην εγγύτητα μιας δέσμης, τα σήματα στις θύρες εξόδου δίνονται από την (3.12). Αυτό διευκολύνει το σύστημα στρεφόμενης δέσμης να συλλέγει το σήμα από τη θύρα εξόδου εκείνη που αντιστοιχεί στη δέσμη [10, 11]. Καθώς ο χρήστης μετακινείται κατά τη διάρκεια της κλήσης και πλησιάζει σε περιοχή άλλης δέσμης, το σύστημα παρακολουθεί τη στάθμη του σήματος και πράττει μεταγωγή σε άλλες θύρες εξόδου σύμφωνα με τις ανάλογες απαιτήσεις. Η αρχιτεκτονική αυτού του συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος [6] είναι :

- Χαμηλή πολυπλοκότητα και μικρό κόστος. Αφού τα συστήματα αυτά απαιτούν ένα μόνο δίκτυο σταθερών δεσμών, RF διακόπτες και απλή λογική ελέγχου, η υλοποίηση τους είναι εύκολη και φτηνή.
- Μέτρια αλληλεπίδραση με τους δέκτες του σταθμού βάσης. Στην πράξη, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί εύκολα να αντικαταστήσει τις συμβατικές κεραιές τομέα κυψέλης χωρίς να απαιτούνται σημαντικές τροποποιήσεις στη διεπαφή της κεραιάς με το περιβάλλον ή στους αλγορίθμους βασικής ζώνης που εφαρμόζονται στο δέκτη.
- Εξάπλωση της κάλυψης λόγω του αυξημένου κέρδους της κεραιοδιάταξης.

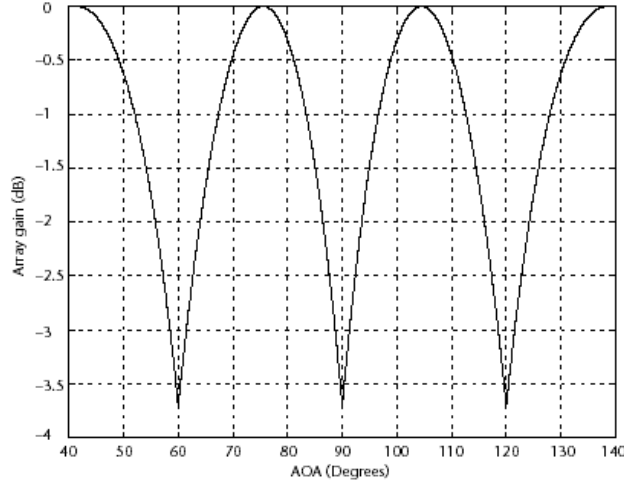
Τα μειονεκτήματα αυτού του συστήματος [6] είναι :

- Αδυναμία αντιμετώπισης των παρεμβαλλόντων σημάτων και των πολυδιαδρομικών συνιστωσών που καταφθάνουν από γωνία πολύ κοντά σε εκείνη του επιθυμητού σήματος. Σε αυτήν την περίπτωση, τα σήματα αυτά εμφανίζονται στην ίδια θύρα εξόδου με το επιθυμητό σήμα και καθίσταται πολύ δύσκολος ο διαχωρισμός τους.
- Από το Σχήμα 3.5 βλέπουμε την πτώση του κέρδους καθώς ο κινούμενος χρήστης απομακρύνεται από το μέγιστο ενός λοβού και φτάνει στο σημείο τομής δύο λοβών κατά 3.9 dB (scalloping). Για λόγους ευκρίνειας παρατίθεται το Σχήμα 3.7. Η στάθμη του σήματος διακυμαίνεται κατά αυτήν την τιμή καθώς ο χρήστης κινείται μεταξύ των περιοχών κάλυψης από διαφορετικές δέσμες.
- Έλλειψη διαφορισιμότητας (diversity). Καθώς το σύστημα επιλέγει το επιθυμητό σήμα από μια θύρα εξόδου, δεν μπορεί να το συνδυάσει με πολυδιαδρομικές συνιστώσες που προσπίπτουν σε άλλες δέσμες, οι οποίες με τη σειρά τους αντιστοιχούν σε άλλες θύρες εξόδου.



Σχήμα 3.6: Αρχιτεκτονική συστήματος στρεφόμενης δέσμης [6, σελ. 112].





Σχήμα 3.7: Scalping [6, σελ. 114].

### 3.1.7 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΔΕΣΜΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (MULTIPLE FIXED BEAM SYSTEMS)

Στα συστήματα πολλαπλών σταθερών δεσμών ακτινοβολίας, αντί να επιλέγεται το σήμα από μια συγκεκριμένη θύρα, συνδυάζονται τα σήματα από όλες τις θύρες, αξιοποιώντας τη διαφορισμότητα μονοπατιού (path diversity). Αυτή η προσέγγιση μπορεί να επιτύχει καλύτερη επίδοση αφού ενισχύει την ανίχνευση λαμβανομένου σήματος στην άνω ζεύξη κάνοντας χρήση των σημάτων από όλα τα διαθέσιμα μονοπάτια στις δέσμες ακολουθούμενα μετά από μια τεχνική διαφορισμότητας-συνδυαστικότητας. Στην κάτω ζεύξη, η δέσμη που λαμβάνει την περισσότερη ισχύ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετάδοση προς τον επιθυμητό κινητό χρήστη.

### 3.1.8 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ (ADAPTIVE ARRAYS SYSTEMS)

Αυξάνοντας τη πολυπλοκότητα της επεξεργασίας του σήματος, είναι δυνατό να επιτύχουμε μεγαλύτερες βελτιώσεις στην απόδοση από αυτές που μπορούν να αποκτηθούν χρησιμοποιώντας συστήματα στρεφόμενης δέσμης. Στο σημείο αυτό θα ακολουθήσει μια γενική περιγραφή των συστημάτων προσαρμοστικών κεραιών και των κυριότερων τεχνικών διαμόρφωσης δέσμης ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται σε αυτά, κατά κύριο λόγο όπως αυτά αναπτύσσονται στο [12].

Το Σχήμα 3.8 παρουσιάζει μια τυπική προσαρμοστική στοιχειοκεραία. Ένα επιθυμητό σήμα καταφθάνει από τη γωνία  $\theta_0$ , ενώ  $N$  παρεμβάλλοντα σήματα από τις γωνίες  $\theta_1 \dots \theta_N$ . Το σήμα και τα παρεμβάλλοντα σήματα λαμβάνονται από μια στοιχειοκεραία  $M$  στοιχείων με  $M$  πιθανούς συντελεστές βάρους. Κάθε λαμβανόμενο σήμα στο στοιχείο  $m$  περιλαμβάνει και θόρυβο Gauss. Ο χρόνος αναπαρίσταται με την  $k$ -οστή χρονική δειγματοληψία. Η έξοδος του συστήματος είναι

$$y(k) = \overline{w}^H x(k) \quad (3.16)$$

όπου

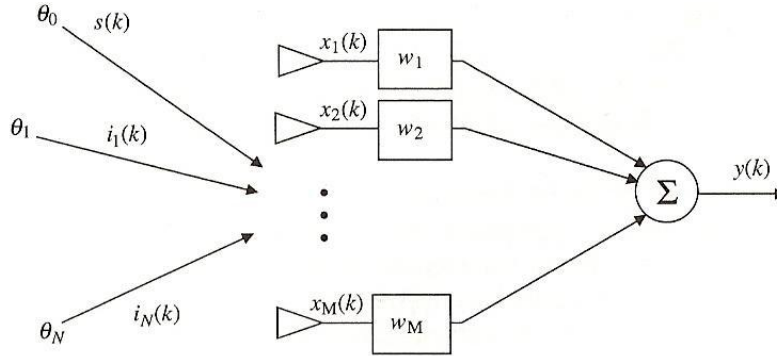
$$\overline{x}(k) = \overline{a}_o s(k) + [\overline{a}_1 \dots \overline{a}_N] \cdot [i_1(k) \dots i_N(k)]^T + \overline{n}(k) = \overline{x}_s(k) + \overline{x}_i(k) + \overline{n}(k) \quad (3.17)$$

με  $w = [w_1 \dots w_M]^H$  το διάνυσμα των βαρών,  $\overline{x}_s(k)$  το διάνυσμα του επιθυμητού σήματος,  $\overline{x}_i(k)$  το διάνυσμα των παρεμβαλλόντων σημάτων,  $\overline{n}(k)$  ο μηδενικής μέσης

τιμής θόρυβος Gauss σε κάθε κανάλι και  $\bar{a}_i$  το steering vector για την  $\theta_i$  διεύθυνση άφιξης. Η σχέση (3.16) ξαναγράφεται ως

$$y(k) = \bar{w}^H \cdot [\bar{x}_s(k) + \bar{u}(k)] \quad (3.18)$$

όπου  $\bar{u}(k) = \bar{x}_i(k) + \bar{n}(k)$  το συνολικό ανεπιθύμητο σήμα.



Σχήμα 3.8: Προσαρμοστική στοιχειοκεραία με επιθυμητό σήμα και παρεμβολείς [12, σελ. 215].

Υποτίθεται αρχικά ότι όλα τα εισερχόμενα σήματα είναι στενής ζώνης και ότι ο αριθμός τους  $N+1 \leq M$ . Είναι κατανοητό ότι τα αφικνούμενα σήματα είναι χρονομεταβλητά και οι υπολογισμοί βασίζονται μέχρι το  $k$ -οστό χρονοστιγμιότυπο του εισερχομένου σήματος. Προφανώς, αν οι εκπομποί κινούνται, μεταβάλλονται οι αντίστοιχες γωνίες άφιξης και επομένως ο πίνακας των steering vectors αλλάζει με το χρόνο. Σε αυτό το σημείο υποθέτουμε πως οι εκπομποί δεν αλλάζουν θέση και έτσι μπορεί να παραλειφθεί στις σχέσεις (3.16)- (3.18) η εξάρτηση από το χρόνο.

Η μέση ισχύς στην έξοδο είναι [12]

$$P = E \left[ \left| \bar{w}^H \cdot \bar{x} \right|^2 \right] = \bar{w}^H \cdot \bar{R}_{xx} \cdot \bar{w} \quad (3.19)$$

όπου  $\bar{R}_{xx} = E \left[ \bar{x} \cdot \bar{x}^H \right]$  ο πίνακας συσχέτισης όλων των σημάτων. Η ισχύς στην έξοδο για το επιθυμητό σήμα είναι

$$\sigma_s^2 = E \left[ \left| \bar{w}^H \cdot \bar{x}_s \right|^2 \right] = \bar{w}^H \cdot \bar{R}_{ss} \cdot \bar{w} \quad (3.20)$$

όπου  $\bar{R}_{ss} = E \left[ \bar{x}_s \cdot \bar{x}_s^H \right]$  πίνακας συσχέτισης του επιθυμητού σήματος. Η ισχύς για τα ανεπιθύμητα σήματα είναι

$$\sigma_u^2 = E \left[ \left| \bar{w}^H \cdot \bar{u} \right|^2 \right] = \bar{w}^H \cdot \bar{R}_{uu} \cdot \bar{w} \quad (3.21)$$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι [12]

$$\bar{R}_{xx} = \bar{R}_{ss} + \bar{R}_{uu} \quad (3.22)$$

και

$$\bar{R}_{uu} = \bar{R}_{ii} + \bar{R}_{nn} \quad (3.23)$$

όπου  $\bar{R}_{ii}$  ο πίνακας συσχέτισης για τους παρεμβολείς και  $\bar{R}_{nn}$  ο πίνακας συσχέτισης για το θόρυβο.

Ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις, διαμορφώνεται κατάλληλα το διάνυσμα βαρών και προκύπτει το βέλτιστο διάγραμμα λήψης. Οι δημοφιλέστερες μέθοδοι που εφαρμόζονται εκτεταμένα στα επικοινωνιακά συστήματα είναι [12] :

- Τοποθέτηση μηδενικών στις κατευθύνσεις των παρεμβολέων (Null Steering Beamforming). Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας έτσι το διάνυσμα βαρών ώστε μια δέσμη με μοναδιαίο κέρδος να δημιουργηθεί προς την κατεύθυνση άφιξης του επιθυμητού σήματος, ενώ μηδενισμοί δημιουργούνται στις κατευθύνσεις άφιξης των ανεπιθύμητων σημάτων. Έστω ότι υπάρχουν  $M - 1$  παρεμβολείς. Το κατάλληλο διάνυσμα βαρών προκύπτει

$$\bar{\mathbf{w}}^H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \dots 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{a}}_0 & \bar{\mathbf{a}}_1 \dots \bar{\mathbf{a}}_{M-1} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.24)$$

όπου  $\bar{\mathbf{a}}_0$  το steering vector που συνδέεται με το επιθυμητό σήμα και  $\bar{\mathbf{a}}_1 \dots \bar{\mathbf{a}}_{M-1}$  τα steering vectors που συνδέονται με τους παρεμβολείς. Ένα μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι απαιτείται η γνώση των διευθύνσεων άφιξης όλων των ανεπιθύμητων σημάτων. Επιπλέον, δε καταλήγει πάντα στο μέγιστο σηματοθορυβικό λόγο στην έξοδο. Αυτή η μέθοδος προϋποθέτει πως ο πίνακας των steering vectors είναι ένας  $M \times M$  αντιστρέψιμος πίνακας. Στην περίπτωση που ο αριθμός των παρεμβολέων είναι μικρότερος από  $M - 1$ , μια εκτίμηση των βαρών δίνεται από το [13]. Όμως, αυτή η τροποποίηση απαιτεί και την εισαγωγή θορύβου στο σύστημα, για να εξασφαλιστεί η αντιστροφή πίνακα. Τα βάρη είναι

$$\bar{\mathbf{w}}^H = \bar{\mathbf{u}}_1^T \cdot \mathbf{A}^H (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^H + \sigma_n^2 \cdot \mathbf{I})^{-1} \quad (3.25)$$

όπου  $\mathbf{A}$  ο πίνακας των steering vectors και  $\bar{\mathbf{u}}_1^T$  το καρτεσιανό διάνυσμα βάσης του οποίου το μήκος είναι ίσο με το συνολικό αριθμό των πηγών.

- Μεγιστοποίηση του λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο ( Maximum Signal-to-Interference and Noise Ratio). Ο λόγος αυτός προκύπτει διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (3.20) και (3.21)

$$SINR = \frac{\bar{\mathbf{w}}^H \cdot \bar{\mathbf{R}}_{ss} \cdot \bar{\mathbf{w}}}{\bar{\mathbf{w}}^H \cdot \bar{\mathbf{R}}_{uu} \cdot \bar{\mathbf{w}}} \quad (3.26)$$

Ο μέγιστος  $SINR$  ισοδυναμεί με τη μεγαλύτερη ιδιοτιμή του πίνακα  $\bar{\mathbf{R}}_{uu}^{-1} \cdot \bar{\mathbf{R}}_{ss}$ . Το ιδιοδιάνυσμα που συνδέεται με αυτήν την ιδιοτιμή είναι και το βέλτιστο διάνυσμα βαρών.

- Μέγιστη Πιθανοφάνεια (Maximum Likelihood, ML). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι υπάρχει ένα άγνωστο επιθυμητό σήμα με γνωστή διεύθυνση άφιξης ( $\bar{\mathbf{a}}_0$  το αντίστοιχο steering vector) και ότι το ανεπιθύμητο σήμα  $\bar{n}$  ακολουθεί κατανομή Gauss με μηδενική μέση τιμή. Ο σκοπός της μεθόδου είναι να καθορίσει μια συνάρτηση πιθανοφάνειας που θα μπορεί να δώσει μια εκτίμηση του επιθυμητού σήματος. Το διάνυσμα των βαρών προκύπτει

$$\bar{\mathbf{w}} = \frac{\bar{\mathbf{R}}_{uu}^{-1} \bar{\mathbf{a}}_0}{\bar{\mathbf{a}}_0^H \bar{\mathbf{R}}_{uu}^{-1} \bar{\mathbf{a}}_0} \quad (3.27)$$

- Ελαχιστοποίηση της Διασποράς. (Minimum Variance Distortionless Response, MVDR). Ο όρος *distortionless* (χωρίς παραμόρφωση) εννοεί ότι το επιθυμητό σήμα παραμένει απαραμόρφωτο μετά την εφαρμογή των βαρών. Ο στόχος αυτής της μεθόδου είναι να ελαχιστοποιήσει τη διασπορά του θορύβου εξόδου. Υποτίθεται πως το επιθυμητό σήμα και τα ανεπιθύμητα σήματα έχουν μηδενική μέση τιμή. Η έξοδος του συστήματος είναι

$$y = \overline{\mathbf{w}}^H \overline{\mathbf{a}}_0 s + \overline{\mathbf{w}}^H \overline{\mathbf{u}} \quad (3.28)$$

Επίσης υπάρχει και ο περιορισμός ότι

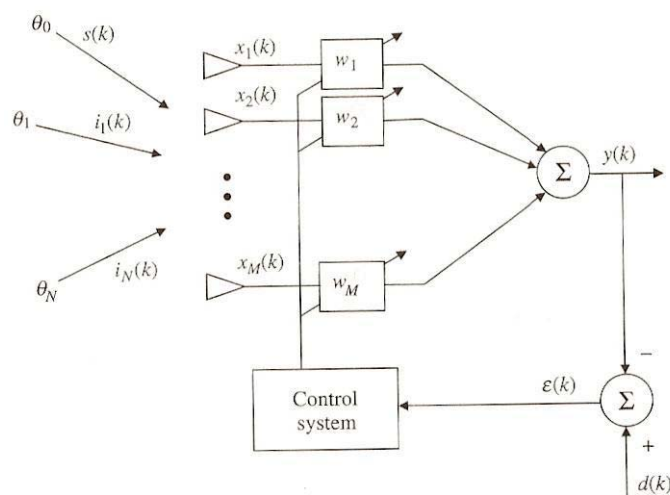
$$\overline{\mathbf{w}}^H \overline{\mathbf{a}}_0 = 1 \quad (3.29)$$

Για να ελαχιστοποιηθεί η διασπορά του  $y$ , προκύπτει μετά από πράξεις ότι το κατάλληλο διάνυσμα βαρών είναι το

$$\overline{\mathbf{w}} = \frac{\overline{\mathbf{R}}_{uu}^{-1} \overline{\mathbf{a}}_0}{\overline{\mathbf{a}}_0^H \overline{\mathbf{R}}_{uu}^{-1} \overline{\mathbf{a}}_0} \quad (3.30)$$

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτεί καμία γνώση για τις διευθύνσεις άφιξης των παρεμβαλλόντων σημάτων, παρά μόνο για αυτές των επιθυμητών σημάτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η MVDR λύση είναι όμοια στη μορφή με την ML. Η μόνη διαφορά είναι ότι η ML προσέγγιση απαιτεί από όλα τα ανεπιθύμητα σήματα που συνδυάζονται να έχουν μηδενική μέση τιμή και να ακολουθούν κατανομή Gauss. Όμως, με την MVDR προσέγγιση, το ανεπιθύμητο σήμα μπορεί να περιλαμβάνει παρεμβολείς που καταφθάνουν από ανεπιθύμητες γωνίες όπως και θόρυβο. Επομένως, η MVDR λύση είναι πιο γενικευμένη στην εφαρμογή της.

- Ελαχιστοποίηση Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Minimum Mean-Square Error, MMSE). Μια εναλλακτική μέθοδος για τη βελτιστοποίηση των βαρών βρίσκεται ελαχιστοποιώντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Το Σχήμα 3.8 πρέπει να τροποποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιεί το σφάλμα ενώ επαναλαμβάνονται τα βάρη. Η τροποποιημένη προσαρμοστική κεραιοδιάταξη φαίνεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: MMSE προσαρμοστικό σύστημα [12, σελ. 218].

Το σήμα  $d$  είναι το σήμα αναφοράς. Κατά προτίμηση είναι πανομοιότυπο ή υψηλά συσχετισμένο με το επιθυμητό σήμα και ασυσχέτιστο με τα ανεπιθύμητα σήματα. Το σφάλμα  $\varepsilon$  είναι το σήμα που δίνεται από τη σχέση

$$\varepsilon = d - \overline{\mathbf{w}}^H \overline{\mathbf{x}} \quad (3.31)$$

Με απλή άλγεβρα προκύπτει ότι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι

$$E\left[|\varepsilon|^2\right] = E\left[|d|^2\right] - 2\overline{\mathbf{w}}^H \overline{\mathbf{r}} + \overline{\mathbf{w}}^H \cdot \overline{\mathbf{R}}_{xx} \cdot \overline{\mathbf{w}} \quad (3.32)$$

όπου  $\overline{\mathbf{r}} = E[d^* \cdot \overline{\mathbf{x}}]$ , το διάνυσμα συσχέτισης. Το διάνυσμα βαρών που ελαχιστοποιεί την (3.32) είναι το

$$\overline{\mathbf{w}} = \overline{\mathbf{R}}_{xx}^{-1} \overline{\mathbf{r}} \quad (3.33)$$

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι απαιτείται γνώση του επιθυμητού σήματος ή ενός υψηλά συσχετισμένου αντιγράφου του για να χρησιμοποιηθεί ως σήμα αναφοράς.

Μέχρι τώρα υποτέθηκε πως τα σήματα καταφθάνουν από σταθερές γωνίες άφιξης. Αν όμως αυτές αλλάζουν, είναι απαραίτητα να βρεθούν τεχνικές βελτιστοποίησης που θα βρίσκουν τη βέλτιστη λύση σε πραγματικό χρόνο και θα προσαρμόζονται στη χρονικά μεταβαλλόμενη φύση του ραδιοδιαύλου. Οι τεχνικές αυτές επιτρέπουν κάθε χρονική στιγμή τον επανυπολογισμό των βαρών. Οι κυριότερες τεχνικές είναι [1, 6, 12] :

- Ελάχιστα Μέσα Τετράγωνα (Least Mean Squares, LMS). Πρόκειται για μια μέθοδο όμοια με την προαναφερθείσα MMSE, μόνο που τώρα υπάρχει εξάρτηση από τη χρονική στιγμή  $k$  και επομένως ισχύουν οι σχέσεις (3.31) – (3.33) με την προσθήκη της χρονικής εξάρτησης. Η σχέση (3.33) προϋποθέτει ότι γνωρίζουμε τα στατιστικά στοιχεία των σημάτων. Εν γένει όμως δεν είναι γνωστά τα στατιστικά χαρακτηριστικά των σημάτων και επομένως οι στιγμιαίες εκτιμήσεις για τον  $\overline{\mathbf{R}}_{xx}$  και το  $\overline{\mathbf{r}}$  είναι

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx}(k) \approx \overline{\mathbf{x}}(k) \overline{\mathbf{x}}^H(k) \quad (3.34)$$

$$\hat{\mathbf{r}}(k) \approx d^*(k) \overline{\mathbf{x}}(k) \quad (3.35)$$

Τα συνεχώς επαναπροσδιοριζόμενα βάρη δίνονται από τον επαναληπτικό αλγόριθμο

$$\overline{\mathbf{w}}(k+1) = \overline{\mathbf{w}}(k) - \mu \left[ \hat{\mathbf{R}}_{xx}(k) \overline{\mathbf{w}}(k) - \hat{\mathbf{r}}(k) \right] = \overline{\mathbf{w}}(k) + \mu \boldsymbol{\varepsilon}^*(k) \overline{\mathbf{x}}(k) \quad (3.36)$$

όπου  $\mu$  είναι η παράμετρος βήματος που καθορίζει τη σύγκλιση. Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι απαιτούνται αρκετές επαναλήψεις του αλγορίθμου μέχρι να προκύψει ικανοποιητική σύγκλιση.

- Αντιστροφή Πίνακα Δειγμάτων (Sample Matrix Inversion, SMI). Ο πίνακας δειγμάτων είναι μια εκτίμηση χρονικού μέσου όρου του πίνακα συσχέτισης χρησιμοποιώντας  $K$  χρονικά δείγματα. Αν η τυχαία διαδικασία είναι εργοδική συσχέτιση, η εκτίμηση χρονικού μέσου όρου θα ισοδυναμεί με τον πραγματικό πίνακα συσχέτισης. Άρα, οι εκτιμήσεις για τον  $\overline{\mathbf{R}}_{xx}$  και το  $\overline{\mathbf{r}}$  είναι

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \overline{\mathbf{x}}(i) \overline{\mathbf{x}}^H(i) \quad (3.37)$$

$$\hat{\mathbf{r}}(k) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K d^*(i) \overline{\mathbf{x}}(i) \quad (3.38)$$

Αφού χρησιμοποιούμε ένα μπλοκ δεδομένων μήκους  $K$ , τα βάρη θα αναπροσαρμόζονται ανά μπλοκ. Έστω ο πίνακας  $\bar{X}_K(k)$  το  $k$ -οστό μπλοκ των διανυσμάτων  $\bar{x}$  περιέχει δεδομένα για  $K$  στιγμιότυπα. Άρα

$$\bar{X}_K(k) = \begin{bmatrix} x_1(1+kK) & x_1(2+kK) & \dots & x_1(K+kK) \\ x_2(1+kK) & x_2(2+kK) & & \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_M(1+kK) & & \dots & x_1(K+kK) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Το επιθυμητό διάνυσμα σήματος αναφοράς ορίζεται ως

$$\bar{d}(k) = [d(1+kK) \quad d(2+kK) \quad \dots \quad d(K+kK)]^T \quad (3.40)$$

Η εκτίμηση για τον πίνακα συσχέτισης προκύπτει τώρα

$$\hat{R}_{xx}(k) = \frac{1}{K} \bar{X}_K(k) \bar{X}_K(k)^H \quad (3.41)$$

ενώ το διάνυσμα συσχέτισης είναι

$$\hat{r}(k) = \frac{1}{K} \bar{X}_K(k) \bar{d}^*(k) \quad (3.42)$$

Με εφαρμογή των (3.41) και (3.42) στη (3.33) προκύπτει το βέλτιστο διάνυσμα βαρών που εφαρμόζεται για το  $k$ -οστό μπλοκ. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι ο αριθμός των στιγμιότυπων  $K$  είναι μικρότερος από το χρόνο που απαιτείται για τη σύγκλιση του αλγορίθμου LMS. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι αυξάνεται το υπολογιστικό φορτίο, καθώς απαιτείται ο υπολογισμός αντίστροφου μεγάλου μεγέθους πίνακα.

- Αναδρομικά Ελάχιστα Τετράγωνα (Recursive Least Squares, RLS). Αυτή η μέθοδος, που αποτελεί μια παραλλαγή της LMS, εκκινεί με μια εκτίμηση του αντίστροφου πίνακα συσχέτισης

$$\hat{R}_{xx}^{-1}(0) = \frac{1}{\delta} I \quad (3.43)$$

όπου  $\delta$  μια μικρή θετική σταθερά.

Τα βάρη ενημερώνονται χρησιμοποιώντας τον αναδρομικό αλγόριθμο

$$\bar{w}(k) = \bar{w}(k-1) + \hat{R}_{xx}^{-1}(k) \bar{x}(k) \mathcal{E}^* \quad (3.44)$$

ενώ η ενημέρωση για τον αντίστροφο του πίνακα συσχέτισης είναι

$$\hat{R}_{xx}^{-1}(k) = \frac{1}{a} \left( \hat{R}_{xx}^{-1}(k-1) - \frac{\hat{R}_{xx}^{-1}(k-1) \bar{x}(k) \bar{x}^H(k) \hat{R}_{xx}^{-1}(k-1)}{a + \bar{x}^H(k) \hat{R}_{xx}^{-1}(k-1) \bar{x}(k)} \right) \quad (3.45)$$

όπου  $a$  είναι ένας παράγοντας εξασθένησης μνήμης μεταξύ 0 και 1, που η χρήση του δηλώνει ότι δίνεται περισσότερη έμφαση στα πιο πρόσφατα δεδομένα. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου έναντι της SMI είναι ότι λόγω της αναδρομικής σχέσης (3.45) δεν απαιτείται η αντιστροφή ενός μεγάλου πίνακα συσχέτισης, καθώς μπορεί να προκύψει απευθείας από προηγούμενες τιμές. Επιπλέον, η RLS μέθοδος συγκλίνει γρηγορότερα από την LMS.

- Αλγόριθμος Σταθερής Περιβάλλουσας (Constant Modulus Algorithm, CMA). Οι τρεις προηγούμενοι προσαρμοστικοί αλγόριθμοι βασίζονται στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος ανάμεσα σε ένα σήμα αναφοράς και της

εξόδου της στοιχειοκεραίας. Το σήμα αναφοράς είναι συνήθως μια συμβολοακουλουθία εκπαίδευσης (training sequence) που χρησιμοποιείται για να εκπαιδεύσει την προσαρμοστική στοιχειοκεραία. Υπάρχουν όμως και άλλες τεχνικές που δε χρειάζονται σήμα αναφοράς, οι γνωστές ως blind adaptive techniques, που προσπαθούν να ανακατασκευάσουν μια γνωστή ιδιότητα στο λαμβανόμενο σήμα. Μια τέτοια προσέγγιση είναι η CM. Μερικές σύγχρονες τεχνικές διαμόρφωσης όπως η FM, η PSK, η FSK και η QAM παράγουν σήματα με σταθερό πλάτος. Υποθέτοντας ότι τα μεταδιδόμενα σήματα έχουν σταθερή περιβάλλουσα, θα πρέπει και η έξοδος της στοιχειοκεραίας να έχει σταθερή περιβάλλουσα. Κάτι τέτοιο όμως λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης δεν ισχύει. Ο CMA λοιπόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποκαταστήσει την έξοδο της στοιχειοκεραίας με μια σταθερή περιβάλλουσα. Μια συνάρτηση κόστους, που μετρά τη διακύμανση του πλάτους, ελαχιστοποιείται για να προσαρμόσει το διάνυσμα των βαρών. Επειδή τα συστήματα CDMA χρησιμοποιούν έλεγχο της ισχύος, η ισχύς για κάθε χρήστη προσαρμόζεται για να ικανοποιηθούν τα κριτήρια ποιότητας της εκάστοτε υπηρεσίας, ο αλγόριθμος αυτός δεν είναι κατάλληλος για σήματα CDMA. Η συνάρτηση κόστους είναι

$$J(k) = E \left[ \left| |y(k)|^p - |a|^p \right|^q \right] \quad (3.46)$$

όπου  $a$  είναι το επιθυμητό πλάτος του σήματος εξόδου και οι εκθέτες  $p$ ,  $q$  παίρνουν τιμές 1 ή 2. Ανάλογα με τις τιμές των εκθετών, προκύπτουν αλγόριθμοι με διαφορετική σύγκλιση και πολυπλοκότητα. Υπάρχουν αρκετά μειονεκτήματα σε αυτή την προσέγγιση, όπως ότι ο αλγόριθμος αυτός λαμβάνει το σήμα με την ισχυρότερη περιβάλλουσα, το οποίο όμως μπορεί να είναι και παρεμβολέας. Ένα άλλο θέμα είναι η αργή σύγκλιση του. Για την περίπτωση όπου  $p=1$ ,  $q=2$ , γνωστή και σαν μορφή 1-2, προκύπτει με επιθυμητό πλάτος  $a=1$

$$\bar{w}(k+1) = \bar{w}(k) - \mu \bar{x}(k) \varepsilon^*(k) \quad (3.47)$$

όπου  $\mu$  είναι η βηματική παράμετρος και

$$\varepsilon(k) = 2 \left( y(k) - \frac{y(k)}{|y(k)|} \right) \quad (3.48)$$

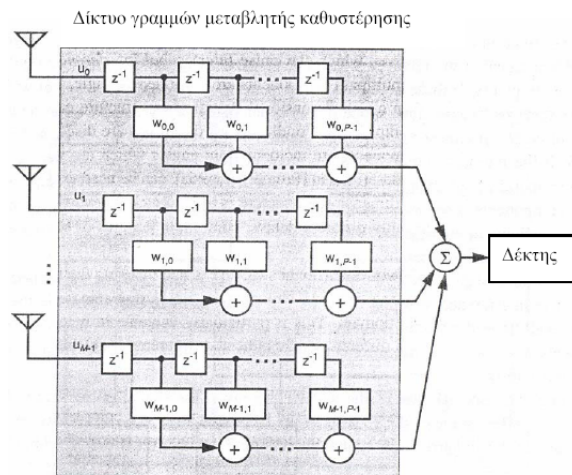
Συνδυασμοί του αλγορίθμου αυτού και της μεθόδου των Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Squares, LS) αποτελούν ο στατικός LS-CMA και ο δυναμικός LS-CMA [1, 12].

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά τις προαναφερθείσες τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης ακτινοβολίας αλλά και για άλλες (π.χ conjugate gradient method), εκτός από τα [1, 6, 12], μπορούν να αναζητηθούν στα [14, 15].

### **3.1.9 ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΕΣ ΕΥΦΥΕΙΣ ΚΕΡΑΙΕΣ (WIDEBAND SMART ANTENNAS) – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΧΩΡΟΧΡΟΝΟΥ**

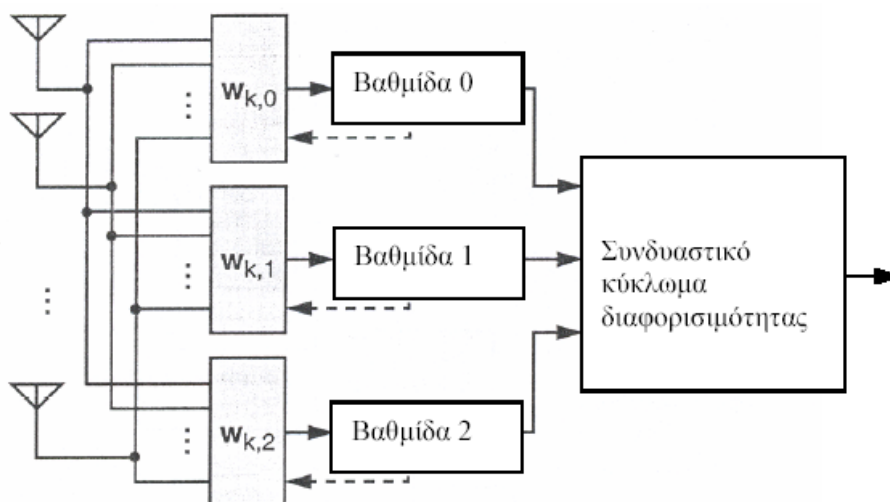
Η επεξεργασία στο πεδίο του χωροχρόνου (space-time processing) προσθέτει χρονική διαφορισμότητα (diversity) και μείωση της ομοδιαυλικής παρεμβολής σε συστήματα ευρείας ζώνης. Το πλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα space-time δεκτών είναι οι έξυπνες κεραίες ευρείας ζώνης (wideband smart antennas). Γενικά, οι

προσαρμοστικές κεραιές ευρείας ζώνης αποσκοπούν στην επίτευξη σταθερής απόκρισης της στοιχειοκεραίας σε όλο το εύρος συχνοτήτων (ισοστάθμιση ή equalization). Σε αντίθεση με τα συστήματα στενής ζώνης, στα συστήματα ευρείας ζώνης οι συχνοτικές συνιστώσες υφίστανται διαφορετική ολίσθηση φάσης, για την ίδια απόσταση διάδοσης του λαμβανόμενου σήματος, λόγω του διαφορετικού μήκους κύματος που αντιστοιχεί σε αυτές. Κατά συνέπεια, κάθε στοιχείο της στοιχειοκεραίας συνδέεται με γραμμή μεταβλητής καθυστέρησης (tapped-delay-line), με αποτέλεσμα το εκάστοτε στοιχείο να έχει απόκριση φάσης μεταβλητή με τη συχνότητα [1] (Σχήμα 3.10).



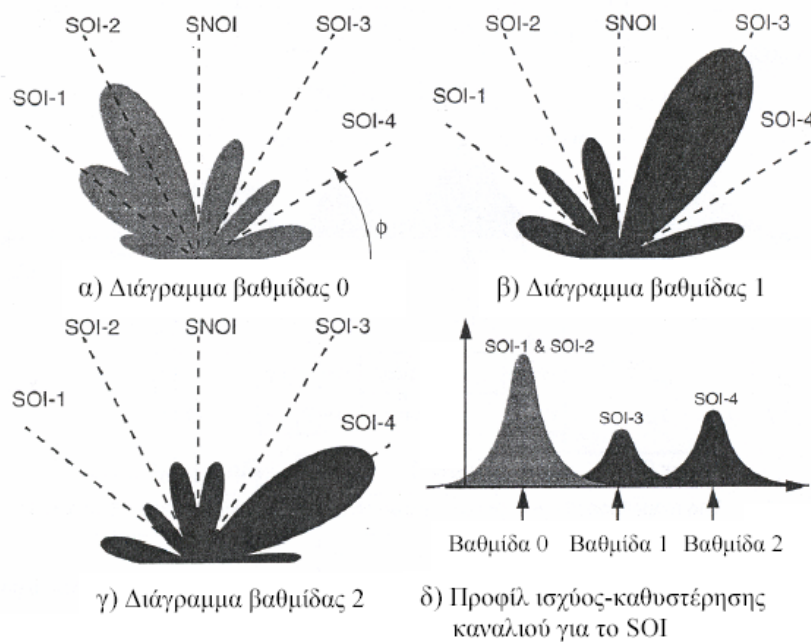
Σχήμα 3.10: Ευφυής κεραία ευρεία ζώνης [1, σελ. 101].

Μια σημαντική ειδική περίπτωση της wideband array είναι ο δέκτης RAKE, που χρησιμοποιείται σε WCDMA συστήματα (Σχήμα 3.11). Πρόκειται για μια προσαρμοστική κεραία ευρείας ζώνης, με κάποια από τα πλεονεκτήματα που αυτή συνεπάγεται, αλλά και πολυπλοκότητα που προσεγγίζει στοιχειοκεραία στενής ζώνης [1]. Σε αυτή τη δομή, κάθε βαθμίδα (RAKE finger) χρησιμοποιεί την προσαρμοστική κεραία (και επομένως κάθε βαθμίδα RAKE χρησιμοποιεί διαφορετικό διάνυσμα βαρών και κατά συνέπεια διαφορετικό διάγραμμα ακτινοβολίας) για να λάβει πολυδιαδρομικές συνιστώσες με πολύ μικρές καθυστερήσεις μεταξύ τους (χρονικά συσχετισμένες) και ταυτόχρονα να απορρίψει ασυσχέτιστες (αργότερα αφικνούμενες) συνιστώσες. Οι έξοδοι από κάθε βαθμίδα αθροίζονται μέσω ενός συνδυαστικού κυκλώματος διαφορισιμότητας.



Σχήμα 3.11: Δέκτης RAKE τριών βαθμίδων [1, σελ. 120].





Σχήμα 3.12: Διαγράμματα ακτινοβολίας δέκτη RAKE τριών βαθμίδων για τη λήψη τεσσάρων πολυδιαδρομικών συνιστωσών (SOI-1,2,3,4) και την απόρριψη παρεμβολής [1, σελ. 122].

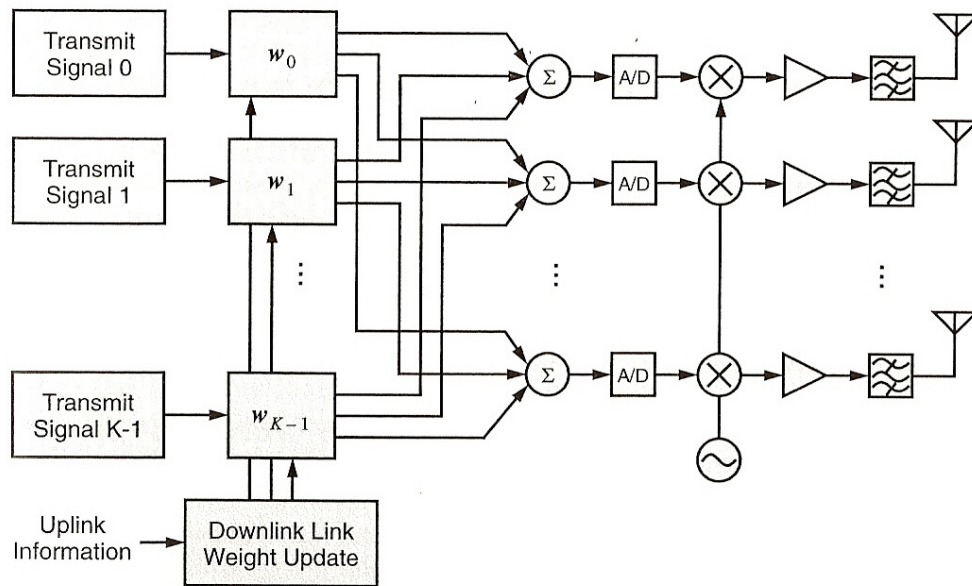
Τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται από κάθε βαθμίδα απεικονίζονται στο Σχήμα 3.12. Η χωρική απόκριση για κάθε βαθμίδα του δέκτη προσαρμόζεται ώστε να μεγιστοποιείται ο λόγος SINR για αυτή τη βαθμίδα. Σε αυτό το παράδειγμα, οι δύο πρώτες ισχυρές πολυδιαδρομικές συνιστώσες, SOI-1 και SOI-2 καταφθάνουν με χρονικές καθυστερήσεις πολύ κοντινές. Η βαθμίδα 0, η οποία συγχρονίζεται με αυτά τα σήματα, σχηματίζει ένα διάγραμμα που λαμβάνει στην ίδια φάση τα δύο σήματα και παρουσιάζει μηδενισμούς στις κατευθύνσεις των ασυσχέτιστων συνιστωσών. Η βαθμίδα 1 συγχρονίζεται με την καθυστέρηση που σχετίζεται με το σήμα SOI-3. Επομένως, το διάγραμμα για αυτή τη βαθμίδα μεγιστοποιεί την ισχύ στην κατεύθυνση του SOI-3, ενώ μηδενίζει τις παρεμβολές από τις άλλες συνιστώσες και την παρεμβάλλουσα πηγή SNOI. Τέλος, η βαθμίδα 2 συλλέγει ισχύ από τη συνιστώσα SOI-4 και απορρίπτει όλα τα ασυσχέιστα με αυτή σήματα. Οι έξοδοι από όλες τις βαθμίδες συνδυάζονται έπειτα με τη βοήθεια τεχνικών διαφορισιμότητας.

### 3.1.10 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΣΜΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ (TRANSMISSION BEAMFORMING)

Μία προσέγγιση για να βελτιωθεί η επίδοση της κάτω ζεύξης είναι η επεξεργασία σήματος στο πεδίο του χώρου από την πλευρά του κινητού τερματικού. Κάτι τέτοιο όμως δε λαμβάνει χώρα σε εκτεταμένο βαθμό εξαιτίας του περιορισμένου χώρου, της περιορισμένης επεξεργαστικής ισχύος και της δυναμικής φύσης του περιβάλλοντος κοντά σε κινητά τερματικά.

Σε συστήματα κινητών επικοινωνιών, η ποιότητα του σήματος στο συνδρομητή μπορεί να βελτιωθεί αλλάζοντας τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδεται το σήμα από το σταθμό βάσης. Στη διαμόρφωση δέσμης λοιπόν για την κάτω ζεύξη, ο αντικειμενικός στόχος είναι η δημιουργία ενός διαγράμματος ακτινοβολίας που παρέχει ικανοποιητική ποιότητα σήματος στον επιθυμητό συνδρομητή, ενώ μηδενίζει την παρεμβολή που μεταδίδεται σε άλλες διευθύνσεις. Ένα πολυσηματικό σύστημα

διαμόρφωσης δέσμης για την κάτω ζεύξη απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα, όπου κάθε μεταδιδόμενο σήμα έχει το δικό του διάνυσμα βαρών [1].



Σχήμα 3.13: Ένα σύστημα διαμόρφωσης δέσμης για την κάτω ζεύξη, ικανό να παράγει  $K$  ταυτόχρονες δέσμες [1, σελ. 112].

Αρκετά θέματα περιπλέκουν τη διαμόρφωση δέσμης για την κάτω ζεύξη. Ο αντίκτυπος της πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Στην καλύτερη περίπτωση, όταν το κανάλι μεταξύ του συνδρομητή και του σταθμού βάσης είναι απολύτως γνωστό, είναι επιθυμητή η επίτευξη χωρικής διαφορισιμότητας, μεταδίδοντας κατά μήκος πολλαπλών μονοπατιών στο συνδρομητή και καταπιέζοντας την ισχύ που μεταδίδεται σε διευθύνσεις που δε φτάνουν τον χρήστη. Όμως, η τέλεια γνώση του καναλιού ποτέ δεν είναι διαθέσιμη. Αν ο σκοπός είναι να επιλεγεί μία μόνο διεύθυνση για μετάδοση, τότε πρέπει να επιλεγεί το βέλτιστο μονοπάτι. Αν ο χρήστης κινείται και οι απώλειες κατά μήκος ενός μονοπατιού αυξάνουν, τότε ο σταθμός βάσης πρέπει να ανιχνεύσει και να ανακατευθύνει την ισχύ σε ένα νέο μονοπάτι.

Η απλούστερη λύση είναι η μετάδοση να γίνει με το ίδιο διάγραμμα δέσμης που χρησιμοποιήθηκε από την έξυπνη κεραία δέκτη στην άνω ζεύξη. Αυτή η προσέγγιση έχει τη μεγαλύτερη δυναμική στα TDD συστήματα, όπου και η άνω και η κάτω ζεύξη μοιράζονται το ίδιο συχνοτικό κανάλι. Σε αυτά τα συστήματα, τα βάρη που καθορίστηκαν στην άνω ζεύξη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση ενός σήματος πίσω σε έναν συγκεκριμένο χρήστη, δεδομένου ότι ο ραδιοδιάυλος παραμένει στάσιμος.

Στα FDD συστήματα, η άνω και η κάτω ζεύξη χρησιμοποιούν διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Από τη σχέση (3.8) προκύπτει πως ο παράγοντας διάταξης εξαρτάται από τη συχνότητα. Επομένως, αν τα ίδια βάρη που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη χρησιμοποιηθούν και στην εκπομπή, θα προκύψει διαφορετικό διάγραμμα ακτινοβολίας και ως εκ τούτου απαιτείται κατάλληλη τροποποίηση αυτών.

Μια άλλη μέθοδος για downlink beamforming, που μπορεί να εφαρμοστεί και σε FDD και σε TDD συστήματα, είναι η χρησιμοποίηση τεχνικών εύρεσης της διεύθυνσης άφιξης του σήματος (direction of arrival) για την άνω ζεύξη και η δημιουργία ενός κύριου λοβού με μέγιστο σε αυτή τη διεύθυνση για την κάτω ζεύξη.

### **3.1.11 ΝΕΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΕΥΦΥΕΙΣ ΚΕΡΑΙΕΣ**

Οι ευφυείς κεραίες είναι ένας κλάδος των κεραιών και των τηλεπικοινωνιών γενικότερα που συνεχώς εξελίσσεται. Μερικές σύγχρονες τάσεις αλλά και πρακτικά θέματα που αφορούν στην υλοποίηση και λειτουργία ευφύων κεραιοδιατάξεων σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα παρουσιάζονται στα [16- 43]. Ενδεικτικά, στα [16- 18] σχεδιάζονται Πίνακες Butler για WLAN [16, 17] και UMTS [18] εφαρμογές. Στο [22] τίθενται βασικά ερωτήματα-προβλήματα που σχετίζονται με τη σχεδίαση ενός συστήματος ευφύων κεραιών, όπως π.χ. ποιο είναι το κριτήριο με βάση το οποίο θα προσδιοριστεί το διάνυσμα των βαρών, πόσα bits θα χρησιμοποιηθούν για την ψηφιακή επεξεργασία των σημάτων, ποιο στοιχείο της διάταξης θα είναι το στοιχείο αναφοράς κ.λ.π. Στο [24] προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος, που ελέγχοντας τις φάσεις των στοιχείων, δημιουργεί διαγράμματα με πολλαπλά μέγιστα στις κατευθύνσεις των επιθυμητών σημάτων και μηδενισμούς στις κατευθύνσεις των ανεπιθυμητών σημάτων. Στο [25] παρουσιάζεται μια γραμμική προσαρμοστική κεραία 8 στοιχείων που λειτουργεί στα 2.4 GHz. Ένας τοπικός γενετικός αλγόριθμος που ελέγχει τα πλάτη και τις φάσεις των στοιχείων μιας γραμμικής προσαρμοστικής κεραίας μεγιστοποιεί το λόγο του σήματος προς παρεμβολή στο [26]. Ακόμα, πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι διάφορα σενάρια ανάπτυξης ευφύων κεραιών αυξάνουν την επίδοση ενός συστήματος UMTS τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη [30]. Εκτός από τη γραμμική στοιχειοκεραία, υπάρχουν και διαφορετικές τοπολογίες ευφύων κεραιών, όπως κυκλική, τετραγωνική, εξαγωνική κ.ά.[33-40]. Στο [35] δοκιμάζεται η ικανότητα μιας κυκλικής στοιχειοκεραίας στην εκτίμηση της διεύθυνσης άφιξης των εισερχομένων σημάτων καθώς και στην διαμόρφωση επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας. Διατάξεις επίπεδων κυκλικών και τετραγωνικών στοιχειοκεραιών προτείνονται στο [36] για προσαρμοστική διαμόρφωση δέσμης ακτινοβολίας. Στο [37] συγκρίνονται τοπολογίες κυκλικών και εξαγωνικών προσαρμοστικών στοιχειοκεραιών, όπου τα πλάτη και οι φάσεις των στοιχείων ρυθμίζονται από έναν PSO (Particle Swarm Optimization) αλγόριθμο. Παρόμοια μελέτη γίνεται και στο [39], με τη διαφορά τώρα ότι τα πλάτη και οι φάσεις των στοιχείων καθορίζονται από την LMS μέθοδο. Τέλος, στα [41-43] προτείνονται νέες ευφυείς κεραίες ευρείας ζώνης.

### **3.2 ΕΥΦΥΕΙΣ ΚΕΡΑΙΕΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (SWITCHED PARASITIC ARRAYS, SPAs)**

Το είδος των ευφύων κεραιών που αναπτύσσεται στην παρούσα διατριβή επιτυγχάνει την ηλεκτρονική στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας μέσω της εναλλαγής μεταξύ των ενεργών και παρασιτικών στοιχείων στο κύκλωμα τροφοδότησης. Πρόκειται για ευφυείς στοιχειοκεραίες ενεργών και παρασιτικών στοιχείων, που ουσιαστικά αποτελούν μια υποκατηγορία των ευφύων κεραιών στρεφόμενης δέσμης ακτινοβολίας (SB), τα χαρακτηριστικά των οποίων περιγράφηκαν εκτενώς στο προηγούμενο υποκεφάλαιο.

Σε γενικές γραμμές μια έξυπνη κεραία μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων (Switched Parasitic Array, SPA) αποτελείται από στοιχεία, στο κύκλωμα τροφοδότησης των οποίων συνδέεται ένας RF διακόπτης και μια δίοδος p-i-n. Όταν η δίοδος είναι ορθά πολωμένη, το αντίστοιχο στοιχείο βραχυκυκλώνεται και λειτουργεί ως ανακλαστήρας, ασχέτως από την κατάσταση του RF διακόπτη. Όταν η δίοδος δεν άγει και ο RF διακόπτης είναι ανοικτός, το στοιχείο καθίσταται ανοικτοκυκλωμένο και παύει να λειτουργεί σαν ανακλαστήρας. Όταν η δίοδος είναι σε αποκοπή και ο RF

διακόπτης είναι κλειστός, μόνο τότε επιτρέπεται η διέλευση του υψίσυχνου ρεύματος μέσω του RF διακόπτη και το στοιχείο είναι πλέον ενεργό. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια διάταξη μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων. Η στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας επιτυγχάνεται με κατάλληλη επιλογή του ποια θα είναι τα παρασιτικά και ποια τα ενεργά στοιχεία. Τα παρασιτικά στοιχεία διαρρέονται από ρεύματα που επάγονται λόγω της τροφοδότησης των ενεργών στοιχείων. Επομένως, κάθε διαφορετικός συνδυασμός τροφοδότησης μεταβάλλει τα ρεύματα στα στοιχεία της στοιχειοκεραίας και κατά συνέπεια οδηγεί σε διαφορετικό διάγραμμα ακτινοβολίας [44].

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα μελετηθούν διατάξεις όπου κάθε φορά ένα στοιχείο θα είναι ενεργό (ή το πολύ δύο στοιχεία θα είναι ενεργά) και επομένως προβλήματα που σχετίζονται με πολλαπλά ενεργά στοιχεία, όπως υψηλό κόστος, απώλεια ισχύος από τη χρήση των διαιρετών ισχύος και των στροφέων φάσεως και ακτινοβολία από γραμμές μεταφοράς είτε περιορίζονται είτε εξαλείφονται. Με ένα ενεργό στοιχείο, μόνο μια κύρια κατεύθυνση δέσμης είναι εφικτή ανά πάσα στιγμή. Αν το σύστημα έξυπνης κεραίας πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε περισσότερες από μία διευθύνσεις ταυτόχρονα, τότε ο αριθμός των ενεργών στοιχείων πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσος με τον αριθμό των ταυτόχρονων δεσμών.

Επιπλέον, σε αυτό το υποκεφάλαιο λαμβάνεται υπόψη το εύρος ζώνης αντίστασης εισόδου της κεραίας, καθώς είναι επιθυμητή η λειτουργία της σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Άλλωστε, ο κύριος στόχος της διατριβής, όπως θα διαφανεί και στα επόμενα κεφάλαια, είναι η σχεδίαση ευφών στοιχειοκεραίων μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων με λειτουργικό εύρος ζώνης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εκπομπή και λήψη σήματος WiFi, mobile WiMAX. Ακόμα, σημαντική παράμετρος είναι η μείωση του μεγέθους της κεραιοδιάταξης, καθώς κάτι τέτοιο συνεπάγεται μείωση του κόστους κατασκευής και συντήρησης, αλλά και διευκόλυνση της φορητής ή/και κινητής λήψης, κάτι που θα προσλάβει ιδιαίτερη σημασία στην περίπτωση που το κεραιοσύστημα προορίζεται για portable ή/και mobile εφαρμογές .

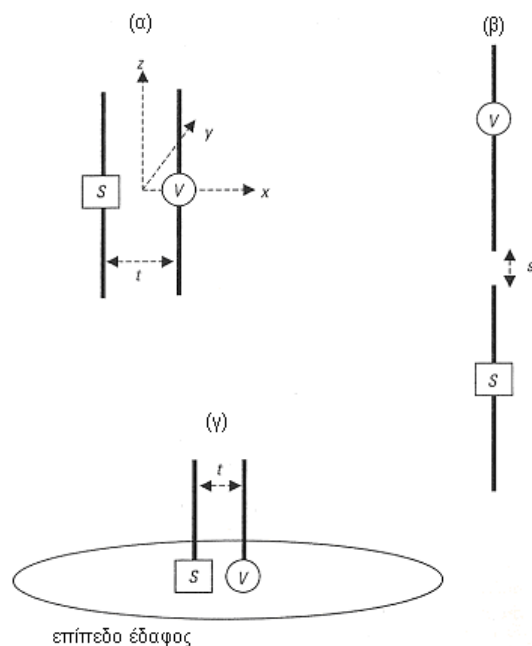
Πολλοί είναι οι λόγοι που συντείνουν στη χρησιμοποίηση ευφών στοιχειοκεραίων μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων για εφαρμογές κινητής τηλεφωνίας και WiFi, mobile WiMAX. Καταρχάς, ο χρήστης διαθέτει πλέον τη δυνατότητα να επιλέξει από έναν αριθμό προκαθορισμένων διαγραμμάτων λήψης εκείνο που κάθε φορά θα προσφέρει την καλύτερη ποιότητα λαμβανομένου σήματος. Αυτό γίνεται εφικτό με ένα αλγόριθμο που ανά τακτά χρονικά διαστήματα ή κάθε φορά που ζητείται ένα νέο συχνοτικό κανάλι σαρώνει όλα τα διαθέσιμα διαγράμματα λήψης και επιλέγει αυτό που προσφέρει καλύτερη ποιότητα σήματος. (Η ποιότητα σήματος μπορεί να προσδιοριστεί με ποικίλους τρόπους. Συνήθως αναφέρεται σε στάθμη σήματος ή σηματοθορυβικό λόγο). Δεδομένου επίσης ότι πρόκειται για ένα σύστημα ευρυεκπομπής, όπου ο πομπός σήματος εκπέμπει, αν όχι με ομοιοκατευθυντικό, με διάγραμμα μεγάλου εύρους δέσμης, αρκεί στον τελικό χρήστη μια κεραία μεταγωγής λοβού για ικανοποιητική λήψη αλλά και για την αντιμετώπιση προβλημάτων παρεμβολών μεταξύ διαφορετικών πομπών ή πολυδιαδρομικής διάδοσης. Ακόμα, η απλότητα αυτών των κεραιοσυστημάτων (μη πολύπλοκη επεξεργασία σήματος, αναλογική μορφοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας, μεταγωγή της κεραίας στο επιθυμητό διάγραμμα με απλό κύκλωμα διακοπών) τα καθιστά πολύ ελκυστικά για εφαρμογές που αφορούν τον τελικό χρήστη ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας ή WiFi, mobile WiMAX.

