



**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ Τ.Ε.Ι. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ**  
**ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΙΕΕΕ 802.16j**



Της φοιτήτριας  
Γεωργία Π. Πετρίδου  
Αρ. Μητρώου: 03/2396

Επιβλέπων  
Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης  
Εργαστηριακός Συνεργάτης

Θεσσαλονίκη 2012





**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ Τ.Ε.Ι. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ  
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΙΕΕΕ 802.16j**

**Γεωργία Π. Πετρίδου**

**Επιβλέπων: Παναγιώτης Σαρηγιαννίδης  
Εργαστηριακός Συνεργάτης**

**Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:**

.....

**Θεσσαλονίκη 2012**

## Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με την μελέτη των ασύρματων συστημάτων κινητών τηλεπικοινωνιών του προτύπου IEEE 802.16j ως μετεξέλιξη του WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Σκοπός της εργασίας είναι η ανάλυση και παρουσίαση του προτύπου. Πιο συγκεκριμένα γίνεται μια ιστορική αναδρομή των τηλεπικοινωνιών και του προτύπου 802.16. Έπειτα γίνεται εκτενέστερη αναφορά στα κυψελωτά δίκτυα MCNs (multihop cellular networks), την τοπολογία του δικτύου και τα διάφορα σενάρια λειτουργίας αναμετάδοσης. Επιπρόσθετα στο φυσικό επίπεδο αναλύεται η τεχνική TDD (Time Division Duplexing) και η μορφή πλαισίου. Όσον αφορά το επίπεδο MAC οι τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης του σήματος FEC (Forward Error-Correction) και AMC (Adaptive Modulation and Coding), αλλά και τα πρωτόκολλα ARQ (Automatic Repeat Request), HARQ (Hybrid ARQ) και LR-ARQ (Local Retransmission Automatic Repeat-Request) συντέλεσαν ώστε να ενισχυθεί η αξιοπιστία του δικτύου και να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις QoS (Quality of Service) των συνδρομητών. Επιπλέον με το σύστημα πολλαπλών κεραιών και σε συνδυασμό με το προσαρμοστικό σύστημα της κεραίας AAS (Adaptive Antenna Systems) και την τεχνολογία MIMO (Multiple Input and Multiple Output) μειώνονται οι παρεμβολές στο σήμα και αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης. Επίσης αναφέρεται η κατάσταση αδράνειας του σταθμού που παίζει σημαντικό ρόλο στην εξοικονόμηση ενέργειας του δικτύου. Τέλος με το πρωτόκολλο KMP (key management protocol) Version 1 και Version 2 που γίνεται κρυπτογράφηση στα δεδομένα και σε συνδυασμό διαφόρων τεχνικών παρέχεται ασφάλεια στους χρήστες του δικτύου.

## Λέξεις Κλειδιά

WiMAX, TDD, FDD, OFDMA, MCN, Relay, Multiantenna, MIMO, Tunneling, LOS, NLOS, Mobile, Transparent

## **Abstract**

This Thesis has got to do with the study of wireless systems mobile communications of the IEEE 802.16j standard as a amendment of WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access). The study aims at presenting the main features and aspects of the popular IEEE 802.16j standard. At a closer look, a historical review of telecommunications and the 802.16 family standards is being made. After that, an extensive reference follows, about cellular networks MCNs (multihop cellular networks), the networks topology, and all the potential scenarios of transmission function. Also, there is detailed overview of the TDD (Time Division Duplexing) Technique and the framework form in a physical level. Considering the MAC level, the configuration and coding techniques of the FEC (Forward Error-Correction) and AMC (Adaptive Modulation and Coding) signal, as the ARQ (Automatic Repeat Request), HARQ (Hybrid ARQ) and LR-ARQ Local Re-Transmission ARQ) protocols have contributed for the reliability of the network and the satisfaction of the QoS (Quality of Service) demands of the subscribers. With the multiple antennas system and in combination with the adaptive system of the AAS (Adaptive Antenna Systems) antenna, and in technique MMO(Multiple Input and Multiple Output) interferences in the signal are being reduced, and the transmission rate is being increased. Furthermore, the energy efficiency issue is discussed as an important operation feature. Finally, security aspects provided to the users are discussed, since there is a rigorous encryption of the data and a combination of Techniques at the KMP (key management protocol) Version 1 and 2.