Περισσότερος λόγος για την αξιοποίηση των ευφών στοιχειοκεραίων μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων σε θέματα συστημάτων ευρυεκπομπής και

συγκεκριμένα WiFi, mobile WiMAX συστήματα θα γίνει στο Κεφάλαιο 5. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποια βασικά παραδείγματα τέτοιων κεραιοσυστημάτων για να κατανοηθούν ο τρόπος λειτουργίας τους και τα πλεονεκτήματα που αποφέρει η εκμετάλλευσή τους.

### 3.2.1 ΑΛΙΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ SPAS

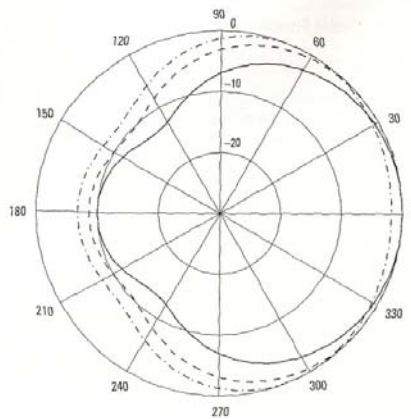
Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η πιο απλή περίπτωση SPA, που αποτελείται από ένα τροφοδοτούμενο και ένα παρασιτικό δίπολο [44, 45]. Το ενεργό στοιχείο τροφοδοτείται από τάση  $V$  και το παρασιτικό έχει το διακόπτη  $S$ . Τα χαρακτηριστικά της κατευθυντικότητας της στοιχειοκεραίας μπορούν να ελεγχθούν με την ενεργοποίηση του διακόπτη  $S$ . Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, το στοιχείο συντονίζεται στην ίδια συχνότητα όπως το ενεργό αν έχουν το ίδιο μήκος. Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός, το στοιχείο δε συντονίζεται. Αυτή είναι και η βασική λειτουργία αυτών των συστημάτων. Ένα dc ηλεκτρονικό σήμα ελέγχει την κατάσταση του διακόπτη και κατά προέκταση τα χαρακτηριστικά της κατευθυντικότητας της κεραίας. Αν είναι εφικτή η εναλλαγή της θέσης του ενεργού στοιχείου μεταξύ των δύο στοιχείων, η κεραία ονομάζεται στοιχειοκεραία μεταγωγής και ενεργών και παρασιτικών στοιχείων (Switched Active Switched Parasitic Antenna, SASPA) [46].



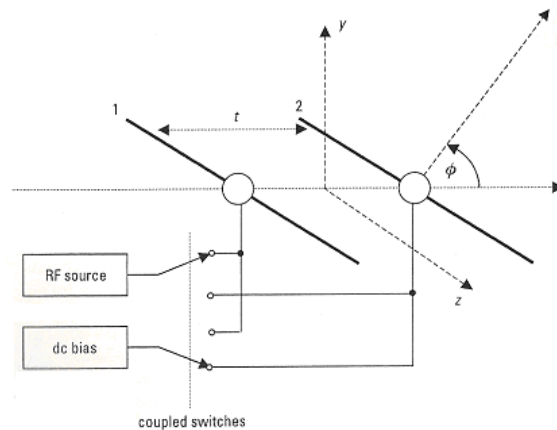
Σχήμα 3.14: SPA δύο στοιχείων σε διαφορετικές διατάξεις [44, σελ. 53].

Για λόγους απλότητας, υποτίθεται ότι τα δίπολα είναι παράλληλα στον  $z$  άξονα. Και τα δύο έχουν μήκος  $\lambda_0/2$ , πολύ μικρή ακτίνα και είναι τοποθετημένα όπως στο Σχήμα 3.14 α). Όταν ο διακόπτης  $S$  είναι κλειστός, το διάγραμμα ακτινοβολίας στο  $H$  επίπεδο βρίσκεται στο επίπεδο  $xy$  και εξαρτάται από τη γωνία  $\varphi$ . Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζεται το παραπάνω διάγραμμα ακτινοβολίας για διάφορες τιμές της απόστασης  $t$  μεταξύ των δύο στοιχείων. Σε κάθε περίπτωση, το στοιχείο στα δεξιά είναι το ενεργό και αυτό στα αριστερά το βραχυκυκλωμένο παρασιτικό που δρα σαν ανακλαστήρας. Η κατεύθυνση μεγίστου είναι  $\varphi = 0^\circ$ . Αν το αριστερό στοιχείο ήταν

το ενεργό και το δεξιό το βραχυκυκλωμένο παρασιτικό, τότε  $\varphi = 180^\circ$  και το διάγραμμα του Σχήματος 3.15 θα στρεφόταν κατά  $180^\circ$ . Η αντιστροφή επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση ενός RF διακόπτη που αλλάζει την πηγή από το ένα στοιχείο στο άλλο και βραχυκυκλώνοντας το άλλο στοιχείο ώστε να λειτουργεί σαν ανακλαστήρας. Το κύκλωμα που ελέγχει την κατευθυντικότητα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16. Κάθε δίπολο έχει ένα διακόπτη στο κέντρο του. Όταν η πηγή RF εφρμόζεται σε ένα στοιχείο, ο διακόπτης στο κέντρο είναι ανοιχτός και ο διακόπτης στο κέντρο του άλλου στοιχείου είναι κλειστός. Με μια απλή γραμμή ελέγχου του διακόπτη RF και των δύο dc διακοπών τοποθετημένων στο κέντρο κάθε στοιχείου, η κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας μπορεί να αντιστραφεί ηλεκτρονικά. Λόγω συμμετρίας, η εμπέδηση εισόδου είναι ίδια και για τις δύο περιπτώσεις.



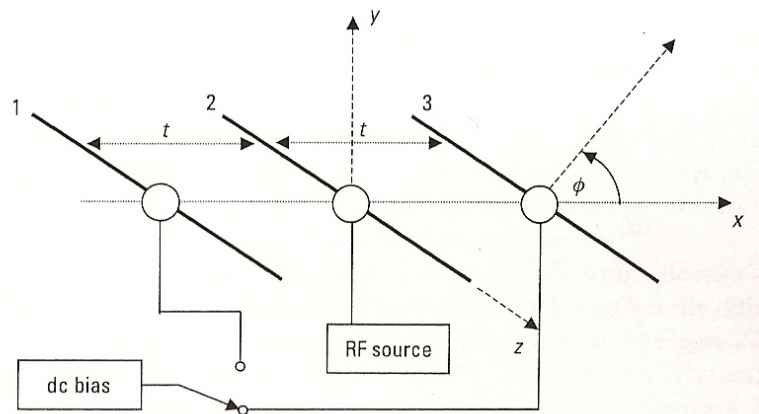
Σχήμα 3.15: Κανονικοποιημένο διάγραμμα ισχύος ακτινοβολίας στο H επίπεδο της SASPA. “—”  $t=0.1\lambda$ , “- - -”  $t=0.25\lambda$ , “.”  $t=0.4\lambda$  [44, σελ. 55].



Σχήμα 3.16: Κύκλωμα ελέγχου του διαγράμματος ακτινοβολίας της SASPA [44, σελ. 56].

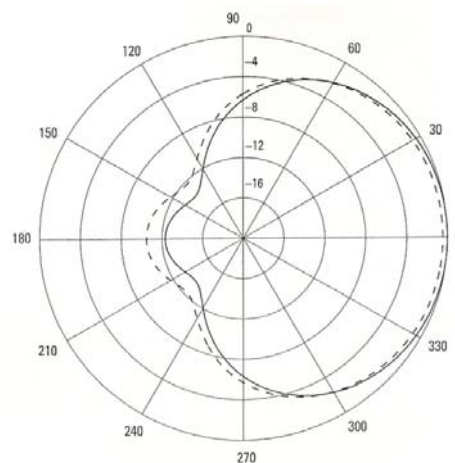
Μία κεραία μεταγωγής παρασιτικών στοιχείων με σταθερή τη θέση του ενεργού στοιχείου (Fixed Active Switched Parasitic Antenna, FASPA) είναι η εναλλακτική εκδοχή της SASPA. Σε αυτήν την περίπτωση, η πηγή RF είναι συνδεδεμένη σε ένα σταθερό ενεργό στοιχείο και με τη χρήση dc διακοπών αλλάζει η κατάσταση των παρασιτικών στοιχείων που περιβάλλουν το ενεργό. Η απλούστερη υλοποίηση αυτής της τεχνικής είναι μια στοιχειοκεραία τριών στοιχείων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.17. Το κεντρικό στοιχείο, το στοιχείο 2 είναι πάντα ενεργό και όταν ο διακόπτης στο στοιχείο 1 είναι κλειστός, ο διακόπτης στο στοιχείο 3 είναι ανοιχτός και επομένως η κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας είναι  $\varphi_{\max} = 0^\circ$ . Αν αλλάξει η

κατάσταση στους διακόπτες, τότε  $\varphi_{\max} = 180^\circ$ . Δεδομένης της συμμετρίας της διάταξης, η αντίσταση εισόδου της FASPA είναι ίδια και για τις δύο καταστάσεις των dc διακοπών [44]. Αν υποθεθεί πως το ανοικτοκυκλωμένο στοιχείο δε διαρρέεται καθόλου από ρεύμα, τα χαρακτηριστικά της κεραίας είναι ίδια με της SASPA δύο στοιχείων. Αν ο διακόπτης στο κέντρο ενός παρασιτικού στοιχείου μήκους  $\lambda_o/2$  και μικρής ακτίνας είναι κλειστός, το στοιχείο βρίσκεται κοντά στο συντονισμό και επάγεται μεγάλη ποσότητα ρεύματος. Τότε το διάγραμμα ακτινοβολίας και η αντίσταση εισόδου επηρεάζονται σημαντικά από το παρασιτικό στοιχείο. Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός, το στοιχείο δε βρίσκεται κοντά στο συντονισμό και επάγεται ελάχιστη ποσότητα ρεύματος, οπότε και το στοιχείο δε μεταβάλλει την επίδοση της στοιχειοκεραίας.



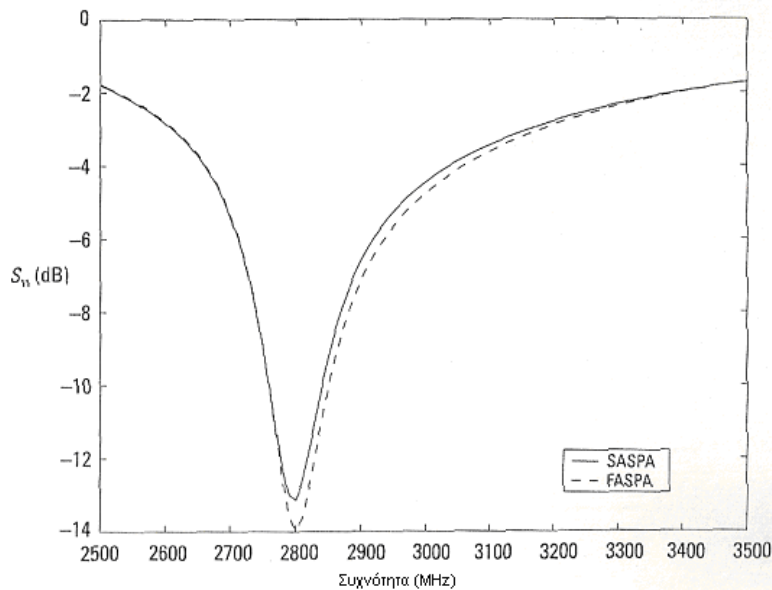
Σχήμα 3.17: Σχηματική αναπαράσταση της FASPA τριών στοιχείων [44, σελ. 57].

Στο επόμενο σχήμα συγκρίνονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας στο  $H$  επίπεδο για τη SASPA και τη FASPA. Τα δίπολα έχουν μήκος 0.05m, ακτίνα σύρματος 0.001m και η μεταξύ τους απόσταση είναι  $t = 0.02m$ . Το κενό στο ανοικτοκυκλωμένο στοιχείο είναι 0.001m και η εφαρμοζόμενη συχνότητα 3 GHz. Το αποτέλεσμα της παρουσίας του ανοικτοκυκλωμένου στοιχείου είναι μια αύξηση του κέρδους για τη FASPA τριών στοιχείων (0.5 dB) και ένας λόγος front-to-back 6.3 dB, συγκρινόμενος με την τιμή των 5.2 dB για την περίπτωση της SASPA δύο στοιχείων [44].



Σχήμα 3.18: Σύγκριση κανονικοποιημένων διαγραμμάτων ακτινοβολίας της “—”SASPA δύο στοιχείων και της “- - -” FASPA τριών στοιχείων [44, σελ. 58].

Η επίδραση της παρουσίας του ανοικτοκυκλωμένου παρασιτικού στοιχείου στην εμπέδηση εισόδου του τροφοδοτούμενου στοιχείου είναι αρκετά περιορισμένη. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή του  $S_{11}$ . Ο διαχωρισμός των διπόλων είναι  $t = 0.2 \lambda_o$ . Υπάρχει μια μικρή ολίσθηση όσο αφορά τη συχνότητα συντονισμού και το λειτουργικό εύρος ζώνης -10 dB είναι περίπου 80 MHz για τη SASPA και περίπου 90 MHz για τη FASPA. Οι υπολογισμοί των διαγραμμάτων και του  $S_{11}$  έχουν γίνει με τη χρήση του Αριθμητικού Ηλεκτρομαγνητικού Κώδικα (NEC). Ειδική αναφορά στο NEC θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 3.19: Μεταβολή του  $S_{11}$  συναρτήσει της συχνότητας για τη SASPA δύο στοιχείων και τη FASPA τριών στοιχείων [44, σελ. 59].

Και τα δύο παραδείγματα που αναπτύχθηκαν αφορούσαν γραμμικές στοιχειοκεραίες. Διατάξεις SASPA και FASPA μπορούν να χρησιμοποιηθούν εφαρμόζοντας ακτινική συμμετρία. Για παράδειγμα, ένα ενεργό μονόπολο περικυκλωμένο από παρασιτικά μονόπολα που μετάνονται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σαρώσει το αζιμούθιο κατά  $360^\circ$  [46, 47]. Αν διατηρείται η συμμετρία στη σχεδίαση και στην τοπολογία των διακοπών, η αντίσταση εισόδου της κεραίας είναι ανεξάρτητη των θέσεων των διακοπών και ανεξάρτητη από τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας.

Στην παρούσα διατριβή μελετώνται διάφορες διατάξεις από ευφείς κεραίες μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων που προορίζονται για εφαρμογές εκπομπής και λήψης σήματος WiFi και κινητής τηλεφωνίας. Δίνεται έμφαση σε δομές που περιλαμβάνουν ενεργά στοιχεία με τα υπόλοιπα βραχυκυκλωμένα, σε δομές που αποτελούνται από ένα κεντρικό σταθερό ενεργό στοιχείο που περιστοιχίζεται από ανοικτοκυκλωμένα ή βραχυκυκλωμένα στοιχεία και στην κεραία ESPAR, όπου ένα σταθερό ενεργό στοιχείο περιστοιχίζεται από έναν δακτύλιο παθητικών στοιχείων φορτωμένων με μεταβλητά φανταστικά φορτία. Η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση των προτεινόμενων στοιχειοκεραίων γίνεται με τη Μέθοδο των Ροών, η οποία επεξηγείται στο επόμενο κεφάλαιο, ενώ δίνεται βάρος



στη βέλτιστη σχεδίαση των προτεινόμενων κεραιοδιατάξεων με την αρωγή της τεχνικής των Γενετικών Αλγορίθμων (βλ. επίσης Κεφάλαιο 4), όπου στόχος της σχεδίασης, όπως διαφαίνεται από ορισμένες πρωτότυπες και εύχρηστες αντικειμενικές συναρτήσεις, είναι η σύνθεση διαγραμμάτων ακτινοβολίας με επιθυμητές ιδιότητες και η προσαρμογή των ενεργών στοιχείων σε διαστήματα συχνοτήτων που αφορούν το WiFi, mobile WiMAX σύστημα.

### 3.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] J. C. Liberti and T. S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications*, Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [2] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, Cambridge University Press.
- [3] A. Jacobsen, "Smart antennas for dummies," *R&D Report*, April 2001.
- [4] M. Chryssomallis, "Smart antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 42, No. 3, pp. 129-136, June 2000.
- [5] S. Bellofiore, C. A. Balanis, J. Foutz, and A. S. Spanias, "Smart-antenna systems for mobile communication networks Part 1: overview and antenna design," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 44, No. 3, pp. 145-154, June 2002.
- [6] A. E. Zooghyby, *Smart Antenna Engineering*, Artech House, 2005.
- [7] Shelton, J., K Kelleher, "Multiple Beams from Linear Arrays," *IRE Transcriptions on Antennas and Propogation*, Vol. 9, Issue 12, 1961, pp. 154-161.
- [8] Foster, H. E., R. E. Hiatt, "Buttler Network Extension to any number of antenna ports," *IEEE Transaction Antennas and Propogation*, Vol. 18, Issue 6, pp. 818-820.
- [9] M. A. Halim, *Adaptive Array Measurements in Communications*, Artech House, 2001.
- [10] Dong, L., M. A. Ingram, "Beam Selection Algorithm based on PTR metric and its Synchronization Performance," *Radio and Wireless Conference*, pp. 115-118, August 2003.
- [11] Matumoto T., S. Nishioka, D. J. Hodder, "Beam Selection Performance Analysis of a Switched Multi-beam Antenna System in Mobile Communications Environments," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 46, Issue 1, pp. 10-20, 1997.
- [12] F. Gross, *Smart Antennas for Wireless Communications*, McGraw-Hill, New York, 2005.
- [13] L. C. Godara, "Application of antenna arrays to mobile communications, Part II: beam-forming and direction-of-arrival considerations," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, No. 8, pp. 1195-1245, August 1997.
- [14] H. Van Trees, *Optimum Array Processing, Part IV of Dtection, Estimation and Modulation Theory*, Wiley Interscience, New York, 2002.
- [15] L. C. Godara, *Smart Antennas*, CRC Press, Boca Ratton, FL, 2004.
- [16] S. K. A. Rahim and P. Gardner, "Dual Butler Matrix Active Antenna System", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 49, No. 12, pp. 3004-3007, December 2007.
- [17] S .Z. Ibrahim, M. K. A. Rahim, T. Masri, M. N. A. Karim and M. Z. A. AbdulAziz, "Multibeam Antenna Array with Butler Matrix for WLAN Applications", *Proceedings of the Second European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2007)*, Edinburgh, November 2007.
- [18] T. N. Kaifas and J. N. Sahalos, "A 4x4 Butler Matrix Optimized for UMTS Applications", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 49, No. 3, pp. 585-588, March 2007.
- [19] A. Coraiola and B. Sturani, "Using a Pair of Phased Antennas to Improve UHF Reception|Transmission in Tunnels", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 42, No. 5, pp. 40-47, October 2000.
- [20] M. H. Bataineh and J. I. Ababneh, "Synthesis of Aperiodic Linear Phased Antenna Arrays Using Particle Swarm Optimization", *Electromagnetics*, Vol. 26, Issue 7, pp. 531-541, October 2006.
- [21] Y. Chen, S. Yang and Z. Nie, "Synthesis of Uniform Amplitude Thinned Linear Phased Arrays Using the Differential Evolution Algorithm", *Electromagnetics*, Vol. 27, Issue 5, pp. 287-297, June 2007.
- [22] H. J. Im, S. Choi, B. Choi, H. Kim and J. Choi1, "A Survey of Essential Problems in the Design of Smart Antenna System", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 33, No. 1, pp. 31-34, April 2002.
- [23] V. Kalinichev, "Analysis of Beam-Steering and Directive Characteristics of Adaptive Antenna Arrays for Mobile Communications", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 43, No. 3, pp. 145-152, June 2001.

- [24] M. Mouhamadou, P. Vaudon and M. Rammal, "Smart Antenna Array Patterns Synthesis: Null Steering and Multi-User Beamforming by Phase Control", *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 60, pp. 95-106, 2006.
- [25] R. Azaro, L. Ioriatti, M. Martinelli, M. Benedetti and A. Massa, "An Experimental Realization of a Fully Adaptive Smart Antenna", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 50, No. 6, pp. 1715-1716, June 2008.
- [26] H. C. Hsu, "Optimizing Beam Pattern of Adaptive Linear Phase array Antenna Using Local Genetic Algorithm", *Proceedings of the Antennas and Propagation Society International Symposium (2005)*, pp. 315-318, 2005.
- [27] Y. J. Gu, Z. G. Shi, K. S. Chen and Y. Li, "Robust Adaptive Beamforming for Steering Vector Uncertainties based on Equivalent Doas Method", *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 79, pp. 277-290, 2008.
- [28] D.I. Abu-Al-Nadi, T.H. Ismail and M.J. Mismar, "Interference Suppression by Element Position Control of Phased Arrays using LM Algorithm", *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 60, Issue 2, pp. 151-158, February 2006.
- [29] A. Akdagli and K. Guney, "Shaped-Beam Pattern Synthesis of Equally and Unequally Spaced Linear Antenna Arrays Using a Modified Tabu Search Algorithm", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 36, No. 1, pp. 16-20, January 2003.
- [30] P. Monogioudis, K. Conner, D. Das, Sr. Gollamudi, J. A. C. Lee, A. L. Moustakas, S. Nagaraj, A. M. Rao, R. A. Soni and Y. Yuan, "Intelligent Antenna Solutions for UMTS: Algorithms and Simulation Results", *IEEE Communications Magazine*, pp. 28-39, October 2004.
- [31] P. Ngamjanyaporn, M. Krairiksh and M. Bialkowski, "Combating Interference in an Indoor Wireless-Communication System Using a Phased-Array Antenna with Switched-Beam Elements", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 45, No. 5, pp. 411-415, June 2005.
- [32] J. A. Hejres, A. Peng, Member and Jamal Hijres, "Fast Method for Sidelobe Nulling in a Partially Adaptive Linear Array Using the Elements Positions", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 6, pp. 332-335, 2007.
- [33] S. K. Sanyal, Q. M. Alfred and T. Chakravarty, "A Novel Beam-Switching Algorithm For Programmable Phased Array Antenna", *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 60, pp. 187-196, 2006.
- [34] T. Su and H. Ling, "Array Beamforming in the Presence of a Mounting Tower Using Genetic Algorithms", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 53, No. 6, pp. 2011-2019, June 2005.
- [35] P. Ioannides and C. A. Balanis, "Uniform Circular Arrays for Smart Antennas", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 47, No. 4, pp. 192-206, August 2005.
- [36] P. Ioannides and C. A. Balanis, "Uniform Circular and Rectangular Arrays for Adaptive Beamforming Applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 4, pp. 351-354, 2005.
- [37] K. R. Mahmoud, M. El-Adawy, S. M. M. Ibrahim, R. Bansal, K. R. Mahmoud and S. H. Zainud-Deen, "A Comparison Between Circular and Hexagonal Array Geometries For Smart Antenna Systems Using Particle Swarm Optimization Algorithm", *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 72, pp. 75-90, 2007.
- [38] S. Wu and J. Zhang, "Research of Array Geometry for Smart Antenna", *Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation (ISAPE 2003)*, pp. 294-298, 2003.
- [39] F. Gozasht, G. R. Dadashzadeh and S. Nikmehr, "A Comprehensive Performance Study of Circular and Hexagonal Array Geometries in the LMS Algorithm for Smart Antenna Applications", *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 68, pp. 281-296, 2007.
- [40] S. Savov, V. Vasileva and M. Doneva, "Novel Smart Antenna based on Half-Wavelength Dipoles", *Proceedings of the Second European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2007)*, Edinburgh, November 2007.
- [41] M. E. Bialkowski and M. Uthansakul, "A Wideband Array Antenna with Beam-Steering Capability Using Real Valued Weights", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 48, No. 2, pp. 287-291, February 2006.

- [42] S. S. Jeon, Y. Wang, Y. Qian and T. Itoh, Fellow, "A Novel Smart Antenna System Implementation for Broad-Band Wireless Communications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 50, No. 5, pp. 600-606, May 2002.
- [43] V. V. Mani and R. Bose, "Smart Antenna Design for Beamforming of UWB Signals in Gaussian Noise", *Proceedings of the International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA 2008)*, pp. 311-316, 2008.
- [44] D. V. Thiel and S. Smith, *Switched Parasitic Antennas for Cellular Communications*, Artech House, Boston, USA, 2002.
- [45] D. V. Thiel, S. G. O'Keefe, and J. W. Lu, "Electronic beam steering in wire and patch antenna systems using switched parasitic elements," *IEEE Antennas and Propagation Symposium*, Baltimore, MD, Vol. 1, pp. 534-537, 1996.
- [46] S. L. Preston and D. V. Thiel, "A Multibeam Antenna Using Switched Parasitic and Switched Active Elements for Space-Division-Multiple Access Applications," *IEICE Trans. Electronics*, Vol. E82-C, pp. 1202-1210, July 1999.
- [47] A. Sibille, C. Roblin, and G. Poncelet, "Circular switched monopole arrays for beam steering wireless communications," *Electronics Letters*, Vol. 33, No. 7, pp. 551-552, March 1997.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

# ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΤΟΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟ, Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΡΟΠΩΝ ΚΑΙ Ο ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ

Η σχεδίαση των προτεινόμενων ευφών στοιχειοκεραιών αυτής της διατριβής πραγματοποιείται με τη βοήθεια της στοχαστικής τεχνικής αναζήτησης και βελτιστοποίησης των Γενετικών Αλγορίθμων (Genetic Algorithms, GAs), η οποία ενδείκνυται στην επίλυση σύνθετων πολυπαραμετρικών προβλημάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των ιδιοτήτων και των πλεονεκτημάτων της μεθόδου αυτής, προσδίδοντας φυσικά περισσότερη έμφαση σε εφαρμογές της μεθόδου αυτής σε προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής φύσεως, και ιδιαίτερα στη σύνθεση και σχεδίαση κεραιών.

Για την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση των προτεινόμενων ευφών στοιχειοκεραιών που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια της διατριβής επιλέχθηκε η Μέθοδος των Ροπών, (Method of Moments, Mom). Πιο συγκεκριμένα, η σύνθεση και η ανάλυση των κεραιών γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου προσομοίωσης SuperNec v.2.4 (SNEC). Θεμέλιος λίθος αυτού του προγράμματος είναι ο Αριθμητικός Ηλεκτρομαγνητικός Κώδικας (Numerical Electromagnetics Code, NEC), ο οποίος χρησιμοποιεί τη Μέθοδο των Ροπών για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων. Έτσι κρίνεται σκόπιμο να ακολουθήσει σε αυτό το κεφάλαιο και μια επισκόπηση της μεθόδου των Ροπών και του προγράμματος SNEC.

### 4.1 ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms, GAs) είναι μέθοδοι αναζήτησης της βέλτιστης λύσης που βασίζονται στις αρχές της φυσικής επιλογής και εξέλιξης. Αναπτύχθηκαν από τον J. Holland [1], αρχικά για τη μελέτη του φαινομένου της φυσικής προσαρμογής, και στην συνέχεια για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, χωρίς όμως απαραίτητα τη χρήση παραγώγων της συνάρτησης κόστους ή συμπεριφοράς. Η ουσία των γενετικών αλγορίθμων βρίσκεται στον ανταγωνισμό μεταξύ των ατόμων του πληθυσμού και όχι στην συνεργασία αυτών. Ουσιαστικά μιμούνται την διαδικασία της φυσικής επιλογής, σύμφωνα με την οποία επιβιώνει τελικά ο ισχυρότερος (καταλληλότερος). Τα άτομα τα οποία έχουν επιδείξει καλύτερη ικανότητα προσαρμογής στο περιβάλλον έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιζήσουν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και να ζευγαρώσουν αποδίδοντας περισσότερους και πιο εύρωστους απογόνους. Η διαδικασία της φυσικής εξέλιξης έχει ως αποτέλεσμα την επικράτηση ατόμων με χαρακτηριστικά τα οποία τους επιτρέπουν την βέλτιστη προσαρμογή και τελικά την επιβίωση. Το γεγονός αυτό καθιστά τους γενετικούς αλγόριθμους αποτελεσματικούς στην επίλυση σύνθετων, συνδυαστικών και αλληλοεξαρτώμενων προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Στην Βιολογία, η γενετική ταυτότητα του ατόμου εμπεριέχεται στις αλυσίδες DNA, τα λεγόμενα χρωμοσώματα. Αντίστοιχα στους GAs το σύνολο των παραμέτρων κάθε λύσης κωδικοποιείται σε αλληλουχίες αριθμών ή γενικότερα χαρακτήρων που επίσης καλούνται χρωμοσώματα. Το κάθε χρωμόσωμα αποτελεί και

ένα άτομο του συνολικού πληθυσμού. Το χρωμόσωμα απαρτίζεται από τα γονίδια (genes) τα οποία είναι λειτουργικά τμήματα της αλυσίδας DNA και περιγράφουν αυτοτελώς ένα γνώρισμα. Οι δυνατές τιμές κάθε γνωρίσματος ονομάζονται αλληλόμορφες τιμές (alleles). Κάθε γονίδιο είναι τοποθετημένο σε συγκεκριμένη θέση στο χρωμόσωμα. Έτσι και στους γενετικούς αλγόριθμους μία ακολουθία γονιδίων αποτελεί ένα χρωμόσωμα. Ένα συγκεκριμένο χρωμόσωμα (μοναδικό) μπορεί να αποκωδικοποιηθεί σ' ένα σύνολο παραμέτρων που αναπαριστούν μία πιθανή λύση του προβλήματος. Τα χρωμοσώματα μπορούν να κωδικοποιηθούν σαν σειρές πραγματικών αριθμών, δυαδικών αριθμών, συμβόλων του αλφάβητου ή και σαν συνδυασμοί των παραπάνω.

Οι βασικές αρχές των γενετικών αλγορίθμων και εφαρμογές τους σε συστήματα υπολογιστών παρουσιάστηκαν από τους Holland [1] και De Jong [2] το 1975 και περιγράφηκαν διεξοδικά από τον Goldberg [3]. Ο γενετικός αλγόριθμος εκκινεί διαμορφώνοντας, συνήθως με τυχαίο τρόπο, έναν αρχικό πληθυσμό χρωμοσωμάτων. Η επίδοση κάθε ατόμου εκτιμάται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) ή της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness function), η οποία καθορίζει το στόχο στο εκάστοτε πρόβλημα βελτιστοποίησης. Μια υψηλή τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση συνεπάγεται ένα καλό χρωμόσωμα. Αφού έχουν δημιουργηθεί τα αρχικά χρωμοσώματα, μια στοχαστική στρατηγική επιλογής (selection strategy) καθορίζει ποια χρωμοσώματα θα λάβουν μέρος στη διαδικασία της εξέλιξης. Πιο συγκεκριμένα, τα άτομα αυτά υποβάλλονται σε μετασχηματισμούς μέσω στοχαστικών, γενετικών τελεστών για να δημιουργήσουν απογόνους, σύμφωνα με τη λογική της επικράτησης του ισχυρότερου. Τα χρωμοσώματα αυτά ζευγαρώνουν μεταξύ τους (σύμφωνα με τεχνικές που θα εξηγηθούν αναλυτικά παρακάτω) με σκοπό τη γέννηση απογόνου (offspring) στον οποίο υπάρχει γενετικό υλικό και από τους δύο γονείς – χρωμοσώματα. Οι δύο τύποι γενετικών τελεστών είναι η διασταύρωση (crossover), κατά την οποία κατασκευάζονται νέα άτομα συνδυάζοντας γενετικό υλικό από προϋπάρχοντα άτομα και η μετάλλαξη (mutation), δηλαδή η τροποποίηση γενετικού υλικού για τη σύνθεση νέων ατόμων. Το νέο σετ χρωμοσωμάτων που παράγεται από αυτή τη διαδικασία ζευγαρώματος σχηματίζει την επόμενη γενιά (generation) χρωμοσωμάτων, αν και δεν αποκλείεται να σωθούν χρωμοσώματα από την προηγούμενη γενιά και να εισαχθούν στην επόμενη. Έπειτα υπολογίζεται η επίδοση των ατόμων του νέου πληθυσμού. Σε κάθε γενιά διατηρείται σταθερό το πλήθος των χρωμοσωμάτων. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για αρκετές γενιές, έως ότου ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού [3-8].

Ένας γενετικός αλγόριθμος έχει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών τεχνικών βελτιστοποίησης, όπως:

- η ευκολία εφαρμογής του σε οποιοδήποτε πρόβλημα
- η καθολική έρευνα που διεξάγει στο χώρο λύσεων
- η μη απαίτηση a priori γνώσης του προβλήματος βελτιστοποίησης
- η μη εξάρτηση του από τις αρχικές συνθήκες αναζήτησης
- βελτιστοποιεί με συνεχείς ή διακριτές παραμέτρους
- δεν απαιτεί πληροφορία για παράγωγο της συνάρτησης κόστους
- ταυτόχρονα κάνει αναζήτηση σε μεγάλο εύρος από το χώρο λύσεων
- δουλεύει καλά με μεγάλο αριθμό μεταβλητών
- μπορεί να τρέξει παράλληλα σε πολλούς υπολογιστές
- βελτιστοποιεί μεταβλητές με αρκετά περίπλοκες επιφάνειες κόστους
- παρέχει μια λίστα βέλτιστων παραμέτρων, όχι απλά μια μεμονωμένη λύση

- μπορεί να κωδικοποιεί τις παραμέτρους και η βελτιστοποίηση να γίνεται με κωδικοποιημένες παραμέτρους
- δουλεύει με αριθμητικά δεδομένα, με πειραματικά δεδομένα ή αναλυτικές συναρτήσεις [8].

Για αυτούς τους λόγους οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν καταστεί ένα εξαιρετικά δημοφιλές εργαλείο βελτιστοποίησης. Υπολογιστικές μοντελοποιήσεις τους έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα προβλήματα σε ένα ευρύ φάσμα επιστημών, όπως για παράδειγμα στην αεροναυπηγική, στην επιχειρησιακή έρευνα, στις κοινωνικές επιστήμες και στην κβαντική φυσική [2, 9-11]. Στον ηλεκτρομαγνητισμό έχουν εφαρμοστεί στην σχεδίαση και την βελτιστοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών κεραιών και στοιχειοκεραιών [12-45], σε προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [46-47], σε προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (multiobjective optimization) κεραιοδιατάξεων [48-51], αλλά και σε προβλήματα βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας υπολογιστικές μεθόδους [52-60]. Στην συνέχεια θα αναλυθούν οι κυριότερες ιδιότητες των GAs, οι μηχανισμοί υλοποίησης τους και οι παράμετροι που πρέπει να ρυθμιστούν για την επίτευξη της επιθυμητής λύσης [8, 52].

#### **4.1.1 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ**

Κάθε παράμετρος του προβλήματος βελτιστοποίησης στο οποίο εφαρμόζεται ένας γενετικός αλγόριθμος κωδικοποιείται και λαμβάνει τη μορφή γονιδίου εντός του χρωμοσώματος και έτσι δύναται ο GA να εξελίσσεται με τρόπο που δεν εξαρτάται άμεσα από το χώρο λύσεων. Παράλληλα, θα πρέπει να τονισθεί ότι η εκτίμηση της καταλληλότητας των λύσεων συνεπάγεται την αποκωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων και τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης με τις αποκωδικοποιημένες παραμέτρους. Κάθε γονίδιο μπορεί να αποτελείται από μια αλληλουχία συμβόλων ενός συγκεκριμένου αλφαβήτου. Το αλφάβητο μπορεί να περιέχει δυαδικά ψηφία, ακέραιους αριθμούς, αριθμούς κινητής υποδιαστολής ή σύμβολα (A, B, C, D). Ανάλογα με την περίπτωση, για κάποιες παραμέτρους μπορεί να χρησιμοποιούνται διαφορετικά σχήματα κωδικοποίησης, διαμορφώνοντας ως εκ τούτου χρωμοσώματα με μεικτές αναπαραστάσεις. Ο τρόπος αναπαράστασης επηρεάζει εν γένει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου και καθορίζει το είδος των γενετικών τελεστών που δύναται να εφαρμοστούν.

Για την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων, έχει αποδειχθεί ότι η κωδικοποίηση πρέπει να έχει κάποιες μορφής αντιστοιχία με το πρόβλημα προς επίλυση [3, 8]. Επίσης θα πρέπει γενικά να χρησιμοποιείται το μικρότερο δυνατό αλφάβητο που επιτρέπει η φυσική έκφραση του προβλήματος [3]. Συνήθως επιλέγεται δυαδική κωδικοποίηση [1], ακόμα και όταν αυτή δεν φαίνεται να έχει άμεση σχέση με το πρόβλημα, καθώς διέπεται από απλούς γενετικούς τελεστές οι οποίοι μπορούν να ρυθμιστούν με αποτελεσματικότητα και με ευχέρεια για την διεξαγωγή αποδοτικής βελτιστοποίησης [52]. Από την άλλη μεριά, αναπαραστάσεις με αλφάβητο πραγματικών αριθμών (real coding) έχουν αποδειχτεί εξαιρετικά χρήσιμες σε προβλήματα που περιέχουν συνεχή (μη κβαντισμένα) μεγέθη. Ουσιαστικά παρέχουν ακριβέστερη απεικόνιση του χώρου λύσεων, διευκολύνοντας την στοχαστική αναζήτηση και επιταχύνοντας την σύγκλιση του αλγορίθμου. Σε κάθε περίπτωση όμως η πραγματική κωδικοποίηση αυξάνει την δυσκολία υλοποίησης των σχετικών γενετικών τελεστών, η αποδοτική ρύθμιση των οποίων ενδέχεται να απαιτεί σημαντική προσπάθεια από τον σχεδιαστή.

#### **4.1.2 ΔΟΜΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ - ΣΧΗΜΑΤΑ**

Ο βασικός μηχανισμός της γενετικής έρευνας σύμφωνα με τον Holland [1] είναι η εξερεύνηση και κατόπιν η αναπαραγωγή αλληλουχιών από σύμβολα τα οποία βελτιώνουν την καταλληλότητά (fitness) των χρωμοσωμάτων εφόσον αποτελούν μέρος τους. Οι αλληλουχίες συμβόλων καλούνται δομικά τμήματα (building blocks), ενώ το συμβολικό μέσο για την ακριβή ταξινόμηση ομοιοτήτων μεταξύ συμβολοσειρών ονομάζεται σχήμα (schema). Διατυπώνεται ωσαύτως η Υπόθεση των δομικών τμημάτων (building block Hypothesis) η οποία προτείνει ότι οι πιο κατάλληλες λύσεις (σχήματα υψηλής τάξης) προκύπτουν από την σύνθεση βασικών δομικών τμημάτων (σχήματα χαμηλής τάξης). Ο GA θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να αναγνωρίζει, να ελέγχει και να ενσωματώνει στην εξελικτική διαδικασία τα σχήματα με σκοπό την βελτίωση της επίδοσής του από γενιά σε γενιά. Η αποτελεσματικότητα του GA σε προβλήματα με μη γραμμικό πεδίο έρευνας οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο επεξεργάζεται παράλληλα τα δομικά τμήματα. Η ιδιότητα αυτή του «εγγενούς παραλληλισμού» (implicit parallelism) [1] θεωρείται εξαιρετικά σημαντική, καθώς ο GA ουσιαστικά υπολογίζει την μέση τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας για ένα πολύ μεγαλύτερο πλήθος σχημάτων με το ίδιο υπολογιστικό κόστος. Με αυτόν τον τρόπο ο GA δειγματοληπτεί αποδοτικά μεγαλύτερο τμήμα του χώρου λύσεων, αποφεύγοντας την παγίδευση σε τοπικά βέλτιστα.

#### **4.1.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΝΟΣ ΑΠΛΟΥ GA**

Η διαδικασία ενός απλού γενετικού αλγόριθμου αποτελείται από τις ακόλουθες φάσεις [8]:

1. Δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού
2. Υπολογισμός της καταλληλότητας κάθε μέλους του πληθυσμού
3. Ενεργοποίηση της φυσικής επιλογής
4. Επιλογή μελών του πληθυσμού για ζευγάρωμα
5. Γέννηση απογόνων από τη διασταύρωση γονέων
6. Μετάλλαξη επιλεγμένων μελών του πληθυσμού
7. Τερματισμός ή επιστροφή στη φάση 2.

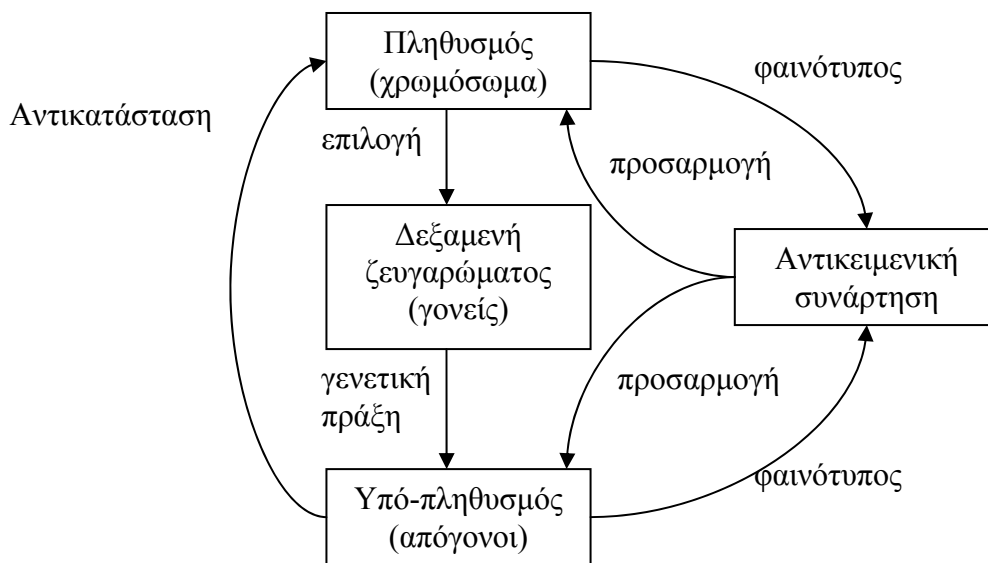
Συνήθως, ο αρχικός πληθυσμός δημιουργείται με τυχαίο τρόπο.

Η διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό βήμα στη βελτιστοποίηση. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η κινητήρια δύναμη του γενετικού αλγορίθμου. Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ποιότητας ή της επίδοσης (fitness) των ατόμων στον πληθυσμό και αποτελεί το μοναδικό σύνδεσμο ανάμεσα στο φυσικό πρόβλημα που τίθεται σε βελτιστοποίηση και το γενετικό αλγόριθμο. Η αντικειμενική συνάρτηση συνοψίζει τις απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος. Με άλλα λόγια, εκφράζει το κατά πόσο μια λύση προσεγγίζει τον επιθυμητό στόχο ή καθορίζει την απόσταση που τη χωρίζει από αυτόν. Η αντικειμενική συνάρτηση συνήθως λαμβάνει θετικές τιμές, αν όμως αναφέρεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί να λάβει και αρνητικές τιμές, οπότε αναφέρεται κυρίως ως συνάρτηση κόστους. Στην τελευταία περίπτωση, απαιτείται προσεκτική επιλογή των μηχανισμών του γενετικού αλγορίθμου. Αφού η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να κληθεί πολλές φορές για την εκτίμηση της καταλληλότητας των μελών του πληθυσμού, υπάρχει συνήθως ένας συμβιβασμός μεταξύ της υπολογιστικής ακρίβειας και του χρόνου εκτίμησης. Για να μειωθεί ο χρόνος σύγκλισης, μόνο οι σχετικές με την καταλληλότητα μεταβλητές πρέπει να συμπεριληφθούν. Ο χρόνος που θα αναλωθεί για την προσεκτική διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης θα αποφέρει αργότερα στη διαδικασία αξιοπρόσεκτα



οφέλη. Συχνά, η αντικειμενική συνάρτηση ικανοποιεί περισσότερους από έναν στόχους. Αυτός ο τύπος προβλήματος ονομάζεται πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση.

Από την διασταύρωση επιλέγονται τα ζευγάρια από τα οποία παράγονται δυο απόγονοι, οι οποίοι προστίθενται στον πληθυσμό της νέας γενεάς. Ένα μικρό ποσοστό μεταλλάσσεται. Ο καινούριος πληθυσμός παίρνει την θέση του προηγούμενου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Κατώτατο όριο για τον τερματισμό της διαδικασίας εκφράζει το fitness-threshold, κατώφλι καταλληλότητας. Αξιολογείται η τελική φάση και αν χρειαστεί επαναλαμβάνουμε την διαδικασία αλλιώς τερματίζεται δίνοντας την βέλτιστη δυνατή λύση. Στο σχήμα που ακολουθεί αναπαρίσταται σχηματικά ένας κύκλος του βασικού γενετικού αλγόριθμου.



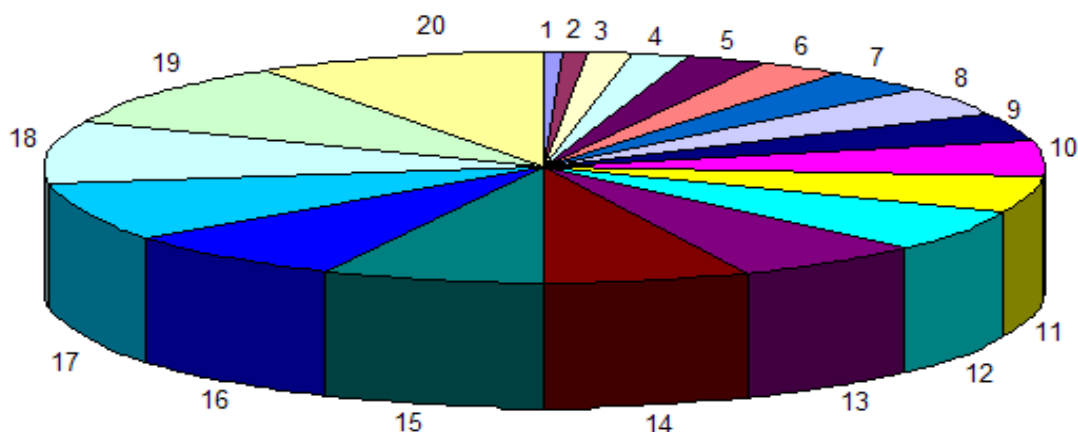
Σχήμα 4.1: Ένας κύκλος βασικού γενετικού αλγόριθμου.

#### 4.1.4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ (SELECTION) ΤΩΝ GAS

Οι στρατηγικές επιλογής καθορίζουν ποια χρωμοσώματα θα συμμετάσχουν στη διαδικασία της εξέλιξης και στο σχηματισμό των απογόνων. Η επιλογή οφείλει να λαμβάνει υπόψη την καταλληλότητα κάθε ατόμου εισάγοντας με αυτόν τον τρόπο την επίδραση της συνάρτησης καταλληλότητας στην διαδικασία βελτιστοποίησης. Από την επιλογή δε θα πρέπει να αποκλείονται εκ προοιμίου άτομα που χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές στην αντικειμενική συνάρτηση, διότι αυτή η τακτική μπορεί να οδηγήσει σε απόρριψη χρήσιμης πληροφορίας και τελικά σε πρόωρη σύγκλιση σε τοπικό και όχι στο ολικό βέλτιστο. Οι κυριότερες στρατηγικές στοχαστικής επιλογής στους GAs είναι οι εξής:

- Η πιο δημοφιλής τεχνική επιλογής είναι η λεγόμενη διαδικασία της ρουλέτας. Η πιθανότητα ενός χρωμοσώματος να επιλεγεί είναι ανάλογη της τιμής της καταλληλότητας του συγκρινόμενη με τη συνολική καταλληλότητα του τρέχοντος πληθυσμού. Ένα χρωμόσωμα με υψηλή τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση έχει περισσότερες πιθανότητες να επιλεγεί από ότι ένα με χαμηλή τιμή καταλληλότητας. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται ακόμα ως ρόδα ρουλέτας που περιέχει όλα τα χρωμοσώματα, στην οποία τα χρωμοσώματα που έχουν μια καλύτερη ικανότητα καταλαμβάνουν μια μεγαλύτερη περιοχή επιφάνειας

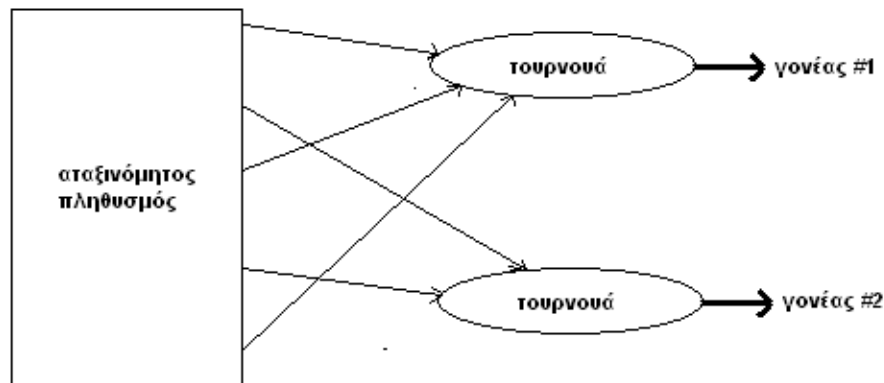
της ρόδας με αποτέλεσμα να αποκτούν μια μεγαλύτερη πιθανότητα για να επιλεγούν. Υπάρχουν όμως κάποια προβλήματα που σχετίζονται με αυτή την προσέγγιση: Αρχικά, η ρόδα ρουλέτας πρέπει να υπολογίζεται εκ νέου σε κάθε γενιά. Ακόμα, αν ο ρυθμός μετάλλαξης είναι χαμηλός, τότε στις τελευταίες γενεές όλα τα χρωμοσώματα θα έχουν περίπου την ίδια πιθανότητα επιλογής. Τέλος, οι καταλληλότητες πρέπει να κανονικοποιούνται ώστε να προκύψουν οι πιθανότητες [3-8, 52].



Σχήμα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου της ρουλέτας.

- Άλλη μέθοδος είναι η αποδεκάτιση πληθυσμού (population decimation). Σε αυτήν την στρατηγική τα χρωμοσώματα ταξινομούνται σύμφωνα με τις τιμές της καταλληλότητάς τους, από την υψηλότερη στη χαμηλότερη [3, 52]. Αυτή η στρατηγική συνιστάται σε πολλές περιπτώσεις, καθώς οδηγεί σε κανονική σύγκλιση και παράγει καλύτερες λύσεις από τις υπόλοιπες στρατηγικές [7]. Επιλέγεται μία ελάχιστη τιμή καταλληλότητας για τον εναπομείναντα πληθυσμό. Τα άτομα με μικρότερη καταλληλότητα από την τιμή αυτή απορρίπτονται. Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία αναπαραγωγής μέχρι τη συμπλήρωση μιας νέας γενιάς. Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου επιλογής είναι η απλότητά της. Το μόνο που κάνει είναι να καθορίσει ποια από τα άτομα του παρόντος πληθυσμού είναι αρκετά κατάλληλα ώστε να αντιπροσωπευθούν στην επόμενη γενιά και στη συνέχεια κατά ένα τυχαίο τρόπο σχηματίζει ζεύγη ατόμων τα οποία επιβιώνουν από την αποδεκάτιση. Κύριο και αρκετά σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι από τη στιγμή που ένα άτομο απορριφθεί από τον πληθυσμό, ένα αρκετά πιθανόν ένα αποκλειστικό χαρακτηριστικό του να χαθεί δια παντός από τις επόμενες γενιές. Αυτή η απώλεια είναι φυσικό επόμενο σε όλους τους αποτελεσματικούς και πετυχημένους γενετικούς αλγόριθμους μόνο που σε αυτή τη μέθοδο συμβαίνει πολύ πριν ο γενετικός αλγόριθμος αντιληφθεί την πιθανή σπουδαιότητα ενός αποκλειστικού χρωμοσώματος.
- Στην επονομαζόμενη μέθοδο τουρνουά (tournament selection) σχηματίζονται δύο μικρές ομάδες χρωμοσωμάτων από τη δεξαμενή ζευγαρώματος. Το χρωμοσώμα με την υψηλότερη καταλληλότητα από κάθε ομάδα γίνεται γονέας. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να συμπληρωθεί ο απαιτούμενος πληθυσμός. Η στρατηγική αυτή δουλεύει καλά με το κατώφλι καταλληλότητας, επειδή ο πληθυσμός δε χρειάζεται ποτέ ταξινόμηση, πράγμα σπουδαίο, καθώς η ταχύτητα ταξινόμησης προκύπτει ως θέμα μόνο σε μεγάλου μεγέθους πληθυσμούς [8]. Η μέθοδος επιλογής τουρνουά αποτελεί

μία από τις πλέον αποδοτικές στοχαστικές μεθόδους επιλογής, υστερεί όμως σε σχέση με τη μέθοδο της αποδεκάτισης πληθυσμού [7].



Σχήμα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου της ρουλέτας.

- Η επιλογή με την μέθοδο κατάταξης (ranking selection) πραγματοποιείται τοποθετώντας τα άτομα σε φθίνουσα σειρά σύμφωνα με την αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Κατόπιν αποδίδονται σε αυτά πιθανότητες επιλογής χρησιμοποιώντας μία γραμμική ή μη γραμμική κατανομή. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει αρνητικές τιμές [3].

#### 4.1.5 ΣΧΗΜΑΤΑ ΖΕΥΓΑΡΩΜΑΤΟΣ (MATING SCHEMES)

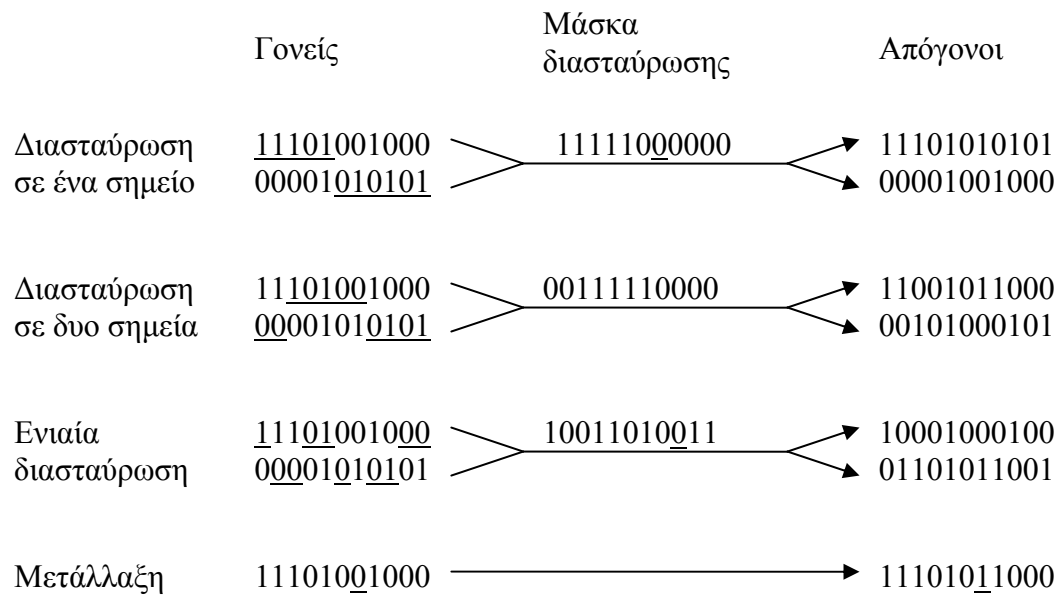
Ενώ οι μέθοδοι επιλογής ασχολούνται με ποια χρωμοσώματα θα συμπεριληφθούν στη διαδικασία της εξέλιξης (δηλαδή ποιοι είναι οι γονείς), τα σχήματα ζευγαρώματος καθορίζουν ποιο ακριβώς θα είναι οι δύο γονείς που θα ζευγαρώσουν μεταξύ τους. Τα γνωστότερα σχήματα είναι τα ακόλουθα :

- Best Mates-Worst. Όπως υποδηλώνει και η ονομασία τα χρωμοσώματα με τις υψηλότερες τιμές καταλληλότητας ζευγαρώνουν με αυτά που έχουν τις χαμηλότερες τιμές καταλληλότητας.
- Adjacent Fitness Pairing. Τα δύο άτομα που βρίσκονται υψηλότερα στην κατάταξη με βάση την καταλληλότητα ζευγαρώνουν μεταξύ τους, τα επόμενα δύο πάλι μεταξύ τους κ.ο.κ. Αυτό είναι και το ενδεικνυόμενο σχήμα [7].
- Emperor Selective mating. Το πρώτο άτομο με βάση την κατάταξη φθίνουσας καταλληλότητας ζευγαρώνει με το δεύτερο, το τέταρτο κ.λ.π, ενώ το τρίτο, το πέμπτο κ.λ.π παραμένουν αμετάβλητα.

#### 4.1.6 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗΣ (CROSSOVER)

Οι μηχανισμοί επιλογής ασχολούνται με το ποια υπάρχοντα άτομα θα συμμετάσχουν στη διαδικασία της εξέλιξης, αλλά δε δημιουργούν νέα. Η διερεύνηση όμως σε έναν επαρκή χώρο λύσεων προϋποθέτει τη χρήση διαδικασιών σύνθεσης και ανάμιξης γενετικού υλικού. Με τη διασταύρωση επιδιώκεται ανταλλαγή γενετικής πληροφορίας μεταξύ των γονέων με σκοπό τη δημιουργία απογόνων με καλύτερα χαρακτηριστικά [3, 52]. Κατασκευάζονται λοιπόν δυο απόγονοι συνδυάζοντας επιλεγμένα στοιχεία από τους δυο γονείς. Αντιγράφοντας ένα γονίδιο από μια συγκεκριμένη θέση ενός γονέα, το γονίδιο αυτό θα υπάρχει στον απόγονο στην ίδια αυτή θέση. Ο τελεστής της διασταύρωσης εφαρμόζεται στους γονείς με πιθανότητα  $p_c$ , η οποία πρέπει να επιλεγθεί κατάλληλα από τον σχεδιαστή. Τυπικές τιμές της  $p_c$  είναι μεταξύ 0.6 και 0.8 [3, 52].

Συνήθως εφαρμόζεται η διασταύρωση n-σημείων (n-point crossover). Επιλέγονται λοιπόν τυχαία  $n$  σημεία στα χρωμοσώματα των γονέων και κατόπιν ενώνονται οι υποακολουθίες που βρίσκονται ανάμεσα στα σημεία αυτά με αμοιβαία ανταλλαγή γενετικού υλικού. Κυρίως πραγματοποιείται διασταύρωση ενός ή δύο σημείων ( $n=1$  ή  $n=2$ ). Στο σχήμα 1.5.1 παρατηρούμε στη πρώτη περίπτωση την διασταύρωση σε ένα σημείο. Οι απόγονοι ανταλλάζουν τα χαρακτηριστικά των γονιών τους από ένα σημείο και πέρα. Από το επιλεγθέν σημείο διασταύρωσης, ο πρώτος απόγονος παίρνει το πρώτο μέρος από τον ένα και το δεύτερο μέρος από τον άλλο γονιό και αντίθετα ο δεύτερος. Στην δεύτερη περίπτωση έχουμε την διασταύρωση σε δύο σημεία. Έτσι τα γονίδια των γονιών είναι χωρισμένα τώρα σε τρία μέρη. Αντικαθιστούμε για τον ένα απόγονο την μέση του πρώτου γονιού στο μέσο του δεύτερου γονιού και για τον άλλο απόγονο, αντικαθιστούμε τη μέση του δεύτερου γονιού στον πρώτο. Στην περίπτωση της ενιαίας διασταύρωσης συνδυάζονται διάφορα μέρη του ενός γονέα με τα αντίστοιχα αντίθετα του αλλού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4.



**Σχήμα 4.4: Διασταύρωση και Μετάλλαξη.**

Τα προηγούμενα παραδείγματα αφορούσαν δυαδικά χρωμοσώματα. Υπάρχει η δυνατότητα χρήσης μάσκας διασταύρωσης για μη δυαδικά (συνεχών μεταβλητών) χρωμοσώματα [8]. Αυτή η προσέγγιση αναμειγνύει τιμές μεταβλητών ανάμεσα στους γονείς για τη δημιουργία απογόνων. Περισσότερο κοινές προσεγγίσεις συνδυάζουν τιμές μεταβλητών από τους γονείς. Μια προσέγγιση είναι να αποδοθούν συντελεστές βαρύτητας στους γονείς και μετά να προστεθούν για τη δημιουργία απογόνων:

$$\begin{aligned} offspring1 &= \beta mother + (1 - \beta) father \\ offspring2 &= (1 - \beta) mother + \beta father \end{aligned} \tag{4.1}$$

όπου  $0 \leq \beta \leq 1$ . Όταν  $\beta = 0.5$ , το αποτέλεσμα είναι ο μέσος όρος των μεταβλητών των δύο γονέων. Αυτή η διαδικασία γραμμικού συνδυασμού γίνεται για όλες τα γονίδια στο δεξιό ή αριστερό μέρος κάποιου σημείου διασταύρωσης, ή μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε γονίδιο. Τα γονίδια μπορούν να αναμειχθούν χρησιμοποιώντας το ίδιο  $\beta$  ή επιλέγοντας διαφορετικές τιμές για κάθε μεταβλητή-γονίδιο. Αυτές οι μέθοδοι ανάμειξης δημιουργούν τιμές μεταβλητών που δεν υπερβαίνουν τα όρια όπως ήδη εκπροσωπούνται στον πληθυσμό.

Η γραμμική διασταύρωση δημιουργεί απογόνους των οποίων οι τιμές των μεταβλητών υπερβαίνουν τα όρια των αντιστοίχων στους γονείς με το να βρίσκει τρεις νέες τιμές που δίνονται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} offspring1 &= 0.5 * mother + 0.5 * father \\ offspring2 &= 1.5 * mother - 0.5 * father \\ offspring3 &= -1.5 * mother + 0.5 * father \end{aligned} \quad (4.2)$$

Μόνο δύο από τους τρεις απογόνους γίνονται αποδεκτοί. Οποιαδήποτε τιμή εκτός των περιορισμών απορρίπτεται. Η ευριστική διασταύρωση είναι μια διακύμανση όπου κάποιος τυχαίος αριθμός  $0 \leq \beta \leq 1$  επιλέγεται και οι μεταβλητές των απογόνων καθορίζονται από τη σχέση

$$offspring = \beta * (mother - father) + mother \quad (4.3)$$

Ένα άλλο ενδεχόμενο είναι η εύρεση διαφορετικής τιμής  $\beta$  για κάθε μεταβλητή-γονίδιο. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει τη γέννηση απογόνων που ξεπερνούν τις τιμές των γονεϊκών μεταβλητών. Αν αυτό συμβεί, ο απόγονος απορρίπτεται και ο αλγόριθμος δοκιμάζει νέα τιμή  $\beta$ .

Η συνεχής διασταύρωση απλού σημείου μιμείται τη διασταύρωση σε ένα σημείο των δυαδικών GAs. Ξεκινά επιλέγοντας τυχαία μια μεταβλητή σαν το σημείο διασταύρωσης μέσα στα χρωμοσώματα-γονείς. Έστω  $q$  το τυχαία επιλεγμένο σημείο διασταύρωσης και έστω

$$\begin{aligned} mother &= [m_1 m_2 \dots m_q \dots m_{n \text{ var}}] \\ father &= [f_1 f_2 \dots f_q \dots f_{n \text{ var}}] \end{aligned} \quad (4.4)$$

Οι επιλεγμένες μεταβλητές συνδυάζονται για να δώσουν νέες μεταβλητές που θα εμφανίζονται στους απογόνους

$$\begin{aligned} b_q &= m_q - \beta [m_q - f_q] \\ g_q &= f_q + \beta [m_q - f_q] \end{aligned} \quad (4.5)$$

όπου  $\beta$  επίσης μια τυχαία μεταβλητή μεταξύ 0 και 1. Το τελικό βήμα είναι η ολοκλήρωση της διασταύρωσης με το υπόλοιπο χρωμόσωμα όπως πριν:

$$\begin{aligned} offspring1 &= [m_1 m_2 \dots b_q \dots f_{n \text{ var}}] \\ offspring2 &= [f_1 f_2 \dots g_q \dots m_{n \text{ var}}] \end{aligned} \quad (4.6)$$

Για να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός της διασταύρωσης συνεχών μεταβλητών, έστω ότι έχουμε τους εξής γονείς: mother=[1 2 3 4 5 6] και father=[3 2 1 0 1 2]. Η διασταύρωση με έναν τυχαίο συντελεστή βαρύτητας, έστω  $\beta=0.78642$ , όπως στη σχέση (4.1) θα δώσει chrom3= [1.4272 2 2.5728 3.1457 4.1457 5.1457] και chrom4= [2.5728 2 1.4272 0.85433 1.8543 2.8543]. Στη συνέχεια ένας τυχαίος συντελεστής βαρύτητας, έστω  $\beta=[0.30415 0.79177 0.22736 0.24999 0.61258 0.61086]$ , εφαρμόζεται για κάθε μεταβλητή στο χρωμόσωμα. Τότε η σχέση (4.1) δίνει chrom3=[2.3917 2 1.4547 0.99997 3.4503 4.4434] και chrom4=[1.6083 2 2.5453 3 2.5497 3.5566]. Η γραμμική διασταύρωση σύμφωνα με τη σχέση (4.2) καταλήγει σε chrom3=[2 2 2 2 3 4], chrom4=[0 2 4 6 7 8] και chrom5=[4 2 0 -2 -1 0]. Η ευριστική διασταύρωση για  $\beta=0.78642$  παράγει σύμφωνα με τη σχέση (4.3) chrom3=[2.5728 2 1.4272 0.85432 1.8543 2.8543] και chrom4=[-0.57284 2 4.5728 7.1457 8.1457 9.1457]. Η συνεχής διασταύρωση σε ένα σημείο για  $q=5$  και

$\beta=0.78642$  παράγει σύμφωνα με τη (4.5) chrom3=[1 2 3 4 1.8543 2] και chrom4=[3 2 1 0 4.1457 6].

#### **4.1.7 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΑΞΗΣ (MUTATION)**

Η μετάλλαξη μεταβάλλει ένα ή περισσότερα γονίδια ενός ατόμου με πιθανότητα  $p_m$ , ώστε να προκύψει ένα νέο άτομο. Στο Σχήμα 4.4 γίνεται αλλαγή ενός μόνο γονιδίου. Η  $p_m$  επιλέγεται σχετικά μικρή (συνιστώμενη τιμή 0.15 [7]) καθώς όταν πλησιάζει την μονάδα ο GA εκφυλίζεται ουσιαστικά σε τυχαία αναζήτηση. Το νόημα της μετάλλαξης είναι ότι όταν αλλάζει ένα μικρό τμήμα του πληθυσμού με τυχαίο τρόπο μπορεί ο γενετικός αλγόριθμος να ερευνήσει αποδοτικά σε μία νέα, άγνωστη περιοχή λύσεων. Στην περίπτωση που στο γενετικό αλγόριθμο χρησιμοποιείται δυαδική απεικόνιση, η μετάλλαξη είναι δυαδική (binary mutation) και αντιστρέφει ένα ή περισσότερα bits σε κάθε άτομο με πιθανότητα  $p_m$ . Σε πραγματικές απεικονίσεις εφαρμόζονται οι ακόλουθες τεχνικές μετάλλαξης [3] :

- Η ομοιόμορφη (uniform mutation), στην οποία ένα γονίδιο του χρωμοσώματος επιλέγεται τυχαία και τίθεται ίσο με έναν ομοιόμορφα κατανομημένο τυχαίο αριθμό εντός προκαθορισμένων ορίων.
- Η ανομοιόμορφη (non-uniform mutation), όπου ένα γονίδιο επιλέγεται τυχαία και τίθεται ίσο με ένα μη-ομοιόμορφα κατανομημένο τυχαίο αριθμό εντός των προκαθορισμένων ορίων.
- Η πολλαπλά ανομοιόμορφη (multi-non-uniform mutation), όπου η ανομοιόμορφη μετάλλαξη εφαρμόζεται σε κάθε γονίδιο του χρωμοσώματος.
- Τέλος η συνοριακή (boundary mutation), όπου ένα γονίδιο του χρωμοσώματος επιλέγεται τυχαία και τίθεται ίσο με το κατώτατο ή το ανώτατο φράγμα του.

#### **4.1.8 ΕΛΙΤΙΣΜΟΣ**

Έχει αποδειχτεί ότι η είναι εφικτή η εύρεση της βέλτιστης λύσης μετά από άπειρες επαναλήψεις του αλγορίθμου όταν σε κάθε νέα γενιά υπεισέρχεται το άτομο με την καλύτερη καταλληλότητα της προηγούμενης γενιάς [52]. Η στρατηγική αυτή καλείται ελιτισμός (elitism). Στην πράξη έχει παρατηρηθεί ότι η υιοθέτηση του ελιτισμού βελτιώνει την απόδοση του GA. Γενικότερα, είναι δυνατό να προστατεύεται μία ομάδα ατόμων υψηλής καταλληλότητας. Το πλήθος όμως των ατόμων που προστατεύονται πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά, γιατί αν είναι πολύ μικρό άτομα με εξαιρετική επίδοση δε θα λάβουν μέρος ως έχουν στη διαδικασία της εξέλιξης, ενώ από την άλλη πλευρά αν είναι αρκετά μεγάλο λιγοστεύει ο αριθμός των ατόμων στα οποία εφαρμόζονται η μετάλλαξη και η διασταύρωση και έτσι φθίνει η απόδοση του αλγορίθμου.

#### **4.1.9 ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ GA**

Όσον αφορά την αρχικοποίηση του γενετικού αλγορίθμου, η πρώτη γενιά διαμορφώνεται συνήθως με τυχαίο τρόπο. Πολλές φορές μπορεί να υπάρχουν στην πρώτη γενιά άτομα τα οποία αποτελούν λύση ενός παραπλήσιου προβλήματος.

Σχετικά με το πως μπορεί να τερματιστεί ένας γενετικός αλγόριθμος, ο πιο συνηθισμένος τρόπος είναι να τερματιστεί όταν έχει εκτελεστεί ένα συγκεκριμένο προκαθορισμένο πλήθος επαναλήψεων-γενιών. Επειδή όμως ο αλγόριθμος είναι στοχαστικός δεν είναι εξασφαλισμένη έτσι η σύγκλιση στο ολικό βέλτιστο, ενώ υπάρχει και η αντίθετη περίπτωση να έχει συγκλίνει ο αλγόριθμος και να συνεχίζεται άσκοπα η αναζήτηση. Για αυτούς τους λόγους επιλέγονται και άλλα κριτήρια τερματισμού. Συνήθως, ο GA τερματίζεται όταν η συνάρτηση καταλληλότητας των

ατόμων υπερβεί ένα προκαθορισμένο κατώφλι ή όταν μια βέλτιστη λύση δεν έχει αλλάξει μετά από ένα ορισμένο αριθμό επαναλήψεων.

#### **4.1.10 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΑ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ**

Οι γενετικοί αλγόριθμοι εφαρμόζονται κυρίως σε προβλήματα αναζήτησης βέλτιστου, όπου υπάρχουν αρκετά τοπικά ελάχιστα (μέγιστα). Ο στόχος τους είναι η εύρεση του καθολικού βέλτιστου. Οι κάτωθι ιδιότητες των γενετικών αλγορίθμων συμβάλλουν σε αυτήν την προσπάθεια :

- Αναζήτηση από ένα πληθυσμό λύσεων και όχι μόνο από μία.
- Χρήση τυχαίων, στοχαστικών τελεστών και όχι καθορισμένων.
- Χρήση πληροφορίας για την προσαρμογή και όχι παραγώγους ή άλλη βοηθητική πληροφορία.

Δεν είναι σίγουρο ότι η λύση που θα δώσει τελικά ο γενετικός αλγόριθμος είναι και η βέλτιστη. Σε προβλήματα όμως ηλεκτρομαγνητικής φύσεως και ειδικότερα σε θέματα σχεδίασης και ανάπτυξης κεραιών οι κάτωθι κανόνες [3-8, 52], που δεν είναι δεσμευτικοί, συνήθως συντείνουν στην εύρεση της ολικά βέλτιστης λύσης, αν βέβαια και αυτή υπάρχει.

- Η επιλογή της κατάλληλης κωδικοποίησης εξαρτάται από το υπό εξέταση πρόβλημα. Ακόμα, γονίδια που σχετίζονται μεταξύ τους θα πρέπει να βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις μέσα στο χρωμόσωμα. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί η κωδικοποίηση μιγαδικών αριθμών, στην οποία χρησιμοποιούνται δύο γονίδια για την περιγραφή του μέτρου και της φάσης αντίστοιχα. Τα γονίδια αυτά πρέπει να βρίσκονται σε διαδοχικές θέσεις εντός του χρωμοσώματος.
- Το μέγεθος του πληθυσμού αποτελεί κρίσιμο παράγοντα. Το πλήθος των γενιών καθορίζει αν όντως θα επιτευχθεί σύγκλιση και το πλήθος των χρωμοσωμάτων το πόσο καλή θα είναι η λύση στην περίπτωση της σύγκλισης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο πληθυσμός τόσο μεγαλύτερο ποσοστό του χώρου λύσεων ερευνάται και τόσο περισσότερα σχήματα αντιπροσωπεύονται. Από την άλλη μεριά αυξάνεται το υπολογιστικό κόστος κατά την εκτέλεση του GA.
- Σημαντική παράμετρος για την εκτέλεση του GA είναι η πιθανότητα διασταύρωσης  $p_c$  η οποία μπορεί να λάβει τιμές μεταξύ 0.5 και 0.9. Οι υψηλότερες τιμές εξασφαλίζουν πιο γρήγορη αναζήτηση του χώρου λύσεων. Τιμές μεταξύ 0.7 και 0.8 αποδεικνύονται αποδοτικές στα περισσότερα προβλήματα [5].
- Η πιθανότητα μετάλλαξης  $p_m$  επιλέγεται πάντα σχετικά μικρή, συνήθως 0.15. Τιμές της  $p_m$  μεγαλύτερες από 0.15 δίνουν την δυνατότητα στον GA να ξεφύγει από τα τοπικά βέλτιστα, αλλά μπορεί να οδηγήσουν στην απομάκρυνση ατόμων με εξαιρετικές επιδόσεις που βρίσκονται κοντά στο ολικό βέλτιστο, καθυστερώντας ή αποτρέποντας τη σύγκλιση [7].
- Ενθαρρύνεται η χρησιμοποίηση τεχνικών ελιτισμού.

#### **4.1.11 ΈΝΑ ΒΗΜΑ ΠΡΟΣ ΒΗΜΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ**

Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί αναλυτικά ένας γενετικός αλγόριθμος που ως στόχο έχει την ελαχιστοποίηση της στάθμης των πλευρικών λοβών μιας γραμμικής «εκλεπτυσμένης» στοιχειοκεραίας (thinned array) ισοτροπικών στοιχείων [8]. Η «εκλέπτυνση» σημαίνει ότι κάποια στοιχεία δε τροφοδοτούνται με σκοπό τη

μείωση των πλευρικών λοβών. Ένα στοιχείο που είναι ‘on’ συνδέεται με το κύκλωμα τροφοδοσίας. Ένα στοιχείο που είναι ‘off’ συνδέεται με ένα φορτίο τερματισμού. Η διαδικασία αυτή είναι απλούστερη από τη γενικότερη περίπτωση της ανομοιόμορφης τοποθέτησης των στοιχείων. Η «εκλέπτυνση» έχει  $2^N$  πιθανούς συνδυασμούς, όπου  $N$  ο αριθμός των κεραιοστοιχείων. Αν η στοιχειοκεραία είναι συμμετρική, τότε οι πιθανοί συνδυασμοί μειώνονται αισθητά.

Μια τέτοια στοιχειοκεραία έχει διακριτές παραμέτρους. Ένα bit αντιπροσωπεύει την κατάσταση κάθε στοιχείου σαν ‘on’=1 ή ‘off’=0. Στο υπό εξέταση παράδειγμα υπάρχει μια συμμετρική ως προς το φυσικό της κέντρο στοιχειοκεραία με  $N_T$  στοιχεία, όπου  $N_T$  άρτιος φυσικός αριθμός. Τα κεντρικά και τα ακριανά στοιχεία είναι πάντα ενεργά. Τα κεντρικά στοιχεία υποτίθενται ενεργά γιατί οι διατάξεις μείωσης του πλάτους των πλευρικών λοβών έχουν ένα μέγιστο στο κέντρο. Τα ακριανά στοιχεία υποτίθενται ενεργά για να κρατηθεί σταθερό το γωνιακό εύρος του κύριου λοβού, πράγμα πολύ σημαντικό όταν στόχος είναι η μείωση της μέγιστης στάθμης πλευρικών λοβών. Επομένως κάθε χρωμόσωμα είναι ένα  $1 \times N_{\text{cbits}}$  διάνυσμα που αποτελείται από 0 και 1, όπου  $N_{\text{cbits}} = (N_T - 4)/2$ . Η συνάρτηση κόστους στο εν λόγω πρόβλημα είναι το σχετικό διάγραμμα μακρινού πεδίου στοιχειοκεραίας σημειακών πηγών. Η έξοδος της που ελαχιστοποιείται είναι η μέγιστη στάθμη πλευρικού λοβού. Οι παράμετροι που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της συνάρτησης κόστους είναι το αν ένα κεραιοστοιχείο είναι ενεργό ή όχι. Η συνάρτηση κόστους επιστρέφει το υψηλότερο επίπεδο πλευρικού λοβού της συστοιχίας [8]

$$AF_{th} = 20 \log_{10} \left( \max \left\{ \frac{w \cos \Psi}{N_{active}} \right\} \right), \quad u > \frac{1}{d N_T} \quad (4.7)$$

όπου  $w = [1 \text{ chromosome } 1]$

$d = 0.5\lambda$ , η απόσταση των στοιχείων

$N_T = 4 + 2N_{\text{cbits}}$  το πλήθος των στοιχείων

$N_{\text{cbits}}$  ο αριθμός των bits σε ένα χρωμόσωμα

$N_{active}$  ο αριθμός των ενεργών στοιχείων

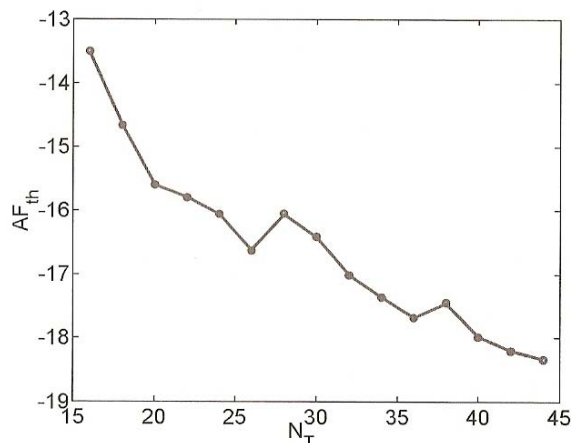
$\Psi = [0.5kdu \ 1.5kdu \ \dots \ (N_T/2 - 0.5)kdu]$

$u = \cos(\varphi)$ , όπου η γωνία  $\varphi$  μετριέται από τον άξονα της στοιχειοκεραίας μέχρι το σημείο παρατήρησης.

Ανιχνεύονται λοιπόν όλες οι γωνίες  $\varphi$  όπου σχηματίζονται πλευρικοί λοβοί (τοπικά μέγιστα) και η συνάρτηση κόστους επιστρέφει το ύψος του μεγαλύτερου πλευρικού λοβού. Βρίσκοντας την ελάχιστη τιμή της συνάρτησης κόστους, προκύπτει η διάταξη που εμφανίζει όσο περισσότερο γίνεται περιορισμένους πλευρικούς λοβούς. Αφού η στοιχειοκεραία είναι συμμετρική ως προς το φυσικό κέντρο της, ένα συνημίτονο χρησιμοποιείται στον παράγοντα διάταξης αντί ενός μιγαδικού εκθέτη. Διαιρώντας με τον αριθμό των ενεργών στοιχείων ο παράγοντας διάταξης κανονικοποιείται στο μέγιστο του. Επιβάλλοντας στα ακριανά στοιχεία να είναι ενεργά, στοιχειοθετείται ένας καλά ορισμένος κύριος λοβός για όλα τα χρωμοσώματα. Επομένως, η περιοχή των πλευρικών λοβών ξεκινά στον πρώτο μηδενισμό δίπλα στην κύρια δέσμη. Μια καλή εκτίμηση της θέσης του πρώτου μηδενισμού είναι  $u = 1/(dN_T)$ .

Μια εξαντλητική έρευνα για όλα τα πιθανά χρωμοσώματα απαιτεί  $2^{N_{\text{cbits}}}$  υπολογισμούς της συνάρτησης κόστους. Αυτή η προσέγγιση μειώνει κατακόρυφα τον υπολογιστικό χρόνο. Ένα γράφημα της ελάχιστης τιμής της συνάρτησης κόστους συναρτήσει του  $N_T$  παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα. Όσο αυξάνει το πλήθος των στοιχείων, μειώνονται οι στάθμες των πλευρικών λοβών. Ο υπολογιστικός χρόνος σχεδόν διπλασιάζεται κάθε φορά που το  $N_T$  αυξάνει κατά 2.





Σχήμα 4.5: Η ελάχιστη τιμή της  $AF_{th}$  συναρτῆσει του  $N_T$  [8, σελ.55].

Ένας δυαδικός αλγόριθμος για  $N_T=52$  έχει αρχικό πληθυσμό που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο πληθυσμός μετά ταξινομείται. Κανένα από τα χρωμοσώματα δεν είναι καλύτερο από μια ομοιόμορφη στοιχειοκεραία. Για τη διαδικασία της επιλογής, απορρίπτονται τα 4 χειρότερα χρωμοσώματα. Η γενιά συμπληρώνεται με την επιλογή τουρνουά. Δύο ανταγωνιστές επιλέγονται τυχαία. Το χρωμόσωμα με το χαμηλότερο κόστος γίνεται η μητέρα. Άλλα δυο χρωμοσώματα επιλέγονται τυχαία και το χρωμόσωμα με το χαμηλότερο κόστος γίνεται ο πατέρας, κ.ο.κ.

Αρχικός πληθυσμός

Chromosome	$AF_{th}$
100111001110000111010000	-9.071
101101000110110000011001	-7.267
010101101010011101010101	-7.252
100111001111011111101101	-10.722
010010111010000101101000	-8.374
010101010010100100100011	-9.557
100101010111100010000111	-8.167
101001000011101001010000	-5.734

Πληθυσμός μετά από ταξινόμηση

Chromosome	$AF_{th}$
100111001111011111101101	-10.722
010101010010100100100011	-9.557
100111001110000111010000	-9.071
010010111010000101101000	-8.374
100101010111100010000111	-8.167
101101000110110000011001	-7.267
010101101010011101010101	-7.252
101001000011101001010000	-5.734

Οι γονείς για τη γενιά 1 βρίσκονται με επιλογή τουρνουά

Ανταγωνιστές	Νικητές	Γονείς
4,1	1	100111001111011111101101
2,1	1	100111001111011111101101
1,1	1	100111001111011111101101
1,4	1	100111001111011111101101

Σχήμα 4.6: Βήματα αλγορίθμου (α) [8, σελ.56].

Στη συνέχεια παράγονται τυχαίες μάσκες διασταύρωσης που εφαρμόζονται στους γονείς για τη γέννηση απογόνων. Σε αυτήν την περίπτωση, αφού όλοι οι γονείς είναι το χρωμόσωμα 1, οι απόγονοι είναι και αυτοί το χρωμόσωμα 1. Καμιά βελτίωση δεν προέκυψε από αυτές τις διασταυρώσεις. Ένα ποσοστό μετάλλαξης 5% καταλήγει σε 9 τυχαίες αλλαγές bits στον πληθυσμό εκτός του καλύτερου χρωμοσώματος, λόγω ελιτισμού. Όλα αυτά παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Δύο από τα μεταλλαγμένα χρωμοσώματα έχουν καλύτερη καταλληλότητα από το καλύτερο του αρχικού πληθυσμού. Στο τέλος της πρώτης γενιάς (αρχή της δεύτερης) ταξινομείται ο πληθυσμός.

**Ομοιόμορφη διασταύρωση για δημιουργία απογόνων στη γενιά 1**

Μάσκες διασταύρωσης	Απόγονοι	AF <sub>th</sub>
001110100110000110010010	100111001111011111101101	-10.722
110001011001111001101101	100111001111011111101101	-10.722
011010100011001110110101	100111001111011111101101	-10.722
100101011100110001001010	100111001111011111101101	-10.722

**Πληθυσμός της γενιάς 1 μετά από μετάλλαξη (έντονα bits)**

Chromosome	AF <sub>th</sub>
100111001111011111101101	-10.722
010101010011100100100011	-9.6814
110111001100000111000000	-8.1671
010010111010000101101000	-8.374
100111011111011111101101	-11.378
100111001111011111101100	-10.857
100111001111011111101101	-10.722
1001011011111111101101	-9.7262

**Πληθυσμός μετά από ταξινόμηση γενιά 1**

Chromosome	AF <sub>th</sub>
100111011111011111101101	-11.378
100111001111011111101100	-10.857
100111001111011111101101	-10.722
100111001111011111101101	-10.722
100101101111111111101101	-9.726
010101010011100100100011	-9.681
010010111010000101101000	-8.374
110111001100000111000000	-8.167

**Σχήμα 4.7: Βήματα αλγορίθμου (β) [8, σελ. 57].**

Η γενιά 2 θα ξεκινήσει με ένα νέο τουρνουά. Αυτή τη φορά υπάρχει κάποια διαφοροποίηση στους γονείς. Οι νέες μάσκες και το ζευγάρι δημιουργούν 4 νέους απογόνους. Παρόλο που οι απόγονοι δεν είναι ίδιοι, είναι απλώς αντίγραφα ήδη υπάρχοντων γονέων. Κατά συνέπεια, η μετάλλαξη θα δώσει στον πληθυσμό την απαραίτητη διαφοροποίηση. Γίνεται πάλι η ταξινόμηση του πληθυσμού και διαπιστώνεται ότι μετά από δύο γενεές το μέγιστο επίπεδο πλευρικού λοβού έχει μειωθεί κατά 2 dB. Μέχρι τώρα, η μετάλλαξη παρέχει τη διαφοριστικότητα, ενώ η διασταύρωση καταλήγει σε αναπαραγωγή μόνο κάποιων καλών χρωμοσωμάτων. Μια ομοιόμορφη στοιχειοκεραία εξακολουθεί να έχει χαμηλότερους πλευρικούς λοβούς σε αυτό το σημείο.

Οι γονείς για τη γενιά 2 από την επιλογή τουρνουά

Ανταγωνιστές	Νικητές	Γονείς
3,3	3	100111001111011111101101
3,1	1	100111011111011111101101
1,1	1	100111011111011111101101
3,2	2	100111001111011111101100

Ομοιόμορφη διασταύρωση για δημιουργία απογόνων στη γενιά 2

Μάσκες διασταύρωσης	Απόγονοι	AF <sub>th</sub>
000101111011011000001111	100111001111011111101101	-10.722
111010000100100111110000	100111011111011111101101	-11.378
011011000101111001100101	100111001111011111101101	-10.722
100100111010000110011010	100111011111011111101100	-11.378

Πληθυσμός της γενιάς2 μετά από μετάλλαξη (έντονα bits)

Chromosome	AF <sub>th</sub>
100111011111011111101101	-11.378
100111001111010111101100	-12.12
100111011111011111101101	-11.378
100111001111011110110101	-11.679
100110001111011111101101	-9.567
10011111111101111001101	-12.987
1001110011110111111001101	-11.962
100110011111011111101100	-10.138

Πληθυσμός μετά από ταξινόμηση γενιά 2

Chromosome	AF <sub>th</sub>
100111111111001111001101	-12.987
100111001111010111101100	-12.12
100111001111011111001101	-11.962
100111001111011101101101	-11.679
100111011111011111101101	-11.378
100111011111011111101101	-11.378
100110011111011111101100	-10.138
100110001111011111101101	-9.567

Σχήμα 4.8: Βήματα αλγορίθμου (γ) [8, σελ. 58].

Ο GA συνεχίζει αυτή τη διαδικασία. Στη γενιά 31 βρίσκει τη βέλτιστη λύση. Αν υποθεθεί ότι επτά διαφορετικά χρωμοσώματα μεταλλάσσονται σε κάθε γενιά (το μέγιστο δυνατό), τότε ο αριθμός των εκτιμήσεων της συνάρτησης κόστους σε αυτό το παράδειγμα είναι  $8+31 \times 7=225$ .

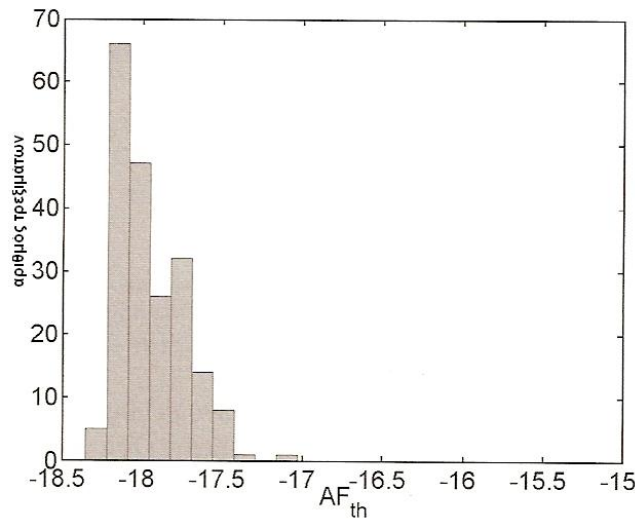
Τελικός πληθυσμός μετά τη γενιά 31

Chromosome	AF <sub>th</sub>
11111111111101111001110	-18.35
11111111011110111001111	-16.652
11111111011101111001110	-16.087
11111111011101111001110	-16.087
11111111011100111001111	-15.556
1111111101111111001111	-15.118
11101111011101111001111	-14.231
11111111001101111001101	-13.664

Σχήμα 4.9: Βήματα αλγορίθμου (δ) [8, σελ. 59].

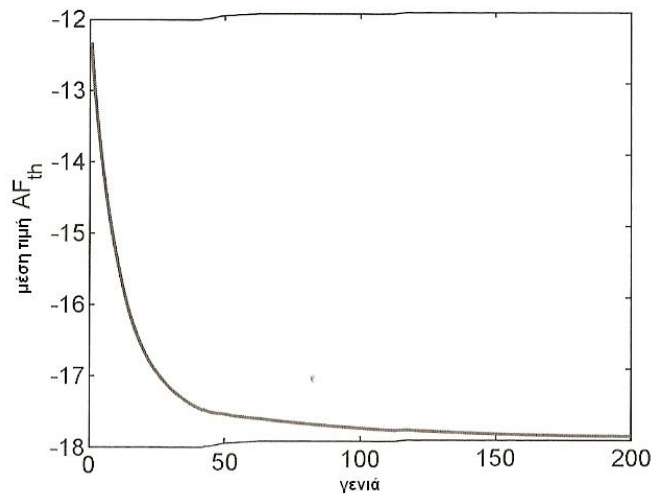
Ο GA δεν λειτουργεί πάντα το ίδιο καλά. Οι τυχαίες μεταβλητές παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα σε κάθε ανεξάρτητο τρέξιμο του αλγορίθμου. Για να

δειχθεί η ποικίλη απόδοση του αλγορίθμου, έγιναν 200 ανεξάρτητα τρεξίματα και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα [8]. Το σχήμα 4.10 είναι ένα γράφημα των ανεξάρτητων τρεξιμάτων που διατήρησαν μια δεδομένη βέλτιστη τιμή για την  $AF_{th}$ . Για παραπάνω από τον μισό χρόνο, ο αλγόριθμος βρήκε μια «εκλεπτυσμένη» διάταξη που είχε ένα βέλτιστο αποτέλεσμα με το σχετικό ύψος του κορυφαίου πλευρικού λοβού κάτω από -18 dB.



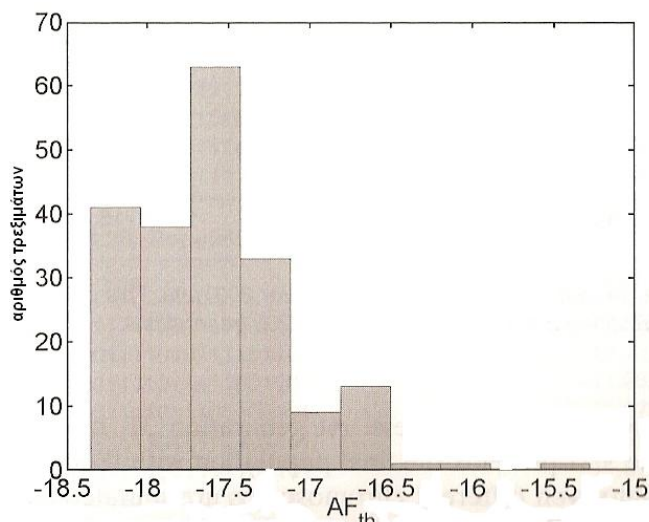
Σχήμα 4.10: Απόδοση του αλγορίθμου για 200 τρεξίματα (200 γενεές/τρεξίμο) [8, σελ. 59].

Το Σχήμα 4.11 είναι ένα γράφημα του μέσου όρου του καλύτερου αποτελέσματος για 200 ανεξάρτητα τρεξίματα σε κάθε γενιά. Στο μέσο όρο, ο GA ξεκινά γρήγορα και μετά επιβραδύνει.



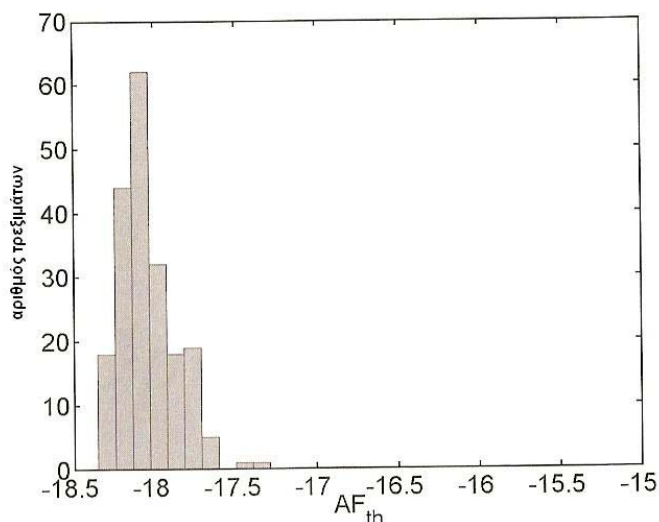
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα του μέσου όρου της  $AF_{th}$  συναρτήσει των αριθμών των γενιών [8, σελ. 60].

Περιορίζοντας το μέγιστο αριθμό των γενιών σε 50, μειώνεται σημαντικά η επίδοση του αλγορίθμου, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα. Ένας πρώιμος τερματισμός του αλγορίθμου μπορεί να αρνηθεί τη ζητούμενη λύση.



Σχήμα 4.12: Απόδοση του αλγορίθμου για 200 τρεξίματα (50 γενεές/τρέξιμο) [8, σελ. 60].

Το Σχήμα 4.13 παρουσιάζει μια μικρή βελτίωση όταν ο αριθμός των γενεών αυξάνει σε 500. Συγκεκριμένα, υπάρχουν στο Σχήμα 4.12 περίπου 20 λύσεις που είναι χειρότερες από τη χειρότερη λύση του Σχήματος 4.13.



Σχήμα 4.13: Απόδοση του αλγορίθμου για 200 τρεξίματα (500 γενεές/τρέξιμο) [8, σελ. 61].

#### 4.1.12 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΕΡΑΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Στον ηλεκτρομαγνητισμό έχουν εφαρμοστεί ευρέως οι γενετικοί αλγόριθμοι στη σχεδίαση και τη βελτιστοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών κεραιών και στοιχειοκεραιών [12-45]. Όταν σχεδιάζεται μια κεραία ή κεραιοδιάταξη με τη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων, τα ζητούμενα μπορεί να είναι η σύνθεση ενός επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας, η ελαχιστοποίηση της στάθμης των πλευρικών λοβών του διαγράμματος ακτινοβολίας, η σύνθεση διαγράμματος με πολλαπλούς λοβούς ακτινοβολίας ώστε σε κάποιες κατευθύνσεις να εμφανίζεται μέγιστη ακτινοβολή και σε κάποιες άλλες ελάχιστη, η επίτευξη συντονισμού σε κάποια μεμονωμένη συχνότητα ή σε ένα εύρος ζώνης συχνοτήτων καθώς και οποιοσδήποτε συνδυασμός από τα παραπάνω. Οι σχεδιαστικές παράμετροι μπορεί να είναι οι θέσεις των στοιχείων κάποιας κεραιοδομής, τα μεγέθη τους, οι ρευματικές διεγέρσεις κ.λ.π.

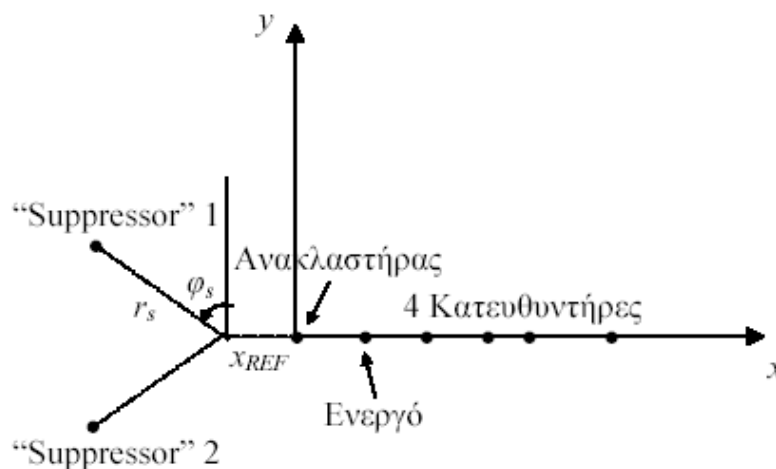
Στο [12] σχεδιάζεται μια τυπωμένη κεραία διπλής ζώνης, η οποία προκύπτει με τη χρήση ενός γενετικού αλγόριθμου που μεταβάλλει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Μια μέθοδος για τον περιορισμό των πλευρικών λοβών μιας επίπεδης τετραγωνικής στοιχειοκεραίας παρουσιάζεται στο [13], η οποία βασίζεται στη χρήση ενός γενετικού αλγόριθμου που τροποποιεί τους συντελεστές βάρους σε κάθε στοιχείο. Στο [15] προτείνεται ένας γενετικός αλγόριθμος πραγματικής κωδικοποίησης με υψηλό ποσοστό μετάλλαξης (30%) για την ελαχιστοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης (coupling) μεταξύ δύο VHF-UHF κεραιών που τοποθετούνται πάνω στην άτρακτο ενός πολεμικού αεροσκάφους. Η τεχνική των γενετικών αλγορίθμων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ενός βέλτιστου σετ συντελεστών βάρους τροφοδοσίας και μιας βέλτιστης τοποθέτησης των στοιχείων μιας ανομοιόμορφης κυκλικής στοιχειοκεραίας [16], όπου σκοπός είναι η εξαγωγή ενός διαγράμματος ακτινοβολίας με τη μεγαλύτερη δυνατή μείωση της στάθμης του υψηλότερου πλευρικού λοβού, υπό τον περιορισμό ενός σταθερού εύρους δέσμης. Μια συμπαγής γενετική κεραία που αποτελείται από ένα σετ αγωγών οι οποίοι συνδέονται σε σειρά και είναι φορτωμένοι με κατάλληλο φορτίο σχεδιάζεται στο [27]. Το σχήμα της κεραίας, οι θέσεις και οι τιμές των φορτίων βελτιστοποιούνται χρησιμοποιώντας ένα γενετικό αλγόριθμο πραγματικής απεικόνισης. Στο [29] παρουσιάζεται μια κυκλική ευφυής κεραία μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών λογαριθμικών περιοδικών διπολικών κεραιών. Η όλη διάταξη υπόκειται σε μια διαδικασία βελτιστοποίησης με σκοπό την επίτευξη σημαντικής κατευθυντικότητας και λειτουργικού εύρους ζώνης στη μπάνα των 3.1 GHz-10 GHz με τη βοήθεια ενός γενετικού αλγόριθμου. Η στροφή της δέσμης καθίσταται εφικτή επιλέγοντας κάθε φορά ποια λογαριθμική περιοδική διπολική κεραία συνδέεται με την πηγή σήματος. Επιπλέον, μέθοδοι σχεδίασης κεραιών ευρείας ζώνης με τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων αναλύονται στο [36]. Περαιτέρω, ένας γενετικός αλγόριθμος βελτιστοποιεί μια διάταξη κάθετων διπόλων υπεράνω επίπεδης γης στο [37]. Στο [38] εισάγεται μια νέα μεθοδολογία για τη βελτιστοποίηση της τοπολογίας και των μεταβλητών μιας γραμμικής στοιχειοκεραίας. Αυτή η προσέγγιση συνδυάζει μια «γλώσσα των κεραιών», η οποία καθορίζει πως θα κατασκευαστούν οι κεραίες, με έναν γενετικό αλγόριθμο που θα δημιουργεί νέες σχεδιάσεις μέσα στο πλαίσιο αυτής της γλώσσας. Οι γραμματικοί κανόνες αυτής της γλώσσας είναι ευέλικτοι και μπορούν να κυμανθούν οπουδήποτε από πολύ ακαθόριστοι μέχρι πολύ συγκεκριμένοι. Η μέθοδος επιδεικνύεται λαμβάνοντας υπόψη κάποια ενδιαφέροντα σχεδιαστικά παραδείγματα όπου η «γλώσσα» ήταν περιορισμένη στις γνωστές τοπολογίες των λογαριθμικών περιοδικών κεραιών και των κεραιών Yagi-Uda, που ήταν γνωστό εκ των προτέρων ότι λειτουργούν καλά. Σαν αποτέλεσμα, ο γενετικός αλγόριθμος ανέπτυξε κάποιες υβριδικές σχεδιάσεις με καλύτερη επίδοση που αποτελούνται από έναν συγκερασμό των παραδοσιακών λογαριθμικών περιοδικών κεραιών και κεραιών Yagi-Uda. Η νέα αυτή οικογένεια κεραιών ονομάζονται Yagi-log κεραίες. Μια τεχνική που συνδυάζει τη μέθοδο Schelkunoff με έναν γενετικό αλγόριθμο για τη σύνθεση γραμμικών στοιχειοκεραιών με μιγαδικούς συντελεστές τροφοδοσίας και τυχαία διαγράμματα ακτινοβολίας αναφέρεται στο [39]. Μια τεχνική σύνθεσης διαγράμματος ακτινοβολίας για μια MxN επίπεδη στοιχειοκεραία προτείνεται επίσης στο [39], όπου ένας γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για να καθορίσει το βέλτιστο πλάτος και τη βέλτιστη φάση διέγερσης του κάθε στοιχείου στη διάταξη. Ακόμα, στο [40] περιγράφεται η σχεδίαση κεραίας σύρματος ευρείας ζώνης, φορτωμένης σε διάφορα σημεία με παράλληλα κυκλώματα πηνίου και αντίστασης, σε συνδυασμό με κατάλληλα προσαρμοστικά δίκτυα.

Ενδεικτικά, στο [51] παρουσιάζεται ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Παρουσιάζονται η σχεδίαση μιας κλασικής κεραιάς Yagi-Uda και η σχεδίαση μιας τροποποιημένης κεραιάς Yagi-Uda με επιπλέον παρασιτικά στοιχεία στην περιοχή του ενεργού στοιχείου, που δρουν σαν ανακλαστήρες. Διάφορες αντικειμενικές συναρτήσεις που συνδυάζουν απαιτήσεις για την κατευθυντικότητα, το front-to-back ratio και την αντίσταση εισόδου εξετάζονται. Κάθε τέτοια απαίτηση εισάγεται στην αντικειμενική συνάρτηση και έχει δικό της συντελεστή βαρύτητας. Παρουσιάζονται λοιπόν ενδιαφέρουσες συγκρίσεις με διαφορετικούς συντελεστές βάρους για ποικίλες δομές κλασικών και τροποποιημένων στοιχειοκεραιών Yagi-Uda με συχνότητα λειτουργίας στα 2.4 GHz, ενώ οι βέλτιστες λύσεις μελετώνται όσον αφορά στο εύρος ζώνης που επιτυγχάνουν.

Αναλυτικότερα, η τροποποιημένη στοιχειοκεραία Yagi-Uda, με δύο επιπρόσθετα παρασιτικά στοιχεία στην περιοχή του ενεργού στοιχείου, απεικονίζεται στο Σχήμα 4.14 [51]. Τα δύο αυτά στοιχεία αποκαλούνται «καταστολείς» (“suppressors”), αφού λειτουργούν ως επιπλέον ανακλαστήρες καταστέλλοντας την ακτινοβολία στην οπίσθια κατεύθυνση. Η διάταξη που θα μελετηθεί στη συνέχεια στηρίζεται σε μια στοιχειοκεραία Yagi-Uda με 6 γραμμικά δίπολα παράλληλα στον άξονα z. Πιο συγκεκριμένα, ένα απλό δίπολο τροφοδοτούμενο από πηγή τάσης περιστοιχίζεται από έναν ανακλαστήρα και 4 κατευθυντήρες. Οι «καταστολείς» είναι όμοιοι μεταξύ τους, με ίδιο μήκος και ακτίνα. Η ακτίνα σύρματος είναι κοινή για όλα τα στοιχεία στη διάταξη. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, οι θέσεις των “suppressors” καθορίζονται από μια ακτινική απόσταση  $r_s$ , μια γωνία  $\varphi_s$  που μετράται από τον άξονα y και μια απόσταση αναφοράς  $x_{ref}$  στον άξονα x. Οι “suppressors” είναι συμμετρικά τοποθετημένοι ως προς τον άξονα x.

Για τη σχεδίαση κλασικών και τροποποιημένων στοιχειοκεραιών Yagi-Uda, χρησιμοποιήθηκε δυαδικός γενετικός αλγόριθμος. Όσον αφορά στην κλασική Yagi, κάθε χρωμόσωμα παριστάνει πιθανές τιμές για τα μήκη των στοιχείων και τις μεταξύ τους αποστάσεις. Από την άλλη πλευρά, για τη Yagi με τους δύο «καταστολείς», ακολουθούνται δύο διαφορετικές διαδικασίες βελτιστοποίησης:

- η πρώτη λειτουργεί τόσο πάνω στις παραμέτρους της κλασικής δομής Yagi όσο και σε εκείνες των “suppressors”, ενώ
- η δεύτερη και γρηγορότερη εκδοχή χρησιμοποιεί ως βάση μια προηγουμένως σχεδιασθείσα δομή Yagi-Uda και περιορίζεται στην αναζήτηση μόνο των βέλτιστων παραμέτρων των δύο επιπρόσθετων παρασιτικών στοιχείων.



Σχήμα 4.14: Τοπολογία της τροποποιημένης κεραιάς Yagi-Uda [51].

Κάθε γενετικός περιλαμβάνει 250 γενιές με 60 χρωμοσώματα ανά γενιά. Η επιλογή γίνεται με τη διαδικασία της αποδεκάτισης πληθυσμού (population decimation), ενώ για το ζευγάριωμα χρησιμοποιείται η συνένωση χρωμοσωμάτων με γειτονικές τιμές επίδοσης (adjacent fitness pairing). Ακόμη, επιλέγεται διασταύρωση ενός σημείου με διαίρεση των ατόμων σε επίπεδο γονιδίου και δυαδική μετάλλαξη με πιθανότητα αλλαγής ενός bit σε κάθε χρωμόσωμα ίση με  $p_m = 0.15$ .

Χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε σχεδίασης. Αναλυτικότερα,

- 1) όταν στόχος είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους, η αντικειμενική συνάρτηση έχει τη μορφή

$$of = \left( \frac{G}{G_{des}} \right)^2, \quad (4.8)$$

όπου  $G$  και  $G_{des}$  η τιμή της προσομοίωσης και η ζητούμενη τιμή για το κέρδος της κεραίας αντίστοιχα.

- 2) όταν στόχος είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους και η ελαχιστοποίηση της στάθμης των πλευρικών λοβών, η αντικειμενική συνάρτηση έχει τη μορφή

$$of = W_G G(dBi) - W_B B(dBi), \quad (4.9)$$

όπου  $G$  το κέρδος,  $B$  η μέγιστη στάθμη των πλευρικών λοβών και  $W_G$  και  $W_B$  κατάλληλα επιλεγμένοι συντελεστές βαρύτητας.

- 3) όταν στόχος είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους, η ελαχιστοποίηση της στάθμης των πλευρικών λοβών και η προσαρμογή του ενεργού στοιχείου σε μια γραμμή τροφοδοσίας χαρακτηριστικής αντίστασης  $50 \Omega$ , η αντικειμενική συνάρτηση έχει τη μορφή

$$of = W_G G(dBi) - W_B B(dBi) - W_R (R_{in}(\Omega) - 50) - W_x (X_{in}(\Omega)), \quad (4.10)$$

όπου  $G$  το κέρδος,  $B$  η μέγιστη στάθμη των πλευρικών λοβών,  $R_{in}$  το πραγματικό μέρος της αντίστασης εισόδου,  $X_{in}$  το φανταστικό μέρος της αντίστασης εισόδου και  $W_G$ ,  $W_B$ ,  $W_R$  και  $W_x$  κατάλληλα επιλεγμένοι συντελεστές βαρύτητας.

Τέλος, ειδική αναφορά χρήζει η εργασία [61], όπου αναπτύσσεται ένας κατάλληλα προσαρμοσμένος γενετικός αλγόριθμος πραγματικής απεικόνισης, ο οποίος μεταβάλλει δυναμικά τις παραμέτρους των μηχανισμών του (διασταύρωση και μετάλλαξη) κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Έτσι επιταχύνεται η σύγκλιση και η ανάγκη για εκ νέου καθορισμό των παραμέτρων (που γενικά γίνεται με επαναλαμβανόμενα τρεξίματα του κώδικα με διαφορετικές επιλογές παραμέτρων) μειώνεται σημαντικά. Η αποδοτικότητα της μεθόδου αποδεικνύεται μέσα από την εφαρμογή της σε ευφείς προσαρμοστικές στοιχειοκεραίες όπου το ύψος των πλευρικών λοβών καθορίζεται με βέλτιστη επιλογή των πλατών και/ή των φάσεων των βαρών των στοιχείων.

Το πλούσιο αυτό υλικό συνιστά το καλύτερο υπόβαθρο για τη χρησιμοποίηση της μεθόδου των γενετικών αλγορίθμων στη σχεδίαση ευφών στοιχειοκεραίων και ιδιαίτως ευρυζωνικών ευφών στοιχειοκεραίων μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών διπόλων, η οποία θα παρουσιαστεί εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια της διατριβής.



## 4.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΡΟΠΩΝ ΚΑΙ Ο ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ

Οι ευφυείς κεραίες ουσιαστικά δεν είναι άλλο παρά στοιχειοκεραίες με ηλεκτρονικά προσαρμοζόμενα και ελεγχόμενα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας. Για την ανάλυση και τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών των ευφών κεραιών (πεδίο, διάγραμμα ακτινοβολίας, αντίσταση εισόδου κλπ.) είναι απαραίτητη η χρήση αριθμητικών μεθόδων επίλυσης, όπως η μέθοδος των βοηθητικών πηγών (Method of Auxiliary Sources – MAS), η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Method – FEM) κ.λ.π. Από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους για την ανάλυση κεραιών, τον υπολογισμό των ρευματικών κατανομών, του πεδίου και του διαγράμματος ακτινοβολίας, είναι η μέθοδος των ροπών (Method of Moments – MoM), η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή και μια συνοπτική παρουσίαση της ακολουθεί στη συνέχεια. Ουσιαστικά, η ανάλυση των προτεινόμενων κεραιών αυτής της διατριβής γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου προσομοίωσης SuperNec v.2.4 (SNEC). Θεμέλιος λίθος αυτού του προγράμματος είναι ο Αριθμητικός Ηλεκτρομαγνητικός Κώδικας (NEC), ο οποίος χρησιμοποιεί τη Μέθοδο των Ροπών (MoM) για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων. Έτσι κρίνεται αναγκαία σε αυτό το σημείο μια επισκόπηση της μεθόδου των Ροπών και του προγράμματος SNEC.

### 4.2.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΡΟΠΩΝ

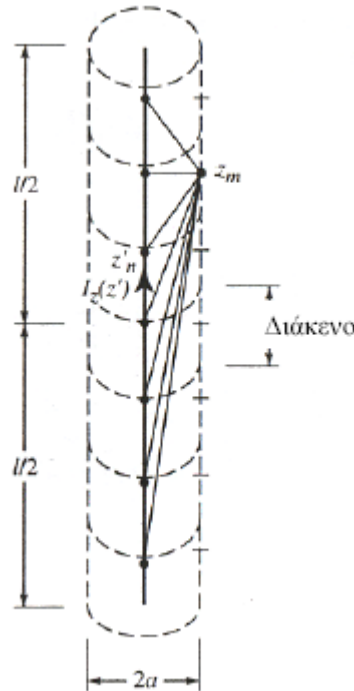
Κατά τον υπολογισμό άγνωστων ρευματικών κατανομών στην επιφάνεια κεραιών προκύπτουν ολοκληρωτικές ή ολοκληρωδιαφορικές εξισώσεις οι οποίες μπορούν να επιλυθούν με την μέθοδο MoM. Η μέθοδος MoM είναι γενική, με την έννοια ότι δεν περιορίζεται μόνο σε γραμμικές κεραίες, ενώ η ρευματική κατανομή κατά μήκος της κεραίας υπολογίζεται κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Επίσης, η μέθοδος MoM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ίδιας και αμοιβαίας αντίστασης. Η ακρίβεια και η ταχύτητα εκτέλεσης της MoM εξαρτάται από την επιλογή των κατάλληλων ολοκληρωτικών εξισώσεων, των συναρτήσεων βάσης κ.α. Οι ολοκληρωτικές εξισώσεις διακρίνονται σε ηλεκτρικού πεδίου (Electric Field Integral Equations – EFIE) και μαγνητικού πεδίου (Magnetic Field Integral Equation – MFIE). Η μέθοδος των ροπών χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό άγνωστων ρευματικών κατανομών σε μικροταινιακά μικροκυματικά κυκλώματα, τυπωμένες και επίπεδες κεραίες, δίπολα και γραμμικές κεραίες [62, 63].

Ειδικότερα στην περίπτωση διπόλων θεωρείται ότι το ρεύμα στα άκρα της κεραίας μηδενίζεται, δηλαδή  $I(l/2) = I(-l/2) = 0$ . Στην συνέχεια υπολογίζεται το ηλεκτρικό (ή μαγνητικό) πεδίο συναρτήσει της άγνωστης ρευματικής κατανομής και εφαρμόζεται η οριακή συνθήκη για το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της κεραίας. Στην περίπτωση ιδανικού αγωγού (άπειρης αγωγιμότητας) η οριακή συνθήκη προβλέπει ότι στο σημείο τροφοδότησης του διπόλου το εφαπτομενικό ηλεκτρικό πεδίο έχει σταθερό πλάτος ενώ πάνω στην επιφάνεια του αγωγού μηδενίζεται.

Δύο δημοφιλείς EFIEs είναι η ολοκληρωδιαφορική εξίσωση του Pocklington και η ολοκληρωτική εξίσωση του Hallen. Η εξίσωση του Pocklington προκύπτει από την επιβολή της οριακής συνθήκης για το μηδενισμό του συνολικού εφαπτομενικού πεδίου στην επιφάνεια ενός τέλει αγωγού. Ύστερα από εκτεταμένη ανάλυση και υποθέτοντας πολύ λεπτό αγωγό ( $a \ll \lambda$ ), καταλήγει κανείς στην ακόλουθη εξίσωση [62, 63]:

$$\left(k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) \int_{-l/2}^{l/2} \frac{e^{-jkr}}{4\pi \cdot r} I_z(z') dz' = -j\omega\varepsilon E_z^i(\rho = a) \quad (4.11)$$

όπου  $I_z(z')$  η ισοδύναμη νηματοειδής ρευματική κατανομή κατά μήκος του κεντρικού άξονα του αγωγού,  $E_z^i$  το προσπίπτον ηλεκτρικό πεδίο,  $a$  η ακτίνα και  $l$  το μήκος του αγωγού, και  $R = \sqrt{a^2 + (z - z')^2}$ . Το σημείο  $z$  είναι σημείο παρατήρησης επί της επιφάνειας του αγωγού και το σημείο  $z'$  είναι σημείο ολοκλήρωσης επί του κεντρικού άξονα του αγωγού (Σχήμα 4.15).



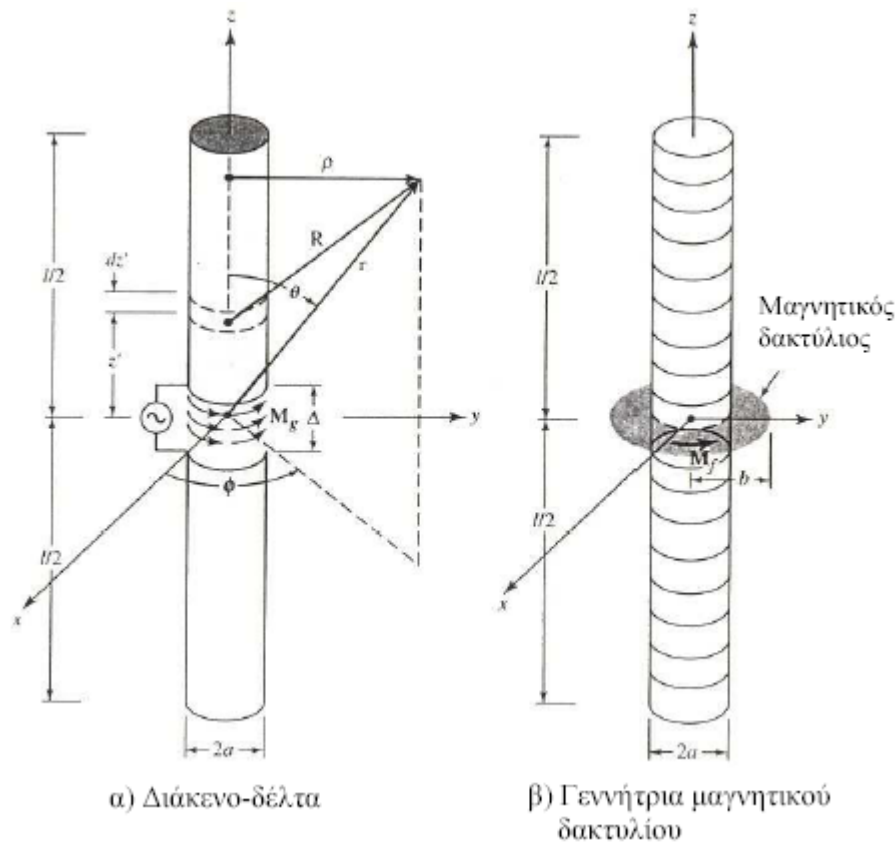
Σχήμα 4.15: Ισοδύναμη ρευματική κατανομή κατά μήκος του κεντρικού άξονα του αγωγού [62].

Με ανάλογη διαδικασία και επιβολή των οριακών συνθηκών για τέλειο λεπτό αγωγό (μηδενισμός του συνολικού εφαπτομενικού πεδίου στην επιφάνεια), προκύπτει και η εξίσωση του Hallén. Στην περίπτωση αυτή επιλύεται διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης με άγνωστη συνάρτηση το διανυσματικό δυναμικό  $A_z$ , το οποίο θεωρείται άρτια συνάρτηση του  $z$  λόγω της συμμετρίας της πυκνότητας ρεύματος. Χρησιμοποιώντας τη σχέση ορισμού του  $A_z$ , καταλήγει κανείς στην ακόλουθη εξίσωση [62]:

$$\int_{-l/2}^{l/2} \frac{e^{-jkr}}{4\pi \cdot R} I_z(z') dz' = -j\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \left[ B \cos(kz) + (V_i/2) \sin(k|z|) \right] \quad (4.12)$$

όπου  $\varepsilon$  η διηλεκτρική σταθερά και  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα,  $V_i$  η τάση τροφοδότησης, και  $B$  σταθερά η οποία προκύπτει από την οριακή συνθήκη μηδενισμού του ρεύματος στα άκρα του αγωγού.

Υπάρχουν δύο τρόποι διέγερσης ενός αγωγού σύρματος: η διέγερση με εφαρμογή τάσης σε διάκενο (delta-gap excitation) και η διέγερση με εφαρμογή ρεύματος ισοδύναμου μαγνητικού δακτυλίου (equivalent magnetic ring current ή magnetic frill generator).



Σχήμα 4.16: Μοντελοποίηση διέγερσης κυλινδρικού διπόλου [62].

- *Διάκενο-δέλτα*. Πρόκειται για την απλούστερη και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή διέγερσης. Σύμφωνα με αυτήν, η τάση διέγερσης υποτίθεται ίση με μια σταθερή τιμή  $V_i$  στο σημείο τροφοδότησης και μηδέν οπουδήποτε αλλού. Επομένως, το προσπίπτον ηλεκτρικό πεδίο  $E_z^i(\rho = a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, -l/2 \leq z \leq +l/2)$  είναι επίσης σταθερό (ίσο με  $V_i/\Delta$ , όπου  $\Delta$  είναι το εύρος του διάκενου) κατά μήκος του διάκενου και μηδέν οπουδήποτε αλλού [62]. Για τη μοντελοποίηση διάκενου δέλτα, το διάκενο τροφοδότησης εύρους  $\Delta$  αντικαθίσταται από ισοδύναμη μαγνητική πυκνότητα ρεύματος ίση με

$$M_g = \hat{\phi} \frac{V_i}{\Delta}, \quad -\frac{\Delta}{2} \leq z' \leq \frac{\Delta}{2} \quad (4.13)$$

- *Γεννήτρια μαγνητικού δακτυλίου*. Στην περίπτωση αυτή το διάκενο τροφοδότησης αντικαθίσταται από μαγνητική πυκνότητα ρεύματος, η οποία υφίσταται επί της περιφέρειας δακτυλίου με εσωτερική ακτίνα ίση με την ακτίνα του αγωγού  $a$  και εξωτερική ακτίνα  $b$ . Εφόσον το δίπολο τροφοδοτείται από γραμμή μεταφοράς, η εξωτερική ακτίνα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την έκφραση της χαρακτηριστικής αντίστασης της γραμμής. Η ισοδύναμη μαγνητική πυκνότητα ρεύματος για το δακτυλιοειδές άνοιγμα είναι [62]

$$M_f = -\hat{\phi} \frac{V_i}{\rho' \ln(b/a)}, \quad a \leq \rho' \leq b \quad (4.14)$$

Τα πεδία που παράγονται από τη μαγνητική πυκνότητα της (4.14) επί της επιφάνειας του αγωγού μπορούν να προσεγγιστούν από εκείνα κατά μήκος του κεντρικού άξονα [62]:

$$E_z^i(\rho = 0, -l/2 \leq z \leq l/2) = -\frac{V_i}{2 \ln(b/a)} \left( \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} + \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} \right) \quad (4.15)$$

όπου  $R_1 = \sqrt{z^2 + a^2}$  και  $R_2 = \sqrt{z^2 + b^2}$ .

Η τροφοδότηση του magnetic frill generator είναι πιο ακριβής από το μοντέλο του διάκενου δέλτα. Βρίσκει εφαρμογή στην εξίσωση του Pocklington, ενώ η εξίσωση του Hallén συνήθως περιορίζεται στη χρήση διάκενου δέλτα [62].

Οι (4.11) και (4.12) αποτελούν εξισώσεις γραμμικού τελεστή (linear-operator equations). Μπορούν λοιπόν να γραφούν στη μορφή [62, 63]

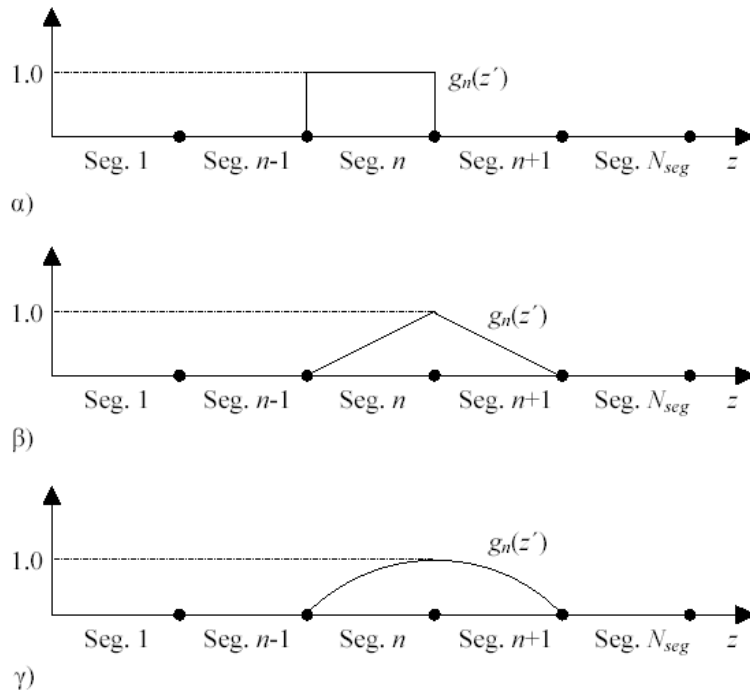
$$F[g] = e \quad (4.16)$$

όπου  $F[.]$  είναι γραμμικός τελεστής ( $F[a_1g_1 + a_2g_2] = a_1F[g_1] + a_2F[g_2]$ ),  $g$  η άγνωστη ρευματική κατανομή και  $e$  η γνωστή διέγερση. Στην προκειμένη περίπτωση ο τελεστής  $F[.]$  είναι ολοκλήρωμα (Hallén), ή ολοκλήρωμα και διαφόριση (Pocklington).

Για την επίλυση της (4.16), η μέθοδος των ροπών προβλέπει τη διαίρεση του αγωγού σε  $N_{seg}$  μη επικαλυπτόμενα τμήματα (segments) και την ανάλυση της  $g$  σε ένα άθροισμα  $N_{seg}$  γνωστών συναρτήσεων  $g_n$ , που καλούνται συναρτήσεις βάσης (basis ή expansion functions) [62]:

$$g(z') = \sum_{n=1}^{N_{seg}} a_n g_n(z'). \quad (4.17)$$

όπου  $a_n$  άγνωστοι σταθεροί συντελεστές. Οι πιο συνηθισμένες συναρτήσεις βάσης (Σχήμα 4.17) είναι οι σταθερές (piecewise constant), οι γραμμικές (piecewise linear), και οι ημιτονοειδείς (piecewise sinusoid) [62, 63].



Σχήμα 4.17: Είδη συναρτήσεων βάσης: α) σταθερή, β) γραμμική, γ) ημιτονοειδής.

Αντικαθιστώντας τη (4.17) στη (4.16) έχουμε:

$$\sum_{n=1}^{N_{seg}} a_n F(\mathbf{g}_n) = \mathbf{e}. \quad (4.18)$$

Για τον υπολογισμό των αγνώστων  $\alpha_n$ , απαιτούνται  $N_{seg}$  γραμμικά ανεξάρτητες εξισώσεις. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζεται η (4.18) σε  $N_{seg}$  διαφορετικά σημεία στην επιφάνεια του αγωγού (point-matching ή collocation). Έτσι, προκύπτει το ακόλουθο  $N_{seg} \times N_{seg}$  σύστημα εξισώσεων:

$$\sum_{n=1}^{N_{seg}} a_n F(\mathbf{g}_n) = \mathbf{e}_m, \quad m = 1, 2, \dots, N_{seg} \quad (4.19)$$

Σε μορφή πινάκων, η (4.19) γράφεται ως εξής:

$$[G_{mn}] \cdot [I_n] = [E_m] \quad (4.20)$$

όπου  $G_{mn} = F(\mathbf{g}_n)$ ,  $I_n = \alpha_n$ ,  $E_m = \mathbf{e}_m$ .

Οι άγνωστοι συντελεστές  $\alpha_n$  μπορούν να υπολογιστούν επιλύοντας τη (4.20) με τεχνικές αντιστροφής πινάκων:

$$[I_n] = [G_{mn}]^{-1} [E_m] \quad (4.21)$$

Για βελτίωση της λύσης των (4.18), (4.19), ή (4.20) μπορεί στη (4.16) να ληφθεί το ακόλουθο εσωτερικό γινόμενο [62]

$$\langle \mathcal{W}_m, F(\mathbf{g}) \rangle = \langle \mathcal{W}_m, \mathbf{e} \rangle \quad (4.22)$$

όπου  $\{\mathcal{W}_m\}$  είναι ένα σετ συναρτήσεων βάρους (weighting functions). Ένα τυπικό, αλλά όχι μοναδικό, εσωτερικό γινόμενο είναι το εξής [62]:

$$\langle w, g \rangle = \iint_s \mathcal{W}^* \cdot g ds \quad (4.23)$$

Η τροποποίηση αυτή αναγκάζει την οριακή συνθήκη μηδενισμού του συνολικού εφαπτομενικού πεδίου να ικανοποιείται κατά μέσο όρο σε όλη την επιφάνεια του αγωγού και όχι μόνο στα matching points. Συνδυάζοντας (4.18) και (4.22), καταλήγει κανείς σε μια εξίσωση της μορφής

$$\sum_{n=1}^{N_{seg}} a_n \langle \mathcal{W}_m, F(\mathbf{g}_n) \rangle = \langle \mathcal{W}_m, \mathbf{e} \rangle, \quad m = 1, 2, \dots, N_{seg} \quad (4.24)$$

Σε μορφή πινάκων ισχύει η (4.20), μόνο που  $G_{mn} = \langle \mathcal{W}_m, F(\mathbf{g}_n) \rangle$  και  $E_m = \langle \mathcal{W}_m, \mathbf{e} \rangle$ .

Όσον αφορά στην επιλογή των συναρτήσεων βάρους, όταν  $\mathcal{W}_n = \mathbf{g}_n$  πρόκειται για τη μέθοδο του Galerkin. Τυπικές συναρτήσεις βάρους είναι οι συναρτήσεις δέλτα [62]:

$$[\mathcal{W}_m] = [\delta(z - z_m)], \quad m = 1, 2, \dots, N_{seg}, \quad z_m \text{ matching points} \quad (4.25)$$

Για περισσότερες πληροφορίες πάνω στη μέθοδο των ροπών ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην εργασία του Harrington [64].

#### **4.2.2 Ο ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SUPERNEC**

Η προσαρμογή της MoM στη σχεδίαση των ευφύων κεραιών που πραγματεύεται αυτή η διατριβή κατέστη δυνατή μέσω του προγράμματος ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης κεραιών SuperNEC v.2.4 (Super Numerical Electromagnetic Code SNEC). Το SuperNEC είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης κεραιών και επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων. Το πρόγραμμα επιτρέπει την προσομοίωση και την εκτίμηση της ηλεκτρομαγνητικής επίδοσης απλών κεραιών, καθώς και κεραιών που βρίσκονται τοποθετημένες πάνω σε πολύπλοκες κατασκευές, σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Το σημείο εκκίνησης, για το πρόγραμμα προσομοίωσης SuperNEC, αποτέλεσε ο πολύ γνωστός αριθμητικός ηλεκτρομαγνητικός κώδικας (Numerical Electromagnetic Code) NEC 2, ο οποίος αναπτύχθηκε από το αμερικάνικο ναυτικό σε συνεργασία με τα εργαστήρια Lawrence Livermore, το 1982.

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

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

Το NEC2 εκτελούσε τις προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ροπών (Method of Moments, MOM). Με τη μέθοδο αυτή γίνεται διακριτοποίηση του προβλήματος χρησιμοποιώντας μικρά αγώγιμα τμήματα (wire segments), συχνά στην μορφή δικτύωματος, όταν μοντελοποιούνται επιφάνειες. Προκειμένου η παραπάνω μέθοδος να παρέχει σωστά αποτελέσματα πρέπει τα μικρά αγώγιμα τμήματα να έχουν μέγεθος περίπου ίσο με το 1/10 του μήκους κύματος. Ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος στον υπολογιστή είναι ανάλογος του  $N^3$ , ενώ η μνήμη που απαιτείται είναι ανάλογη του  $N^2$ , όπου  $N$  είναι ο αριθμός των αγνώστων [65-66].

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

Στην προσπάθεια να γεφυρωθεί το χάσμα ανάμεσα στο ηλεκτρικό μέγεθος των προβλημάτων που επιλύονται μόνο με την μέθοδο των ροπών και σε αυτά που επιλύονται με τη μέθοδο UTD, δημιουργήθηκε ένα νέο υβριδικό μοντέλο που αποτελείται και από τις δύο αυτές μεθόδους. Ο νέος αυτός υβριδικός κώδικας μπορεί να αναλύσει προβλήματα, στα οποία μικρά αγώγιμα τμήματα, διηλεκτρικές πλάκες,

κύλινδροι, σφαίρες κτλ. μπορούν να συνυπάρχουν στο ίδιο πρόβλημα. Συνδυάζοντας τις δύο μεθόδους, έχει αυξηθεί το εύρος των συχνοτήτων στο οποίο μπορούν να επιλυθούν διάφορα προβλήματα [65, 66].

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

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

$$I_i(z) = \alpha_i + \beta_i \sin(z - z_i) + \gamma_i \cos(z - z_i) \quad (4.26)$$

Οι τρεις συντελεστές  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  και  $\gamma_i$  σχετίζονται με την συνέχεια του ρεύματος από το ένα στοιχειώδες αγωγίο τμήμα στο επόμενο, καθώς και με τις συνθήκες στα άκρα του αγωγού. Η εξίσωση (4.26) χρησιμοποιεί τρεις αγνώστους γεγονός το οποίο δείχνει ότι χρησιμοποιώντας πιο ακριβείς συναρτήσεις βάσης, η επίλυση γίνεται πιο πολύπλοκη αλλά με πιο γρήγορη σύγκλιση. Η εξίσωση πινάκων (4.20) επιλύεται στο SNEC με τη μέθοδο του Gauss [67]. Αφού υπολογιστεί η ρευματική κατανομή, στη συνέχεια υπολογίζεται το πεδίο που ακτινοβολεί η κεραία στο χώρο. Η προσέγγιση αυτή του μακρινού πεδίου είναι έγκυρη όταν το σημείο παρατήρησης του πεδίου βρίσκεται σε αρκετά μεγάλη απόσταση από τη ρευματική κατανομή συγκρινόμενη με το μήκος κύματος και τις διαστάσεις της ρευματικής κατανομής. Όσο για τις δομικές μονάδες της UTD που είναι διαθέσιμες στον κώδικα, αυτές περιλαμβάνουν πολυεπίπεδες διηλεκτρικές πλάκες και ελλειπτικούς κυλίνδρους. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης είναι αξιόπιστα όταν οι διαστάσεις των παραπάνω δομών, οι οποίες μπορεί να παριστάνουν διηλεκτρικούς σκεδαστές (π.χ., τοίχους), είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκος κύματος. Γενικά στο SNEC χρησιμοποιείται η MoM για την εξαγωγή των βασικών χαρακτηριστικών των κεραιών (ρευματική κατανομή, ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, διάγραμμα ακτινοβολίας, αντίσταση εισόδου). Σε περιπτώσεις όμως που στην υπό εξέταση δομή συμμετέχουν και στοιχειώδεις μονάδες της UTD, επιστρατεύεται ο υβριδικός χαρακτήρας του SNEC για την ολοκληρωμένη ανάλυση που απαιτείται [65, 66]. Για την ανάλυση των κεραιοσυστημάτων αυτής της διατριβής, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μόνο το μοντέλο της MoM που διαθέτει, καθώς αυτά υλοποιούνται από γραμμικά τμήματα αγωγού (wire segments).

#### **4.3.3 ΓΕΝΕΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΕΡΑΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΗΣ MoM ΚΑΙ ΤΟΥ SNEC**

Πολλά προβλήματα σύνθεσης κεραιών επιλύονται σε συνδυασμό με τη μέθοδο MoM και την τεχνική των Γενετικών Αλγορίθμων [24-27, 29, 33, 51, 54]. Ο βασικός λόγος για τη χρήση αυτού του συνδυασμού είναι η εγκυρότητα και η ακρίβεια των

αποτελεσμάτων που προσφέρει η MoM στην ηλεκτρομαγνητική ανάλυση των κεραιών (υπολογισμός ακτινοβολούμενου πεδίου, αντίστασης εισόδου, κλπ) και η δυνατότητα των γενετικών αλγορίθμων για καθολική εξερεύνηση του χώρου δυνατών λύσεων. Συνήθως σε τέτοια προβλήματα όπου αναζητείται η βέλτιστη σχεδίαση μιας κεραιοδομής, κάθε άτομο του πληθυσμού στο γενετικό αλγόριθμο είναι μια κεραία που αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση και οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες της αναλύονται και παρουσιάζονται με τη βοήθεια της MoM. Με την εφαρμογή των μηχανισμών του γενετικού αλγόριθμου, θα προκύψει η τελική και προτεινόμενη κεραία, η οποία θα ικανοποιεί κατά τον καλύτερο τρόπο τις απαιτήσεις σχεδίασης. Σε επόμενα κεφάλαια θα παρουσιαστούν κάποια κεραιοσυστήματα που σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων και του λογισμικού πακέτου προσομοίωσης SNEC, τα οποία εντάσσονται στα ευρύτερα πλαίσια αυτής της διατριβής.



#### 4.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press, 1975.
- [2] K. A. De Jong, *An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*. PhD Thesis, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [3] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [4] R. L. Haupt, "An introduction to Genetic Algorithms for electromagnetics", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 37, No. 2, pp. 7-15, 1995.
- [5] J.M. Johnson and Y. Rahmat-Samii, "Genetic algorithms in engineering electromagnetics", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 39, No. 4, pp. 7-25, 1997.
- [6] J.M. Johnson and Y. Rahmat-Samii, "Genetic Algorithm Optimization and its Application to Antenna Design", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Digest*, Vol.1, pp326-329, Jun 1994.
- [7] Orchard, B., "Optimising Algorithms for Antenna Design", MSc Dissertation, University of the Witwatersrand, 2002.
- [8] R. L. Haupt and D. H. Werner, *Genetic Algorithms in Electromagnetics*, John Wiley and Sons, New Jersey, 2007.
- [9] A. Oyama, S. Obayashi and T. Nakamura, "Real-coded adaptive range genetic algorithm applied to transonic wing optimization", *Applied Soft Computing*, Vol. 1, pp. 179-187, 2001.
- [10] D. F. Jones, S. K. Mirrazavi and M. Tamiz, "Multi-objective meta-heuristics: An overview of the current state-of-the-art", *European Journal of Operational Research*, Vol. 137, No. 1, pp. 1-9, 2002.
- [11] R. Saha, P. Chaudhury and S. P. Bhattacharyya, "Direct solution of Schrödinger equation by genetic algorithm: test cases", *Physics Letters A*, Vol. 291, No. 6, pp. 397-406, 2001.
- [12] H. T. Chou, Y. C. Hou and W. J. Liao, "A Dual Band Patch Antenna Design for WLAN and DSRC Applications Based on a Genetic Algorithm Optimization", *Electromagnetics*, Vol. 27, Issue 5, pp. 253-262, 2007.
- [13] D. Tonn and R. Bansal, "Reduction of Sidelobe Levels in Interrupted Phased Array Antennas by Means of a Genetic Algorithm", *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 17, Issue 2, pp. 134-141, March 2007.
- [14] M. A. Panduro, "Design of Coherently Radiating Structures in a Linear Array Geometry using Genetic Algorithms", *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 61, Issue 8, pp. 515-520, September 2007.
- [15] M. E. Aydemir, T. Gunel and F. Ustuner, "Genetic Approach to the Minimization of the Coupling between Aircraft Antennas", *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 60, Issue 4, pp. 299-305, April 2006.
- [16] M. A. Panduro, A. L. Mendez, R. Dominquez and G. Romero, "Design of Non-Uniform Circular Antenna Arrays for Side Lobe Reduction using the Method of Genetic Algorithms", *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 60, Issue 10, pp. 713-717, November 2006.
- [17] C. H. Chan, S. H. Yeung, W. S. Chan and K. F. Man, "Genetic Algorithm Optimized Printed UWB Sickle-Shape Dipolar Antenna with Stable Radiation Pattern", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 49, No. 11, pp. 2695-2697, November 2007.
- [18] A. Recioui and A. Azrar, "Use of Genetic Algorithms Linear and Planar Antenna Array Synthesis based on Schelkunoff Method", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 49, No. 7, pp. 1619-1623, July 2007.
- [19] S. Baskar, A. Alphones, and P. N. Suganthan, "Genetic-Algorithm-Based Design of a Reconfigurable Antenna Array with Discrete Phase Shifters", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 45, No. 6, pp. 461-465, June 2005.

- [20] F. Bilotti, F. Castellana and L. Vegni, "Multi-Frequency Patch Antenna Design via the Method of Moment and Genetic Algorithm", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 35, No. 3, pp. 184-186, November 2002.
- [21] R. Perez and J. Basterrechea, "Antenna Far-Field Pattern Reconstruction using Equivalent Currents and Genetic Algorithms", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 42, No. 1, pp. 21-25, July 2004.
- [22] S. M. Meriah, E. Cambiaggio, F. T. Bendimerad, R. Staraj, J. P. Damiano and L. Brochier, "Design of a Thinned Microstrip Antenna Reflectarray using a Genetic Algorithm", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 46, No. 6, pp. 559-562, September 2005.
- [23] S. S. Pattnaik, B. Khuntia, D. C. Panda, D. K. Neog and S. Devi, "Calculation of Optimized Parameters of Rectangular Microstrip Patch Antenna using Genetic Algorithm", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 37, No. 6, pp. 431-433, June 2003.
- [24] X. Chen, K. Huang, and X. B. Xu, "Automated Design of a Three-Dimensional Fishbone Antenna using Parallel Genetic Algorithm and NEC", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 4, pp. 425-428, 2005.
- [25] D. Arnaud-Cormos, R. Loison and R. Gillard, "Fast Multistructure Method of Moments Combined with a Genetic Algorithm (MSMoM/GA) for Efficient Optimization of Printed Antennas", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 6, pp. 172-174, 2007.
- [26] T. Xiang, K. F. Man, K. M. Luk and C. H. Chan, "Design of Multiband Miniature Handset Antenna by MoM and HGA", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 5, pp. 179-182, 2006.
- [27] E. E. Altshuler and D. S. Linden, "An Ultrawide-Band Impedance-Loaded Genetic Antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 52, No. 11, pp. 3147-3150, November 2004.
- [28] R. L. Haupt, "Calibration of Cylindrical Reflector Antennas with Linear Phased Array Feeds", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 56, No. 2, pp. 593-596, February 2008.
- [29] C. I. Tsitouri, S. C. Panagiotou, T. D. Dimousios and C. N. Capsalis, "A Circular Switched Parasitic Array of Log-Periodic Antennas with Enhanced Directivity and Beam Steering Capability for Ultra Wideband Communications Applications", *Proceedings of the Loughborough Antennas and Propagation Conference, 2008, (LAPC 2008)*, pp. 281-284, Loughborough, March 2008.
- [30] G. G. Chavka and N. Litwinczuk, "Design of Wire Antennas with using of Genetic Algorithms", *Proceedings of the International Conference on Antenna Theory and Techniques*, pp. 220-222, Sevastopol, September 2007.
- [31] H. Hang, Q. Weicheng and F. Shuo, "Optimizing the Architecture of Planar Phased Array by Improved Genetic Algorithm", *Proceedings of the IEEE 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, pp. 676-679, 2007.
- [32] A. Rolland, R. Sauleau and M. Drissi, "Full Wave Synthesis of Integrated Lens Antennas using FDTD and Genetic Algorithms", *Proceedings of the Second European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2007)*, Edinburgh, November 2007.
- [33] M. Kisangiri and A. A. Kucharski, "GA/MoM Optimization of Pifa Antennas with Meandering Slits", *Proceedings of the Second European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2007)*, Edinburgh, November 2007.
- [34] Y. Ravinder and V. M. Pandharipande, "Genetic Algorithm Assisted Dual Diversity Smart Antenna with Triple-COLD Array for QPSK Communication System", *Proceedings of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2007, (ICEAA 2007)*, pp. 723-726, Torino, September 2007.
- [35] J. Chung, R. Abd-Alhameed and P. Excell, "Design of Wire Bow-Tie Antenna for Near Field Imaging using Genetic Algorithms", *Proceedings of the Loughborough Antennas and Propagation Conference, 2008, (LAPC 2008)*, pp. 317-320, Loughborough, March 2008.
- [36] Z. Altman, R. Mittra and A. Boag, "New designs of ultra wide-band communication antennas using a genetic algorithm", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 45, No. 10, pp. 1494-1501, 1997.

- [37] P.L. Werner, Z. Altman, R. Mittra, D.H. Werner and A.J. Ferraro, "Optimization of stacked vertical dipoles above a ground plane using the genetic algorithm", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 13, No. 1, pp. 51-66, 1999.
- [38] E.A. Jones and W.T. Joines, "Genetic design of linear antenna arrays", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 42, No. 3, pp. 92-100, 2000.
- [39] D. Marcano and F. Duran, "Synthesis of antenna arrays using genetic algorithms", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 42, No. 3, pp. 12-20, 2000.
- [40] S.D. Rogers, C.M. Butler and A.Q. Martin, "Realization of a genetic-algorithm-optimized wire antenna with 5 : 1 bandwidth", *Radio Science*, Vol. 36, No. 6, pp. 1315-1325, 2001.
- [41] S.L. Avila, W.P. Carpes and J.A. Vasconcelos, "Optimization of an offset reflector antenna using genetic algorithms", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 40, No. 2, pp. 1256-1259, 2004.
- [42] Y.C. Ji, Q.Z. Liu, X.L. He and H. Zhang, "Optimal designs of ultra wide-band communication antennas", *Chinese Journal of Electronics*, Vol. 13, No. 4, pp. 728-731, 2004.
- [43] M. Donelli, S. Caorsi, F. De Natale, D. Franceschini and A. Massa, "A versatile enhanced genetic algorithm for planar array design", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 18, No. 11, pp. 1533-1548, 2004.
- [44] P. K. Varlamos, C. N. Capsalis, "Electronic Beam Steering Using Switched Parasitic Smart Antenna Arrays", *Progress in Electromagnetics Research*, Vol., 36, pp. 101-119, 2002.
- [45] P. K. Varlamos, C. N. Capsalis, "Design of a Six-Sector Switched Parasitic Planar Array Using the Method of Genetic Algorithms", *Wireless Personal Communications Journal*, Vol. 26, No. 1, August 2003.
- [46] M.H. Oktm and B. Saka, "Design of multilayered cylindrical shields using a genetic algorithm", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 43, No. 2, pp. 170-176, 2001.
- [47] L. Dawson, J. Clegg, S.J. Porter, J.F. Dawson and M.J. Alexander, "The use of genetic algorithms to maximize the performance of a partially lined screened room", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 44, No. 1, pp. 233-242, 2002.
- [48] S. A. Mitilneos, I. I. Heretakis, N. Chatziathanasiou, S. C. A. Thomopoulos and C. N. Capsalis, "Multiobjective Antenna Array Design Using the Method of Genetic Algorithms", *WSEAS Transactions on Communications*, Vol. 4, No. 8, pp. 739-744, 2005.
- [49] M. A. Panduro, D. H. Covarrubias, C. A. Brizuela and F.R. Marante, "A Multi-Objective Approach in the Linear Antenna Array Design", *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 59, Issue 4, pp. 205-212, June 2005.
- [50] P. Yazdanbakhsh and K. Solbach, "Performance Optimization of Monopole Four Square Array Antenna using the Method of Genetic Algorithms", *Proceedings of the Second European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2007)*, Edinburgh, November 2007.
- [51] P. K. Varlamos, P. J. Papakanellos, S. C. Panagiotou and C. N. Capsalis, "Multi-objective Genetic Optimization of Yagi-Uda Arrays with Additional Parasitic Elements", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 47, No.4, pp. 92-97, August 2005.
- [52] Y. Rahmat-Samii and E. Michielssen, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*, John Wiley and Sons, New York, 1999.
- [53] D. S. Weile and E. Michielssen, "Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: A review", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 45, No. 3, pp. 343-353, 1997.
- [54] J. M. Johnson and Y. Rahmat-Samii, "Genetic algorithms and method of moments (GA/MOM) for the design of integrated antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 47, No. 10, pp. 1606-1614, 1999.
- [55] T. Su and H. Ling, "Determining the equivalent impedance boundary condition for corrugated coatings based on the genetic algorithm", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 48, No. 3, pp. 374-382, 2000.
- [56] Z. F. Li, Y. E. Erdemli, J. L. Volakis and P. Y. Papalambros, "Design optimization of conformal antennas by integrating stochastic algorithms with the hybrid finite-element

- method”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 50, No. 5, pp. 676-684, 2002.
- [57] D. Erni, D. Wiesmann, M. Spuhler, S. Hunziker, E. Moreno, B. Oswald, J. Frohlich and C. Hafner, “Application of evolutionary optimization algorithms in computational optics”, *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, Vol. 15, No. 2, pp. 43-60, 2000.
- [58] E. Moreno, D. Erni, C. Hafner, R. E. Kunz and R. Vahldieck, “Modeling and optimization of non-periodic grating couplers”, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 34, No. 11, pp. 1051-1069, 2002.
- [59] W. Chien and C. Chiu, “Using NU-SSGA to reduce the searching time in inverse problem of a buried metallic object”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 53, No. 10, pp. 3128-3134, 2005.
- [60] S. M. Cui, A. Mohan and D. S. Weile, “Pareto optimal design of absorbers using a parallel elitist nondominate sorting genetic algorithm and the finite element-boundary integral method”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 53, No. 6, pp. 2099-2107, 2005.
- [61] D. W. Boeringer, D. H. Werner, and D. W. Machuga, “A simultaneous parameter adaptation scheme for genetic algorithms with application to phased array synthesis,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 53, No. 1, pp. 356-371, January 2005.
- [62] C. A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*, John Wiley and Sons, 2nd Edition, 1997, ch. 8, App. III.
- [63] J. Krauss, *Κεραίες*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2<sup>η</sup> Έκδοση, 1998.
- [64] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, MacMillan, New York, 1968.
- [65] A. Fourie and D. Nitch, “SuperNEC: antenna and indoor-propagation simulation program,” *IEEE Antennas and Propagat. Mag.*, vol. 42, no. 3, pp. 31-48, June 2000.
- [66] SuperNec v. 2.4 Reference Manuals.
- [67] A. Ralston, *A First Course in Numerical Analysis*, McGraw-Hill, New York, 1965.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΥΦΥΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΩΝ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ WiFi, mobile WiMAX ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

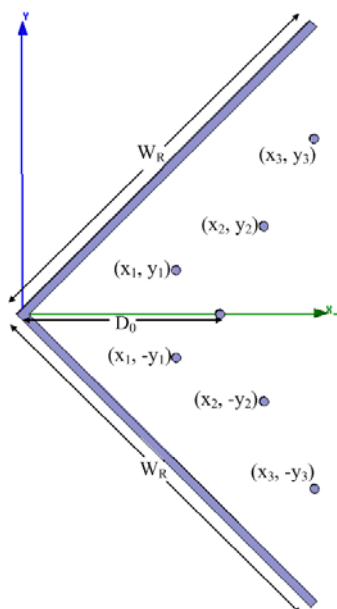
Σε αυτό το κεφάλαιο σχεδιάζονται στοιχειοκεραίες μεταγωγής λοβού όπου στη διάταξη ένα ή περισσότερα στοιχεία είναι ενεργά και τα υπόλοιπα είναι παρασιτικά βραχυκυκλωμένα. Ο λόγος που στο πρώτο παράδειγμα αυτού του κεφαλαίου προτιμάται μια διάταξη με περισσότερα στοιχεία ενεργά αντί για ένα μόνο είναι ότι με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η διαμόρφωση ενός κατευθυντικότερου διαγράμματος ακτινοβολίας με σημαντικά μικρότερο (και κατά συνέπεια λειτουργικότερο) εύρος δέσμης και καλύτερη προσαρμογή στην επιθυμητή συχνότητα. Η μεταγωγή από λοβό σε λοβό καθίσταται δυνατή είτε με αμοιβαία αντιμετάθεση ενεργών και παρασιτικών στοιχείων ως προς μια ευθεία συμμετρίας, είτε με κυκλική αντιμετάθεση του ενεργού στοιχείου στην περιφέρεια της διάταξης.

Πιο συγκεκριμένα, σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου, είναι η ενσωμάτωση των SPA κεραιών σε πιο πολύπλοκες κεραιοδιατάξεις με σκοπό, αφενός την πλήρη αξιοποίηση των ιδιοτήτων τους και αφετέρου τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας τους. Η βελτιστοποίηση των προτεινόμενων κεραιοσυστημάτων επιτυγχάνεται με την αρωγή των γενετικών αλγορίθμων. Έτσι, στην παράγραφο 5.1 αναπτύσσεται μια νέα ευφυής στοιχειοκεραία μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων, στη συγκεκριμένη περίπτωση διπόλων, και ενός γωνιακού ανακλαστήρα. Η στοιχειοκεραία αποτελείται από ένα γωνιακό ανακλαστήρα, ένα δίπολο τοποθετημένο στη διαγώνιο του ανακλαστήρα και τρία ζεύγη διπόλων συμμετρικά τοποθετημένα ως προς τη διαγώνιο. Σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, επιλέγοντας κατάλληλα τα ενεργά και βραχυκυκλωμένα στοιχεία, διαμορφώνεται ένα σύνολο από τρία διαγράμματα ακτινοβολίας, τα οποία κατ'εναλλαγή καλύπτουν το τεταρτημόριο που ορίζεται από το γωνιακό ανακλαστήρα των 90 μοιρών. Στην παράγραφο 5.2 μια στοιχειοκεραία αποτελούμενη από στοιχεία τύπου PIFA βελτιστοποιείται με σκοπό τη διαμόρφωση ενός επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας και την επίτευξη εύρους ζώνης αντίστασης εισόδου στη WiFi, mobile WiMAX συχνοτική ζώνη. Πιο συγκεκριμένα, η στοιχειοκεραία αποτελείται από τέσσερις κεραιές τύπου PIFA, οι οποίες είναι συμμετρικά τοποθετημένες πάνω σε κοινό αγωγίμο επίπεδο σε σχηματισμό σταυρού. Η κυκλική αντιμετάθεση του μοναδικού στοιχείου PIFA που είναι κάθε φορά ενεργό, επιτυγχάνει στροφή του επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας, καλύπτοντας έτσι ολόκληρο το οριζόντιο επίπεδο.

#### 5.1 ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΓΩΝΙΑΚΟ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ WiFi, MOBILE WiMAX ΣΥΧΝΟΤΙΚΗ ΖΩΝΗ

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση μιας SPA κεραιάς με γωνιακό ανακλαστήρα που προορίζεται για χρήση σε WiFi, mobile WiMAX εφαρμογές. Η κεραιά αποτελείται από 7 στοιχεία: τρία ζεύγη διπόλων τα οποία περιβάλλονται από ένα γωνιακό ανακλαστήρα 90 μοιρών, και ένα δίπολο το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω στη διχοτόμο του γωνιακού ανακλαστήρα. Η

ηλεκτρική κατάσταση του κάθε διπόλου (ενεργό ή παρασιτικό) καθορίζεται από το γενετικό αλγόριθμο, με σκοπό τη δημιουργία ενός κύριου λοβού ακτινοβολίας και στροφή αυτού [1-3]. Κάθε ζεύγος διπόλων είναι συμμετρικά τοποθετημένο ως προς τη διχοτόμο του γωνιακού ανακλαστήρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Κάθε χρονική στιγμή, τα ενεργά στοιχεία τροφοδοτούνται από ίδιες εκδοχές κατά πλάτος, φάση και συχνότητα του ίδιου σήματος πηγής, ενώ τα υπόλοιπα παρασιτικά είναι βραχυκυκλωμένα. Ο σκοπός της σχεδίασης είναι η παραγωγή τριών κατευθυντικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας που θα καλύπτουν το τεταρτημόριο που ορίζει ο γωνιακός ανακλαστήρας με τους κύριους λοβούς να κατευθύνονται στις  $-30^\circ$ ,  $0^\circ$  και  $30^\circ$  αντίστοιχα. Επιπλέον, εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος  $30^\circ$  και σχετικές στάθμες πλευρικών λοβών μικρότερες από  $-10$  dB με επαρκές εύρος ζώνης αντίστασης εισόδου στη μάντα συχνοτήτων WiFi, mobile WiMAX (2.4 GHz) απαιτούνται. Εξαιτίας της συμμετρίας της δομής ως προς τη διχοτόμο του γωνιακού ανακλαστήρα, μόνο τα διαγράμματα που στοχεύουν στις  $0^\circ$  και στις  $30^\circ$  χρειάζεται να βελτιστοποιηθούν. Το διάγραμμα που στοχεύει στις  $-30^\circ$  προκύπτει από το διάγραμμα που στοχεύει στις  $30^\circ$  και επιτυγχάνεται με αμοιβαία εναλλαγή της ηλεκτρικής κατάστασης των διπόλων κάθε ζεύγους η οποία αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη κατάσταση των διακοπών και των διόδων.



Σχήμα 5.1: SPA επτά στοιχείων που με γωνιακό ανακλαστήρα.

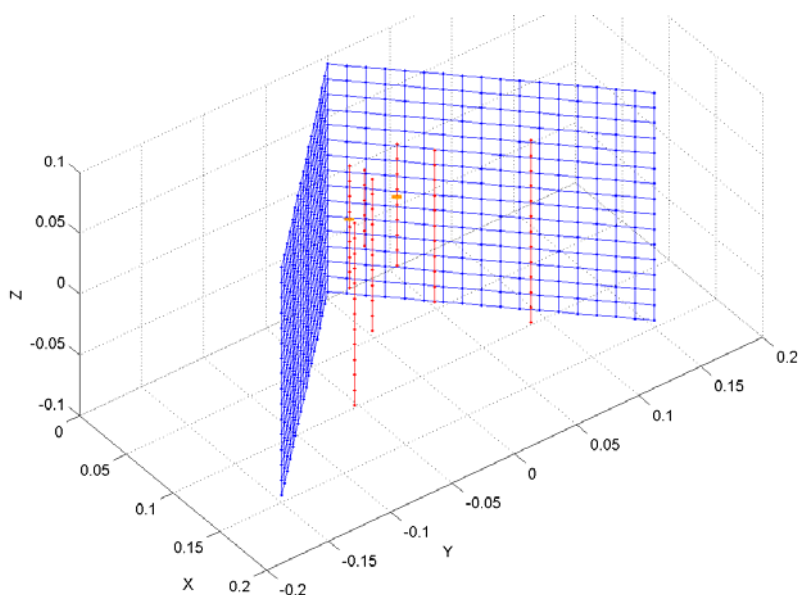
Η παραγόμενη κεραία προτείνεται για εφαρμογές στη WiFi, mobile WiMAX συχνοτική περιοχή των 2.4 GHz. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δέκτης εναλλαγής λοβού, όπου μετρίεται το επίπεδο λήψης του κάθε λοβού και τελικά επιλέγεται ο λοβός ο οποίος παρέχει το ισχυρότερο σήμα. Επιπρόσθετα, όταν μια ευφυής κεραία χρησιμοποιείται σε ένα σταθμό βάσης WiFi, mobile WiMAX, είναι δυνατό να επιτευχθεί σημαντικά υψηλό διαφορικό κέρδος στην πλευρά του κινητού δέκτη με τη ταλάντωση του διαγράμματος ακτινοβολίας του πομπού μεταξύ των τριών προαναφερθέντων καταστάσεων [6].

### 5.1.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ SPA ΓΙΑ ΤΗ WIFI, MOBILE WIMAX ΜΠΑΝΤΑ

Η προσομοίωση και ο σχεδιασμός της υπό εξέταση κεραίας [10] γίνονται με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου SNEC [4-9] όπου τα συστατικά στοιχεία της MoM

που είναι διαθέσιμα στον κώδικα είναι τα τμήματα αγωγού (wire segments). Ως εκ τούτου, η κεραία αποτελείται από δύο πλέγματα αγωγών σύρματος (που αναπαριστούν τον γωνιακό ανακλαστήρα) και επτά αγωγούς σύρματος που αναπαριστούν τα δίπολα. Η τελική δομή στο SNEC υλοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε οι τιμές εισόδου που καθορίζει ο χρήστης για τις διαστάσεις της διάταξης να δίνονται συναρτήσει των αριθμών των τμημάτων αγωγού. Δεδομένου λοιπόν του ότι το μήκος τμήματος (segment length, *seglen*) είναι κλάσμα του μήκους κύματος  $\lambda$ , το ηλεκτρικό μέγεθος της SPA είναι σταθερό. Το σκεπτικό αυτό προέκυψε από την αναγκαιότητα σχεδίασης της SPA σύμφωνα με τους περιορισμούς που θέτει το SNEC.. Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται η υλοποίηση της στο SNEC. Τα ενεργά στοιχεία του σχήματος τροφοδοτούνται από όμοιες (σε συχνότητα, πλάτος και φάση) πηγές τάσης. Το κάθε στοιχείο μπορεί να είναι είτε ενεργό είτε παθητικό και η ηλεκτρική του κατάσταση καθορίζεται από το γενετικό αλγόριθμο. Τα στοιχεία κάθε ζεύγους τοποθετούνται συμμετρικά εκατέρωθεν της διχοτόμου του ανακλαστήρα, ωστόσο οι ηλεκτρική τους κατάσταση μπορεί να διαφέρει.

Για να βρεθεί η κεραία με τις επιθυμητές ιδιότητες, εφαρμόζεται η τεχνική των γενετικών αλγορίθμων και μάλιστα η εκδοχή που είναι ενσωματωμένη στο SNEC. Ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι δυαδικού τύπου. Ο συνολικός πληθυσμός αποτελείται από 250 γενιές και κάθε γενιά περιλαμβάνει 60 χρωμοσώματα. Στο σχηματισμό κάθε επόμενης γενιάς συμμετέχουν τα δέκα χρωμοσώματα της προηγούμενης με τις υψηλότερες τιμές καταλληλότητας (ελιτισμός). Η στρατηγική επιλογής που χρησιμοποιείται είναι η αποδεκάτιση πληθυσμού, ενώ το σχήμα ζευγαρώματος είναι η συνένωση ατόμων με γειτονικές τιμές επίδοσης (adjacent fitness pairing). Το σημείο της διασταύρωσης επιλέγεται τυχαία και κάθε χρωμόσωμα χωρίζεται σε επίπεδο γονιδίων. Η πιθανότητα μετάλλαξης είναι ίση με 0.15 [11].



Σχήμα 5.2: Υλοποίηση της προτεινόμενης διάταξης στο SNEC.

Μεταβάλλοντας το ύψος και το πλάτος του γωνιακού ανακλαστήρα, το μήκος και τις συντεταγμένες του κάθε ζεύγους διπόλων μέσα στην περιοχή που ορίζει ο ανακλαστήρας, το μήκος και τη θέση του διπόλου της διχοτόμου πάνω στη διχοτόμο καθώς και ποια δύο (αρχικά) από τα επτά στοιχεία θα είναι, προκύπτει η δομή με την ικανοποιητική αντίσταση εισόδου και το επιθυμητό αζιμουθιακό διάγραμμα σε όλη

στη συχνότητα των 2.4 GHz (WiFi, mobile WiMAX Band). Εξαιτίας της συμμετρίας της δομής, ο γενετικός αλγόριθμος αναζητά μόνο τρία ζεύγη συντεταγμένων (ένα για κάθε ζεύγος διπόλων, (x,y), (x,-y)) και τη θέση του διπόλου της διχοτόμου πάνω στη διχοτόμο.

Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, ο σκοπός της παρούσας σχεδίασης είναι η δημιουργία ενός διαγράμματος ακτινοβολίας με δεδομένες ιδιότητες (μέγιστο κέρδος στις 30°, εύρος ημίσειας ισχύος 30° και σχετικές στάθμες πλευρικών λοβών κάτω από -10 dB) και παράλληλα η διατήρηση ενός λειτουργικού εύρους ζώνης στη WiFi, mobile WiMAX μπάντα. Τα διάγραμμα με τον κύριο λοβό στις -30° θα προκύψει από αυτό των 30° με αμοιβαία εναλλαγή της ηλεκτρικής κατάστασης των συμμετρικών στοιχείων ενώ το διάγραμμα με τον κύριο λοβό στις 0° θα προκύψει με την εφαρμογή ενός νέου γενετικού αλγορίθμου στην εξαγόμενη δομή, όπου κρατώντας όλες τις φυσικές διαστάσεις σταθερές, θα αναζητηθεί μόνο ο αριθμός και η θέση των ενεργών στοιχείων που θα ικανοποιούν την απαίτηση για συγκεκριμένο διάγραμμα ακτινοβολίας και προσαρμογής.

Ένα σετ από 360 σημεία χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του διαγράμματος ακτινοβολίας των 30°. Έστω  $D(\phi)$  η κατευθυντικότητα (ορισμένη με γωνιακό βήμα 1°) και  $D_{\max}$  η μέγιστη κατευθυντικότητα. Τότε, η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώνεται ως εξής: Αρχικά, τα σχετικά τετραγωνικά σφάλματα αθροίζονται με τον ακόλουθο τρόπο:

- Μέσα στον κύριο λοβό, που σχηματίζεται λαμβάνοντας υπόψη 29 σημεία, ο όρος σφάλματος είναι

$$e_1 = \frac{1}{29} \sum_{\phi=1^\circ}^{29^\circ} \left[ \left( \frac{D(\phi) - 0.5}{D_{\max} / 0.5} \right)^2 u \left( 0.5 - \frac{D(\phi)}{D_{\max}} \right) \right], \quad (5.1)$$

όπου  $u(x)$  είναι η βηματική συνάρτηση

$$u(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}. \quad (5.2)$$

- Στα άκρα του κύριου λοβού η επιθυμητή στάθμη είναι 3 dB κάτω από το μέγιστο κέρδος, συνεπώς ο αντίστοιχος όρος σφάλματος είναι

$$e_2 = \frac{1}{2} \sum_{\phi=0,30^\circ} \left( \frac{D(\phi) - 0.5}{D_{\max} / 0.5} \right)^2. \quad (5.3)$$

- Έξω από τον κύριο λοβό, που σχηματίζεται από 329 σημεία, η σχετική στάθμη πλευρικού λοβού δεν πρέπει να ξεπερνά τα -10 dB. Επομένως, ο σχετικός όρος σφάλματος εκφράζεται

$$e_3 = \frac{1}{329} \sum_{\phi=31^\circ}^{359^\circ} \left[ \left( \frac{D(\phi) - 0.1}{D_{\max} / 0.1} \right)^2 u \left( \frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.1 \right) \right]. \quad (5.4)$$

- Για να επιτευχθεί ταυτόχρονα προσαρμογή προς μια γραμμή μεταφοράς χαρακτηριστικής αντίστασης 50 Ω σε κάθε σημείο τροφοδότησης, ένας επιπλέον όρος σφάλματος υπολογίζεται σαν



$$e_4 = abs\left(\frac{R_{in}-50}{50}\right)^2 + abs\left(\frac{X_{in}}{50}\right)^2, \quad (5.5)$$

όπου  $R_{in}$  και  $X_{in}$  αντιπροσωπεύουν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της αντίστασης εισόδου αντίστοιχα.

Έπειτα, το συγκεντρωτικό σφάλμα προκύπτει από την άθροιση όλων των όρων σφάλματος αφού πολλαπλασιαστεί ο καθένας με έναν συντελεστή βαρύτητας  $w_i$  ( $i=1,2,3,4$ ).

Επομένως το συνολικό σφάλμα υπολογίζεται σαν

$$err = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^4 w_i e_i \quad (5.6)$$

Αφού βρεθεί το συνολικό σφάλμα, η αντικειμενική συνάρτηση προκύπτει

$$OF = \frac{1}{1 + \sqrt{err}}. \quad (5.7)$$

Έστω  $\lambda_o$  το μήκος κύματος στα 2.4 GHz. Στον Πίνακα 5.1, φαίνεται το εύρος μεταβολής κάθε παραμέτρου που συμμετέχει στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η ακτίνα αγωγών κάθε στοιχείου είναι 1.5 mm. Αφού οι χωρικές παράμετροι δίνονται συναρτήσει του  $\lambda_o$ , οι ηλεκτρικές διαστάσεις της κεραίας παραμένουν σταθερές και τα δεδομένα που προκύπτουν είναι κατάλληλα για εφαρμογή και σε άλλες συχνότητες.

**Πίνακας 5.1**

**Παράμετροι και αποτέλεσμα του γενετικού αλγορίθμου για την κεραία με λοβό στις 30°.**

Parameter	Range	Step	Result	Phys. dim.
<i>Sidelength of the cornerplate</i>	$\lambda_o : 1.7\lambda_o$	$0.1\lambda_o$	$1.5\lambda_o$	18.75 cm
<i>Height of the cornerplate</i>	$\lambda_o : 1.7\lambda_o$	$0.1\lambda_o$	$1.7\lambda_o$	21.25 cm
<i>Length of the bisector's dipole</i>	$0.5\lambda_o : 1.7\lambda_o$	$0.1\lambda_o$	$0.5\lambda_o$	6.25 cm
<i>Length of the 1<sup>st</sup> pair of dipoles</i>	$0.5\lambda_o : 1.7\lambda_o$	$0.1\lambda_o$	$1.5\lambda_o$	18.75 cm
<i>Length of the 2<sup>nd</sup> pair of dipoles</i>	$0.5\lambda_o : 1.7\lambda_o$	$0.1\lambda_o$	$1.4\lambda_o$	17.5 cm
<i>Length of the 3<sup>rd</sup> pair of dipoles</i>	$0.5\lambda_o : 1.7\lambda_o$	$0.1\lambda_o$	$1.3\lambda_o$	16.25 cm
<i>Position of bisector's dipole</i>	1.5cm : 7.5cm	0.2cm	3.9cm	
<i>Coordinates of the 1<sup>st</sup> pair of dipoles(x,y)</i>	(1.5,0.5) : (13,13) cm	0.2cm	(2.9,1.9)cm	
<i>Coordinates of the 2<sup>nd</sup> pair of dipoles(x,y)</i>	(1.5,0.5) : (13,13) cm	0.2cm	(7.1,5.3)cm	
<i>Coordinates of the 3<sup>rd</sup> pair of dipoles(x,y)</i>	(1.5,0.5) : (13,13) cm	0.2cm	(10.3,7.1)cm	
<i>Position of the 1<sup>st</sup> active element</i>	1 : 7	1	4	
<i>Position of the 2<sup>nd</sup> active element</i>	1 : 7	1	7	

Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία βελτιστοποίησης, όσον αφορά το διάγραμμα με τον κύριο λοβό στις  $0^\circ$ , είναι πανομοιότυπη με τη μόνη διαφορά ότι το μέγιστο κέρδος  $D(\phi)$  θα πρέπει να εμφανίζεται για  $\phi=0$ . Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ίδια των 5.1-5.7 με κατάλληλη τροποποίηση των ορίων των ολοκληρωμάτων για μέγιστη κατευθυντικότητα στις  $0^\circ$ .

- Μέσα στον κύριο λοβό, που σχηματίζεται λαμβάνοντας υπόψη 29 σημεία, ο όρος σφάλματος είναι

$$e_1 = \frac{1}{29} \sum_{\phi=-14^\circ}^{14^\circ} \left[ \left( \frac{\frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.5}{0.5} \right)^2 u \left( 0.5 - \frac{D(\phi)}{D_{\max}} \right) \right], \quad (5.1)'$$

όπου  $u(x)$  είναι η βηματική συνάρτηση

$$u(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}. \quad (5.2)'$$

- Στα άκρα του κύριου λοβού η επιθυμητή στάθμη είναι 3 dB κάτω από το μέγιστο κέρδος, συνεπώς ο αντίστοιχος όρος σφάλματος είναι

$$e_2 = \frac{1}{2} \sum_{\phi=\pm 15^\circ} \left( \frac{\frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.5}{0.5} \right)^2. \quad (5.3)'$$

- Έξω από τον κύριο λοβό, που σχηματίζεται από 329 σημεία, η σχετική στάθμη πλευρικού λοβού δεν πρέπει να ξεπερνά τα -10 dB. Επομένως, ο σχετικός όρος σφάλματος εκφράζεται

$$e_3 = \frac{1}{329} \sum_{\phi=16^\circ}^{344^\circ} \left[ \left( \frac{\frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.1}{0.1} \right)^2 u \left( \frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.1 \right) \right]. \quad (5.4)'$$

Οι 5.5 – 5.7 παραμένουν αμετάβλητες. Επιπρόσθετα, όπως είναι αναμενόμενο, οι μοναδικοί παράμετροι που συμμετέχουν πλέον στο γενετικό αλγόριθμο είναι μόνο ο αριθμός και η θέση των ενεργών στοιχείων. Οι χωρικές παράμετροι παραμένουν ίδιες της δομής που έχει προκύψει από τη διαδικασία βελτιστοποίησης του διαγράμματος κατευθυντικότητας στις  $30^\circ$ .

Πίνακας 5.2

Παράμετροι και αποτέλεσμα του γενετικού αλγορίθμου για την κεραία με λοβό στις  $0^\circ$ .

Parameter	Range	Step	Result
<i>Number of active elements</i>	1 : 7	1	3
<i>Position of the <math>x^{\text{th}}</math> active element</i>	1 : 7	1	1, 4, 5

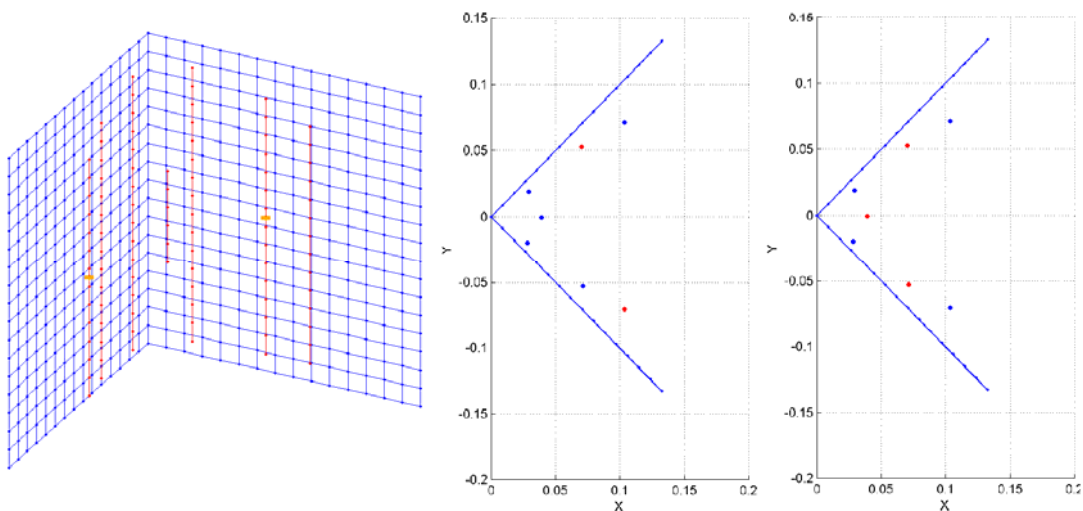
### 5.1.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ SPA ΓΙΑ ΤΗ WIFI, MOBILE WIMAX ΜΠΑΝΤΑ

Για να βρεθεί η τελική διάταξη που θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις που αναλύθηκαν προηγουμένως, πολλά τρεξίματα του γενετικού αλγόριθμου έλαβαν χώρα για διαφορετικές τιμές των συντελεστών βαρύτητας που ενσωματώνονται στην αντικειμενική συνάρτηση. Τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν για  $\mathcal{W}_1 = \mathcal{W}_2 = \mathcal{W}_3 = 2$  και  $\mathcal{W}_4 = 1$  όσον αφορά και τις δύο διαδικασίες βελτιστοποίησης. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.1 και 5.2. ενώ η εξαγόμενη δομή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3 όπου επισημαίνονται και τα ενεργά, κατά περίπτωση, στοιχεία. Επιπλέον, στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι τιμές των VSWR και εύρους ημίσειας ισχύος για τη συχνότητα των 2.4 GHz για τρία ζητούμενα διαγράμματα ακτινοβολίας.

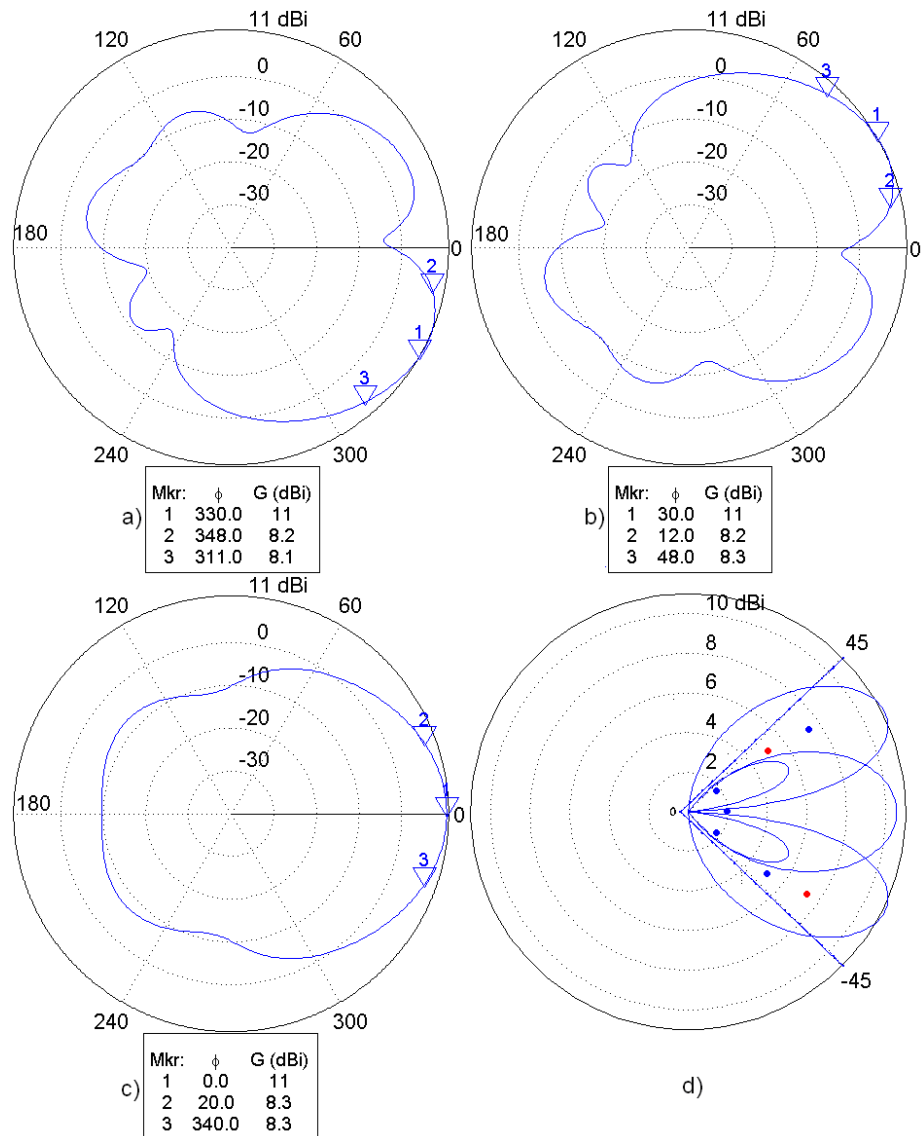
Πίνακας 5.3  
Τιμές του VSWR και 3 db στα 2.4 GHz για κάθε ζητούμενο διάγραμμα.

2.4 GHz	30°	0°	-30°
VSWR	2.013	2.103	2.013
3 db	36°	40°	36°

Το εύρος ζώνης καθορίζεται από το διάστημα συχνοτήτων όπου ο συντελεστής ανάκλασης σε κάθε σημείο τροφοδοσίας δεν υπερβαίνει τα -10 dB κάτι που αντιστοιχεί σε τιμές VSWR μικρότερες του 2. Προφανώς η εξεταζόμενη κεραία θα πρέπει να εμφανίζει στη συχνότητα των 2.4 GHz τιμές VSWR όσο το δυνατόν πλησιέστερες στην τιμή 2, κάτι που όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.3, όντως ισχύει. Τα διαγράμματα μακρινού πεδίου στο οριζόντιο επίπεδο μαζί με τα μέγιστα κέρδη για αυτή τη διάταξη στα 2.4 GHz παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4, όπως υπολογίζονται από το SNEC.



Σχήμα 5.3: Παραγόμενη από τον γενετικό αλγόριθμο SPA και τα ενεργά στοιχεία κάθε διαγράμματος (30°, 0°).



**Σχήμα 5.4:** Διαγράμματα ακτινοβολίας για το οριζόντιο επίπεδο για α)  $-30^\circ$  β)  $30^\circ$  γ)  $0^\circ$  και δ) η παραγόμενη ταλάντωση του διαγράμματος (oscillation).

Το σχήμα του διαγράμματος ικανοποιεί τις προδιαγραφές στη συχνότητα των 2.4 GHz, ενώ το εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος κυμαίνεται μεταξύ  $36^\circ$ - $40^\circ$ .

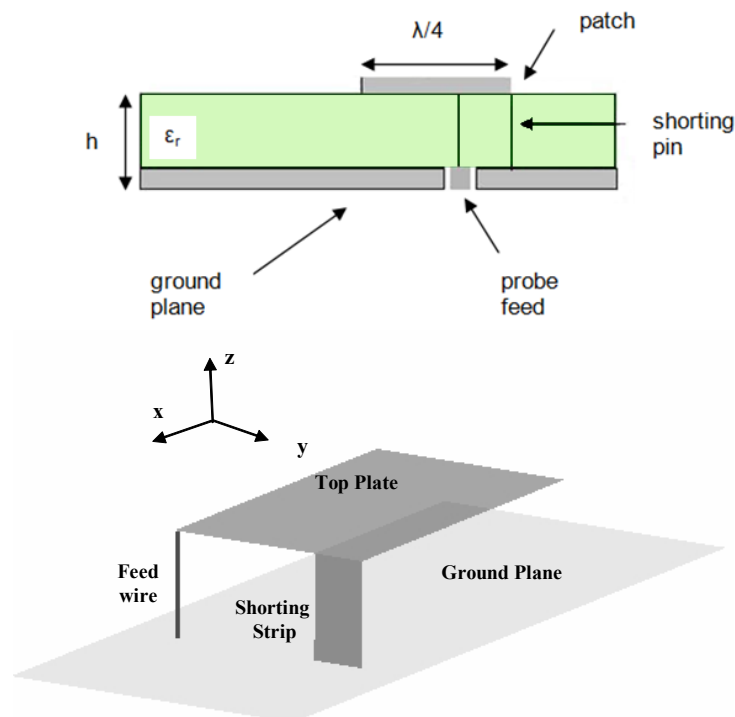
Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης δείχνουν ότι το προτεινόμενο κεραιοσύστημα εμφανίζει κατευθυντικές ιδιότητες σε σχέση τα αζιμουθιακά διαγράμματα ακτινοβολίας και σημαντική ικανότητα ταλάντωσης αυτών. Οι τιμές της αντίστασης εισόδου για τη συχνότητα των 2.4 GHz είναι ικανοποιητικές και για τα τρία διαγράμματα ενώ ικανοποιούνται και οι αρχικοί περιορισμοί για το εύρος ημίσειας ισχύος καθώς και για τον περιορισμό των οπίσθιων και πλευρικών λοβών των οποίων η τιμή, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του Σχήματος 5.4 είναι μικρότερη από τα  $-10$  dB ως προς τον κύριο.

## 5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΑΣ SPA ΤΕΤΡΑΠΛΗΣ ΡΙΦΑ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ WiFi, mobile WiMAX ΣΥΧΝΟΤΙΚΗ ΖΩΝΗ

Με την ολοένα αυξανόμενη απαίτηση σε κινητές επικοινωνίες ευρείας ζώνης, αποδίδεται περισσότερη προσοχή στο σχεδιασμό των νέων τερματικών. Τα μελλοντικά κινητά τερματικά αναμένονται να παρουσιάζουν αυξημένο λειτουργικό εύρος ζώνης, κέρδος και κατευθυντικότητα, ενώ παράλληλα να διατηρούν ένα χαμηλό γεωμετρικό προφίλ. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών ένα νέο κεραιοσύστημα για τερματικά, η επίπεδη κεραία ανεστραμμένου F (Planar Inverted F Antenna, PIFA) έχει εμφανιστεί σαν ο κατάλληλος αντικαταστάτης των μονοπολικών και ελικοειδών κεραιών που κατασκευάστηκαν τα προηγούμενα χρόνια από τη βιομηχανία [12].

### 5.2.1 Η ΕΠΙΠΕΔΗ ΚΕΡΑΙΑ ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΟΥ F (PLANAR INVERTED F ANTENNA, PIFA)

Η γεωμετρία της PIFA απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5. Η διάταξη αποτελείται από μια αγωγίμη ορθογώνια πλάκα (top plate) τοποθετημένη πάνω από επίπεδη βάση περιορισμένου μεγέθους (ground plane). Μεταξύ τους υπάρχει ένα τροφοδοτούμενο σύρμα (feed wire) και μια ορθογώνια κατασκευή (shorting strip) που βραχυκυκλώνει το κάτω με το πάνω μέρος της όλης διάταξης.



Σχήμα 5.5: Δομή της PIFA.

Η απόδοση της κεραίας μπορεί να ελεγχθεί και να βελτιστοποιηθεί αλλάζοντας με διάφορους συνδυασμούς τις διαστάσεις των διαφόρων στοιχείων της κεραίας. Γενικά, έχει παρατηρηθεί από διάφορες εφαρμογές σχετικά με την PIFA ότι εάν το ground plane είναι πολύ μεγαλύτερο από  $\lambda/4$ , όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος που προκύπτει από τη συχνότητα λειτουργίας, τότε το διάγραμμα ακτινοβολίας θα εμφανίζει πολλούς

λοβούς και κατά συνέπεια η κεραία δεν είναι κατευθυντική. Από την άλλη, ένα είναι σημαντικά μικρότερο από  $\lambda/4$ , τότε ο συντονισμός γίνεται όλο και πιο δύσκολος και η επίδοση της κεραίας μειώνεται αισθητά. Η πανκατευθυντική συμπεριφορά της PIFA με σημαντικές τιμές κέρδους, εξασφαλίζει επαρκή απόδοση για τα τυπικά εσωτερικά περιβάλλοντα λαμβάνοντας υπόψη τις τυποποιημένες τιμές ισχύος και της ευαισθησίας των δεκτών των περιορισμένου εύρους ραδιοσυσκευών.

Επιπλέον, η πόλωση της κεραίας είναι συνήθως ελλειπτική αντί για γραμμική. Κατά συνέπεια, η κεραία έχει τη δυνατότητα να λάβει και κάθετα και οριζόντια πολωμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, γεγονός που είναι πολύ χρήσιμο για τα εσωτερικά περιβάλλοντα όπου η αποπόλωση είναι ένα κυρίαρχο φαινόμενο που λαμβάνει χώρα συχνά και έτσι η επιλογή της καλύτερης πόλωσης αποτελεί δύσκολη υπόθεση. Αξίζει να αναφερθεί ότι γενιά το εύρος ζώνης της PIFA αυξάνεται με την αύξηση του πάχους της κεραίας. Επιπλέον, επειδή το εύρος ζώνης επηρεάζεται αισθητά από το μέγεθος του ground plane, αλλάζοντας το συγκεκριμένο μέγεθος, πετυχαίνουμε ποικιλία εύρους ζώνης.

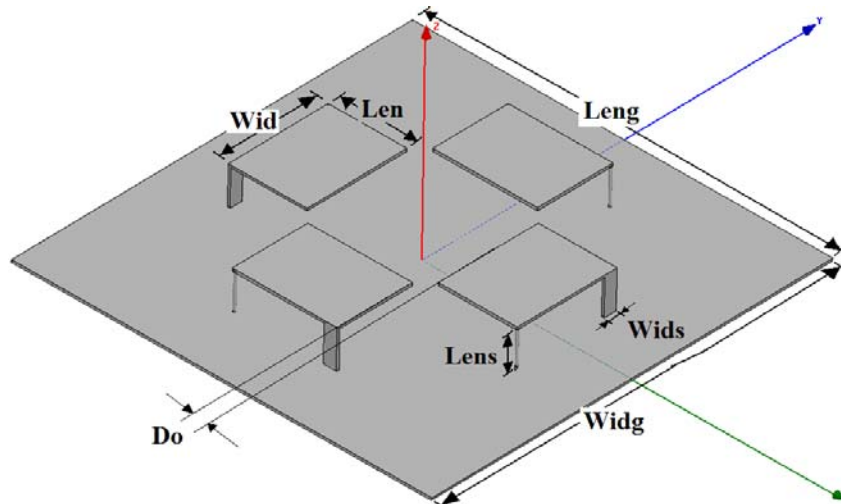
Γενικά, τα πλεονεκτήματα της χρήσης κεραίας τύπου PIFA είναι τα εξής: α) μπορεί να τοποθετηθεί σε κινητή συσκευή σε σύγκριση με τις ελικοειδής ή τις κεραίες ραδιοφώνου, β) έχει μειωμένη οπίσθια ακτινοβολία προς το κεφάλι του χρήστη, ελαχιστοποιώντας την ηλεκτρομαγνητική απορρόφηση ισχύος των κυμάτων (SAR) ενώ παράλληλα ενισχύει την απόδοση των κεραίων, γ) εκθέτει μέτριο ως υψηλό κέρδος τόσο στις κάθετες όσο και στις οριζόντιες πολώσεις, γεγονός που σημαντικό σε περιπτώσεις όπου ο προσανατολισμός της κεραίας δεν καθορίζεται και οι ανακλάσεις λαμβάνουν χώρα από διαφορετικές γωνίες του περιβάλλοντος.

Τα χαρακτηριστικά εκπομπής και η επίδοση της κεραίας ρυθμίζεται αλλάζοντας τις διαστάσεις του τροφοδοτούμενου και του στοιχείου βραχυκυκλώσεως [12], το μέγεθος και το περίγραμμα της άνω αγωγίμης πλάκας [13-16], καθώς και το μέγεθος της επίπεδης βάσης [17]. Αλλάζοντας τις διαστάσεις της πάνω πλάκας, το ύψος πάνω από την επίπεδη βάση και το μέγεθος της ίδιας της βάσης, παρατηρείται μια μεταβολή στη συχνότητα συντονισμού και στο εύρος ζώνης [12].

Σε αυτό το σημείο προτείνεται η σχεδίαση και βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών μιας συστοιχίας κεραίων PIFA στρεφόμενου λοβού, για ISM εφαρμογές στα 2.4 GHz. Η προτεινόμενη δομή αποτελείται από τέσσερις κεραίες PIFA συμμετρικά τοποθετημένες πάνω σε κοινή επίπεδη βάση (Quad-PIFA), μία εκ των οποίων είναι ενεργή σε κάθε χρονική στιγμή ενώ οι υπόλοιπες είναι βραχυκυκλωμένες (παρασιτικά στοιχεία) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6. Η προσθήκη των παρασιτικών στοιχείων παρέχει τη δυνατότητα για αυξημένο κέρδος, κατευθυντικότητα, στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας και προσαρμογή στην επιθυμητή συχνότητα. Η εναλλαγή κατάστασης μεταξύ ενεργής ή παθητικής μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση RF διακοπών δύο καταστάσεων ή μιας p.i.n. διόδου και ενός διακόπτη RF δύο καταστάσεων. Στη δεύτερη περίπτωση, και όταν η δίοδος είναι αγωγίμη, το αντίστοιχο στοιχείο είναι βραχυκυκλωμένο και δρα σαν ανακλαστήρα ανεξάρτητα από την κατάσταση του RF διακόπτη. Αντίθετα, όταν η δίοδος δεν είναι αγωγίμη, υπάρχουν δύο καταστάσεις: αν ο RF διακόπτης είναι ανοικτός, το στοιχείο είναι ανοικτοκυκλωμένο και είναι ουσιαστικά άορατο στη δομή, ενώ όταν ο διακόπτης είναι κλειστός το στοιχείο γίνεται ενεργό. Η στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας επιτυγχάνεται θέτοντας κατάλληλα τα στοιχεία της δομής σε ενεργή ή παρασιτική κατάσταση [18-21].

Κύριος σκοπός της συγκεκριμένης δομής είναι η επίτευξη ενός διαγράμματος ακτινοβολίας με τον κύριο λοβό κατευθυνόμενο στις 0, 90, 180 και 270° κυκλικά, καλύπτοντας έτσι ολόκληρο το οριζόντιο επίπεδο. Επιπλέον, απαιτείται εύρος ζώνης

ημίσειας ισχύος  $90^\circ$  και σχετικές στάθμες πλευρικών λοβών μικρότερες από  $-10$  dB με επαρκές εύρος ζώνης αντίστασης εισόδου στη μπάντα συχνοτήτων WiFi, mobile WiMAX (2.4 GHz). Χάρη στη συμμετρία της δομής, ελέγχοντας ηλεκτρικά ποια από τις τέσσερις PIFA είναι ενεργή κάθε φορά, μπορούν να επιτευχθούν κατευθυντικές δέσμες, οι οποίες μπορούν να στραφούν και να καλύψουν ολόκληρο το αζιμούθιο.



Σχήμα 5.6: Δομή της SPA Quad-PIFA.

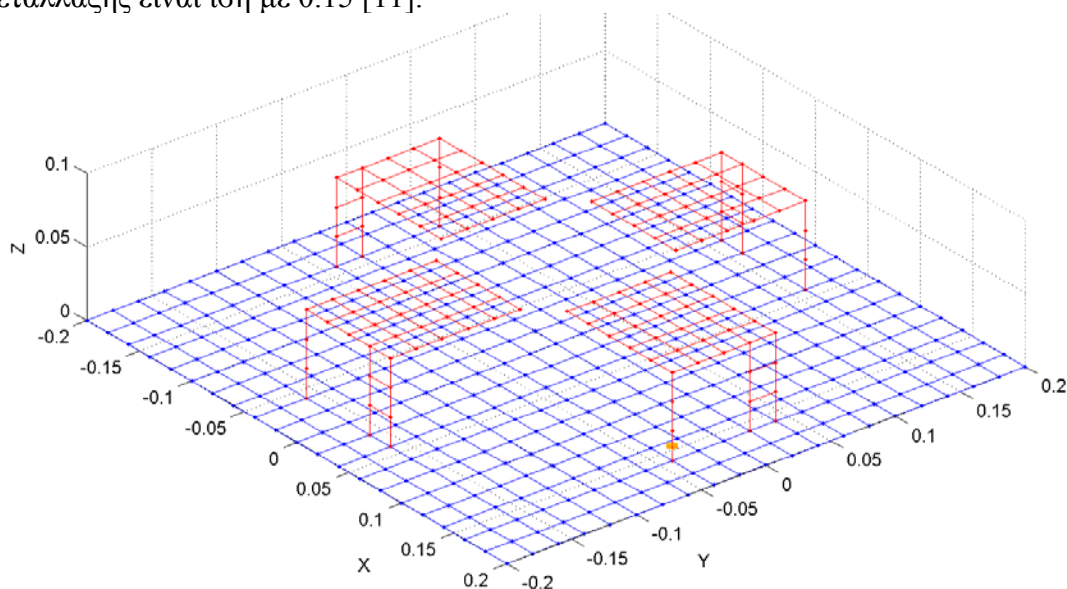
Η προτεινόμενη κεραία [21] είναι μια υβριδική κεραία και είναι κατάλληλη για εφαρμογές στη WiFi/WLAN συχνοτική περιοχή των 2.4 GHz όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ως πομπός όσο και σα δέκτης. Η επιλεκτική της κατευθυντικότητα δίνει τη δυνατότητα επικέντρωσης σε συγκεκριμένες περιοχές κάλυψης (πομπός) ή τη δυνατότητα επιλογής από μια ποικιλία από hot spot εκείνου που παρέχει το ισχυρότερο σήμα (δέκτης).

### 5.2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ SPA QUAD-PIFA

Η προσομοίωση και ο σχεδιασμός της προαναφερθείσας κεραίας γίνονται με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου SNEC, όπου τα συστατικά στοιχεία της MoM που είναι διαθέσιμα στον κώδικα είναι τα τμήματα αγωγού (wire segments). Ως εκ τούτου, η PIFA αποτελείται από πλέγματα αγωγών σύρματος (που αναπαριστούν τις άνω πλάκες, την επίπεδη βάση και τις επιφάνειες βραχυκύκλωσης αντίστοιχα) και αγωγούς σύρματος που αναπαριστούν τα στοιχεία τροφοδότησης και βραχυκύκλωσης, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.6. Η τελική δομή στο SNEC υλοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε οι τιμές εισόδου που καθορίζει ο χρήστης για τις διαστάσεις της διάταξης να δίνονται συναρτήσεως των αριθμών των τμημάτων αγωγού. Δεδομένου λοιπόν του ότι το μήκος τμήματος (segment length, *seglen*) είναι κλάσμα του μήκους κύματος  $\lambda$ , το ηλεκτρικό μέγεθος της PIFA είναι σταθερό. Το σκεπτικό αυτό προέκυψε από την αναγκαιότητα σχεδίασης της PIFA σύμφωνα με τους περιορισμούς που θέτει το SNEC.

Και στη συγκεκριμένη περίπτωση, εφαρμόζεται η τεχνική των γενετικών αλγορίθμων και μάλιστα η εκδοχή που είναι ενσωματωμένη στο SNEC. Ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι δυαδικού τύπου. Ο συνολικός πληθυσμός αποτελείται από 250 γενιές και κάθε γενιά περιλαμβάνει 60 χρωμοσώματα. Στο σχηματισμό κάθε επόμενης γενιάς συμμετέχουν τα δέκα

χρωμοσώματα της προηγούμενης με τις υψηλότερες τιμές καταλληλότητας (ελιτισμός). Η στρατηγική επιλογής που χρησιμοποιείται είναι η αποδεκάτιση πληθυσμού, ενώ το σχήμα ζευγαρώματος είναι η συνένωση ατόμων με γειτονικές τιμές επίδοσης (adjacent fitness pairing). Το σημείο της διασταύρωσης επιλέγεται τυχαία και κάθε χρωμόσωμα χωρίζεται σε επίπεδο γονιδίων. Η πιθανότητα μετάλλαξης είναι ίση με 0.15 [11].



Σχήμα 5.6: Υλοποίηση της SPA Quad-PIFA στο SNEC.

Τα χαρακτηριστικά της κεραίας που λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία της βελτιστοποίησης, είναι το πλάτος και το μήκος των top plates, το ύψος και το πλάτος των shorting strip των τεσσάρων PIFA, η απόσταση μεταξύ τους, η ηλεκτρική τους κατάσταση (ενεργή ή παρασιτική) και το μέγεθος του ground plate. Μεταβάλλοντας αυτές τις παραμέτρους, ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να καταλήξει σε μια δομή που να ικανοποιεί πρωταρχικά την απαίτηση σχεδίασης που είναι ενός διαγράμματος ακτινοβολίας με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (μέγιστο κέρδος στην κατεύθυνση των  $0^\circ$ , εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος  $90^\circ$ , σχετικά μικρούς πλευρικούς και οπίσθιους λοβούς) επιτυγχάνοντας παράλληλα προσαρμογή στη συχνότητα των 2.4 GHz. Οι παραπάνω παράμετροι, τα διαστήματα διακύμανσής των και οι τελικές τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Επιτυγχάνοντας την πρωταρχική αυτή απαίτηση, ικανοποιείται και η αρχική ιδέα δημιουργίας της προτεινόμενης κεραίας που είναι η δημιουργία τεσσάρων κατευθυντικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας στις κατευθύνσεις των  $0, 90, 180$  και  $270^\circ$ , μεταβάλλοντας περιστροφικά την ηλεκτρική κατάσταση της κάθε PIFA και επιλέγοντας ποια εξ' αυτών είναι ενεργή ή παθητική σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή. Χάρη στη συμμετρική δομή της κεραίας επιτυγχάνεται μέγιστη κατευθυντικότητα και χάρη στην ικανότητά της για στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας επιτυγχάνεται κάλυψη ολόκληρου του αζιμουθιακού επιπέδου.

Έστω  $D(\phi)$  η κατευθυντικότητα (ορισμένη με γωνιακό βήμα  $1^\circ$  και  $D_{\max}$  η μέγιστη κατευθυντικότητα. Η αντικειμενική συνάρτηση που μπορεί να ικανοποιήσει αυτές τις απαιτήσεις είναι η ακόλουθη:

- Μέσα στον κύριο λοβό, που σχηματίζεται λαμβάνοντας υπόψη 89 σημεία, ο όρος σφάλματος είναι



$$e_1 = \frac{1}{89} \sum_{\phi=-44^\circ}^{44^\circ} \left[ \left( \frac{\frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.5}{0.5} \right)^2 u \left( 0.5 - \frac{D(\phi)}{D_{\max}} \right) \right], \quad (5.1)''$$

όπου  $u(x)$  είναι η βηματική συνάρτηση

$$u(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}. \quad (5.2)''$$

- Στα άκρα του κύριου λοβού η επιθυμητή στάθμη είναι 3 dB κάτω από το μέγιστο κέρδος, συνεπώς ο αντίστοιχος όρος σφάλματος είναι

$$e_2 = \frac{1}{2} \sum_{\phi=\pm 45^\circ} \left( \frac{\frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.5}{0.5} \right)^2. \quad (5.3)''$$

- Έξω από τον κύριο λοβό, που σχηματίζεται από 269 σημεία, η σχετική στάθμη πλευρικού λοβού δεν πρέπει να ξεπερνά τα -10 dB. Επομένως, ο σχετικός όρος σφάλματος εκφράζεται

$$e_3 = \frac{1}{269} \sum_{\phi=46^\circ}^{314^\circ} \left[ \left( \frac{\frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.1}{0.1} \right)^2 u \left( \frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.1 \right) \right]. \quad (5.4)''$$

- Για να επιτευχθεί ταυτόχρονα προσαρμογή προς μια γραμμή μεταφοράς χαρακτηριστικής αντίστασης 75 Ω σε κάθε σημείο τροφοδότησης, ένας επιπλέον όρος σφάλματος υπολογίζεται σαν

$$e_4 = abs \left( \frac{R_{in} - 75}{75} \right)^2 + abs \left( \frac{X_{in}}{75} \right)^2, \quad (5.5)''$$

όπου  $R_{in}$  και  $X_{in}$  αντιπροσωπεύουν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της αντίστασης εισόδου αντίστοιχα.

Έπειτα, το συγκεντρωτικό σφάλμα προκύπτει από την άθροιση όλων των όρων σφάλματος αφού πολλαπλασιαστεί ο καθένας με έναν συντελεστή βαρύτητας  $w_i$  ( $i=1,2,3,4$ ).

Δεδομένου ότι ο σκοπός της σχεδίασης είναι η επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων για ένα εύρος ζώνης συχνοτήτων, η διαδικασία που περιγράφηκε

επαναλαμβάνεται για έναν αριθμό  $P$  διακριτών συχνοτήτων που κείτονται στο επιθυμητό διάστημα και επομένως το συνολικό σφάλμα υπολογίζεται σαν

$$err = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^4 w_i e_i \quad (5.6)''$$

Αφού βρεθεί το συνολικό σφάλμα, η αντικειμενική συνάρτηση προκύπτει

$$OF = \frac{1}{1 + \sqrt{err}} \quad (5.7)''$$

Η συχνότητα προσομοίωσης τέθηκε στα 2.4 GHz, τη συχνότητα των WiFi/WLAN. Αν  $\lambda_0$  το μήκος κύματος στα 2.4 GHz, ο Πίνακας 5.4, απεικονίζει το εύρος μεταβολής κάθε παραμέτρου που συμμετέχει στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Από τη στιγμή που οι χωρικές παράμετροι δίνονται συναρτήσει του  $\lambda_0$ , οι ηλεκτρικές διαστάσεις της κεραίας παραμένουν σταθερές και τα δεδομένα που προκύπτουν είναι κατάλληλα για εφαρμογή και σε άλλες συχνότητες. Είναι στη διακριτική ευχέρεια του σχεδιαστή να επιλέξει κάποια άλλη συχνότητα, αν ενδιαφέρεται για άλλες εφαρμογές. Η ακτίνα αγωγών κάθε στοιχείου είναι 0.5 mm.

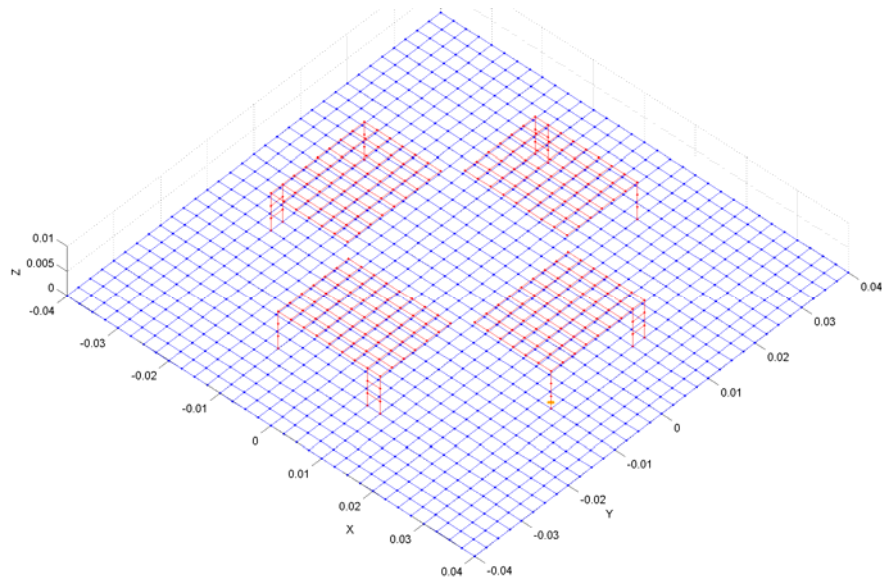
**Πίνακας 5.4**  
**Παράμετροι και αποτέλεσμα του γενετικού αλγορίθμου για την SPA Quad-PIFA.**

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

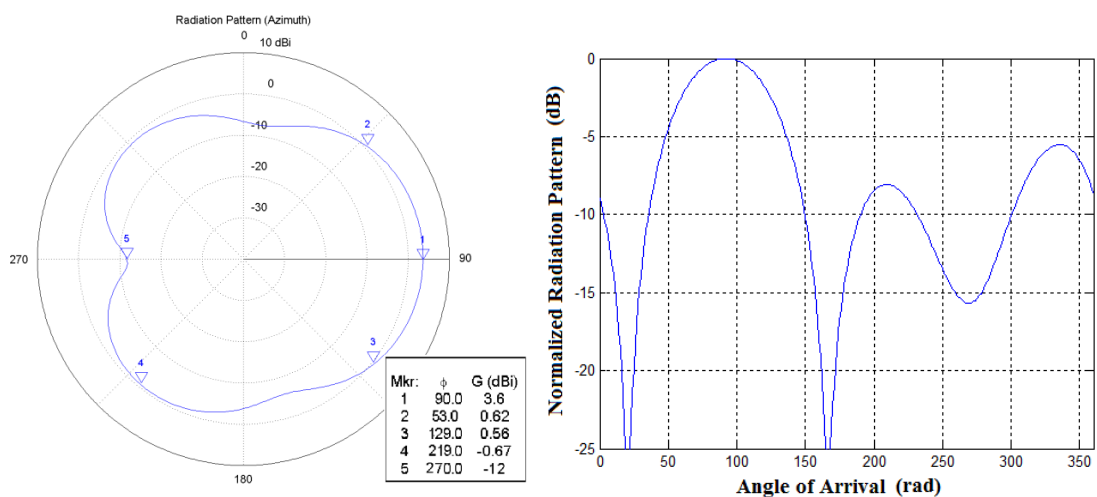
### 5.2.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ SPA QUAD-PIFA ΓΙΑ ΤΗ WIFI, MOBILE WIMAX ΜΠΑΝΤΑ

Εξαιτίας των πολλαπλών απαιτήσεων από το γενετικό αλγόριθμο για συγκεκριμένο διάγραμμα ακτινοβολίας, προσαρμογή σε συγκεκριμένη συχνότητα, περιορισμένες φυσικές και του μεγάλου αριθμού των παραμέτρων που πήραν μέρος στη διαδικασία της βελτιστοποίησης, κάθε γενετικός αλγόριθμος διήρκεσε αρκετά μέχρι να ολοκληρωθεί. Πάραυτα, πραγματοποιήθηκε ένας αρκετά μεγάλος αριθμός

γενετικών αλγορίθμων για διαφορετικές τιμές των συντελεστών βάρους την αντικειμενικής συνάρτησης. Τα καλύτερα αποτελέσματα εξάχθηκαν για  $\mathcal{W}_1 = \mathcal{W}_2 = \mathcal{W}_3 = 3$  και  $\mathcal{W}_4 = 1$  και απεικονίζονται, για κάθε παράμετρο του γενετικού, στον Πίνακα 5.4. Επίσης, η παραγόμενη κεραιοδιάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.7 και το διάγραμμα ακτινοβολίας με κατεύθυνση στις  $90^\circ$  στο Σχήμα 5.8. Τα υπόλοιπα τρία διαγράμματα ακτινοβολίας ( $0, 180$  και  $270^\circ$ ) έχουν ακριβώς την ίδια μορφή χάρη στη συμμετρία της κεραίας.

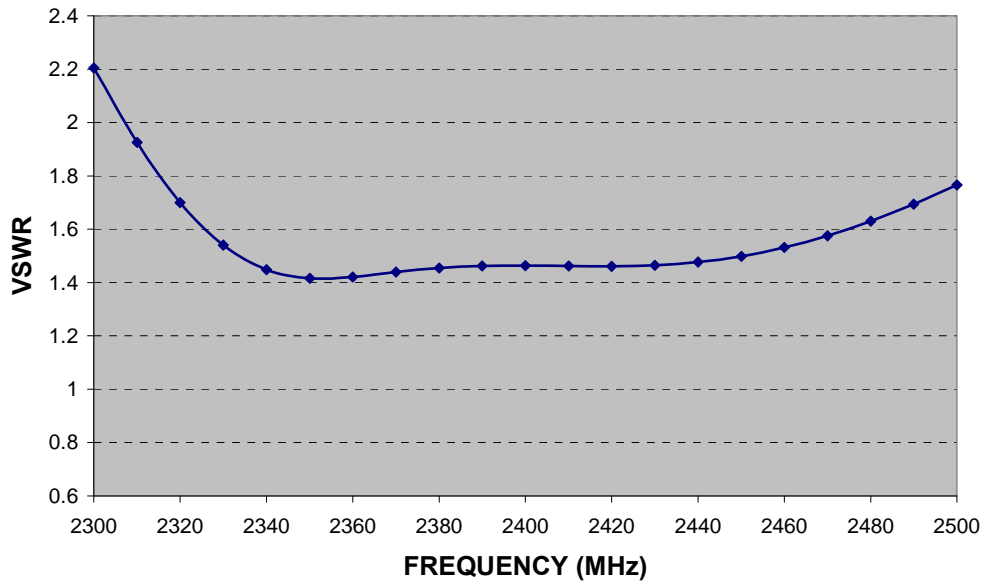


Σχήμα 5.7: Παραγόμενη από τον γενετικό αλγόριθμο SPA Quad-PIFA



Σχήμα 5.8: Διαγράμματα ακτινοβολίας για το οριζόντιο επίπεδο για την SPA Quad-PIFA με κατεύθυνση τις  $90^\circ$ .

Η σωστή λειτουργία της SPA Quad-PIFA, όσον αφορά τον επιθυμητό συντονισμό, επιτυγχάνεται στις συχνότητες όπου η τιμή του συντελεστή ανάκλασης στο σημείο τροφοδότησης είναι μικρότερο από  $-10$  dB, κάτι που αντιστοιχεί σε VSWR με τιμή μικρότερη από 2, λαμβάνοντας υπόψη ότι για τη βελτιστοποίηση της συγκεκριμένης κεραίας θεωρήθηκε γραμμή μεταφοράς χαρακτηριστική αντίσταση  $75\Omega$ . Το Σχήμα 5.9 απεικονίζει τη μεταβολή του VSWR γύρω από τη συχνότητα των  $2.4$  GHz.



**Σχήμα 5.9:** Μεταβολή του VSWR της SPA Quad-PIFA γύρω από τα 2.4 GHz.

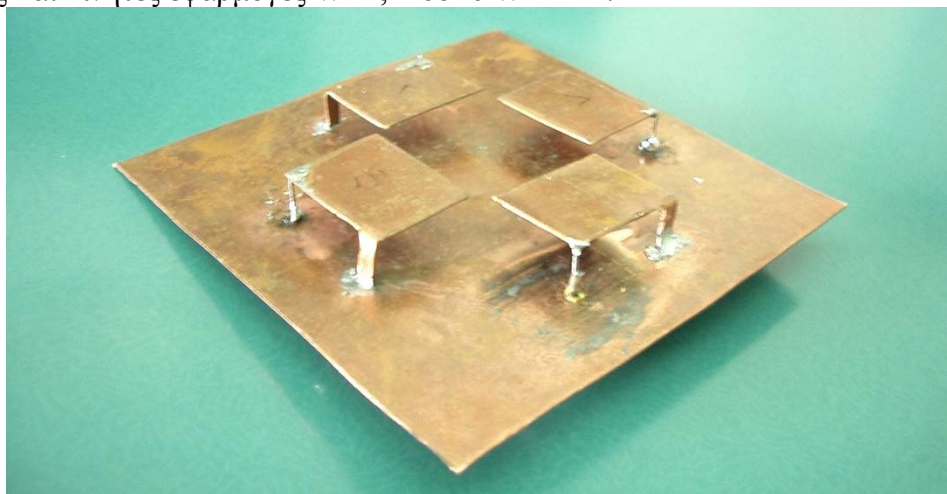
Όπως προκύπτει από το Σχήμα 5.9, η βελτιστοποιημένη SPA Quad-PIFA επιδεικνύει συντονισμό στα 2.4 GHz (VSWR = 1.4633) και εκτεταμένο λειτουργικό εύρος ζώνης σε μια περιοχή μεγαλύτερη των 200 MHz γύρω από την κεντρική συχνότητα. Επίσης, από το Σχήμα 5.8, είναι φανερό ότι η συγκεκριμένη κεραία παρουσιάζει έναν κύριο λοβό στις 90°, με εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος 82°, κέρδος 3.6 dB και λόγο front-to-back 15.6 dB στα 2.4 GHz. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι τιμές διατηρούνται σε ολόκληρο το λειτουργικό εύρος των 200 MHz της προτεινόμενης SPA Quad-PIFA, καθιστώντας έτσι τα επιτευκτά αποτελέσματα περισσότερο από ικανοποιητικά.

Έχοντας σα δεδομένο το διάγραμμα ακτινοβολίας του Σχήματος 5.8, το συγκεκριμένο διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να στραφεί, απλά αλλάζοντας περιστροφικά την ηλεκτρική κατάσταση των PIFA, κάνοντάς το έτσι να κατευθύνεται προς τις 0, 180 και 270°, καλύπτοντας με αυτόν τον τρόπο ολόκληρο το αζιμουθιακό επίπεδο. Τέλος, οι φυσικές διαστάσεις της κεραίας που απεικονίζονται στον Πίνακα 5.4 και που εκφράζονται τόσο συναρτήσει του μήκους κύματος στα 2.4 GHz όσο και με απόλυτες διαστάσεις, επιδεικνύουν μια αρκετά συμπαγή κεραιοδιάταξη, ικανοποιώντας επομένως την αρχική απαίτηση για μια δομή περιορισμένων διαστάσεων.

#### **5.2.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΗΣ SPA QUAD-PIFA ΓΙΑ ΤΗ WIFI, MOBILE WIMAX ΜΠΑΝΤΑ.**

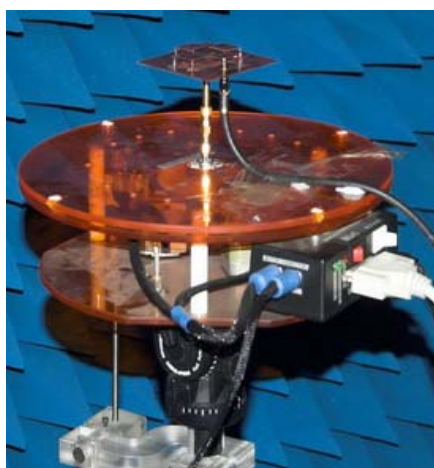
Για να επαληθευτούν οι ιδιότητες λήψης της προτεινόμενης κεραίας, ένα πρωτότυπο για μια μοναδική θέση μεταγωγής που αναπαριστάνει ένα κεραιοστιγμιότυπο από τα τέσσερα που μπορεί να προσφέρει η εν λόγω SPA Quad-PIFA κατασκευάστηκε και μετρήθηκε μέσα στον ανηχοϊκό θάλαμο της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου [22]. Η υλοποιημένη κεραία παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10 και αποτελείται από ένα ενεργό και τρία παρασιτικά στοιχεία, με το ενεργό στοιχείο επιλεγμένο κατάλληλα με βάση τη προσομοίωση, έτσι ώστε το προκύπτον διάγραμμα ακτινοβολίας να στοχεύει στις 90°. Οι φυσικές διαστάσεις της κατασκευασμένης

κεραίας παρουσιάζονται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 5.4. Το υλικό των στοιχείων είναι χαλκός πάχους 1 mm για να ταυτίζεται με την επιλεγμένη ακτίνα βελτιστοποίησης των segments του SNEC. Η υλοποιημένη διάταξη διακρίνεται για το αρκετά περιορισμένο γεωμετρικό προφίλ που την καθιστούν πρόσφορη για σταθερές, φορητές και κινητές εφαρμογές WiFi, mobile WiMAX.



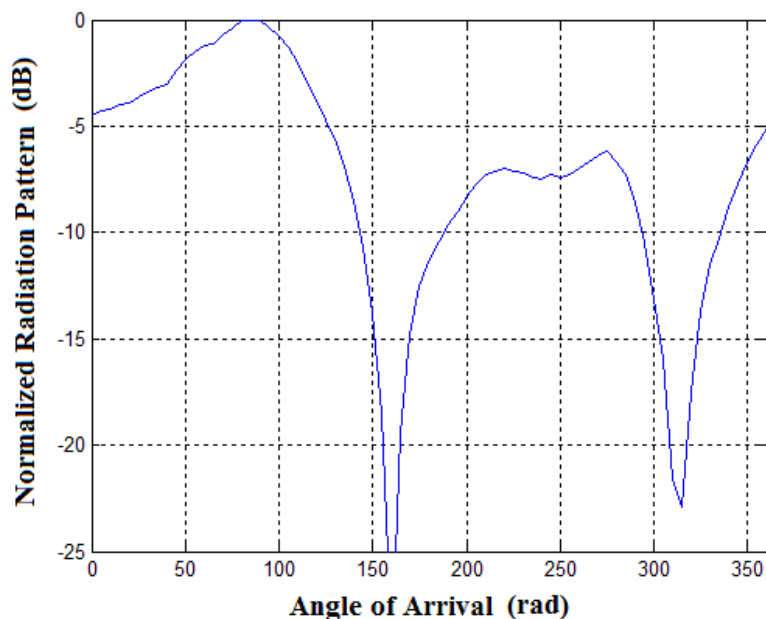
**Σχήμα 5.10:** Πρωτότυπο της προτεινόμενης κεραίας SPA Quad-PIFA.

Για τη διαδικασία των μετρήσεων στον ανηχοϊκό θάλαμο, η υπό εξέταση κεραία χρησιμοποιήθηκε σαν δέκτης, ενώ η χοανοκεραία EM-6917C-1 από την Electro-Metrics χρησιμοποιήθηκε σαν πομπός. Η κεραία εκπομπής διεγείρεται από διαδοχικούς ημιτονοειδείς τόνους γύρω από τη συχνότητα των 2.4 GHz με κατάλληλο συχνοτικό βήμα και μια ισχύ εξόδου 10 dBm, που παράγονται από έναν αναλυτή δικτύου Hewlett-Packard 8714C. Ο ίδιος αναλυτής δικτύου χρησιμοποιείται για την μέτρηση της στάθμης του σήματος που λαμβάνει η υλοποιημένη κεραία. Για να προσεγγιστεί υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα περιστρεφόμενης τράπεζας DAMS-5000 για την περιστροφή της κεραίας δέκτη (Σχήμα 5.11).



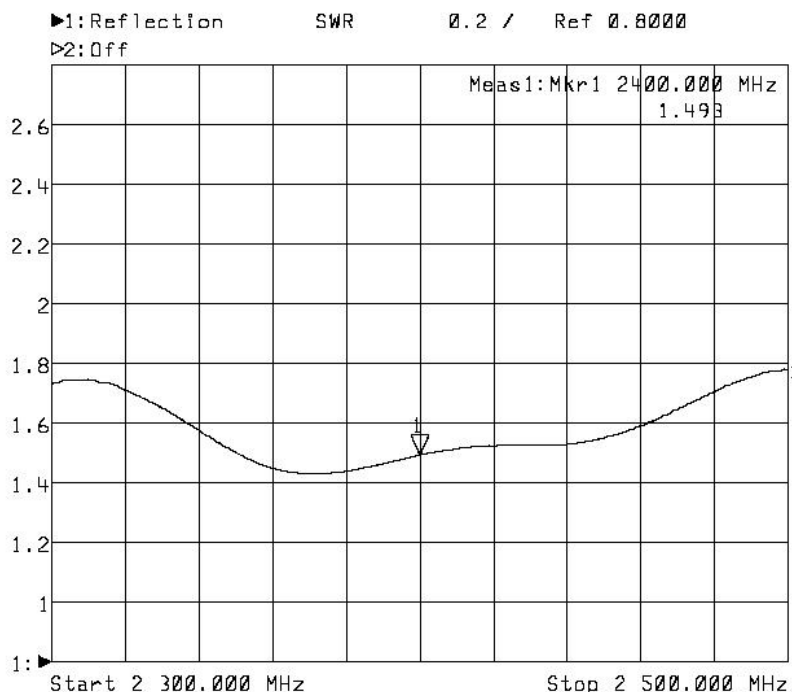
**Σχήμα 5.11:** Πρωτότυπο της προτεινόμενης κεραίας SPA Quad-PIFA στον ανηχοϊκό θάλαμο.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων όσον αφορά το κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας με κατεύθυνση στις  $90^\circ$  παρουσιάζεται στο σχήμα 5.12.



**Σχήμα 5.12:** Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας για το οριζόντιο επίπεδο για την κατασκευασμένη SPA Quad-PIFA με κατεύθυνση τις 90°.

Η απεικόνιση του μετρούμενου VSWR της κατασκευασμένης κεραίας φαίνεται στο Σχήμα 5.13. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το VSWR μετρήθηκε πειραματικά χρησιμοποιώντας γραμμή μεταφοράς χαρακτηριστικής αντίστασης 50Ω και, έπειτα, μετασχηματίστηκε θεωρώντας γραμμή μεταφοράς 75Ω για ευκολότερη σύγκριση απέναντι στα προσομοιωμένα αποτελέσματα.

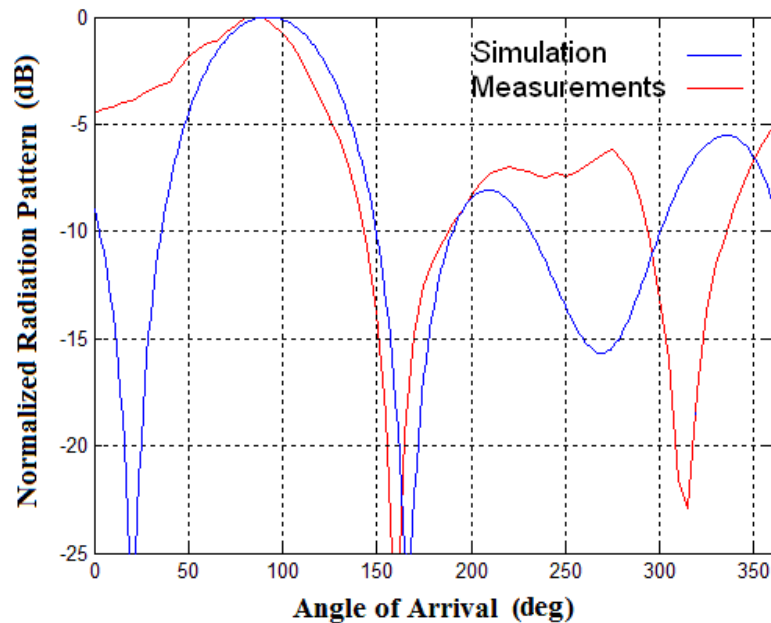


**Σχήμα 5.13:** Μεταβολή του VSWR της κατασκευασμένης SPA Quad-PIFA γύρω από τα 2.4 GHz.

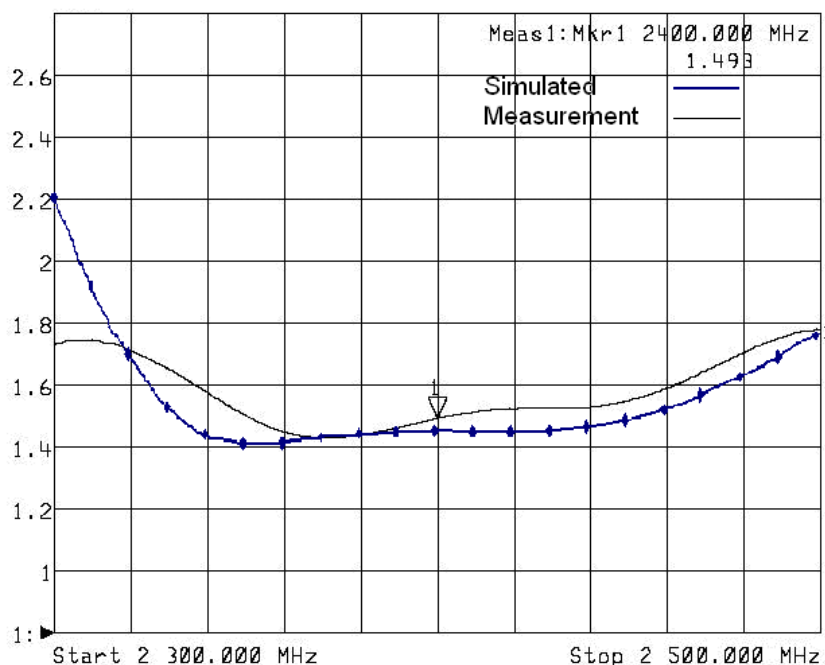
Με μια παρατήρηση των Σχημάτων 5.13 και 5.13 προκύπτει ότι η μετρούμενη κεραία παρουσιάζει εύρος ημίσειας ισχύος ίσο με 80° ενώ ο λόγος front-to-back είναι ίσος με 7 dB. Επιπλέον, το λειτουργικό εύρος ζώνης της κεραίας (VSWR < 2) είναι αρκετά μεγαλύτερο από 200 MHz. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα χαρακτηριστικά

της κεραίας αναμένονται να παραμείνουν αναλλοίωτα όσον αφορά τα διαγράμματα ακτινοβολίας που στοχεύουν στις  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  και  $270^\circ$ , εξαιτίας της συμμετρίας, ωστόσο, πιθανές διαφορές που οφείλονται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η ατελής τροφοδότηση της κεραίας, είναι πιθανό να εμφανιστούν.

Μια σύγκριση μεταξύ των μετρούμενων και των προσομοιωθέντων αποτελεσμάτων όσον αφορά το διάγραμμα ακτινοβολίας και το λόγο στάσιμου κύματος παρέχεται στα σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 5.14: Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας για το οριζόντιο επίπεδο για την κατασκευασμένη SPA Quad-PIFA με κατεύθυνση τις  $90^\circ$ .



Σχήμα 5.15: Μεταβολή του VSWR της κατασκευασμένης SPA Quad-PIFA γύρω από τα 2.4 GHz.

Από τα παραπάνω Σχήματα προκύπτει ότι τα αποτελέσματα προσομοίωσης της προτεινόμενης SPA Quad-PIFA είναι πολύ κοντά με τα πραγματικά μετρηθέντα αποτελέσματα της κατασκευασμένης κεραίας. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται από

το Σχήμα 5.14 των κανονικοποιημένων διαγραμμάτων ακτινοβολίας, οι δύο κεραίες παρουσιάζουν σχεδόν όμοια διαγράμματα, με την ίδια κατευθυντικότητα, το ίδιο εύρος ημίσειας ισχύος, σχεδόν τις ίδιες μεταβολές μεταξύ μέγιστων και μηδενισμών με μια μικρή διαφορά στις  $20^\circ$  και στις  $270^\circ$  περίπου. Επίσης, τα διαγράμματα των λόγων ανάκλασης, φανερώνουν και τα δύο τις ιδιότητες ευρυεκπομπής της προτεινόμενης κεραίας, ικανοποιώντας την απαίτηση για προσαρμογή σε ένα άκρως ικανοποιητικό εύρος γύρω από την επιθυμητή κεντρική συχνότητα των 2.4 GHz. Μάλιστα, το λειτουργικό εύρος ζώνης των περισσότερων από 200 MHz στην περίπτωση της μετρούμενης κεραίας, επιβραβεύει την αρχική επιλογή της PIFA σε στοιχείο για την προτεινόμενη στοιχειοκεραία, μιας και οι ευρυζωνικές ιδιότητες της PIFA είναι γνωστές στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι όποιες μικρές διαφορές μεταξύ των συγκρινόμενων διαγραμμάτων οφείλονται κατά κύριο λόγο στις κατασκευαστικές ατέλειες του πρωτότυπου και σε διάφορους αστάθμητους περιβαλλοντικούς παράγοντες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, που δεν αποτελούν σημείο ανάλυσης της συγκεκριμένης διατριβής.



### 5.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] P. K. Varlamos, P. J. Papakanellos, and C. N. Capsalis, "Design of circular switched parasitic dipole arrays using a genetic algorithm," *International Journal of Wireless Information Networks*, Vol. 11, No. 4, pp. 201-206, October 2004.
- [2] A. Chelouah, A. Sibille, P. Rosson, and J. P. Couvy, "Angular diversity based on beam switching of circular arrays for HIPERLAN terminals," *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 5, pp. 387-388, March 2000.
- [3] S. L. Preston, D. V. Thiel, T. A. Smith, S. G. O' Keefe, and J. W. Lu, "Basestation tracking in mobile communications using a switched parasitic antenna array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 46, No. 6, pp. 841-844, June 1998.
- [4] A. Fourie and D. Nitch, "SuperNEC: antenna and indoor-propagation simulation program," *IEEE Antennas and Propagat. Mag.*, vol. 42, no. 3, pp. 31-48, June 2000.
- [5] SuperNec v. 2.4 MOM Technical Reference Manual, [Online]. Available at <http://www.supernec.com/manuals/snmomtrm.htm>
- [6] S. A. Zekavat, and CR. Nassar, "Transmit Diversity via Oscillating-Beam-Pattern Adaptive Antennas: An Evaluation Using Geometric-Based Stochastic Circular-Scenario Channel Modeling", *IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, VOL. 3, NO.4, JULY 2004*
- [7] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [8] Y. Rahmat-Samii and E. Michielssen, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*. John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [9] B. Orchard, *Optimizing Algorithms for Antenna Design*. MSc Dissertation, University of the Witwatersrand, 2002.
- [10] T. D. Dimousios, S. C. Panagiotou, C. N. Capsalis, "Design and Optimization of a Switched Parasitic Corner Plated Antenna for maximum Directionality and Diversity Gain at the WiFi frequency of 2.4 GHz with the aid of Genetic Algorithms", *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2007. ICEAA 2007*
- [11] B. Orchard, *Optimizing Algorithms for Antenna Design*. MSc Dissertation, University of the Witwatersrand, 2002.
- [12] K. L. Virga and Y. Rahmat – Samii, "Low – Profile Enhanced – Bandwidth PIFA Antennas for Wireless Communications Packaging," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, no 10, pp.1879 – 1888, Oct. 1997.
- [13] Y. B. Kwon, J. I. Moon and S. O. Park, "An Internal Triple – Band Planar Inverted – F Antenna," *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, vol. 2, pp. 341 – 344, 2003
- [14] Z. D. Liu, P.S. Hall and D. Wake, "Dual – Frequency Planar Inverted – F Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 45, no. 10, pp. 1451 – 1458, Oct. 1997.
- [15] D. Qi, B. Li and H. Liu, "Compact Triple – Band Planar Inverted – F Antenna for Mobile Handsets," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 41, no 6, pp. 483 – 486, June 2004.
- [16] . Salonen, M. Keskilamni and M. Kivikoski, "New Slot Configurations for Dual – Band Planar Inverted – F Antenna," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 28, no 5, pp. 293 – 298, Mar. 2001.
- [17] M. F. Abedin and M. Ali, "Modifying the Ground Plane and Its Effect on Planar Inverted – F Antennas (PIFAs) for Mobile Phone Handsets," *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, vol. 2, pp. 226 – 229, 2003.
- [18] P. K. Varlamos, P. J. Papakanellos, and C. N. Capsalis, "Design of circular switched parasitic dipole arrays using a genetic algorithm," *International Journal of Wireless Information Networks*, Vol. 11, No. 4, pp. 201-206, October 2004.
- [19] A. Chelouah, A. Sibille, P. Rosson, and J. P. Couvy, "Angular diversity based on beam switching of circular arrays for HIPERLAN terminals," *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 5, pp. 387-388, March 2000.
- [20] S. L. Preston, D. V. Thiel, T. A. Smith, S. G. O' Keefe, and J. W. Lu, "Basestation tracking in mobile communications using a switched parasitic antenna array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 46, No. 6, pp. 841-844, June 1998.A.

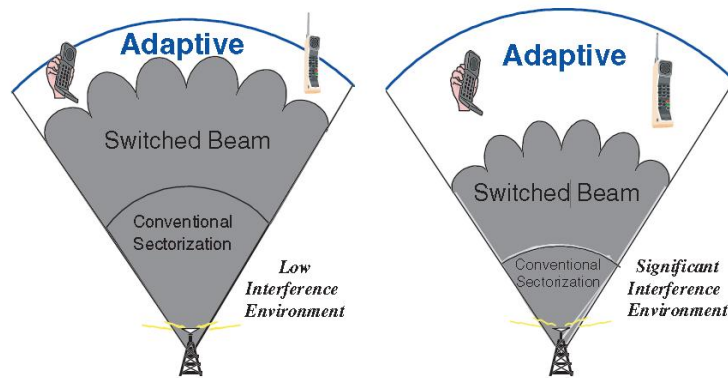
- Karnik, "Performance of TCP congestion control with rate feedback: TCP/ABR and rate adaptive TCP/IP," M. Eng. thesis, Indian Institute of Science, Bangalore, India, Jan. 1999.
- [21] T. D. Dimousios, C. I. Tsitouri, S. C. Panagiotou, C. N. Capsalis, "Design and Optimization of a Smart Quad-PIFA for Maximum Directionality at 2.4 GHz with the Aid of Genetic Algorithms", *3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009*.
- [22] T.D. Dimousios, C.D. Nikolopoulos, S.A. Mitilineos and C.N. Capsalis, "A new, low-profile and low-cost SPA-PIFA, suitable for mobile 2.4GHz ISM applications", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 24, No. 7, pp. 881-891, 2010.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΕΡΑΙΩΝ ESPAR (ELECTRONICALLY STEERABLE PASSIVE ARRAY RADIATOR ANTENNA) ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ WiFi, mobile WiMAX ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ

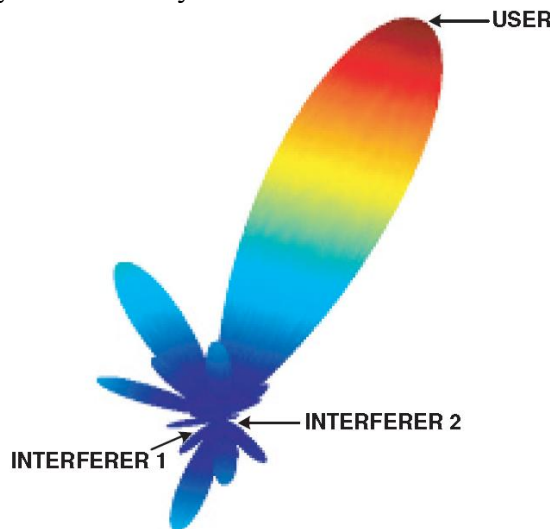
Ένα νέο είδος ευφυούς κεραίας που ερευνάται αναλυτικά τα τελευταία χρόνια είναι η Electronically Steerable Passive Array Radiator Antenna (ESPAR) [1-3]. Μια ενδεικτική αναφορά για αυτού του είδους την κεραία έγινε ήδη στο Κεφάλαιο 3. Η κεραία ESPAR είναι μία χαμηλής κατανάλωσης και μικρού μεγέθους έξυπνη κεραία. Η διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας (beamforming) επιτυγχάνεται με κατάλληλη ρύθμιση της άεργης αντίστασης (reactance) των φορτίων στα παρασιτικά στοιχεία που περιβάλλουν το ενεργό κεντρικό στοιχείο. Λόγω της δυνατότητας για γρήγορο beamforming, αλλά και της χαμηλής κατανάλωσης ισχύος που την διακρίνει, η κεραία αυτή κάνει πρακτική την μαζική ανάπτυξη τεχνολογιών έξυπνων κεραιών και αναμένεται να χρησιμοποιηθεί σε πολλές σύγχρονες εφαρμογές. Σημειώνεται ότι ο όρος παρασιτικό στοιχείο (parasitic element) χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα βραχυκυκλωμένο ή ανοικτοκυκλωμένο στοιχείο, ενώ ο όρος παθητικό (passive element) για να περιγράψει ένα στοιχείο το οποίο δεν είναι συνδεδεμένο με ενεργά κυκλώματα λήψης. Παρόμοια, γίνεται και μια διάκριση μεταξύ των κεραιών ESPAR και των κεραιών SPA (Switched Parasitic Arrays). Οι μεν πρώτες, πέραν κάποιων ενεργών στοιχείων (συνήθως ενός), αποτελούνται από παθητικά στοιχεία τερματισμένα σε κάποιο φορτίο, ενώ οι δεύτερες αποτελούνται από παρασιτικά βραχυκυκλωμένα ή ανοικτοκυκλωμένα στοιχεία. Επίσης, οι ESPAR κεραίες έχουν περιορισμένες δυνατότητες προσαρμογής του διαγράμματος ακτινοβολίας τους, ενώ οι SPA είναι αποκλειστικά κεραίες μεταγωγής λοβού. Βέβαια, οι όροι αυτοί αρκετά συχνά χρησιμοποιούνται αδιακρίτως και πολλές φορές οι κεραίες ESPAR αντιμετωπίζονται σαν SPAs.

Οι προσαρμοστικές ευφυείς κεραίες θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικές, αφού έχει αποδειχθεί η ευεργετική τους επίδραση στην επίδοση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. 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 κεραίες (smart antennas) και οι προσαρμοστικές στοιχειοκεραίες (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.



**Σχήμα 6.1: Βελτίωση κάλυψης σε περιβάλλοντα χαμηλών και έντονων παρεμβολών**

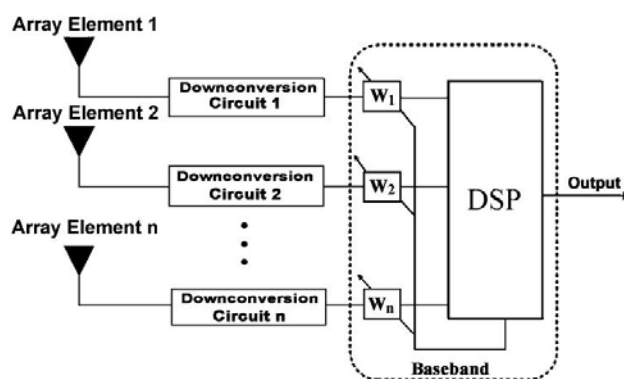
Νέες προηγμένες υπηρεσίες, όπως οι PL (Position Location) υπηρεσίες για κλήση έκτακτης ανάγκης, η ανίχνευση απάτης (fraud detection), το ευφρές σύστημα μεταφορών (ITS – Intelligent Transportation System) κ.λπ., γίνονται πραγματικότητα με τη δυνατότητα εύρεσης κατεύθυνσης (direction finding) των έξυπνων κεραιών. Οι κεραίες 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. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το αποτέλεσμα της διαμόρφωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας, όπου ο κύριος λοβός έχει κατεύθυνση προς τον επιθυμητό χρήστη, ενώ ταυτόχρονα απορρίπτονται τα σήματα παρεμβολής από άλλες κατευθύνσεις.



**Σχήμα 6.2: Το αποτέλεσμα της διαμόρφωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας**

Διάφοροι αλγόριθμοι διαμόρφωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας και εκτίμησης της κατεύθυνση άφιξης (DOA – Direction of arrival) έχουν σχεδιαστεί. Οι

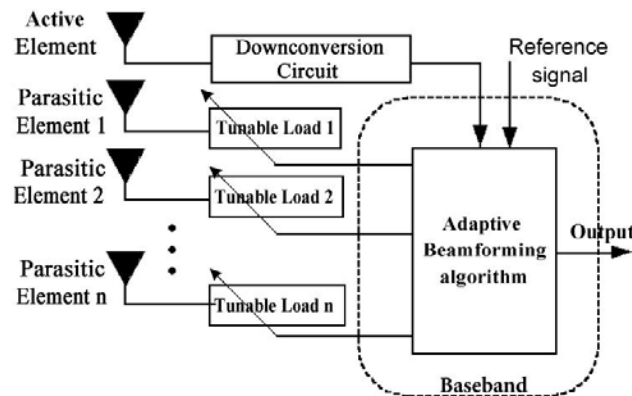
προσομοιώσεις και τα πειράματα που πραγματοποιούνται από πολλούς ερευνητές έχουν πιστοποιήσει τις δυνατότητες των αλγορίθμων αυτών. Οι περισσότεροι από αυτούς τους αλγόριθμους σχεδιάζονται βασισμένοι στις στοιχειοκεραίες DBF (Digital Beamforming). Το λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα μιας τέτοιας κεραίας φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Τα σήματα που λαμβάνονται από τα μεμονωμένα στοιχεία διαμορφώνονται σε σήματα βασικής συχνότητας. Στην συνέχεια, τα σήματα αυτά μετατρέπονται σε ψηφιακά και εισέρχονται στο κύκλωμα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP – Digital Signal Processing) που φαίνεται στο σχήμα, στο οποίο εκτελούνται οι παραπάνω αλγόριθμοι. Εντούτοις, σε όλη αυτήν την διαδικασία καταναλώνεται ιδιαίτερη ποσότητα συνεχούς (DC) ισχύος. Επιπλέον, κάθε κανάλι που συνδέεται με έναν αισθητήρα (array sensor) έχει την ίδια δομή, με αποτέλεσμα το κόστος κατασκευής να αυξάνεται ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων. Οι παράγοντες αυτοί κάνουν τις κεραίες DBF ακατάλληλες για συστήματα χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και χαμηλού κόστους και αποτελούν τροχοπέδη για μαζικές εφαρμογές των τεχνολογιών των έξυπνων κεραίων. Οι κεραίες ESPAR μπορούν να παρακάμψουν τα παραπάνω προβλήματα σχεδίασης των κεραίων DBF.



Σχήμα 6.3: Το λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα μιας στοιχειοκεραίας DBF

Οι κεραίες ESPAR αποτελούν μια σχετικά νέα υποκατηγορία προσαρμοστικών κεραίων. Θεωρούνται μια αρκετά ελκυστική εναλλακτική επιλογή ευφυούς κεραίας, χάρη στον μειωμένο όγκο τους και στο χαμηλότερο κόστος κατασκευής και συντήρησης από ότι οι πλήρως προσαρμοστικές κεραίες. Η μορφοποίηση λοβού (beamforming) στις ESPAR κεραίες επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας την φανταστική αντίσταση τερματισμού παθητικών στοιχείων, τα οποία είναι ηλεκτρομαγνητικά συζευγμένα με – το συνήθως - ένα ενεργό στοιχείο [4]. Πιο συγκεκριμένα, μια κεραία ESPAR είναι μια στοιχειοκεραία ελεγχόμενη από τις άεργες αντιστάσεις των φορτίων, στην οποία ένα κεντρικό στοιχείο συνδέεται με την μοναδική θύρα RF και ένας αριθμός από περιβάλλοντα παρασιτικά στοιχεία διαμορφώνουν τη διάταξη. Η στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας επιτυγχάνεται με την κατάλληλη ρύθμιση των άεργων αντιστάσεων των φορτίων στα παρασιτικά στοιχεία που περιβάλλουν το κεντρικό ενεργό στοιχείο. Οι άεργες αντιστάσεις των φορτίων δημιουργούνται από διόδους varactor RB (Reversely Biased). Το μόνο ρεύμα που υπάρχει είναι ένα μικρό RB ρεύμα διαρροής. Επομένως, η κατανάλωση ισχύος της κεραίας ESPAR είναι πολύ μικρή. Επιπλέον, το σύστημα έχει μια μοναδική θύρα RF που ακολουθείται από ένα κύκλωμα κάτω-μετατροπής (down-conversion). Από την άποψη της κατανάλωσης ισχύος και του κόστους κατασκευής, είναι προφανές ότι οι κεραίες ESPAR είναι κατάλληλες για μαζικές εφαρμογές έξυπνων κεραίων, ειδικά σε

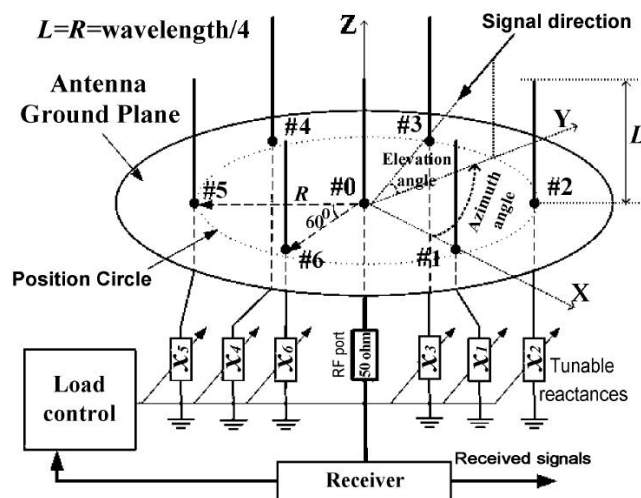
φορητά κινητά τηλεφωνικά που λειτουργούν με μπαταρίες. Συγκρινόμενες με τις πλήρως προσαρμοστικές κεραιές, οι οποίες απαιτούν έναν πλήρη πομποδέκτη RF για κάθε ενεργό στοιχείο, είναι φανερή η διαφορά στο κόστος και τη δυσκολία υλοποίησης. Το λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα μιας κεραιάς ESPAR φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.4: Το λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα μιας κεραιάς ESPAR

## 6.1 ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ESPAR

Μια ESPAR κεραιά αποτελείται είτε από δίπολα στον ελεύθερο χώρο [2-3] είτε από μονόπολα πάνω από επίπεδο έδαφος [5-7]. Στο Σχήμα 6.5 απεικονίζεται μια ESPAR κεραιά αποτελούμενη από επτά στοιχεία. Το μοναδικό ενεργό στοιχείο βρίσκεται στο κέντρο της διάταξης. Τα παθητικά στοιχεία σχηματίζουν έναν κύκλο γύρω από το ενεργό και τερματίζονται με φανταστικά φορτία. Σε αντιδιαστολή με τα συμβατικά συστήματα έξυπνων κεραιών, κάθε παρασιτικό στοιχείο αλληλεπιδρά ηλεκτρομαγνητικά με το ενεργό και τα υπόλοιπα παρασιτικά [1-2].



Σχήμα 6.5: ESPAR επτά στοιχείων

Το ενεργό κεντρικό στοιχείο περιβάλλεται από έξι παρασιτικά στοιχεία που τοποθετούνται ομοιόμορφα σε ένα κυκλικό πλέγμα ακτίνας  $R$  και πάνω σε ένα κυκλικό γειωμένο επίπεδο. Στην πρότυπη αυτή δομή, όλα τα στοιχεία είναι μονόπολα. Το μήκος  $L$  κάθε μονοπόλου και η ακτίνα  $R$  του κυκλικού πλέγματος είναι ίσα με το ένα τέταρτο του μήκους κύματος ( $\lambda/4$ ). Σύμφωνα με τον Harrington, μεγάλη απόσταση μεταξύ των στοιχείων (για παράδειγμα ίση με  $\lambda/2$ ) οδηγεί σε μειωμένο κέρδος και σε σημαντικούς πίσω λοβούς. Από την άλλη μεριά, μείωση της απόστασης σε  $\lambda/8$  οδηγεί σε κεραία υπερβολικού κέρδους. Έτσι, μια ρεαλιστική σχεδίαση με χρήση απόστασης  $\lambda/4$  είναι αυτή που προκρίνεται συνήθως. Το κυκλικό αγωγίμο επίπεδο, πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένη η δομή της κεραίας, μετασχηματίζει τα μονόπολα σε δίπολα με μήκος  $2L$ , μέσω της μεθόδου των ειδώλων. Το κεντρικό μονόπολο είναι συνδεδεμένο σε έναν πομποδέκτη RF, ενώ το κάθε παρασιτικό μονόπολο έχει το δικό του ανεξάρτητο φορτίο, το οποίο ελέγχεται μέσω μιας ρυθμιζόμενης διόδου varactor.

Αλλάζοντας το φανταστικό φορτίο κάθε στοιχείου, μεταβάλλεται το ηλεκτρικό του μήκος και επομένως αυτό μπορεί να συμπεριφέρεται σαν ανακλαστήρας ή κατευθυντήρας. Με αυτόν τον τρόπο, διαμορφώνεται και ελέγχεται το διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Στο [8] παρουσιάζεται ένας γρήγορος αλγόριθμος διαμόρφωσης δέσμης που βασίζεται στη ρύθμιση των φανταστικών φορτίων στα παθητικά στοιχεία. Στα [1], [3, 5-8] προτείνονται διάφοροι τρόποι υλοποίησης για τα φορτία, όπως η χρήση σταθερών φορτίων, η χρησιμοποίηση διόδων που ελέγχονται από τάση dc ή εναλλακτικά η χρησιμοποίηση ανοιχτοκυκλωμένων και βραχυκυκλωμένων γραμμών μεταφοράς. Στο [9] αναλύονται διάφορες τοπολογίες της ESPAR κεραίας με βάση αριθμητικές υπολογιστικές μεθόδους, ενώ στα [10-11] δίνεται έμφαση στα διαγράμματα ακτινοβολίας αυτής της συγκεκριμένης κεραίας.

### 6.1.1 Η ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ ESPAR

Αρχικά υποθέτουμε ότι η κεραία βρίσκεται σε λειτουργία εκπομπής (transmitting mode). Η κεραία παράγει ένα κατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας βάσει των έργων αντιστάσεων των ρυθμιζόμενων φορτίων στα παρασιτικά μονόπολα ( $x_1, x_2, \dots, x_6$ ). Τα σήματα που λαμβάνονται ή εκπέμπονται από την κεντρική θύρα RF επάγουν στα παρασιτικά μονόπολα αμοιβαία ρεύματα. Τα παρακάτω διανύσματα  $I$  και  $V$  αντιπροσωπεύουν τα ρεύματα και τις τάσεις στα μονόπολα.

$$I = [i_0 \quad i_1 \quad i_2 \quad i_3 \quad i_4 \quad i_5 \quad i_6]^T$$

$$V = [v_0 \quad v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad v_4 \quad v_5 \quad v_6]^T$$

Στα παραπάνω διανύσματα, τα  $i_0$  και  $v_0$  αντιπροσωπεύουν το ρεύμα και την τάση στο ενεργό κεντρικό στοιχείο, αντίστοιχα. Οι αμοιβαίες αγωγιμότητες (admittances) αντιπροσωπεύονται από τη μήτρα  $Y$ , στην οποία κάθε στοιχείο  $y_{ij}$  δείχνει την αμοιβαία αγωγιμότητα μεταξύ των μονοπόλων  $i$  και  $j$ . Επομένως, τα επαγόμενα ρεύματα προκύπτουν από τις αμοιβαίες αγωγιμότητες σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση πινάκων.

$$I = \mathbf{Y}V$$

$$= \begin{bmatrix} y_{00} & y_{01} & y_{02} & y_{03} & y_{04} & y_{05} & y_{06} \\ y_{10} & y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} \\ y_{20} & y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} \\ y_{30} & y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} \\ y_{40} & y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} \\ y_{50} & y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} & y_{56} \\ y_{60} & y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix}$$

Λόγω της συμμετρικής δομής της κεραίας ESPAR, ισχύουν οι παρακάτω ισότητες.

$$y_{11} = y_{22} = y_{33} = y_{44} = y_{55} = y_{66}$$

$$y_{01} = y_{02} = y_{03} = y_{04} = y_{05} = y_{06}$$

$$y_{12} = y_{23} = y_{34} = y_{45} = y_{56} = y_{61}$$

$$y_{13} = y_{24} = y_{35} = y_{46} = y_{51} = y_{62}$$

$$y_{14} = y_{25} = y_{36}.$$

Έτσι, η μήτρα αγωγιμοτήτων περιγράφεται πλήρως με μόνο έξι παραμέτρους. Η τάση  $u_0$  στο κεντρικό ενεργό μονόπολο και οι τάσεις  $u_m$  στα παρασιτικά μονόπολα δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$v_0 = v_s - z_0 i_0$$

$$v_m = -jx_m i_m$$

όπου  $m = (1, 2, \dots, 6)$ ,  $z_0$  είναι η χαρακτηριστική αντίσταση στη είσοδο της θύρας RF, και  $u_s$  είναι η πηγή τάσης που είναι συνδεδεμένη στην θύρα RF. Οι παραπάνω σχέσεις σε μορφή πινάκων γράφονται ως εξής:

$$V = \begin{bmatrix} v_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \mathbf{X}I = v_s U_1 - \mathbf{X}I$$

όπου  $\mathbf{X}$  και  $U_1$  είναι:

$$\mathbf{X} = \text{diag}[z_0, jx_1, \dots, jx_6]$$

$$U_1 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T.$$

Έτσι, καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$I = \mathbf{Y}V = \mathbf{Y}(v_s U_1 - \mathbf{X}I).$$



η οποία μετά από ορισμένες μαθηματικές πράξεις γράφεται στην τελική της μορφή ως εξής:

$$I = v_s(\mathbf{Y}^{-1} + \mathbf{X})^{-1}U_1 = v_s W$$

όπου η παράσταση  $(\mathbf{Y}^{-1} + \mathbf{X})^{-1}U_1$  αντικαθίσταται από το  $W$ , ένα διάνυσμα  $7 \times 1$ , το οποίο αποκαλείται και διάνυσμα ισοδύναμων βαρών (Equivalent Weight Vector).

Το διάγραμμα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου είναι η υπέρθεση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των μονοπόλων. Επομένως, το σήμα μακρινού πεδίου στη κατεύθυνση  $\theta$  του αζιμούθιου μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$y(\theta)_{\text{far}} = I^T \alpha(\theta) = W^T \alpha(\theta) v_s.$$

Το διάνυσμα στροφής (steering vector)  $\alpha(\theta)$  καθορίζεται από την γεωμετρική δομή της κεραίας και στην περίπτωση που εξετάζουμε είναι:

$$\alpha(\theta) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\frac{\pi}{2} \cos(\theta)} \\ e^{j\frac{\pi}{2} \cos(\theta - \frac{\pi}{3})} \\ e^{j\frac{\pi}{2} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})} \\ e^{j\frac{\pi}{2} \cos(\theta - \pi)} \\ e^{j\frac{\pi}{2} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3})} \\ e^{j\frac{\pi}{2} \cos(\theta - \frac{5\pi}{3})} \end{bmatrix}$$

Σύμφωνα με το θεώρημα της αμοιβαιότητας για τα διαγράμματα ακτινοβολίας, όταν η κεραία βρίσκεται σε λειτουργία λήψης (receiving mode), τα σήματα τάσης  $u(t)$  στην θύρα RF δίνονται από την σχέση:

$$u(t) = W^T \alpha(\theta) s(t)$$

όπου  $s(t)$  είναι τα επίπεδα κύματα με το πλάτος και την φάση στην κατεύθυνση  $\theta$  του αζιμούθιου. Στην τελευταία σχέση, το  $W$  εξαρτάται από την άεργη αντίσταση σε κάθε μονόπολο. Τα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας επιτυγχάνονται με την κατάλληλη ρύθμιση των άεργων αντιστάσεων ( $x_1, x_2, \dots, x_6$ ). Για να γίνει αυτό, δίνονται οι κατάλληλες τιμές στις ελεγχόμενες τάσεις των διόδων varactor που είναι συνδεδεμένες σε κάθε μονόπολο.

### 6.1.2 ΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ESPAR

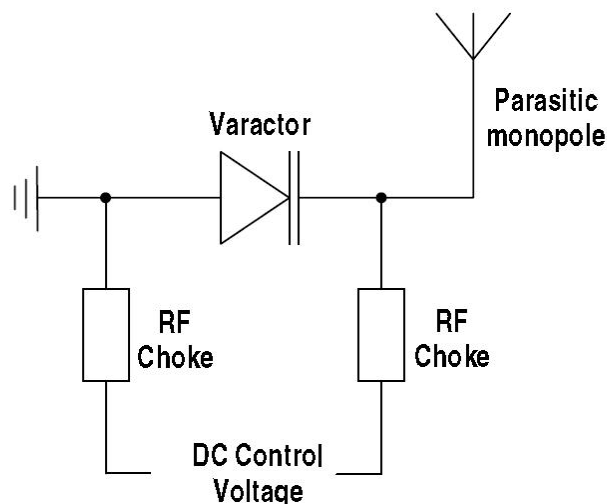
Ίσως το πιο σημαντικό στοιχείο στην κεραία ESPAR είναι τα φορτία που υπάρχουν σε κάθε παρασιτικό μονόπολο. Μέσω αυτών άλλωστε επιτυγχάνεται η διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η άεργη αντίσταση των φορτίων δημιουργείται από διόδους varactor. Στον συγκεκριμένο τύπο διόδων, η χωρητικότητα ελέγχεται μέσω της συνεχούς τάσης ανάστροφης πόλωσης, σύμφωνα με την εξής σχέση:

$$C = kV_r^{-\frac{1}{2}}$$

Ένα τυπικό κύκλωμα ελέγχου της διόδου είναι αυτό που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Σε αυτό υπάρχουν δύο στραγγαλιστικά πηνία (RF chokes), τα οποία

απομονώνουν το μικροκυματικό σήμα του παρασιτικού στοιχείου από την συνεχή τάση ελέγχου. Η κατανάλωση ισχύος στα παθητικά στοιχεία του παρακάτω κυκλώματος είναι ελάχιστη σε σχέση με αυτήν στα αντίστοιχα κυκλώματα των ενεργών στοιχειοκεραιοών.



Σχήμα 6.6: Το κύκλωμα ελέγχου του φορτίου

## 6.2 Η ΚΕΡΑΙΑ ESPAR ΣΤΗ ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Οι ιδιότητες μορφοποίησης λοβού και προσαρμοζόμενης λειτουργίας των κεραιοών ESPAR έχουν πρόσφατα αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης. Στο [12] προτείνεται μια μέθοδος steepest gradient για τον έλεγχο των φορτίων τερματισμού μιας ESPAR κεραιοάς. Ο προσαρμοζόμενος έλεγχος μιας ESPAR είναι ιδιαίτερα δύσκολος, αφού α) τα σήματα στους ακροδέκτες των παθητικών στοιχείων δεν είναι παρατηρήσιμα, β) ο συντελεστής ρεύματος κάθε στοιχείου δεν είναι ανεξάρτητος από των υπολοίπων και γ) η έξοδος του ενεργού στοιχείου είναι μη γραμμική συνάρτηση των αντιστάσεων τερματισμού των παθητικών. Στο [12] γίνεται χρήση ενός σήματος-πλότου (pilot signal) και μιας τεχνικής βασισμένης στον συντελεστή συσχέτισης του σήματος-πλότου και του σήματος εξόδου της ESPAR, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο προσαρμοστικός έλεγχος της κεραιοάς. Αντίθετα, στο [13] αντιμετωπίζεται το ίδιο ζήτημα με στοχαστικό τρόπο και με χρήση του MSE (Mean Square Error) μεταξύ του επιθυμητού και του λαμβανόμενου σήματος. Στο [8] χρησιμοποιείται επίσης μια στοχαστική προσέγγιση, αλλά με μια συνάρτηση λάθους που περιλαμβάνει τον συντελεστή συσχέτισης των δύο σημάτων. Η δυνατότητα χωρο-χρονικής επεξεργασίας σημάτων (space-time filtering), για τον προσαρμοστικό έλεγχο της ESPAR κεραιοάς σε εφαρμογές TDMA και CDMA παρουσιάζεται στο [14]. Η μέθοδος βασίζεται στην χρήση καθυστερημένων εκδοχών του σήματος εξόδου του ενεργού στοιχείου για την αντιμετώπιση της διασυμβολικής παρεμβολής (επεξεργασία στο πεδίο του χρόνου), καθώς και στην μορφοποίηση λοβού για την αντιμετώπιση της ενδοκαναλικής παρεμβολής λόγω της παρουσίας πολλών χρηστών (επεξεργασία στο πεδίο του χώρου). Στο [15] το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας

κεραίας ESPAR που αποτελείται από μονοπολικά στοιχεία διαμορφώνεται ρυθμίζοντας κατάλληλα τους πυκνωτές μεταβλητής χωρητικότητας με τους οποίους τερματίζονται τα παθητικά στοιχεία. Στο [16] παρουσιάζεται μια μέθοδος μορφοποίησης λοβού μιας μονοπολικής κεραίας ESPAR πάνω από επίπεδη βάση με περίβλημα βασισμένη στην τεχνική των γενετικών αλγορίθμων. Μια κεραία ESPAR τριπλής ζώνης συχνοτήτων λειτουργίας περιγράφεται στο [17], όπου η μορφοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας και η αντίσταση εισόδου σε κάθε συχνότητα λειτουργίας προκύπτουν από έναν γενετικό αλγόριθμο ο οποίος ρυθμίζει τα μεταβλητά φορτία τα οποία συνδέονται με τα παθητικά στοιχεία.

Οι κεραίες ESPAR, όπως προαναφέρθηκε, έχουν προταθεί επίσης για την υλοποίηση τεχνικών εκτίμησης της γωνίας άφιξης εισερχόμενου σήματος (Direction of Arrival, DoA). Μια τροποποίηση της μεθόδου MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) αναπτύσσεται στο [18]. Η μέθοδος αυτή αντικαθιστά τα σήματα από διαφορετικά στοιχεία με το σήμα του μοναδικού ενεργού στοιχείου, για διαφορετικές τιμές των φανταστικών αντιστάσεων τερματισμού των παθητικών στοιχείων, προκειμένου να κατασκευαστεί ο πίνακας συσχετίσεων ο οποίος είναι απαραίτητος για την μέθοδο MUSIC. Για τον ίδιο σκοπό, προτείνεται στο [19] η χρήση της συσχέτισης της ισχύος εξόδου μιας ESPAR κεραίας. Τέλος, πρακτικές όψεις της εκτίμησης DoA με ESPAR κεραίες, όπως στην περίπτωση ελέγχου κατεύθυνσης δορυφόρου, ή ενός ρομποτικού συστήματος κίνησης και επιστροφής στην βάση του κ.α. εξετάζονται στο [20].

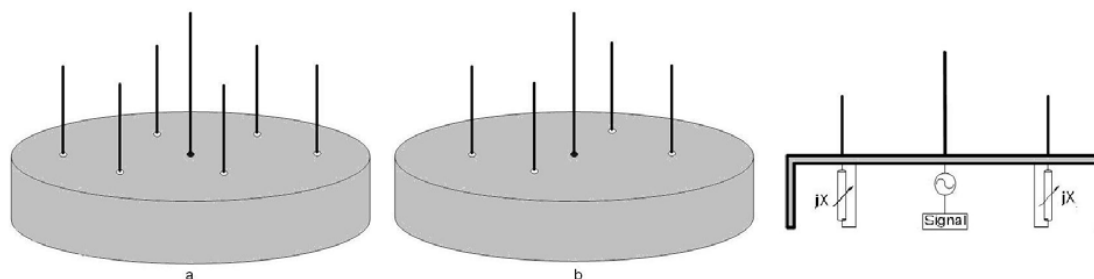
Στα πλαίσια της βιβλιογραφίας η σχεδίαση των κεραίων ESPAR πραγματοποιείται με αριθμητικές τεχνικές. Στο [5] αναλύεται η επίδραση ενός μεταλλικού κυλινδρικού τοιχώματος (skirt), τοποθετημένου περιμετρικά του επιπέδου γείωσης μιας ESPAR κεραίας αποτελούμενης από μονόπολα, με στόχο την βελτίωση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας της κεραίας στο οριζόντιο επίπεδο. Στο [6] παρουσιάζεται μια μέθοδος βασισμένη σε γενετικούς αλγορίθμους και την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να σχεδιαστεί μια κεραία ESPAR. Στο [7] χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος μιας κεραίας ESPAR. Η τεχνική βασίζεται στον εγκλωβισμό της κεραίας μέσα σε μια διηλεκτρική ράβδο, με κατάλληλα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και μέγεθος, οπότε ο όγκος της κεραίας μειώνεται κατά 80%, ενώ η επιφάνεια των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων κατά 50%. Στο [21] προτείνεται μια τεχνική τύπου modal expansion, η οποία συγκρίνεται με μια διαδομένη τεχνική πεπερασμένων στοιχείων. Στο [22] χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός της μεθόδου των ροπών και της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης σχεδίασης έγκειται στην τοποθέτηση των φανταστικών αντιστάσεων τερματισμού μέσα στην κοιλότητα των συνδέσμων SMA των παθητικών στοιχείων. Επίσης, στο [23] παρουσιάζεται μια κεραία ESPAR διπλής ζώνης συχνοτήτων λειτουργίας, η οποία όμως ουσιαστικά αποτελείται από δύο κεραίες τοποθετημένες στον ίδιο χώρο, ενώ στο [24] προτιμάται η χρησιμοποίηση ομάδων πυκνωτών σταθερής χωρητικότητας αντί για μεταβλητούς πυκνωτές ελεγχόμενους από τάση (varactors).

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια εφαρμογής των ESPAR κεραίων στη συχνοτική περιοχή των 2.4 GHz, ώστε να καταστεί εφικτή η χρησιμοποίηση των κεραίων αυτών σε συστήματα εκπομπής ή λήψης σημάτων WiFi και mobile WiMAX. Επίσης, γίνεται προσπάθεια τροποποίησης της μιας κεραίας έτσι ώστε να καταστεί δυνατή και η εκπομπή ή λήψη σήματος κινητής τηλεφωνίας στις συχνότητες των 1800 και 1900 MHz. Στην Παράγραφο 6.3 αναπτύσσονται δύο ESPAR κεραίες που αποτελούνται από επτά και πέντε μονόπολα πάνω από άπειρο και τελείως αγώγιμο έδαφος. Ο σκοπός της σχεδίασης είναι η εξαγωγή μιας κατευθυντικής δέσμης προς

μια προκαθορισμένη κατεύθυνση και η προσαρμογή της αντίστασης εισόδου στα 2.4 GHz. Στην Παράγραφο 6.4 γίνεται προσπάθεια χρησιμοποίησης των varactors ώστε η ESPAR των επτά στοιχείων να καταστεί λειτουργική και στις συχνότητες κινητής τηλεφωνίας των 1800 και 1900 MHz. Τέλος, στην Παράγραφο 6.5 παρουσιάζεται μια ESPAR κεραία με γωνιακό ανακλαστήρα, όμοια με την SPA της παραγράφου 5.1, και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο τεχνολογιών και των πλεονεκτημάτων της χρήσης varactors για τη μετατροπή της SPA σε ESPAR.

### 6.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΕΡΑΙΑΣ ESPAR ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΑ 2.4 GHz ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Στο Σχήμα 6.7 απεικονίζονται δύο ESPAR κεραίες αποτελούμενες από επτά και πέντε μονόπολα πάνω από επίπεδη βάση και κυλινδρικό περίβλημα. Το μοναδικό ενεργό στοιχείο βρίσκεται στο κέντρο της διάταξης. Τα παθητικά στοιχεία σχηματίζουν έναν κύκλο γύρω από το ενεργό και συνδέονται με φανταστικά φορτία. Σε αντιδιαστολή με τα συμβατικά συστήματα έξυπνων κεραιών, κάθε παθητικό στοιχείο αλληλεπιδρά ηλεκτρομαγνητικά με το ενεργό και τα υπόλοιπα παθητικά. Αλλάζοντας το φανταστικό φορτίο κάθε στοιχείου, μεταβάλλεται το ηλεκτρικό του μήκος και επομένως αυτό μπορεί να συμπεριφέρεται σαν ανακλαστήρας ή κατευθυντήρας. Με αυτόν τον τρόπο, διαμορφώνεται και ελέγχεται το διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο [1, 10, 11, 25].



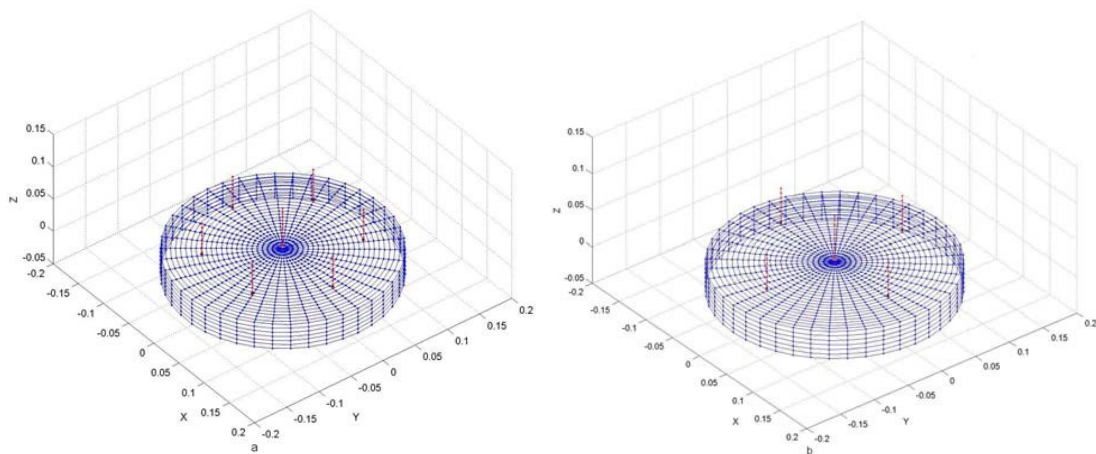
Σχήμα 6.7: Διάταξη μιας ESPAR α) 7 & β) 5 στοιχείων και η εσωτερική δομή των.

Ο σκοπός της σχεδίασης, στην περίπτωση της ESPAR 5 στοιχείων, είναι η εύρεση μιας δομής της οποίας το οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας να έχει μέγιστη κατευθυντικότητα στις  $0^\circ$ , το εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος να είναι  $90^\circ$ , η σχετική στάθμη πλευρικών λοβών να είναι  $-8$  dB και να επιτυγχάνεται προσαρμογή στη συχνότητα των 2.4 GHz. Εναλλάσσοντας τα φορτία ανάμεσα στα παρασιτικά στοιχεία με κυκλικό τρόπο, επιτυγχάνεται η στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας κατά  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  ή  $270^\circ$ , εξαιτίας της συμμετρίας που παρουσιάζει η κυκλική αυτή στοιχειοκεραία. Έτσι, αυτή η έξυπνη κεραία έχει τη δυνατότητα να προσφέρει τέσσερα διαγράμματα ακτινοβολίας με τους κύριους λοβούς προσανατολισμένους σε όλες τις πιθανές διευθύνσεις κατά διαστήματα  $90^\circ$  από  $0^\circ$  ως  $360^\circ$ , καλύπτοντας έτσι ολόκληρο το αζιμούθιο.

Όμοιες είναι και οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί η ESPAR 7 στοιχείων, με τη μόνη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση το επιθυμητό εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος είναι  $60^\circ$ . Έτσι, τώρα, εναλλάσσοντας κυκλικά τα φορτία των παρασιτικών στοιχείων, παράγονται έξι πανομοιότυπα διαγράμματα ακτινοβολίας με τους κύριους λοβούς στραμμένους στις κατευθύνσεις των  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $240^\circ$  και  $300^\circ$ .

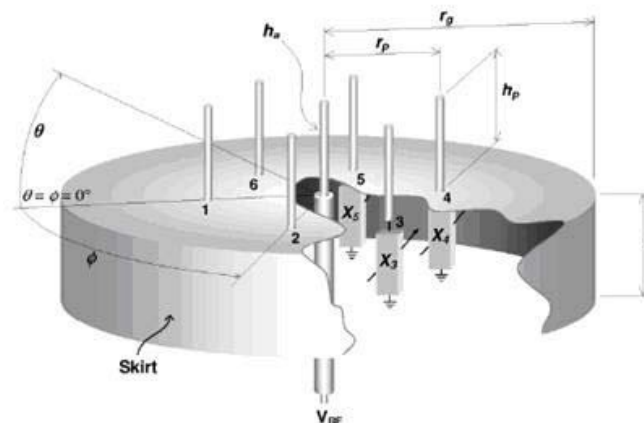
### 6.3.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ESPAR

Η υλοποίηση των προτεινόμενων ESPAR απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα. Η προσομοίωση και ο σχεδιασμός της υπό εξέταση κεραίας γίνονται με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου SNEC όπου τα συστατικά στοιχεία της MoM που είναι διαθέσιμα στον κώδικα είναι τα τμήματα αγωγού (wire segments). Ως εκ τούτου, η κεραία αποτελείται πλέγματα αγωγών σύρματος (που αναπαριστούν την επίπεδη βάση και το κυλινδρικό περίβλημα) και αγωγούς σύρματος που αναπαριστούν τα δίπολα. Η τελική δομή στο SNEC υλοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε οι τιμές εισόδου που καθορίζει ο χρήστης για τις διαστάσεις της διάταξης να δίνονται συναρτήσει των αριθμών των τμημάτων αγωγού. Δεδομένου λοιπόν του ότι το μήκος τμήματος (segment length, *seglen*) είναι κλάσμα του μήκους κύματος  $\lambda$ , το ηλεκτρικό μέγεθος των κεραίων είναι σταθερό. Το σκεπτικό αυτό προέκυψε από την αναγκαιότητα σχεδίασης της ESPAR σύμφωνα με τους περιορισμούς που θέτει το SNEC.



Σχήμα 6.8: Υλοποίηση των ESPAR στο SNEC.

Μεταβάλλοντας το μήκος του ενεργού στοιχείου, το μήκος των παθητικών στοιχείων, το φορτίο σε κάθε παθητικό στοιχείο, την ακτίνα της περιφέρειας των παρασιτικών στοιχείων, την ακτίνα της συνολικής διάταξης και το ύψος του κυλινδρικού περιβλήματος, προκύπτει η δομή με την ικανοποιητική αντίσταση εισόδου στη συχνότητα λειτουργίας και το επιθυμητό αζιμουθιακό διάγραμμα σε αυτή τη συχνότητα (Σχήμα 6.9). Για να βρεθεί η κεραία με τις επιθυμητές ιδιότητες, εφαρμόστηκε η τεχνική των Γενετικών Αλγορίθμων και μάλιστα η εκδοχή που είναι ενσωματωμένη στο SNEC.



Σχήμα 6.9: Μεταβαλλόμενοι παράγοντες του GA.

Η κινητήρια δύναμη του γενετικού αλγόριθμου είναι η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιεί. Όπως προαναφέρθηκε, ο σκοπός της σχεδίασης είναι η επίτευξη ενός διαγράμματος ακτινοβολίας με το μέγιστο κέρδος στις  $0^\circ$ , με εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος  $90^\circ$  και  $60^\circ$  για τις ESPAR 5 και 7 στοιχείων αντίστοιχα, σχετική στάθμη πλευρικών λοβών ίση με  $-8$  dB, ενώ παράλληλα ζητείται και ικανοποιητική αντίσταση εισόδου σε μια συχνότητα. Τα εναπομείναντα διαγράμματα προκύπτουν με κυκλική αντιμετάθεση των φορτίων στα παθητικά στοιχεία κατά την αντίστροφη φορά των δεικτών του ρολογιού δεδομένης της συμμετρίας της ESPAR κεραίας. Η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώνεται ως εξής :

- Ένα σετ από 360 σημεία χρησιμοποιείται για να καθορίσει το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας. Κάθε σημείο  $D(\phi)$  παριστάνει την επιθυμητή κανονικοποιημένη τιμή του διαγράμματος ακτινοβολίας στη γωνιακή θέση  $\phi$ . Το  $D(\phi)$  σχηματίζεται με γωνιακό βήμα μιας  $1^\circ$  και το  $D_{calculated}(\phi)$  είναι το κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας που υπολογίζεται από το λογισμικό. Συνεπώς, ο πρώτος σχετικός όρος σφάλματος υπολογίζεται ως :

$$e_1 = \frac{1}{360} \sum_{\phi=0^\circ}^{359^\circ} \left( \frac{D(\phi) - D_{calculated}(\phi)}{D(\phi)} \right)^2. \quad (6.1)$$

- Για να επιτευχθεί ταυτόχρονα προσαρμογή προς μια γραμμή μεταφοράς χαρακτηριστικής αντίστασης  $75 \Omega$  στο σημείο τροφοδοσίας, ένας επιπλέον όρος σφάλματος υπολογίζεται σαν

$$e_2 = abs\left(\frac{R_{in} - 75}{75}\right)^2 + abs\left(\frac{X_{in}}{75}\right)^2, \quad (6.2)$$

όπου  $R_{in}$  και  $X_{in}$  αντιπροσωπεύουν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της αντίστασης εισόδου αντίστοιχα.

Το συνολικό σφάλμα δίνεται από την πρόσθεση των προηγούμενων όρων αφού πολλαπλασιαστεί ο καθένας τους με έναν κατάλληλα επιλεγμένο συντελεστή βαρύτητας :

$$err = e_1 + e_2 \quad (6.3)$$

Μετά τον υπολογισμό του συνολικού σφάλματος, η αντικειμενική συνάρτηση δίνεται από τη σχέση

$$OF = \frac{1}{1 + \sqrt{err}}. \quad (6.4)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο στόχος είναι η σχεδίαση κεραιών κατάλληλων για χρήση σε WiFi, mobile WiMAX επικοινωνίες. Συνεπώς, η βελτιστοποίηση των προτεινόμενων κεραιών πρέπει να γίνει στη συχνοτική περιοχή των 2.4 GHz. Έστω  $\lambda$  το μήκος κύματος στα 2.4 GHz. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζεται το εύρος μεταβολής κάθε παραμέτρου που συμμετέχει στο γενετικό αλγόριθμο του Σχήματος 6.9. Αφού οι χωρικές παράμετροι εκφράζονται συναρτήσει μόνο ως προς το  $\lambda$ , οι ηλεκτρικές διαστάσεις της συνολικής διάταξης παραμένουν σταθερές.

Πίνακας 6.1

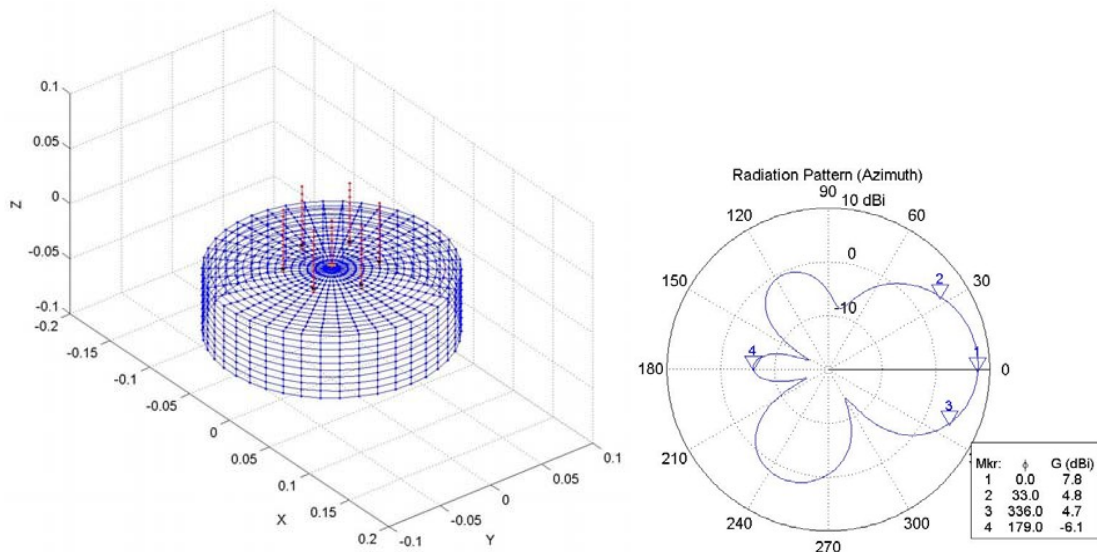
Παράμετροι και αποτέλεσμα του γενετικού αλγορίθμου για τις ESPAR 7 και 5 στοιχείων.

Parameter	Variation	Step	GA Results			
			7 element ESPAR		5 element ESPAR	
Length of central element ( $h_c$ )	0.1λ - λ	0.05λ	0.35λ	4.37 cm	0.35λ	4.37 cm
Length of peripheral elements ( $h_p$ )	0.1λ - λ	0.05λ	0.45λ	5.625 cm	0.5λ	6.25 cm
Distance between active and parasitic elements ( $r_p$ )	0.2λ - 1.3λ	0.05λ	0.30λ	3.75 cm	0.30λ	3.75 cm
Ground skirt radius ( $r_g$ )	0.15λ - 1.3λ	0.05λ	0.8λ	10 cm	0.85λ	10.625 cm
Ground skirt height ( $h_g$ )	0.05λ - 0.6λ	0.05λ	0.45λ	5.625 cm	0.1λ	1.25 cm
Load reactance of the first parasitic element ( $X_1$ )	-1000jΩ:+1000jΩ	j*0.01Ω	j*744 Ω		j*501 Ω	
Load reactance of the second parasitic element ( $X_2$ )	-1000jΩ : +1000jΩ	j*0.01Ω	j*500 Ω		-j*49.6 Ω	
Load reactance of the third parasitic element ( $X_3$ )	-1000jΩ : +1000jΩ	j*0.01Ω	-j*500 Ω		0	
Load reactance of the fourth parasitic element ( $X_4$ )	-1000jΩ : +1000jΩ	j*0.01Ω	j*66.8 Ω		-j*85.4 Ω	
Load reactance of the fifth parasitic element ( $X_5$ )	-1000jΩ : +1000jΩ	j*0.01Ω	-j*220 Ω			
Load reactance of the sixth parasitic element ( $X_6$ )	-1000jΩ : +1000jΩ	j*0.01Ω	j*297 Ω			

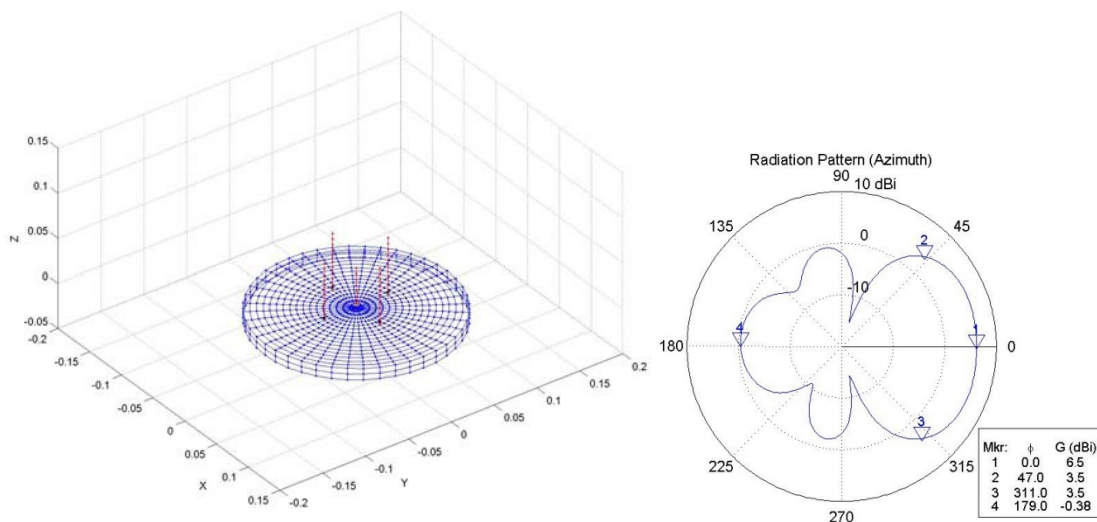
Ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι δυαδικού τύπου. Ο συνολικός πληθυσμός αποτελείται από 250 γενιές και κάθε γενιά περιλαμβάνει 150 χρωμοσώματα. Στο σχηματισμό κάθε επόμενης γενιάς συμμετέχουν τα δέκα χρωμοσώματα της προηγούμενης με τις υψηλότερες τιμές καταλληλότητας (ελιτισμός). Η στρατηγική επιλογής που χρησιμοποιείται είναι η αποδεκάτιση πληθυσμού, ενώ το σχήμα ζευγαρώματος είναι η συνένωση ατόμων με γειτονικές τιμές επίδοσης (adjacent fitness pairing). Το σημείο της διασταύρωσης επιλέγεται τυχαία και κάθε χρωμόσωμα χωρίζεται σε επίπεδο γονιδίων. Η πιθανότητα μετάλλαξης είναι ίση με 0.15 [26-28].

### 6.3.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ESPAR 7 & 5 ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Εξαιτίας της απαίτησης για συγκεκριμένο διάγραμμα ακτινοβολίας, συντονισμό σε συγκεκριμένη συχνότητα, περιορισμένες φυσικές διαστάσεις και εξαιτίας του μεγάλου αριθμού μεταβλητών που έπαιρναν μέρος στη διαδικασία βελτιστοποίησης, χρειαζόταν αρκετός χρόνος για την εκτέλεση του κάθε γενετικού αλγόριθμου (περίπου 2 βδομάδες). Τα βέλτιστα αποτελέσματα για την περίπτωση της κάθε κεραίας απεικονίζονται στον Πινάκα 6.1 ενώ οι βελτιστοποιημένες τελικές δομές, όπως αυτές απεικονίζονται από το SNEC, καθώς και τα διαγράμματα ακτινοβολίας των, παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.10 και 6.11 για την ESPAR των 7 και 5 στοιχείων αντίστοιχα.



Σχήμα 6.10: Η παραγόμενη από τον GA ESPAR 7 στοιχείων και το διάγραμμα ακτινοβολίας της



Σχήμα 6.11: Η παραγόμενη από τον GA ESPAR 5 στοιχείων και το διάγραμμα ακτινοβολίας της

Από τα παραπάνω σχήματα είναι αρκετά εμφανές ότι οι παραγόμενες ESPAR που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα του γενετικού αλγόριθμου, ικανοποιούν τις απαιτήσεις που περιλαμβάνονται στην αντικειμενική συνάρτηση. Όσον αφορά το VSWR, και οι δύο κεραίες επιδεικνύουν ικανοποιητική προσαρμογή της αντίστασης εισόδου στη δεδομένη συχνότητα των 2.4 GHz. Πιο συγκεκριμένα, η ESPAR 7



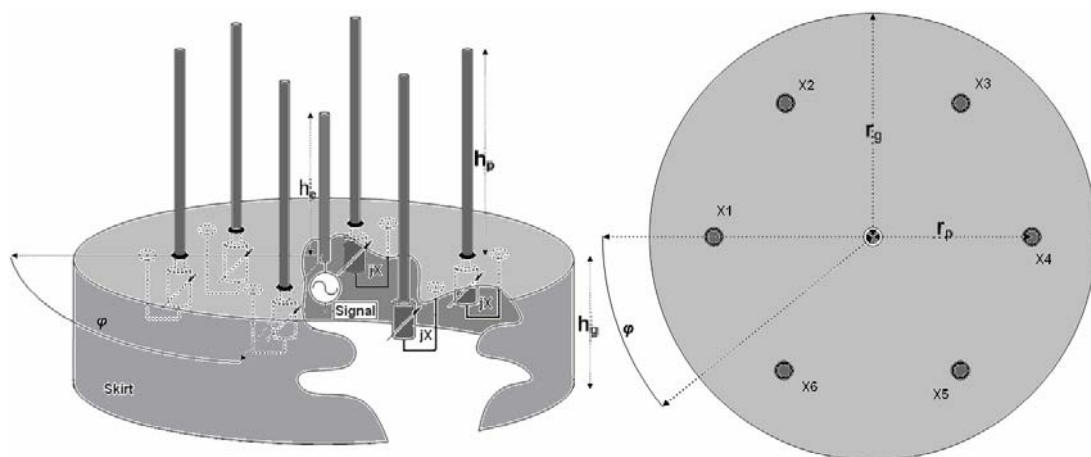
στοιχείων παρουσιάζει  $VSWR = 1.754$ , εύρος ημίσειας ισχύος 3dB  $57^\circ$ , μέγιστο κέρδος 7.8 dB και σχετική στάθμη πλευρικών και οπίσθιων λοβών κατά μέσο όρο ίση με -9 dB. Οι αντίστοιχες τιμές της ESPAR 5 στοιχείων είναι  $VSWR = 1.410$ , 3dB =  $96^\circ$ , μέγιστο κέρδος 6.5 dB και στάθμη πλευρικών και οπίσθιων λοβών -7.5 dB. Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2  
Αποτελέσματα διαγράμματος ακτινοβολίας των ESPAR

2.4 GHz	7 element ESPAR	5 element ESPAR
<i>VSWR</i>	1.754	1.410
<i>3 db Beamwidth</i>	$57^\circ$	$96^\circ$
<i>Max Gain</i>	7.8 dB	6.5 dB
<i>Side/Back Lobes</i>	-9 dB	-7.5 dB

## 6.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ESPAR 7 ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΑ 2.4 GHz, 1800 ΚΑΙ 1900 MHz (Tri-Band ESPAR)

Σε αυτή την παράγραφο, γίνεται μια προσπάθεια έτσι ώστε, η λειτουργικότητα της ESPAR 7 στοιχείων (Σχήμα 6.12) που σχεδιάστηκε, βελτιστοποιήθηκε και παράχθηκε στην παράγραφο 6.3, να επεκταθεί και στη συχνοτική περιοχή της κινητής τηλεφωνίας. Πιο συγκεκριμένα, πέρα από τη συχνότητα των 2.4 GHz, σκοπός της περαιτέρω βελτίωσης της ESPAR 7 στοιχείων είναι η λειτουργία αυτής και στα 1800 και 1900 MHz, συχνότητες που χρησιμοποιούνται για την αποστολή και λήψη σήματος κινητής τηλεφωνίας (GSM), καθιστώντας έτσι την κεραία λειτουργική σε τρεις διαφορετικές συχνοτικές μπάντες (Tri-Band ESPAR).



Σχήμα 6.12: Διάταξη της ESPAR 7 στοιχείων, η εσωτερική δομή της και οι μεταβλητές του GA

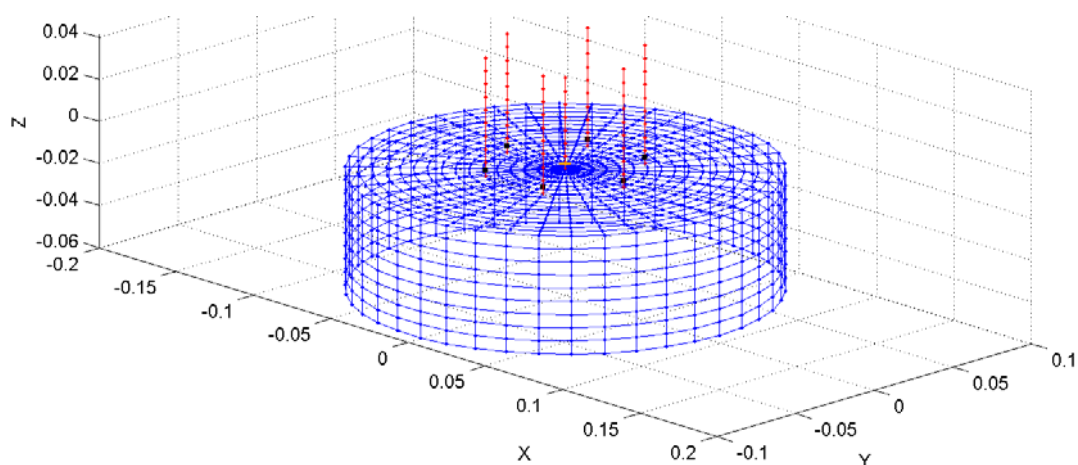
Η υπό εξέταση βελτιστοποίηση αναπτύσσεται στο [17]. Στην προηγούμενη παράγραφο, περιγράφηκε η διαδικασία κατά την οποία, μεταβάλλοντας τις φυσικές διαστάσεις και τις τιμές της φανταστική αντίστασης των παρασιτικών στοιχείων μιας ESPAR 7 στοιχείων σύμφωνα με τις απαιτήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης ενός

γενετικού αλγορίθμου, εξάχθηκε μια κεραιοδομή συγκεκριμένων χαρακτηριστικών: προσαρμογή αντίστασης εισόδου στα 2.4 GHz, εύρος ημίσειας ισχύος  $60^\circ$  και σχετική στάθμη πλευρικών και οπίσθιων λοβών μικρότερη των 8 dB. Ο σκοπός της περαιτέρω βελτίωσης της ESPAR 7 στοιχείων είναι η προσαρμογή της ίδιας κεραιοδιάταξης και στις συχνότητες των 1800 και 1900 MHz, διατηρώντας τα ίδια χαρακτηριστικά του διαγράμματος ακτινοβολίας στις επιπλέον συχνότητες. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί κρατώντας σταθερές τις γεωμετρικές διαστάσεις της παραγόμενης στην παράγραφο 6.3 ESPAR 7 στοιχείων και μεταβάλλοντας μόνο τις τιμές της φανταστικής αντίστασης των παρασιτικών στοιχείων της με την απαίτηση για προσαρμογή και συγκεκριμένο διάγραμμα ακτινοβολίας για τα 1800 και 1900 MHz αντίστοιχα.

Η περιγραφόμενη διαδικασία βελτιστοποίησης επιτελείται με τη χρήση της τεχνικής των γενετικών αλγορίθμων Όλες οι φυσικές διαστάσεις παραμένουν σταθερές και ίσες με τα εξαγόμενα αποτελέσματα της παραγράφου 6.3 και μεταβάλλονται μόνο τα φορτία των παρασιτικών στοιχείων. Χρησιμοποιείται πάλι το λογισμικό πακέτο ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης SNEC.

#### 6.4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ TRI-BAND ESPAR ΚΕΡΑΙΑΣ

Η υλοποίηση της προτεινόμενης κεραιάς ESPAR 7 στοιχείων, ως αποτέλεσμα του γενετικού αλγορίθμου για λειτουργία στα 2.4 GHz στο SNEC, όπως αυτή αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6.13: Υλοποίηση της ESPAR κεραιάς 7 στοιχείων στο SNEC.

Όπως προειπώθηκε, ο στόχος της συγκεκριμένης βελτιστοποίησης είναι η εξαγωγή μιας Tri-Band ESPAR κεραιάς, κατάλληλης για χρήση τόσο στις WiFi/mobile WiMAX εφαρμογές όσο και στην κινητή τηλεφωνία (2.4 GHz, 1800, 1900 MHz). Η διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι η εξής: η κεραιοδομή που παράχθηκε ως αποτέλεσμα του ΓΑ για τα 2.4 GHz (Παράγραφος 6.3.1), υπόκειται σε ακόμα δύο γενετικούς αλγορίθμους (έναν για κάθε επιπλέον συχνότητα) με τις ίδιες απαιτήσεις όσον αφορά το συντονισμό και το διάγραμμα ακτινοβολίας, με τη μόνη διαφορά ότι οι παράμετροι που συμμετέχουν στη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι μόνο τα φορτία των παρασιτικών στοιχείων. Οι χωρικές παράμετροι της δομής είναι αυτές που παρήχθησαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης στα 2.4 GHz.

Ο λόγος που προτιμήθηκε αυτή η σειρά βελτιστοποίησης, δηλαδή πρώτα βελτιστοποίησης ολόκληρης της κεραιοδομής (συμπεριλαμβανομένων των φυσικών διαστάσεων της) στα 2.4 GHz, και έπειτα περαιτέρω βελτιστοποίηση στα 1800 και

1900 MHz μεταβάλλοντας μόνο τα φορτία των παρασιτικών στοιχείων είναι η εξής: μια από τις αρχικές απαιτήσεις στη σχεδίαση της κεραιοδομής, μιας και αυτή πρόκειται να χρησιμοποιηθεί και σε κινητές εφαρμογές, είναι ο περιορισμός των φυσικών διαστάσεων της. Από τις τρεις επιθυμητές συχνότητες λειτουργίας, τα 2.4 GHz έχουν το μικρότερο μήκος κύματος και από τη στιγμή που όλες οι φυσικές διαστάσεις της δομής έχουν επιλεγεί να εκφράζονται σαν πολλαπλάσια του μήκους κύματος και έτσι λαμβάνουν μέρος στους γενετικούς αλγορίθμους, επιλέγηκε αυτή η συχνότητα που θα καθόριζε τις φυσικές διαστάσεις της τελικής δομής.

Όπως και στην περίπτωση των 2.4 GHz, ο σκοπός της σχεδίασης είναι η επίτευξη ενός διαγράμματος ακτινοβολίας με το μέγιστο κέρδος στις  $0^\circ$ , με εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος  $60^\circ$ , σχετική στάθμη πλευρικών λοβών ίση με  $-8$  dB, ενώ παράλληλα ζητείται και ικανοποιητική αντίσταση εισόδου στα 1800 και στα 1900 MHz. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται σχηματίζεται έτσι ώστε να ικανοποιήσει τα απαιτητικά κριτήρια της εν λόγω σχεδίασης. Όπως έχει ήδη επισημανθεί, μόνο το διάγραμμα που θα στοχεύει στις  $0^\circ$  χρειάζεται να βελτιστοποιηθεί, λόγω συμμετρίας. Έστω  $D(\phi)$  η κατευθυντικότητα στο οριζόντιο επίπεδο (προσδιορισμένη με γωνιακό βήμα  $1^\circ$ ) και  $D_{\max}$  η μέγιστη κατευθυντικότητα. Τότε, η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώνεται κατά τα ακόλουθα :

- Μέσα στον κύριο λοβό, που σχηματίζεται λαμβάνοντας υπόψη 59 σημεία, ο όρος σφάλματος είναι

$$e_1 = \frac{1}{59} \sum_{\phi=-29^\circ}^{29^\circ} \left[ \left( \frac{\frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.5}{0.5} \right)^2 u \left( 0.5 - \frac{D(\phi)}{D_{\max}} \right) \right]. \quad (6.5)$$

όπου  $u(x)$  είναι η βηματική συνάρτηση

$$u(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}. \quad (6.6)$$

- Στα άκρα του κύριου λοβού η επιθυμητή στάθμη είναι 3 dB κάτω από το μέγιστο κέρδος, συνεπώς ο αντίστοιχος όρος σφάλματος είναι

$$e_2 = \frac{1}{2} \sum_{\phi=\pm 30^\circ} \left( \frac{\frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.5}{0.5} \right)^2. \quad (6.7)$$

- Έξω από τον κύριο λοβό, που σχηματίζεται από 299 σημεία, η σχετική στάθμη πλευρικού λοβού δεν πρέπει να ξεπερνά τα  $-9$  dB. Επομένως, ο σχετικός όρος σφάλματος εκφράζεται

$$e_3 = \frac{1}{299} \sum_{\phi=31^\circ}^{329^\circ} \left[ \left( \frac{\frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.125}{0.125} \right)^2 u \left( \frac{D(\phi)}{D_{\max}} - 0.125 \right) \right]. \quad (6.8)$$

- Για να επιτευχθεί ταυτόχρονα προσαρμογή προς μια γραμμή μεταφοράς χαρακτηριστικής αντίστασης  $75 \Omega$  στο σημείο τροφοδότησης σε ένα συχνοτικό σημείο, ένας επιπλέον όρος σφάλματος υπολογίζεται σαν

$$e_4 = \text{abs}\left(\frac{R_{in}-75}{75}\right)^2 + \text{abs}\left(\frac{X_{in}}{75}\right)^2, \quad (6.9)$$

όπου  $R_{in}$  και  $X_{in}$  αντιπροσωπεύουν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της αντίστασης εισόδου αντίστοιχα.

Έπειτα, το συγκεντρωτικό σφάλμα προκύπτει αθροίζοντας τους προαναφερθέντες όρους σφάλματος αφού έχει προηγηθεί η εισαγωγή κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας  $w_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ).

$$\text{err} = \sum_{i=1}^4 w_i e_i. \quad (6.10)$$

Τελικά, η αντικειμενική συνάρτηση δίνεται από τη σχέση

$$OF = \frac{1}{1 + \sqrt{\text{err}}}. \quad (6.11)$$

Το μέγεθος του πληθυσμού κάθε γενιάς επιλέγεται να είναι 150 και κάθε γενετικός αλγόριθμος εξελίσσεται για 250 γενιές. Στο σχηματισμό κάθε επόμενης γενιάς συμμετέχουν τα δέκα χρωμοσώματα της προηγούμενης με τις υψηλότερες τιμές καταλληλότητας (στρατηγική ελιτισμού). Η στρατηγική επιλογής που χρησιμοποιείται είναι η αποδεκάτιση πληθυσμού, ενώ το σχήμα ζευγαρώματος είναι η συνένωση ατόμων με γειτονικές τιμές επίδοσης (adjacent fitness pairing). Το σημείο της διασταύρωσης επιλέγεται τυχαία και κάθε χρωμόσωμα χωρίζεται σε επίπεδο γονιδίων. Η πιθανότητα μετάλλαξης είναι ίση με 0.15 [26-28].

Στον Πίνακα 6.2 και στο Σχήμα 6.12, υποδεικνύεται το εύρος της διακύμανσης των παραμέτρων που συμμετέχουν σε κάθε διαδικασία βελτιστοποίησης για την ESPAR κεραία των επτά στοιχείων.

Πίνακας 6.3

Παράμετροι και αποτέλεσμα του γενετικού αλγορίθμου για την ESPAR 7 στοιχείων.

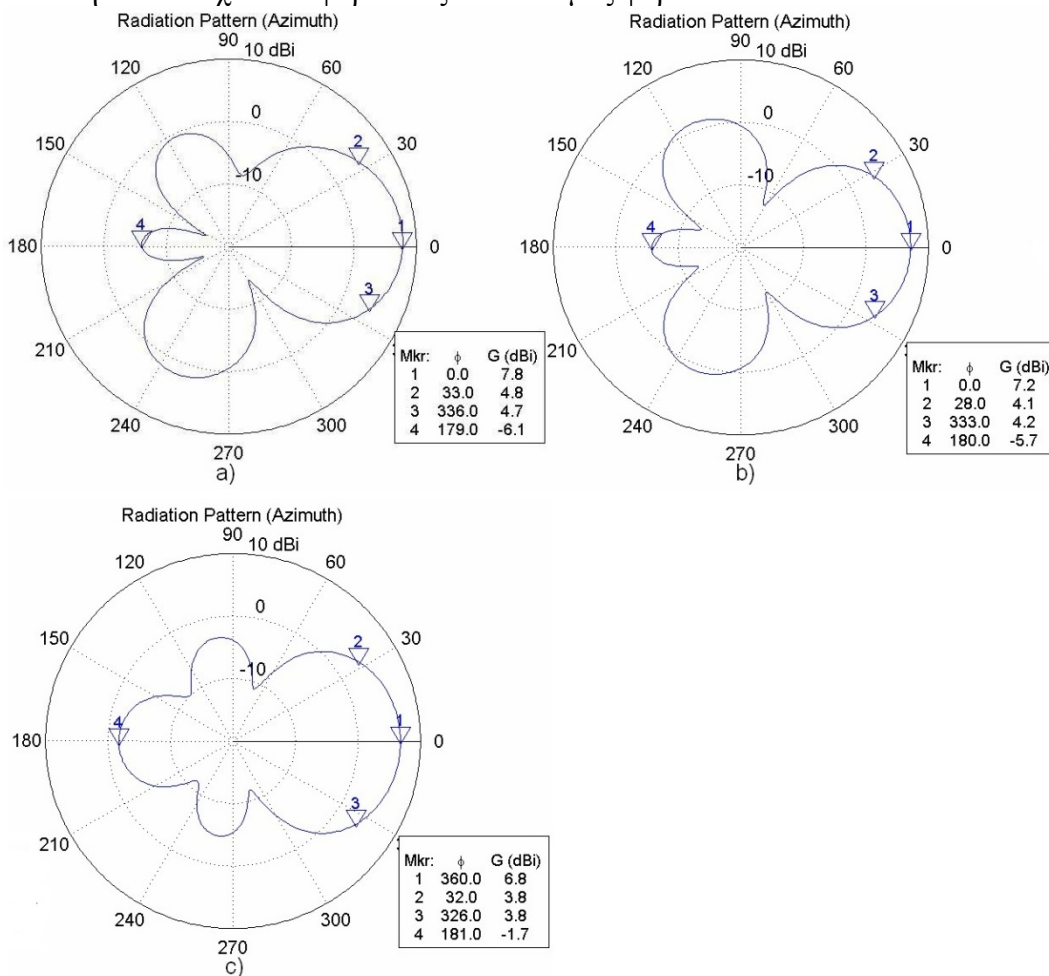
Paramet	Variation	Step	GA Results		
Length of central element( $h_c$ )	$0.1\lambda_0 - \lambda_0$	$0.05\lambda_0$	$0.35\lambda_0$	4.37 cm	
Length of peripheral elements( $h_p$ )	$0.1\lambda_0 - \lambda_0$	$0.05\lambda_0$	$0.45\lambda_0$	5.625 cm	
Distance between active and parasitic elements( $r_p$ )	$0.2\lambda_0 - 1.3\lambda_0$	$0.05\lambda_0$	$0.30\lambda_0$	3.75 cm	
Ground skirt radius( $r_g$ )	$0.15\lambda_0 - 1.3\lambda_0$	$0.05\lambda_0$	$0.8\lambda_0$	10 cm	
Ground skirt height( $h_g$ )	$0.05\lambda_0 - 0.6\lambda_0$	$0.05\lambda_0$	$0.45\lambda_0$	5.625 cm	
			<b>2.4GHz</b>	<b>1.9GHz</b>	<b>1.8GHz</b>
Load reactance of the 1st parasitic element( $X_1$ )	-1000 : +1000 jΩ	j*0.01Ω	j*744Ω	-j*250Ω	-j*250Ω
Load reactance of the 2nd parasitic element( $X_2$ )	-1000 : +1000 jΩ	j*0.01Ω	j*500Ω	-j*999Ω	-j*712Ω
Load reactance of the 3rd parasitic element( $X_3$ )	-1000 : +1000 jΩ	j*0.01Ω	-j*500Ω	0 Ω	j*503Ω
Load reactance of the 4th parasitic element( $X_4$ )	-1000 : +1000 jΩ	j*0.01Ω	j*66.8Ω	-j*0.4Ω	-j*90.5
Load reactance of the 5th parasitic element( $X_5$ )	-1000 : +1000 jΩ	j*0.01Ω	-j*220Ω	-j*7.11Ω	j*505Ω
Load reactance of the 6th parasitic element( $X_6$ )	-1000 : +1000 jΩ	j*0.01Ω	j*297Ω	-j*998Ω	-j*543Ω

Το τελικό αποτέλεσμα είναι μία κεραιοδομή και τρία σετ τιμών των φορτίων των παρασιτικών στοιχείων που καθορίζουν το διάγραμμα ακτινοβολίας και την προσαρμογή της κεραίας σε κάθε μία συχνότητα. Εναλλάσσοντας κυκλικά τις τιμές των φορτίων, χάρη στη συμμετρία που επιδεικνύει η δομή, το προαναφερθέντα διαγράμματα ακτινοβολίας μπορούν να στραφούν σε ολόκληρο το αζιμούθιο, με τον κύριο λοβό να έχει κατεύθυνση στις 0, 60, 120, 180, 260 και 300 αντίστοιχα, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό μέγιστη κατευθυντικότητα, κάλυψη ολόκληρου του επιπέδου και αποφυγή παρεμβολών κατά βούληση.

### 6.4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ TRI-BAND ESPAR

Εξαιτίας των απαιτήσεων για συγκεκριμένο διάγραμμα ακτινοβολίας, προσαρμογή της αντίστασης εισόδου, περιορισμένες φυσικές διαστάσεις και του μεγάλου αριθμού των μεταβλητών που λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία βελτιστοποίησης, έλαβαν χώρα αρκετές εκτελέσεις του γενετικού αλγόριθμου για κάθε διαδικασία βελτιστοποίησης. Σε κάθε εκτέλεση, δοκιμάστηκαν διαφορετικές τιμές για τους συντελεστές βαρύτητας που υπάρχουν στη σχέση 6.10. Τα καλύτερα αποτελέσματα για τη διαδικασία βελτιστοποίησης στα 2.4 GHz (Παράγραφος 6.3) προκύπτουν όταν χρησιμοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση με  $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 1$ . Τα τελικά αποτελέσματα του αλγορίθμου περιλαμβάνονται στον Πίνακα 6.3. Τα καλύτερα αποτελέσματα για τη διαδικασία βελτιστοποίησης στα 1900 MHz προκύπτουν όταν χρησιμοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση με  $w_1 = w_2 = w_3 = 2$  και  $w_4 = 1$ , ενώ καλύτερα αποτελέσματα για τη διαδικασία βελτιστοποίησης στα 1800 MHz προκύπτουν όταν χρησιμοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση με  $w_1 = w_2 = w_3 = 2$  και  $w_4 = 1.5$ .

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζονται τα οριζόντια διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου για την υπό εξέταση κεραία στα 2400 MHz, 1900 MHz και 1800 MHz, όπως εξάγονται από τις γενετικές διαδικασίες βελτιστοποίησης που διενεργεί το SNEC. Σημειώνεται για λόγους εμπέδωσης πως σε κάθε συχνότητα εφαρμόζεται στα παθητικά στοιχεία διαφορετικός συνδυασμός φορτίων.



Σχήμα 6.14: Διαγράμματα ακτινοβολίας της ESPAR κεραίας για το οριζόντιο επίπεδο στα a) 2400 MHz b) 1900 MHz c) 1800 MHz υπολογισμένα από το SNEC.

Όπως συνάγεται από το Σχήμα 6.14, η μορφή των διαγραμμάτων ακτινοβολίας ικανοποιεί τις επιθυμητές προδιαγραφές. Επιπλέον, η κανονική λειτουργία της κεραίας ESPAR σύμφωνα με τις απαιτήσεις για το λειτουργικό εύρος ζώνης υποτίθεται ότι επιτυγχάνεται στις συχνότητες όπου η τιμή του συντελεστή ανάκλασης είναι κάτω από  $-10$  dB, αντιστοιχώντας σε έναν μέγιστο  $VSWR$  ίσο με 2, λαμβανομένης υπόψη μιας χαρακτηριστικής αντίστασης  $75 \Omega$ . Μια λεπτομερής σύγκριση των αποτελεσμάτων παρέχεται στον επόμενο πίνακα.

**Πίνακας 6.4**  
Πληροφορίες για τα διαγράμματα που παρέχει το SNEC.

Συχνότητα (MHz)	SNEC Διαγράμματα Ακτινοβολίας			
	Μέγιστο κέρδος (dBi)	Λόγος front-to-back (dB)	3-dB εύρος δέσμης	VSWR
<b>2400</b>	7.8	13.9	57°	1.754
<b>1900</b>	7.2	12.9	55°	1.645
<b>1800</b>	6.8	8.5	66°	1.427

Συμπερασματικά, η κεραία που αναπτύσσεται στο [17] και σε αυτήν την παράγραφο ικανοποιεί όλες τις προκλήσεις που τίθενται στο σχεδιασμό σύγχρονων έξυπνων κεραιών: επιτυγχάνοντας μεγάλη κατευθυντικότητα, συντονισμό της αντίστασης εισόδου και αρκετά μεγάλο κέρδος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σαν εκπομπός όσο και σα δέκτης σήματος κινητής τηλεφωνίας και WiFi/mobile WiMAX λειτουργώντας στα 1800, 1900 και 2400 MHz αντίστοιχα. Η επιλεκτική κατευθυντικότητά της επιτρέπει την επιλογή κάλυψης συγκεκριμένης περιοχής (εκπομπός) ή την επιλογή του ισχυρότερου από μια πληθώρα σημάτων διαφορετικών σημείων εκπομπής, αποφεύγοντας τις παρεμβολές των υπόλοιπων (δέκτης). Τέλος, οι συμπαγείς διαστάσεις της, την καθιστούν ιδανική τόσο για εφαρμογές σταθερών όσο και, κυρίως, κινητών τηλεπικοινωνιών.

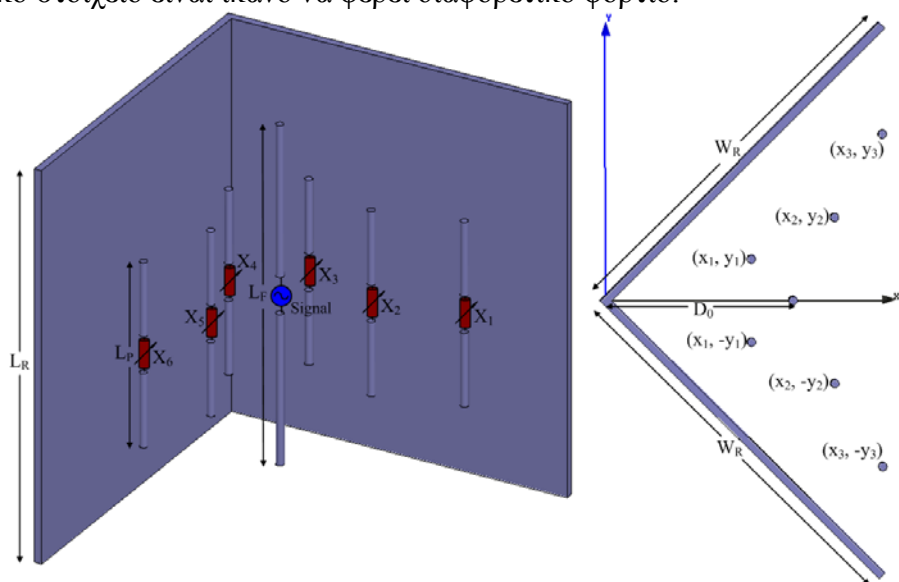
## 6.5 Η κεραία CP-ESPAR

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν πολλάκις προταθεί οι γωνιακοί ανακλαστήρες (corner plate reflectors, CP) ως μέσο επίτευξης υψηλότερης κατευθυντικότητας και στενότερου εύρου δέσμης [29-34]. Έτσι, στο κεφάλαιο αυτό, προτείνεται η διάταξη μίας Corner-Plate κεραίας ESPAR (CP-ESPAR) και παρουσιάζεται μία περίπτωση κατάλληλη για εφαρμογές στα 2.4 GHz ISM. Ο γωνιακός ανακλαστήρας περιβάλλει τα ενεργά και παθητικά στοιχεία, με αποτέλεσμα η ανάλυση των διαθέσιμων δεσμών της ESPAR να αυξηθεί, προσφέροντας περισσότερο διακριτοποιημένη σάρωση στην περιοχή κάλυψης. Επιπρόσθετα, το σχέδιο που προτείνεται εξαλείφει την ηλεκτρομαγνητική σύζευξη ανάμεσα σε παρόμοιες CP-ESPAR που τοποθετούνται σε κοντινή απόσταση, αλλά στοχεύουν σε διαφορετικές γωνίες, καθώς ο γωνιακός ανακλαστήρας συνδέεται με το έδαφος. Ως αποτέλεσμα, το προτεινόμενο σχέδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές σταθμού βάσης, όπου ένας αριθμός πανομοιότυπων CP-ESPAR μπορεί να παραταχθεί καλύπτοντας επιλεγμένους τομείς της επιθυμητής περιοχής. Επιπλέον, λόγω του συμπαγούς μεγέθους του τελικού σχεδιασμού, η προτεινόμενη CP-ESPAR μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε φορητές

εφαρμογές. Άρα η προτεινόμενη διάταξη της κεραίας μπορεί να παράσχει ένα οικονομικό μέσο για την ανάπτυξη συστημάτων διατάξεων κεραιών για σταθμούς βάσεις ή φορητές εφαρμογές.

### 6.5.1 ΔΟΜΗ ΤΗΣ CP-ESPAR

Η προτεινόμενη CP-ESPAR αποτελείται από 7 δίπολα, 6 παθητικά στοιχεία και ένα ενεργό, καθώς και έναν γωνιακό ανακλαστήρα που περιβάλλει όλα τα στοιχεία, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το ενεργό στοιχείο τοποθετείται στη διχοτόμο της γωνίας του γωνιακού ανακλαστήρα, σε μια συγκεκριμένη απόσταση από την ακμή της ( $D_0$ ). Κάθε παθητικό στοιχείο φορτώνεται ενεργά με  $jX_i$ ,  $i = 1, \dots, 6$  και τοποθετείται μέσα στην περιοχή του τεταρτημόριου στη θέση  $(x_i, y_i)$ . Τα παθητικά στοιχεία διαμορφώνονται σε συμμετρικά ζεύγη γύρω από τη διχοτόμο του ανακλαστήρα. Όμως, το ηλεκτρικό τους μήκος μπορεί να διαφέρει καθώς κάθε παθητικό στοιχείο είναι ικανό να φέρει διαφορετικό φορτίο.



Σχήμα 6.15: η δομή της CP-ESPAR

Η δομή της CP-ESPAR δημιουργείται χρησιμοποιώντας το SuperNEC, ένα πακέτο λογισμικού, ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης, ενώ τα ρεύματα που ρέουν μέσα στα στοιχεία καθώς επίσης και το διάγραμμα ακτινοβολίας της διάταξης υπολογίζονται με τη μέθοδο των ροπών (MoM).

Τα χαρακτηριστικά του ανακλαστήρα και τα στοιχεία της δομής έχουν βελτιστοποιηθεί με της βοήθεια των γενετικών αλγόριθμων (ΓΑ). Οι ΓΑ αποτελούν μία κατηγορία αλγορίθμων στοχαστικής βελτιστοποίησης, που εφαρμόζουν τους μηχανισμούς της φυσικής επιλογής και της γενετικής μηχανικής (διασταύρωση, μετάλλαξη) προκειμένου να διερευνήσουν μη γραμμικούς και ασυνεχείς χώρους λύσεων [35]. Οι ΓΑ είναι κατάλληλοι για προβλήματα πολλών διαστάσεων και πολλών μεταβλητών, όπως η σχεδίαση και σύνθεση κεραιών, καθώς ένας μεγάλος αριθμός παραμέτρων πρέπει να βελτιστοποιηθεί για να απαντώνται ορισμένα κριτήρια απόδοσης (πχ κέρδος, εμπέδηση εισόδου κλπ) [28]. Οι παράμετροι βελτιστοποίησης περιλαμβάνουν το ύψος και πλάτος του γωνιακού ανακλαστήρα, τη θέση, μήκος και πάχος των ενεργών και παθητικών στοιχείων και τις τιμές του αντιδραστικού φορτίου των παθητικών στοιχείων. Τα αποτελέσματα του Supernec

στη συνέχεια αξιολογούνται με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το πακέτο προσομοίωσης HFSS.

Η δομή της CP-ESPAR που παρουσιάζεται εδώ είναι κατάλληλη για χρήση ως σταθμός βάσης σε φορητές εφαρμογές στο φάσμα των 2.4 GHz τόσο σαν διάταξη που χρησιμοποιείται μόνη της όσο και σε μια περίπλοκη διάταξη τεσσάρων πανομοιότυπων CP-ESPAR που καλύπτουν ολόκληρο το οριζόντιο πεδίο. Επίσης, η κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δέκτης εναλλαγής δεσμών καθώς η ποιότητα σήματος κάθε δέσμης μετριέται και επιλέγεται η δέσμη που παρέχει το ισχυρότερο σήμα. Παρόμοια, η προτεινόμενη διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εκπομπός εναλλαγής δεσμών στην περίπτωση όπου ο εκπομπός διαθέτει πληροφόρηση όσον αφορά την ποιότητα σύνδεσης από το λήπτη. Επιπλέον, σημαντικό κέρδος πολυδιαδρομής μπορεί να επιτευχθεί στον κινητό λήπτη ταλαντεύοντας το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας [36-40]. Η ταλάντωση του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας επιτυγχάνει κατευθυντικότητα και διαφορική εκπομπή (transmit diversity), και δημιουργεί ένα χρονικά μεταβαλλόμενο κανάλι με ελεγχόμενο χρόνο συνεκτικότητας.

Με την προτεινόμενη κεραία στο σταθμό βάσης, εκπέμποντας σήματα CI/MC-CDMA, και μία μόνο ομοιοκατευθυντική κεραία στον κινούμενο δέκτη, ο ελεγχόμενος χρόνος συνεκτικότητας χρησιμοποιείται από τον κινούμενο δέκτη για να εκμεταλλευτεί το διαφορισμό του χρόνου και να βελτιώσει την απόδοση. Ο πολλαπλός διαφορισμός που προκαλείται από την ταλάντωση του διαγράμματος ακτινοβολίας, οδηγεί σε υψηλό κέρδος κατευθυντικότητας και αντίστοιχη χωρητικότητα δικτύου. Επιπρόσθετα, τα πλεονεκτήματα της κεραίας απέναντι σε παρόμοιους τύπους κεραιών είναι πολύ σημαντικά και θέτουν την παρούσα κεραία μια ιδανική λύση όσον αφορά τους σταθμούς βάσης εφαρμογών WiFi/mobile WiMAX τόσο για σταθερές και φορητές περιπτώσεις.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, η CP-ESPAR προσφέρει σημαντικό κέρδος κατευθυντικότητας, μεγαλύτερο από τις άλλες απλές δομές ESPAR που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία, όσον αφορά τη συχνότητα λειτουργίας των 2.4 GHz. Επιπρόσθετα, η CP-ESPAR παρέχει ένα ταλαντώμενο διάγραμμα ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας ένα μόνο στοιχείο τροφοδοσίας, καθιστώντας έτσι την κατασκευή της εύκολη στο χειρισμό και το κόστος επεξεργασίας σήματος εξαιρετικά χαμηλό, σε αντίθεση με τα περισσότερα MIMO συστήματα όπου χρησιμοποιούνται διάφορες χρονοκαθυστερήσεις και μεταβολές φάσης σε πολλά σημεία τροφοδοσίας. Επιπλέον, η προτεινόμενη κεραία προσφέρει περισσότερα σημεία ταλάντωσης συγκριτικά με την παρόμοια SPA δομή κεραίας (Κεφάλαιο 5.1), με τον ίδιο αριθμό στοιχείων, κάνοντας την CP-ESPAR πολύ πιο κατευθυντική. Τέλος, η χρήση των βαρακτόρων καθιστά την CP-ESPAR κεραία ικανή να διατυπώσει εικονικά οποιοδήποτε διάγραμμα ακτινοβολίας.

### **6.5.2 ΣΧΕΛΙΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

#### **i) Παράμετροι και στόχοι βελτιστοποίησης**

Ο στόχος της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι να παραχθούν επτά διαγράμματα ακτινοβολίας με μέγιστο κέρδος και ελάχιστο συντελεστή ανάκλασης στα 2.4 GHz (75 Ohm αντίσταση εισόδου για 75 Ohm γραμμή τροφοδοσίας εκπομπής). Πέντε εναλλασσόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας με εύρος ημίσειας ισχύος (3db-beamwidth)

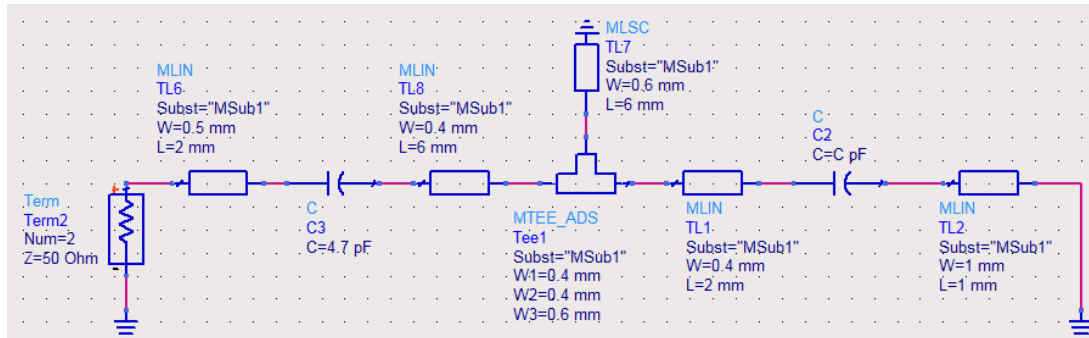


30° το καθένα, με τον κύριο λοβό ακτινοβολίας προσανατολισμένο στις -30°, -15°, 0°, 15° και 30° αντίστοιχα, θα καλύπτουν το τεταρτημόριο του γωνιακού ανακλαστήρα με υψηλή ανάλυση. Δύο διαγράμματα ακτινοβολίας 45° 3db beamwidth το καθένα, με τον κύριο λοβό ακτινοβολίας προσανατολισμένο στις -22.5° και 22.5° αντίστοιχα, θα καλύπτουν το τεταρτημόριο του γωνιακού ανακλαστήρα με χαμηλή ανάλυση. Ένα διάγραμμα ακτινοβολίας 90° 3db beamwidth με τον κύριο λοβό ακτινοβολίας προσανατολισμένο στις 0° θα καλύπτει όλο το τεταρτημόριο στην περίπτωση που δεν επιθυμούμε να αλλάζουμε λοβούς. Τα τρία τελευταία διαγράμματα ακτινοβολίας υποδεικνύουν την ικανότητα της κεραίας να σχηματίζει πολλαπλά διαγράμματα ακτινοβολίας. Χάρη στη συμμετρία της δομής ως προς τη διχοτόμο του γωνιακού ανακλαστήρα, μόνο τα διαγράμματα ακτινοβολίας προσανατολισμένα προς τις 30°, -22.5°, -15° και το διάγραμμα ακτινοβολίας προς τις 0° πρέπει να βελτιστοποιηθούν. Τα διαγράμματα των 30°, 22.5° και 15° επιτυγχάνονται εναλλάσσοντας την ηλεκτρική κατάσταση του συμμετρικού διπόλου (αμοιβαία εναλλαγή φορτίων).

Όπως αναφέρθηκε, οι παράμετροι βελτιστοποίησης περιλαμβάνουν το ύψος ( $L_R$ ) και πλάτος ( $W_R$ ) του γωνιακού ανακλαστήρα, τη θέση ( $x_i, y_i$ ) και μήκος των ενεργών και παθητικών στοιχείων, και τις τιμές των αναδραστικών φορτίων των παθητικών στοιχείων. Όμως, τα μήκη όλων των παθητικών στοιχείων είναι πανομοιότυπα και υποδεικνύονται από το  $L_P$ , ενώ το μήκος του ενεργού στοιχείου από το  $L_F$ . Επίσης, οι θέσεις των συνταιριασμένων παθητικών στοιχείων είναι συμμετρικές ως προς τον x-άξονα (διχοτόμος του γωνιακού ανακλαστήρα) και έτσι για κάθε ζεύγος μόνο δύο παράμετροι πρέπει να βελτιστοποιηθούν όσον αφορά την τοποθέτησή τους, αντί για 4 (δύο συμμετρικά παθητικά στοιχεία τοποθετούνται στο  $(x_i, y_i)$  και  $(x_i, -y_i)$ ). Όσον αφορά τη θέση του ενεργού στοιχείου, μόνο η x- συντεταγμένη του βελτιστοποιείται. Όμως, κάθε παθητικό στοιχείο επιφορτίζεται ανεξάρτητα, άρα και οι έξι τιμές ανάδρασης των παθητικών στοιχείων μετέχουν στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

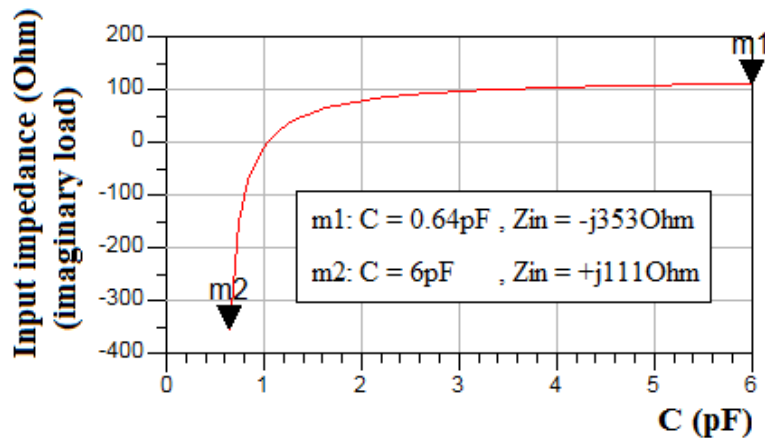
#### ii) Εύρος βελτιστοποίησης των αναδραστικών φορτίων

Διάφορα κυκλώματα έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για την προσομοίωση των φορτίων των ESPAR κεραιών, όπως περιγράφεται σε προηγούμενα σημεία του συγκεκριμένου κεφαλαίου. Ωστόσο, στο παρόν σημείο προτείνεται ένα νέο κύκλωμα προσομοίωσης. Έτσι, για να καθορίζουμε το εύρος των παραμέτρων βελτιστοποίησης σχετικά με τα αναδραστικά φορτία, το αντίστοιχο δίκτυο ενός παθητικού στοιχείου προσομοιώθηκε με τη χρήση του λογισμικού ADS (Agilent). Η σχηματική δομή του αντίστοιχου προτεινόμενου δικτύου απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου το κατακόρυφο στέλεχος χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει ένα επαγωγικό πηνίο ώστε να επιτευχθούν και θετικές τιμές στο εύρος του αντιδραστικού φορτίου. Ο μεταβλητός πυκνωτής C2 χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί μεταβλητό αντιδραστικό φορτίο, ενώ ο πυκνωτής C3 χρησιμοποιείται για να ωθήσουμε το εύρος βελτιστοποίησης σε αρνητικές τιμές και να εξισορροπηθεί το αποτέλεσμα του επαγωγικού πηνίου. Αριστερά, το κύκλωμα τερματίζεται στο παθητικό στοιχείο, ενώ η μικροταινία της δεξιάς κατάληξης είναι γειωμένη. Για να δείξουμε μια γενικότερη προσέγγιση, χρησιμοποιείται στην προσομοίωση το γνωστό και δημοφιλές υπόστρωμα FR4, με πάχος 16mm και  $\epsilon_r = 4.6$ .



Σχήμα 6.16: Σχηματικό διάγραμμα του αντίστοιχου κυκλώματος των παθητικών στοιχείων

Ένας μεγάλος αριθμός διαθέσιμων στο εμπόριο, ελεγχόμενων από τάση μεταβλητών πυκνωτών αξιολογήθηκαν, και επιλέχθηκε τελικά η διόδος JDV2S71E της Toshiba. Η διόδος JDV2S71E είναι μία διόδος SMD σιλικόνης, με μεταβλητή χωρητικότητα ελεγχόμενη από DC τάση. Η χωρητικότητά της εκτείνεται από 0.64pF (μέγιστη χαμηλή χωρητικότητα) στα 6pF (ελάχιστη υψηλή χωρητικότητα) για έλεγχο τάσης από 25V ως 1 V αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μέσω ADS χρησιμοποιώντας τη διόδο JDV2S71E απεικονίζονται παρακάτω. Το αντιδραστικό φορτίο του παθητικού στοιχείου που επιτεύχθηκε κυμαίνεται από -353jOhm ως 111 jOhm. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται από τον Γ.Α. για να δημιουργηθούν ρεαλιστικές τιμές για τη βελτιστοποίηση των αντίστοιχων δικτύων της CP-ESPAR.



Σχήμα 6.17: Αποτελέσματα προσομοίωσης για τα αναδραστικά φορτία της CP-ESPAR

### iii) Αντικειμενική συνάρτηση του ΓΑ

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η κινητήρια δύναμη πίσω από το γενετικό αλγόριθμο. Καλείται από το γενετικό αλγόριθμο για να καθορίσει την καταλληλότητα κάθε σειράς λύσεων που παράγεται κατά την αναζήτηση. Όπως αναφέρθηκε, ο βασικός στόχος είναι να παραχθούν διαγράμματα ακτινοβολίας με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (μέγιστο κέρδος σε ορισμένες κατευθύνσεις, συγκεκριμένο εύρος ημίσειας ισχύος και αντίστοιχα επίπεδα πλάγιου λοβού όσο πιο χαμηλά γίνεται), επιτυγχάνοντας προσαρμογή της αντίστασης εισόδου στα 2.4 GHz. Πέντε εναλλασσόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας των 30° 3db beamwidth το καθένα, με τον κεντρικό λοβό προσανατολισμένο στις -30°, -15°, 0°, 15° και 30° αντίστοιχα, δύο διαγράμματα ακτινοβολίας 45° 3db beamwidth το καθένα, με τον κεντρικό λοβό προσανατολισμένο στις -22.5° και 22.5° αντίστοιχα και ένα διάγραμμα ακτινοβολίας 90° 3db beamwidth, με τον κεντρικό λοβό προσανατολισμένο στις 0°. Χάρη στη συμμετρία της δομής ως προς τη διχοτόμο του

γωνιακού ανακλαστήρα, μόνο τα διαγράμματα ακτινοβολίας προσανατολισμένα προς τις  $-30^\circ$ ,  $-22.5^\circ$ ,  $-15^\circ$  και το διάγραμμα ακτινοβολίας προς τις  $0^\circ$  χρειάζονται βελτιστοποίηση. Τα διαγράμματα των  $30^\circ$ ,  $22.5^\circ$  και  $15^\circ$  επιτυγχάνονται ανταλλάσσοντας την ηλεκτρική κατάσταση του συμμετρικού διπόλου.

Η αντικειμενική συνάρτηση που ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις είναι η ακόλουθη:

- 1) Ένα σετ 360 σημείων χρησιμοποιείται για να σχηματιστεί το επιθυμητό διάγραμμα κατευθυντικότητας. Κάθε σημείο  $D(\phi)$  αντιπροσωπεύει την επιθυμητή κανονικοποιημένη τιμή κατευθυντικότητας σε γωνιακή θέση  $\phi$ . Το  $D(\phi)$  σχηματίζεται με γωνιακό βήμα  $1^\circ$  και  $D_{calculated}(\phi)$  είναι το κανονικοποιημένο διάγραμμα κατευθυντικότητας που υπολογίζεται από το λογισμικό. Το  $D(\phi)$  είναι το απαιτούμενο εύρος δέσμης 3dB και επίσης ζητείται μια αναλογία πλευρικών και οπίσθιων λοβών 9 dB. Ο πρώτος σχετικός όρος σφάλματος δίνεται από τη σχέση:

$$e_1 = \frac{1}{360} \sum_{\phi=0^\circ}^{359^\circ} \left( \frac{D_{calculated}(\phi) - D(\phi)}{D(\phi)} \right)^2$$

όπου:

$$D(\phi) = \begin{cases} 0.5 : 315 \leq \phi \leq 345, & 0.125 : 345 < \phi, \phi < 315 \\ 0.5 : 315 \leq \phi \leq 360, & 0.125 : 0 < \phi < 315 \\ 0.5 : 330 \leq \phi \leq 360, & 0.125 : 0 < \phi < 330 \\ 0.5 : 345 \leq \phi, \phi \geq 15, & 0.125 : 15 < \phi < 345 \\ 0.5 : 337.5 \leq \phi, \phi \geq 22.5, & 0.125 : 22.5 < \phi < 337.5 \end{cases}$$

- 2) Απαιτείται επίσης προσαρμογή την αντίστασης εισόδου, οπότε ένας σχετικός όρος σφάλματος λαμβάνεται υπόψη:

$$e_2 = abs\left(\frac{R_{in} - 75}{75}\right)^2 + abs\left(\frac{X_{in}}{75}\right)^2$$

όπου  $R_{in}$  και  $X_{in}$  αντιπροσωπεύουν το πραγματικό και φανταστικό μέρος την αντίστασης εισόδου αντίστοιχα και μια χαρακτηριστική αντίσταση  $75\Omega$  λαμβάνεται υπόψη.

- 3) Το συγκεντρωτικό σφάλμα δίνεται από το σύνολο των όρων που περιγράφηκαν, αφού έχουν πολλαπλασιαστεί με έναν κατάλληλα επιλεγμένο συντελεστή βάρους το καθένα:

$$err = w_1 e_1 + w_2 e_2$$

- 4) Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως:

$$OF = \frac{1}{1 + \sqrt{err}}$$

Η συχνότητα προσομοίωσης τοποθετήθηκε στα 2.4 GHz, τη συχνότητα που χρησιμοποιείται ευρύτατα στα WLAN/ mobile WiMAX. Στον Πίνακα 6.5 απεικονίζεται το εύρος διακύμανσης κάθε παραμέτρου που λαμβάνει μέρος στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Έστω  $\lambda_0$  το μήκος κύματος στα 2.4 GHz. Αφού οι

χωρικές παράμετροι της υπό εξέταση κεραίας εκφράζονται σε σχέση με το  $\lambda_0$ , εκτός από τις συντεταγμένες κάθε ζεύγους διπόλων, οι ηλεκτρικές διαστάσεις της κεραίας παραμένουν σταθερές και τα δεδομένα που αποκομίσαμε είναι κατάλληλα για εφαρμογές και σε άλλες συχνότητες. Η ακτίνα σύρματος κάθε στοιχείου είναι  $0.012\lambda_0$ .

Ο συνολικός πληθυσμός αποτελείται από 250 γενιές με 60 χρωμοσώματα ανά γενιά. Η μέθοδος επιλογής είναι ο αποδεκατισμός πληθυσμού, ενώ το σύστημα ζευγαρώματος είναι η γειτονική αντιστοίχιση ικανότητας. Το σημείο διασταύρωσης επιλέγεται τυχαία και κάθε χρωμόσωμα διαιρείται σε επίπεδο γονιδίου. Η πιθανότητα μετάλλαξης είναι ίση με 0,15 [41].

Ο Πίνακας 6.5 παρουσιάζει το εύρος διακύμανσης της κάθε παραμέτρου, που φαίνονται στο Σχήμα 6.15, που παίρνουν μέρος στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Εφόσον έχει επιλεχθεί η απεικόνιση όλων των φυσικών διαστάσεων σαν πολλαπλάσια του μήκους κύματος  $\lambda_0$ , ο Πίνακας 6.5 έχει την παρακάτω μορφή:

**Πίνακας 6.5**

**Παράμετροι και αποτελέσματα των γενετικών αλγορίθμων για την CP-ESPAR στα 2.4 GHz.**

Parameter	Variation	Step	GA Results				
			-30°	-22.5°	-15°	0° (30°)	0° (90°)
Length of the corner plate ( $L_R$ )	$\lambda_0 : 1.7\lambda_0$	$0.1\lambda_0$	1.7 $\lambda_0$		21.25 cm		
Width of the corner plate ( $W_R$ )	$\lambda_0 : 1.7\lambda_0$	$0.1\lambda_0$	1.7 $\lambda_0$		21.25 cm		
Length of the bisector's dipole ( $L_P$ )	$0.5\lambda_0 : 1.7\lambda_0$	$0.1\lambda_0$	1.4 $\lambda_0$		17.50 cm		
Length of the reactively loaded dipoles ( $L_F$ )	$0.5\lambda_0 : 1.7\lambda_0$	$0.1\lambda_0$	1.4 $\lambda_0$		17.50 cm		
Position of the active element ( $D_0, 0$ )	(1.5,0):(7.5,0)cm	0.2 cm	(7.5 , 0) cm				
Coordinates of the 1 <sup>st</sup> pair of dipoles(x,y)	(1.5,0.3):(7.5,7.5)cm	0.2 cm	(7.1 , 6.4) cm				
Coordinates of the 2 <sup>nd</sup> pair of dipoles(x,y)	(1.5,0.3):(7.5,7.5)cm	0.2 cm	(4.9 , 0.9) cm				
Coordinates of the 3 <sup>rd</sup> pair of dipoles(x,y)	(1.5,0.3):(7.5,7.5)cm	0.2 cm	(4.7 , 0.3) cm				
			-30°	-22.5°	-15°	0° (30°)	0° (90°)
Load reactance of the 1 <sup>st</sup> parasitic element ( $X_1$ )	-353 : 111 j $\Omega$	0.01j $\Omega$	33.76j $\Omega$	47.52j $\Omega$	59.73j $\Omega$	26.26 j $\Omega$	40.32j $\Omega$
Load reactance of the 2 <sup>nd</sup> parasitic element ( $X_2$ )	-353 : 111 j $\Omega$	0.01j $\Omega$	9.4j $\Omega$	-228.81 j $\Omega$	45.28j $\Omega$	55.21 j $\Omega$	-73.22j $\Omega$
Load reactance of the 3 <sup>rd</sup> parasitic element ( $X_3$ )	-353 : 111 j $\Omega$	0.01j $\Omega$	-1.49j $\Omega$	-339.38 j $\Omega$	-23.21j $\Omega$	50.95 j $\Omega$	2.88j $\Omega$
Load reactance of the 4 <sup>th</sup> parasitic element ( $X_4$ )	-353 : 111 j $\Omega$	0.01j $\Omega$	-17.79j $\Omega$	32.21j $\Omega$	20.62j $\Omega$	7.72 j $\Omega$	-135.01 j $\Omega$
Load reactance of the 5 <sup>th</sup> parasitic element ( $X_5$ )	-353 : 111 j $\Omega$	0.01j $\Omega$	46.3j $\Omega$	-349.22 j $\Omega$	-17.72j $\Omega$	-73.86 j $\Omega$	35.42j $\Omega$
Load reactance of the 6 <sup>th</sup> parasitic element ( $X_6$ )	-353 : 111 j $\Omega$	0.01j $\Omega$	33.79j $\Omega$	-347.19 j $\Omega$	-13.01j $\Omega$	24.97 j $\Omega$	42.15j $\Omega$

Όπως προαναφέρθηκε, ο σκοπός της συγκεκριμένης πρότασης είναι η σχεδίαση μιας CP-ESPAR κεραίας, ικανής να σχηματίζει διάφορα διαγράμματα ακτινοβολίας που στοχεύουν σε διάφορες κατευθύνσεις και διαφορετικών εύρων ημίσειας ισχύος. Έτσι, η βελτιστοποίηση της συγκεκριμένης κεραίας πρέπει να γίνει για κάθε

επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας ξεχωριστά στη συχνότητα των 2.4 GHz. Η διαδικασία που επιλέχθηκε για να ικανοποιήσεις αυτές τις απαιτήσεις ήταν η ακόλουθη: Ένας πλήρης γενετικός αλγόριθμος διεξάγεται αρχικά, με συμμετοχή όλων των παραμέτρων του Πίνακα 6.5, οδηγούμενος από την προαναφερόμενη αντικειμενική συνάρτηση, όσον αφορά το διάγραμμα ακτινοβολίας με τον κύριο λοβό να στοχεύει στις  $-30^\circ$  και με εύρος 3db beamwidth  $30^\circ$ . Όσον αφορά τα υπόλοιπα διαγράμματα ακτινοβολίας που στοχεύουν στις  $-22.5^\circ$ ,  $-15^\circ$  και τα δύο διαγράμματα ακτινοβολίας με προσανατολισμό στις  $0^\circ$ , η εξαγόμενη δομή ως αποτέλεσμα του πρώτου ΓΑ, υφίσταται επιπλέον τέσσερις ΓΑ με τη μόνη διαφορά ότι οι παράμετροι που συμμετέχουν στη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι μόνο τα φορτία των παθητικών στοιχείων. Οι χωρικές παράμετροι της δομής είναι αυτές που προέκυψαν από τον πρώτο ΓΑ και η παραγόμενη κεραία διατηρεί τις ιδιότητές της και στα πέντε διαγράμματα ακτινοβολίας.

### 6.5.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Εξαιτίας της απαίτησης για πολλά διαγράμματα ακτινοβολίας, αρκετοί ΓΑ έλαβαν χώρα για διάφορες τιμές των συντελεστών βάρους που είναι ενσωματωμένοι στην αντικειμενική συνάρτηση. Στην περίπτωση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των  $30^\circ$  3db beamwidth με κατεύθυνση στις  $-30^\circ$ ,  $-15^\circ$  και  $0^\circ$  τα καλύτερα αποτελέσματα λήφθηκαν για τιμές των συντελεστών βάρους  $w_1=2.5$ - $w_2=1$ ,  $w_1=2.5$ - $w_2=1$  και  $w_1=1.5$ - $w_2=1$ . Όσον αφορά το διάγραμμα ακτινοβολίας των  $45^\circ$  3db beamwidth με κατεύθυνση στις  $22.5^\circ$  οι αντίστοιχες τιμές ήταν  $w_1=1$ ,  $w_2=1$  ενώ οι τιμές των συγκεκριμένων συντελεστών βαρύτητας για το διάγραμμα ακτινοβολίας των  $90^\circ$  3db beamwidth με κατεύθυνση τις  $0^\circ$  ήταν  $w_1=10$ ,  $w_2=1$  (Πίνακας 6.6). Τα τελικά αποτελέσματα των γενετικών αλγόριθμων για κάθε παράμετρο φαίνονται στον Πίνακα 6.5, η εξαγόμενη δομή που σχεδιάστηκε τόσο από το SNEC όσο και από το HFSS απεικονίζεται στο Σχήμα 6.18 και τα πέντε διαγράμματα ακτινοβολίας, που παρήχθησαν προσομοιώνοντας την παραγόμενη δομή στο SNEC και στο HFSS παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.19.

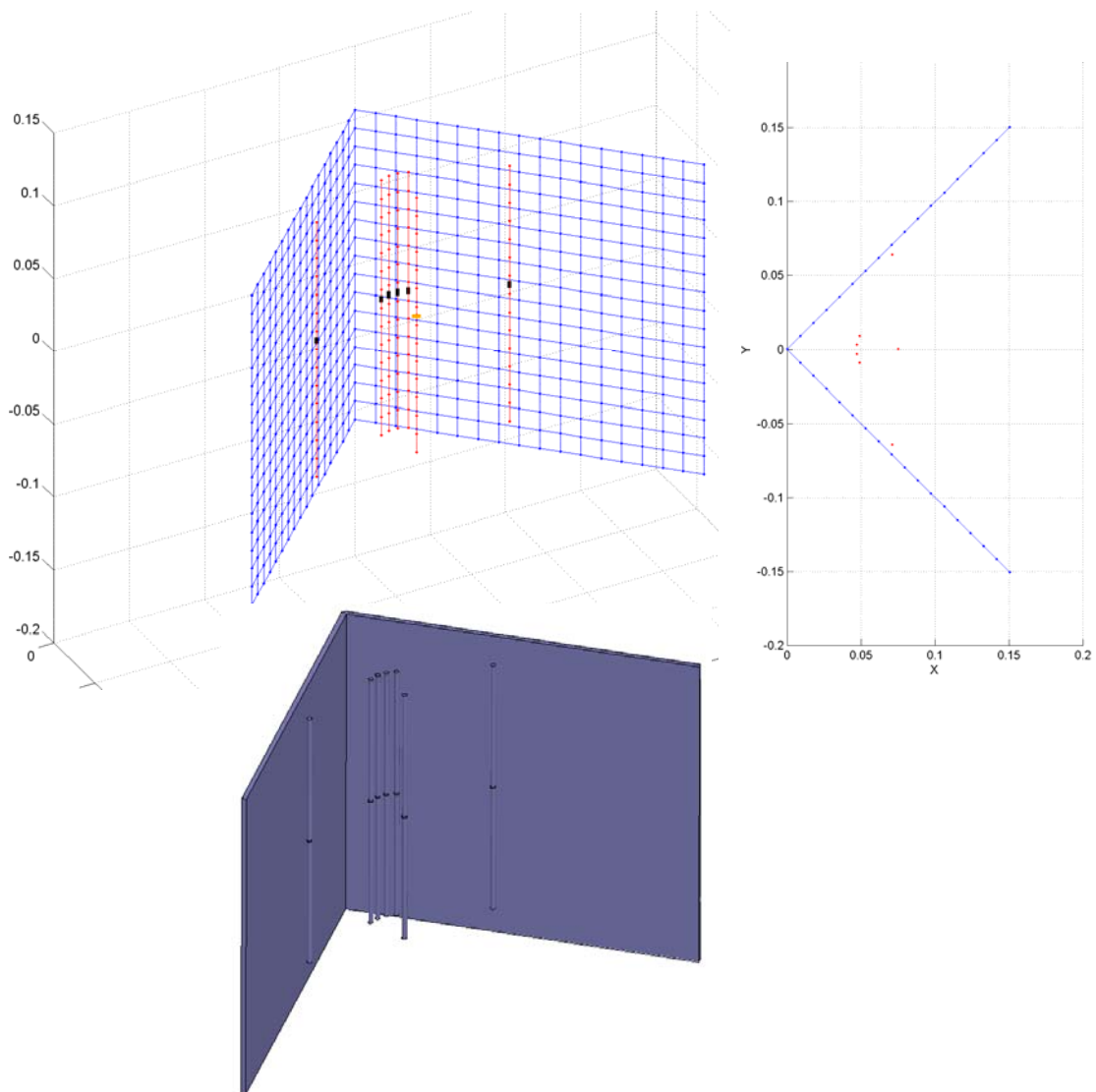
Ο Πίνακας 6.6 συγκεντρώνει όλα τα εξαγόμενα αποτελέσματα των ΓΑ που έλαβαν χώρα έτσι ώστε, τελικά, να παραχθούν τα απαιτούμενα διαγράμματα ακτινοβολίας όσον αφορά το μέγιστο κέρδος, το εύρος ημίσειας ισχύος, την κατεύθυνση, τον περιορισμό των οπίσθιων και πλευρικών λοβών και την προσαρμογή της αντίστασης εισόδου (VSWR) στη συχνότητα λειτουργίας των 2.4 GHz.

Πίνακας 6.6

Αποτελέσματα των γενετικών αλγορίθμων για την CP-ESPAR όσον αφορά τα διαγράμματα ακτινοβολίας.

	$-30^\circ$	$-22,5^\circ$	$-15^\circ$	$0^\circ (30^\circ)$	$0^\circ (90^\circ)$
$w_1$	2.5	1	2.5	1.5	10
$w_2$	1	1	1	1	1
Gain SNEC	13db	10db	12db	12db	7.8db
Gain HFSS	13.9db	11.1db	12.7db	12.9db	8.6db
VSWR	1.6494	1.1639	1.7478	1.6653	1.6845
3db SNEC	$27^\circ$	$44^\circ$	$31^\circ$	$26^\circ$	$83^\circ$
3db HFSS	$34^\circ$	$49^\circ$	$31^\circ$	$29^\circ$	$84^\circ$

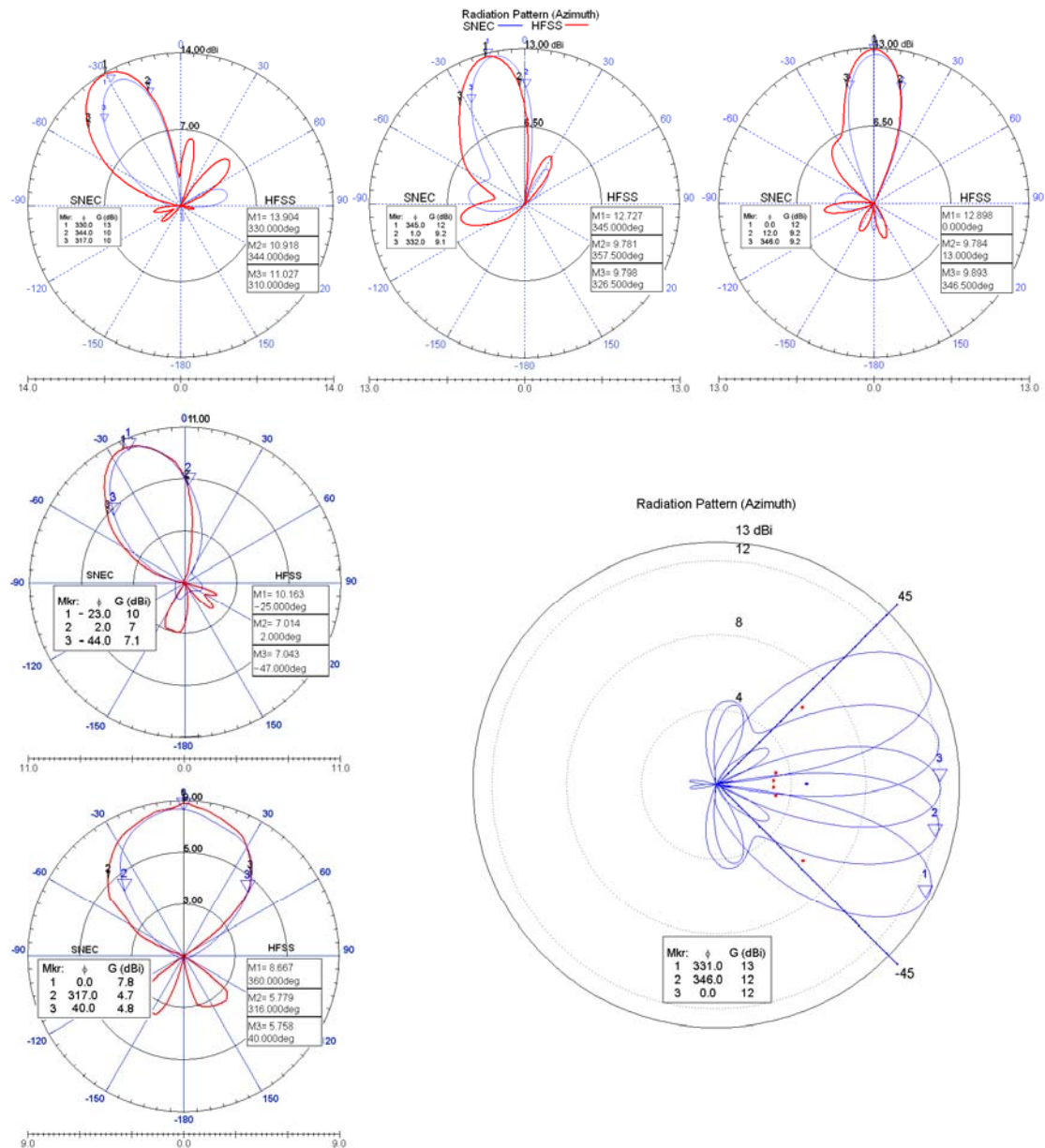
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.5 μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι όλα τα διαγράμματα ακτινοβολίας επιδεικνύουν εύρος ημίσειας ισχύος πολύ κοντά στο επιθυμητό, ικανοποιητικό περιορισμό των οπίσθιων και πλευρικών λοβών, είναι στραμμένα προς την επιθυμητή κατεύθυνση και, σε κάθε περίπτωση, το VSWR είναι μικρότερο από 1.75, καθιστώντας την απαίτηση για προσαρμογή της αντίστασης εισόδου στα 2.4 GHz έγκυρη. Επιπλέον, το μέγιστο κέρδος κάθε διαγράμματος ακτινοβολίας είναι αρκετά μεγάλο (10-14 dB), συγκρινόμενο με τα κέρδη των απλών ESPAR κεραιών που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα [5, 6, 7].



**Σχήμα 6.18:** Η CP-ESPAR παραγόμενη από τον ΓΑ, σχεδιασμένη από το SNEC και HFSS

Το Σχήμα 6.19 απεικονίζει την ταλάντωση που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα ακτινοβολίας των  $30^\circ$  3db beamwidth που στοχεύουν στις  $-30^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  και  $30^\circ$ , ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της προτεινόμενης κεραιάς, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα πολλαπλό διαφορισμό που δημιουργείται μέσω της στρέψης του διαγράμματος ακτινοβολίας και οδηγεί σε αύξηση του κατευθυντικού κέρδους και της χωρητικότητας του αντίστοιχου δικτύου. Χρησιμοποιώντας ένα μόνο σημείο τροφοδοσίας, η CP-ESPAR είναι κεραιά σημαντικά χαμηλού κόστους ανάπτυξης και

λειτουργίας συγκρινόμενη με την αντίστοιχη SPA κεραία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 5. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας των  $45^\circ$  και  $90^\circ$  3db beamwidth που στοχεύουν στις  $-22,5^\circ$  και  $0^\circ$  αντίστοιχα, που απεικονίζονται στο Σχήμα 6.19, αποδεικνύουν ότι η χρήση των φορτίων των παρασιτικών στοιχείων καθιστά την προτεινόμενη κεραία θεωρητικά ικανή να σχηματίσει οποιοδήποτε επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας, γεγονός που δίνει στην CP-ESPAR σημαντικό πλεονέκτημα έναντι άλλων προτεινόμενων κεραιών σταθερού διαγράμματος ακτινοβολίας. Τέλος, οι φυσικές διαστάσεις της κεραίας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5, επιδεικνύουν μια αρκετά συμπαγή κεραία ικανοποιώντας την αρχική απαίτηση για μια κεραιοδομή περιορισμένου μεγέθους.



Σχήμα 6.19: Αποτελέσματα από το SNEC και HFSS των διαγραμμάτων ακτινοβολίας και η επιτεύξιμη ταλάντωση

#### 6.5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η CP-ESPAR που παρουσιάστηκε στη συγκεκριμένη παράγραφο, απαντά σε όλες τις σύγχρονες προκλήσεις σχεδιασμού πολυχρηστικών, κατευθυντικών κεραιών η χρήση των οποίων είναι απαραίτητη για την κάλυψη συγκεκριμένων περιοχών ή η αποφυγή παρεμβολών. Επιτυγχάνοντας αυξημένη κατευθυντικότητα, προσαρμογή της αντίστασης εισόδου και παραπάνω από υψηλό μέγιστο κέρδος, μπορεί ιδανικά να χρησιμοποιηθεί σαν εκπομπός σε συστήματα που λειτουργούν στα 2.4 GHz (WiFi/WLAN/mobile WiMAX). Η επιλεκτική κατευθυντικότητά της δίνει την ευκαιρία να επικεντρωθούμε σε συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης (εκπομπός) ή να επιλέξουμε ανάμεσα σε μια ποικιλία hot spots αυτό με την καλύτερη ισχύ σήματος (λήπτες) ενώ η ικανότητα ταλάντωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας της επιτυγχάνει τόσο κατευθυντικότητα όσο διαφορική εκπομπή τα οποία εκμεταλλεύονται από τους κινητούς χρήστες, για τη βελτίωση της απόδοσης. Σε σύγκριση με την αντίστοιχη SPA που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η CP-ESPAR έχει την ικανότητα δημιουργίας περισσότερων (θεωρητικά άπειρων) διαγραμμάτων ακτινοβολίας, παρέχοντας έτσι κάλυψη του τεταρτημορίου με μεγαλύτερη διακριτότητα και ανάλυση, ταλάντωση του διαγράμματος ακτινοβολίας περισσότερων θέσεων και κατ' επέκταση βελτίωση της κατευθυντικότητας και του διαφορικού κέρδους στο δέκτη. Τέλος, οι συμπαγείς διαστάσεις της την καθιστούν ιδανική τόσο για σταθερή όσο και κινητή εκπομπή και λήψη, καθώς δεν υφίστανται περιορισμοί βάρους και μεγέθους.



## 6.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] T. Ohira and K. Iigusa, "Electronically Steerable Parasitic Array Radiator Antenna", *Electronics and Communications in Japan, Part2*, vol. 87, no. 10, pp. 25-45, 2004.
- [2] A. Akiyama, K. Gyoda, T. Ohira and M. Ando, "Numerical Simulations on Beam and/or Null Forming Performance of ESPAR Antennas", *Electronics and Communications in Japan, Part1*, vol.86, no. 12, pp. 1-11, 2003.
- [3] Y. Nakane and Y. Kuwahara, "Basic Studies on Aperture for Adaptive Antenna with Switched Loads of Parasitic Elements", *Electronics and Communications in Japan, Part1*, vol. 88, no. 9, pp. 19-26, 2005.
- [4] T. Ohira and K. Gyoda, "Electronically steerable passive array radiator antennas for low-cost analog adaptive beamforming", *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology*, pp. 101-104, May 2000.
- [5] H. Kawakami and T. Ohira, "Electrically Steerable Passive Array Radiator (ESPAR) Antennas", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, no. 2, pp. 43-50, April 2005.
- [6] R. Schlub, J. Lu and T. Ohira, "Seven-Element Ground Skirt Monopole ESPAR Antenna Design From a Genetic Algorithm and the Finite Element Method", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 11, pp. 3033-3039, November 2003.
- [7] J. Lu, D. Ireland and R. Schlub, "Dielectric Embedded ESPAR (DE-ESPAR) Antenna Array for Wireless Communications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 53, No. 8, pp. 2437-2443, August 2005.
- [8] C. Sun, A. Hirata, T. Ohira and N. C. Karmakar, "Fast Beamforming of Electronically Steerable Parasitic Array Radiator Antennas: Theory and Experiment", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 7, pp. 1819-1832, July 2004.
- [9] J. Lu, D. Ireland and R. Schlub, "Development of ESPAR Antenna Array using Numerical Modelling Techniques", *3<sup>rd</sup> International Conference on Computational Electromagnetics and Its Applications Proceedings*, pp. 182-185, November 2004.
- [10] K. Gyoda and T. Ohira, "Design of Electronically Steerable Passive Array Radiator (ESPAR) Antennas", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 2, pp. 922-925, July 2000.
- [11] C. Sun, N. C. Karmakar and T. Ohira, "Experimental Studies of Radiation Pattern of Electronically Steerable Passive Array Radiator Smart Antenna", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 3, pp. 884-887, June 2003.
- [12] J. Cheng, Y. Kamiya, and T. Ohira, "Adaptive beamforming of ESPAR antenna using sequential perturbation", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Vol. 1, pp. 133-136, May 2001.
- [13] B. Shishkov and T. Ohira, "Adaptive beamforming of ESPAR antenna based on stochastic approximation theory", *Proceedings of the 2001 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference*, Vol. 2, pp. 597-600, December 2001.
- [14] K. Yang and T. Ohira, "Realization of space-time adaptive filtering by employing electronically steerable passive array radiator antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 51, No. 7, pp. 1476-1485, July 2003.
- [15] B. Schaer, K. Rambabu, J. Bornemann and R. Vahldieck, "Design of Reactive Parasitic Elements in Electronic Beam Steering Arrays", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 53, No. 6, pp. 1998-2003, June 2005.
- [16] T. D. Dimousios, S. C. Panagiotou and C. N. Capsalis, "Design and Optimization of an Electrically Steerable Passive Array Radiator (ESPAR) Antenna for Maximum Directionality at 2.4GHz with the Aid of Genetic Algorithms", *Proceedings of the Fifth IASTED International Conference on Communications Systems and Networks (CSN 2006)*, Palma de Mallorca, August 2006.
- [17] T. D. Dimousios, C. I. Tsitouri, S. C. Panagiotou and C. N. Capsalis, "Design and Optimization of a Multipurpose Tri-Band Electronically Steerable Passive Array Radiator (ESPAR) Antenna with Steerable-Beam-Pattern for Maximum Directionality at the Frequencies of 1.8, 1.9 and 2.4 GHz with the aid of Genetic Algorithms", *Proceedings of the*

- Loughborough Antennas and Propagation Conference, 2008, (LAPC 2008)*, pp. 253-256, Loughborough, March 2008.
- [18] C. Plapous, J. Cheng, E. Taillefer, A. Hirata and T. Ohira, "Reactance domain MUSIC algorithm for electronically steerable parasitic array radiator", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 52, No. 12, pp. 3257-3264, December 2004.
- [19] E. Taillefer, A. Hirata and T. Ohira, "Direction-of-Arrival estimation using radiation power pattern with an ESPAR antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 53, No. 2, pp. 678-684, February 2005.
- [20] J. Cheng and T. Ohira, "ESPAR antenna signal processing for DOA estimation", appears in *Advances in Direction of Arrival Estimation*, by Sathish Chandran, pp. 395-418, Artech House, Norwood, MA, 2006.
- [21] X. Wang and Z. Shen, "Modal expansion analysis of electrically steerable passive array radiators (ESPAR)", *IEEE 2005 Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 4B, pp. 27-30, July 2005.
- [22] J. Lu, D. Ireland and R. Schlub, "Development of ESPAR antenna array using numerical modeling techniques", *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Computational Electromagnetics and its Applications*, pp. 182-185, November 2004.
- [23] O. Shibata and T. Furuhi, "Dual-band ESPAR antenna for wireless LAN applications", *IEEE 2005 Antennas and Propagation Society International Society Symposium*, Vol. 2B, pp. 605-608, July 2005.
- [24] H. Kato and Y. Kuwahara, "Novel ESPAR antenna", *2005 Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 4B, pp. 23-26, July 2005.
- [25] S. C. Panagiotou, T. D. Dimousios and C. N. Capsalis, "Analysis and Design of an ESPAR Antenna Above Perfect Ground, Wire Grid Plate and Wire Grid Plate with Skirt", *Proceedings of the Fifth IASTED International Conference on Communications Systems and Networks (CSN 2006)*, pp. 32-37, Palma de Mallorca, August 2006.
- [26] SuperNec v. 2.4 MOM Reference Manuals.
- [27] A. Fourie and D. Nitch, "SuperNEC: antenna and indoor-propagation simulation program," *IEEE Antennas and Propagat. Mag.*, vol. 42, no. 3, pp. 31-48, June 2000.
- [28] B. Orchard, *Optimizing Algorithms for Antenna Design*. MSc Dissertation, University of the Witwatersrand, 2002.
- [29] Yeliseyeva, N.P., "Optimizing gain of finite size corner-reflector antenna", appears in: *Microwave Conference, 2000. Microwave and Telecommunication Technology. 2000 10th International Crimean*, page(s): 302- 303, 2000
- [30] L. Desclos, M. Madihian, J. M. Floc'h, "A 1.8-6 GHz corner reflector based on shaped monopole excitation", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 21 Iss. 3, pp. 196 – 199, Apr 1999
- [31] V. P. Joseph, K. T. Mathew, "A novel corner reflector antenna", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 30 Iss. 6, pp. 403 – 404, Aug 2001
- [32] Okamoto, N., "Electronic lobe switching by 90 deg corner reflector antenna with ferrite cylinders", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-23, July 1975, p. 527-531.
- [33] Yilong Lu, Xiaofeng Cai, Ziyu Gao, "Optimal design of special corner reflector antennas by the real-coded genetic algorithm", appears in: *Microwave Conference, 2000 Asia-Pacific*, Volume, Issue, 2000 Page(s):1457 – 1460, 2000
- [34] Nestic, A. Micic, Z. Jovanovic, S. Radnovic, I., "Millimetre wave printed antenna array with high side lobe suppression", appears in: *Antennas and Propagation Society International Symposium 2006, IEEE*, page(s): 3051-3054, 9-14 July 2006
- [35] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989
- [36] Zekavat, S.A., Nassar, C.R., "Smart antenna arrays with oscillating beam patterns: characterization of transmit diversity in semi-elliptic coverage", appears in: *IEEE Transactions on Communications*, Volume: 50, Issue: 10, page(s): 1549- 1556, Oct 2002
- [37] Zekavat, S.A., Nassar, C.R., "Fading channel characterization for oscillating-beam-pattern smartantennas using geometric-based stochastic channel modelling with circular

- coverage area”, appears in: *Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Fall. IEEE VTS 54<sup>th</sup>*, Vo.: 3, page(s): 1452-1456, 2001
- [38] Zekavat, S.A., Nassar, C.R., Shattil, S., “Oscillating-beam smart antenna arrays and multicarrier systems: achieving transmit diversity, frequency diversity, and directionality”, appears on: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Volume 51, Issue 5, pp: 1030 – 1039, Sept. 2002
- [39] Zekavat, S.A., Nassar, C.R., “Achieving high-capacity wireless by merging multicarrier CDMA systems and oscillating-beam smart antenna arrays”, appears on: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Volume 52, Issue 4, pp: 772 – 778, July 2003
- [40] Zekavat, S.A., Nassar, C.R., “Transmit diversity via oscillating-beam-pattern adaptive antennas: an evaluation using geometric-based stochastic circular-scenario channel modelling”, appears on: *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Volume 3, Issue 4, pp: 1134 – 1141, July 2004
- [41] Dimousios, T.D., Panagiotou, S.C., Capsalis, C.N., “Design and Optimization of a Switched Parasitic Corner Plated Antenna for maximum Directionality and Diversity Gain at the WiFi frequency of 2.4 GHz with the aid of Genetic Algorithms”, appears on: *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, ICEAA 2007*, pp.: 731-734, 17-21 Sept. 2007

# ΕΠΙΛΟΓΟΣ

## ΓΕΝΙΚΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη και σχεδίαση ευφών στοιχειοκεραίων. Οι ευφείς στοιχειοκεραίες αποτελούν μια πολύ σημαντική παράμετρο των σύγχρονων ασυρμάτων συστημάτων επικοινωνιών. Στα κυριότερα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγονται τα εξής:

- Αύξηση της χωρητικότητας (περισσότεροι χρήστες ή μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης).
- Βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας.
- Αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με τη ραδιοδιάδοση (π.χ. πολυδιαδρομική διάδοση, παρεμβολές).
- Ανίχνευση παραμέτρων του καναλιού (π.χ. γωνίες άφιξης).
- Ποικίλα οικονομικά οφέλη για το σχεδιασμό των ασυρμάτων δικτύων (π.χ. λιγότεροι σταθμοί βάσης, περιορισμός εκπεμπόμενης ισχύος).

Η κύρια συμβολή της διατριβής αυτής είναι η χρησιμοποίηση ευφών κεραιών σε συστήματα ασύρματων δικτύων ευρυεκπομπής. Τα συστήματα ευφών κεραιών που αναλύονται στην εν λόγω διατριβή ενισχύουν τη λήψη εκτιμώντας την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος και προσαρμόζουν τις παραμέτρους της κεραίας έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός πως τα πρότυπα IEEE 802.11, 802.16 που εξετάζονται στη διατριβή υποστηρίζουν φορητή (σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους) και κινητή λήψη, κρίνεται σκόπιμη η χρησιμοποίηση των προτεινόμενων κεραιοσυστημάτων τα οποία διαθέτουν εκτεταμένο λειτουργικό εύρος ζώνης, καθώς οι συμβατικές κεραίες εσωτερικών ή εξωτερικών χώρων που χρησιμοποιούνται για φορητές και κινητές εφαρμογές παρουσιάζουν αποδεδειγμένα φτωχή επίδοση, χαμηλή κατευθυντικότητα, περιορισμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων και αδυναμία καταστολής θορύβου και παρεμβολών.

Ένα είδος ευφών κεραιών που αναπτύσσεται στην παρούσα διατριβή επιτυγχάνει την ηλεκτρονική στρόφη του διαγράμματος ακτινοβολίας μέσω της εναλλαγής μεταξύ των ενεργών και παρασιτικών στοιχείων στο κύκλωμα τροφοδότησης. Πρόκειται για ευφείς στοιχειοκεραίες μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων, που ουσιαστικά αποτελούν μια υποκατηγορία των ευφών κεραιών στρεφόμενης δέσμης ακτινοβολίας. Μελετώνται διατάξεις όπου κάθε φορά ένα στοιχείο ή το πολύ δύο στοιχεία θα είναι ενεργά και επομένως προβλήματα που σχετίζονται με πολλαπλά ενεργά στοιχεία, όπως υψηλό κόστος, απώλεια ισχύος από τη χρήση των διαιρετών ισχύος και των στροφών φάσεως και ακτινοβολία από γραμμές μεταφοράς είτε περιορίζονται είτε εξαλείφονται. Δίνεται έμφαση στη σχεδίαση ευφών στοιχειοκεραίων μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων με συγκεκριμένο λειτουργικό εύρος ζώνης για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη αποστολή ή λήψη σήματος WiFi/mobile WiMAX. Ακόμα, ένας σημαντικός στόχος είναι η μείωση του μεγέθους της εκάστοτε κεραιοδιάταξης, καθώς κάτι τέτοιο συνεπάγεται μείωση του κόστους κατασκευής και συντήρησης, αλλά και διευκόλυνση της φορητής ή/και κινητής λήψης.

Ένα ακόμη είδος ευφών κεραιών που αποτελεί αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης διατριβής, είναι οι ESPAR κεραίες. Η κεραία ESPAR είναι μία χαμηλής κατανάλωσης και μικρού μεγέθους έξυπνη κεραία. Η διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας (beamforming) επιτυγχάνεται με κατάλληλη ρύθμιση της άεργης αντίστασης (reactance) των φορτίων στα παρασιτικά στοιχεία που

περιβάλλουν το ενεργό κεντρικό στοιχείο. Η κυκλική τοπολογία, που εξασφαλίζει εξοικονόμηση χώρου, εξετάζεται αρχικά στη διατριβή και έτσι προκύπτουν λύσεις που εκτός από τις σταθερές (fixed) εφαρμογές, π.χ. κεραιοσυστήματα σε ταράτσες κτιρίων, θα εξυπηρετούν και τις φορητές (portable), κεραιοσυστήματα σε εσωτερικούς χώρους, βεράντες και τις κινητές (mobile) π.χ. κεραιοσυστήματα σε κινούμενα τρένα, λεωφορεία. Η κυκλική διάταξη παρουσιάζει και μια σειρά πλεονεκτήματα τα οποία βαραίνουν αποφασιστικά σε πρακτικές εφαρμογές. Όλα τα διαγράμματα μιας κυκλικής κεραίας προκύπτουν με απλή αντιμετάθεση των φορτίων των παθητικών στοιχείων, λόγω κυλινδρικής συμμετρίας. Εκτός των άλλων η κυκλική στοιχειοκεραία επιτρέπει και ευκολότερη κατασκευή. Τέλος, γίνεται μια προσπάθεια ενσωμάτωσης του κύριου χαρακτηριστικού των ESPAR κεραιών, που είναι τα φορτία των παθητικών στοιχείων, σε άλλα είδη κεραιών, με σκοπό τη βελτίωση και ενίσχυση των χαρακτηριστικών εκπομπής σύμφωνα με τις απαιτήσεις μας.

Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί πως με την εφαρμογή των προτεινόμενων ευφυών κεραιοσυστημάτων ο χρήστης διαθέτει πλέον τη δυνατότητα να επιλέξει από έναν αριθμό προκαθορισμένων διαγραμμάτων λήψης εκείνο που κάθε φορά θα προσφέρει την καλύτερη ποιότητα λαμβανομένου σήματος. Αυτό γίνεται εφικτό με ένα αλγόριθμο που ανά τακτά χρονικά σαρώνει όλα τα διαθέσιμα διαγράμματα λήψης και επιλέγει αυτό που προσφέρει καλύτερη ποιότητα σήματος. Δεδομένου επίσης ότι τα ασύρματα δίκτυα που εξετάζονται αποτελούν συστήματα ευρυεκπομπής, όπου ο πομπός εκπέμπει, αν όχι με ομοιοκατευθυντικό, με διάγραμμα μεγάλου εύρους δέσμης, αρκεί στον τελικό χρήστη μια κεραία μεταγωγής λοβού για ικανοποιητική λήψη αλλά και για την αντιμετώπιση προβλημάτων παρεμβολών μεταξύ διαφορετικών πομπών ή πολυδιαδρομικής διάδοσης. Ακόμα, η απλότητα αυτών των κεραιοσυστημάτων (μη πολύπλοκη επεξεργασία σήματος, αναλογική μορφοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας, μεταγωγή της κεραίας στο επιθυμητό διάγραμμα με απλό κύκλωμα διακοπών) τα καθιστά πολύ ελκυστικά για εφαρμογές που αφορούν τον τελικό χρήστη.

Η σχεδίαση ευφυών στοιχειοκεραιών καθίσταται εφικτή με τη στοχαστική μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων. Προτείνονται συμμετρικές διατάξεις, με σκοπό την ικανοποίηση συγκεκριμένων σχεδιαστικών απαιτήσεων. Αναπτύσσονται πρωτότυπες και ευέλικτες αντικειμενικές συναρτήσεις, που συνοψίζουν και συνδυάζουν τους στόχους κάθε διαδικασίας σχεδίασης: επίτευξη διαγραμμάτων ακτινοβολίας με επιθυμητές ιδιότητες, προσαρμογή ενεργών στοιχείων, ικανοποιητικές τιμές κέρδους. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η υλοποίηση και πειραματική μέτρηση ενός προτεινόμενου κεραιοσυστήματος, όπου καταδεικνύεται άριστη συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων της υλοποίησης και των αριθμητικών αποτελεσμάτων.

## **ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΗΜΕΙΑ ΟΠΟΥ ΠΡΟΑΓΕΤΑΙ Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ**

Η σχεδίαση ευφυών στοιχειοκεραιών καθίσταται εφικτή με τη στοχαστική μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων. Η ηλεκτρομαγνητική τους ανάλυση γίνεται με τη μέθοδο των ροπών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το πρόγραμμα προσομοίωσης SNEC (υβριδικός συνδυασμός MoM-UTD) και ο ενσωματωμένος σε αυτό δυαδικός γενετικός αλγόριθμος. Κάθε γενετικός περιλαμβάνει γενιές των 250 ατόμων (60-150 γενιές). Στο σχηματισμό κάθε επόμενης γενιάς συμμετέχουν τα δέκα χρωμοσώματα της προηγούμενης με τις υψηλότερες τιμές καταλληλότητας (ελιτισμός). Χρησιμοποιείται επιλογή με τη διαδικασία αποδεκατισμού του πληθυσμού, ενώ για το ζευγάριμα προτιμάται η συνένωση χρωμοσωμάτων με γειτονικές τιμές επίδοσης.

Επιλέγεται διασταύρωση ενός σημείου με διαίρεση των ατόμων σε επίπεδο γονιδίου και δυαδική μετάλλαξη με πιθανότητα αλλαγής ενός bit σε κάθε χρωμόσωμα 0.15 (βέλτιστη στρατηγική για το γενετικό του SNEC). Οι απαιτήσεις της σχεδίασης περιλαμβάνουν την κάλυψη του οριζοντίου επιπέδου με συγκεκριμένο αριθμό διαγραμμάτων ακτινοβολίας, σε συνδυασμό ή μη με επίτευξη επιθυμητών τιμών κέρδους ή προσαρμογή της αντίστασης εισόδου. Κάθε διάγραμμα ακτινοβολίας πρέπει να διαθέτει καθορισμένο εύρος μισής ισχύος του κυρίου λοβού (90° ή 60°) και καταπιεσμένους πλευρικούς λοβούς (σχετική στάθμη <-9 dB ή <-10 dB).

- Αρχικά σχεδιάζεται μια στοιχειοκεραία μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων με χρήση γωνιακού ανακλαστήρα κατάλληλη για εφαρμογές στρεφόμενης δέσμης στη συχνότητα των 2.4 GHz. Η δυνατότητα επιλογής από έναν αριθμό διαγραμμάτων ακτινοβολίας αλλά και η επίτευξη ταλάντωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας κάνουν την κεραιοδιάταξη ιδιαίτερα κατευθυντική με σημαντικά οφέλη στην αύξηση του κέρδους του δέκτη μέσω του transmit diversity. Η δομή της συγκεκριμένης κεραίας την καθιστά ιδανική για χρήση ως εκπομπό, είτε μόνη της, καλύπτοντας συγκεκριμένη περιοχή, είτε σαν antenna panel κάνοντας χρήση 4 όμοιων κεραίων για κάλυψη ολόκληρου του επιπέδου με ανεξάρτητη και ανεπηρέαστη χρήση των ιδιοτήτων της ανά τεταρτημόριο (Παράγραφος 5.1).
- Εξετάζεται μια κυκλική SPA όπου τα στοιχεία της δεν είναι απλά δίπολα ή μονόπολα, αλλά PIFA κεραίες, δημιουργώντας έτσι μια δομή SPA Quad-PIFA. Η συχνότητα λειτουργίας της συγκεκριμένης κεραιοδιάταξης είναι τα 2.4 GHz. Εδώ γίνεται προσπάθεια ταυτόχρονης εκμετάλλευσης των ιδιοτήτων των PIFA κεραίων (ευρυζωνικότητα, απλή κατασκευή, περιορισμένες διαστάσεις) και της SPA τεχνολογίας (κατευθυντικότητα, εναλλαγή/στροφή διαγράμματος ακτινοβολίας) με την πρόταση μιας ενοποιημένης κεραιοδομής. Η συγκεκριμένη κεραία κατασκευάστηκε και μετρήθηκε πιστοποιώντας τα θεωρητικά αποτελέσματα με τις πραγματικές μετρήσεις (Παράγραφος 5.2).
- Μια κυκλική ESPAR επτά και πέντε στοιχείων, η οποία διαθέτει έξι και τέσσερις κατευθυντικούς λοβούς αντίστοιχα, σχεδιάζεται για τα 2.4 GHz. Σκοπός αυτής της παραγράφου είναι να καταδείξει την ικανότητα των ESPAR κεραίων να σχηματίζουν διαγράμματα ακτινοβολίας διαφορετικών χαρακτηριστικών εκπομπής, ικανοποιώντας κάθε φορά την οποιαδήποτε απαίτηση του σχεδιαστή. Η συμμετρική της δομή και η κυκλική εναλλαγή των φορτίων των παθητικών στοιχείων συμβάλουν στην επίτευξη κατευθυντικότητας και στροφής του διαγράμματος ακτινοβολίας (Παράγραφος 6.3).
- Η κυκλική ESPAR επτά στοιχείων που βελτιστοποιήθηκε για χρήση στα 2.4 GHz, πλέον αναβαθμίζεται έτσι ώστε να επεκτείνει το λειτουργικό της εύρος και στις συχνότητες της κινητής τηλεφωνίας (GSM 1800, 1900 MHz) διατηρώντας ανέπαφα τα χαρακτηριστικά εκπομπής της σε όλες τις συχνότητες χρήσης της. Πλέον, τα φορτία της ESPAR δε χρησιμοποιούνται μόνο για την επίτευξη συγκεκριμένων χαρακτηριστικών εκπομπής (διάγραμμα ακτινοβολίας, προσαρμογή αντίστασης εισόδου) για μία μόνο συχνότητα, αλλά και για μετάθεση των ίδιων αναλλοίωτων χαρακτηριστικών και σε άλλες συχνοτικές μπάντες, μεταβάλλοντας μόνο τις τιμές των φορτίων και διατηρώντας τις φυσικές διαστάσεις της ESPAR σταθερές (Παράγραφος 6.4).

- Τέλος, παρουσιάζεται ESPAR κεραία με γωνιακό ανακλαστήρα (CP-ESPAR). Οι στόχοι της συγκεκριμένης πρότασης είναι ίδιοι με αυτούς της αντίστοιχης SPA της παραγράφου 5.1 με τις επιπλέον απαιτήσεις για περισσότερα και διάφορων χαρακτηριστικών διαγράμματα ακτινοβολίας. Σε αυτή την παράγραφο καθίσταται σαφής η δυνατότητα της CP-ESPAR δημιουργίας περισσότερων διαγραμμάτων ακτινοβολίας από την αντίστοιχη SPA, γεγονός που επιδρά καθοριστικά στη βελτίωση των χαρακτηριστικών εκπομπής της προτεινόμενης κεραίας (κατευθυντικότητα, ταλάντωση διαγράμματος ακτινοβολίας σε περισσότερες θέσεις, δημιουργία διαφορετικού διαγράμματος ακτινοβολίας ανάλογα με τη χρήση της CP-ESPAR). Παράλληλα υπογραμμίζεται η προφανής βελτίωση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας των διαφόρων τύπων κεραιών με την υιοθέτηση των φορτίων των ESPAR κεραιών, όταν και όπου κάτι τέτοιο μπορεί να είναι εφικτό (Παράγραφος 6.5).

## **ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**

- Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή των προτεινόμενων SPAs και ESPARs και η εξέταση της επίδοσης τους σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, όπως στο διάστημα 3.1 GHz-10GHz των UWB (Ultra-WideBand) επικοινωνιών και των υπόλοιπων συχνοτικών περιοχών του WiMAX πρωτοκόλλου.
- Σε όλη την έκταση της διατριβής μελετώνται SPAs αποτελούμενες από δίπολα και παρουσιάζεται και μία περίπτωση όπου αντί για δίπολα χρησιμοποιείται PIFA κεραία. Ενδιαφέρον θα μπορούσε να έχει η χρήση και άλλου είδους κεραιών σαν ενεργητικά και παθητικά στοιχεία μιας SPA, ανάλογα με τις ιδιότητες που θέλουμε τελικά το προτεινόμενο κεραιοσύστημα και αυτές να συνδυαστούν με τις δυνατότητες των χαρακτηριστικών των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των SPA.
- Διατάξεις στοιχειοκεραιών μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών στοιχείων και ESPAR κεραιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταστολή παρεμβολών που προέρχονται από εκπομπή άλλων ψηφιακών υπηρεσιών (ψηφιακό μέρισμα), τοποθετώντας στο διάγραμμα τους ένα μηδενισμό στην κατεύθυνση από την οποία καταφθάνει το παρεμβάλον σήμα.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχεδίαση μιας ευφυούς κεραίας όπου θα προσφέρεται η δυνατότητα επιλογής τοποθέτησης μηδενισμών στο διάγραμμα της ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη.
- Μπορούν να προκύψουν ευφυείς κεραιοδιατάξεις όπου ελέγχονται δυναμικά οι θέσεις μεγίστων και μηδενισμών του διαγράμματος ακτινοβολίας ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες λήψης τηλεοπτικού και όχι μόνο σήματος. Η ESPAR κεραία, η οποία αποτελεί απλή υποπερίπτωση των πλήρως προσαρμοστικών κεραιών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σκοπό αυτό.
- Το κύριο χαρακτηριστικό των κεραιών ESPAR, που είναι τα φορτία που εφοδιάζουν τα παρασιτικά στοιχεία, θα μπορούσαν να υιοθετηθούν, όπου αυτό είναι δυνατό, από άλλους τύπους κεραιών, βελτιώνοντας με αυτόν τον τρόπο τα χαρακτηριστικά εκπομπής τους, ή ακόμα περισσότερο προσδίδοντάς τους επιπλέον ιδιότητες στις ήδη υπάρχουσες. Έτσι, τα φορτία των ESPAR θα μπορούσαν να τοποθετηθούν στο shorting strip των PIFA κεραιών ή ακόμα και στα παρασιτικά μονόπολα και δίπολα των Yagi κεραιών με σκοπό τη βελτίωση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών εκπομπής.