## Περιεχόμενα

|   |    |
|---|----|
| Περίληψη.....   | 4  |
| Abstract .....  | 5  |
| Περιεχόμενα.....  | 6  |
| Ευρετήριο εικόνων.....  | 8  |
| Ευρετήριο πινάκων.....  | 10 |
| 1. Εισαγωγή.....  | 11 |
| 1.1 Η πορεία ανάπτυξης της ασύρματης κινητής επικοινωνίας ..... | 12 |
| 1.2 Τι είναι το WiMAX.....                                      | 17 |
| 1.3 WiMAX Forum.....  | 17 |
| 2. Το πρότυπο IEEE 802.16 και η εξέλιξη του.....                | 19 |
| 2.1 IEEE 802.16-2001.....                                       | 19 |
| 2.2 IEEE 802.16a.....   | 20 |
| 2.3 IEEE 802.16b.....   | 20 |
| 2.4 IEEE 802.16c.....   | 21 |
| 2.5 IEEE 802.16d.....   | 21 |
| 2.6 IEEE 802.16e-2004.....                                      | 21 |
| 2.7 IEEE 802.16e-2005.....                                      | 25 |
| 2.8 IEEE 802.16/16e.....  | 28 |
| 2.9 Συμπεράσματα κεφαλαίου.....                                 | 29 |
| 3. IEEE 802.16j ΔΙΚΤΥΑ MMR.....                                 | 30 |
| 3.1 Εισαγωγή στο IEEE 802.16j.....                              | 30 |
| 3.2 Δίκτυα MCNs 802.16j.....                                    | 30 |
| 3.2.1 Σενάρια κυφελωτών δικτύων MCNs.....                       | 31 |
| 3.3 Συνεργατικό σύστημα πολλών βημάτων.....                     | 32 |
| 3.4 Σενάρια λειτουργίας αναμετάδοσης.....                       | 33 |
| 3.5 Τοπολογία.....  | 36 |
| 3.6 Συμπεράσματα κεφαλαίου.....                                 | 37 |
| 4. Φυσικό Επίπεδο.....  | 38 |
| 4.1 Πλαίσιο OFDMA.....  | 38 |
| 4.2 Τεχνική TDD.....  | 39 |
| 4.3 Τύποι λειτουργίας αναμετάδοσης.....                         | 40 |
| 4.4 Τεχνικές λειτουργίας αναμεταδοτών.....                      | 42 |
| 4.5 Μορφή του πλαισίου.....                                     | 44 |
| 4.6 Αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού.....                        | 47 |
| 4.6.1 Προσαρμοστική περίοδος σχεδίου.....                       | 49 |
| 4.6.2 Αύξηση-μείωση του ποσοστού.....                           | 49 |
| 4.6.3 Αποτελέσματα της προσομοίωσης.....                        | 50 |
| 4.7 Συμπεράσματα κεφαλαίου.....                                 | 54 |
| 5. Επίπεδο MAC.....   | 55 |
| 5.1 Προώθηση των πακέτων.....                                   | 55 |
| 5.2 Τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης σήματος.....         | 58 |

|  |    |
|--|----|
| 5.2.1 Τεχνική FEC.....   | 58 |
| 5.2.2 Τεχνική AMC.....   | 59 |
| 5.3 Διαχείριση εύρους ζώνης.....   | 61 |
| 5.4 Πρωτόκολλο HARQ – Διασφάλιση αξιόπιστης μεταφοράς.....                       | 63 |
| 5.4.1 Chase σε συνδυασμό με το HARQ.....   | 64 |
| 5.4.2 Επαυξητικός πλεονασμός HARQ.....   | 65 |
| 5.4.3 Μέθοδος LR-ARQ.....  | 67 |
| 5.5 Συμπεράσματα κεφαλαίου.....  | 68 |
| 6. Επιλογή διαδρομής.....  | 69 |
| 6.1 Επιλογή σταθμού για το δίκτυο.....   | 69 |
| 6.2 Σενάρια για την απόδοση του δικτύου σε σχέση με την επιλογή του σταθμού..... | 71 |
| 6.2.1 Αντιστοίχιση στο συγκεντρωτικό μοντέλο.....                                | 71 |
| 6.2.2 Αντιστοίχιση στο κατανεμημένο μοντέλο.....                                 | 72 |
| 6.2.3 Αξιολόγηση της απόδοσης των δυο μοντέλων.....                              | 72 |
| 6.3 Συμπεράσματα κεφαλαίου.....  | 74 |
| 7. Multiantenna - Σύστημα πολλαπλών κεραιών.....                                 | 75 |
| 7.1 Προσαρμοστικό σύστημα κεραίας (AAS).....                                     | 75 |
| 7.2 Σύστημα πολλαπλών κεραιών MIMO.....  | 76 |
| 7.3 Συμπεράσματα κεφαλαίου.....  | 77 |
| 8. Εξοικονόμηση ενέργειας.....   | 78 |
| 8.1 Συμπέρασμα κεφαλαίου.....  | 79 |
| 9. Ασφάλεια.....   | 80 |
| 9.1 Συμπέρασμα κεφαλαίου.....  | 83 |
| 10. Ανταγωνιστές του 802.16j.....  | 84 |
| 10.1 IMT-Advanced.....   | 84 |
| 10.2 LTE-Advanced.....   | 85 |
| 10.3 Συμπέρασμα κεφαλαίου.....   | 87 |
| Αναφορές.....  | 88 |

## Ευρετήριο εικόνων

|  |    |
|--|----|
| <b>Εικόνα 1:</b> παράδειγμα κυψελοειδούς τοπικού δικτύου.....                | 12 |
| <b>Εικόνα 2:</b> Mobile Telephone System.....                                | 13 |
| <b>Εικόνα 3:</b> Συσκευή συστήματος δεύτερης γενιάς 2G.....                  | 14 |
| <b>Εικόνα 4:</b> Σύστημα CDMA2000.....                                       | 15 |
| <b>Εικόνα 5:</b> Συσκευή τρίτης γενιάς 3G.....                               | 15 |
| <b>Εικόνα 6:</b> Παράδειγμα τέταρτης γενιάς 4G.....                          | 16 |
| <b>Εικόνα 7:</b> Το λογότυπο του WiMAX Forum.....                            | 17 |
| <b>Εικόνα 8:</b> Αρχιτεκτονική WiMAX δικτύου.....                            | 18 |
| <b>Εικόνα 9:</b> Διάδοση σε συνθήκες οπτικής επαφής.....                     | 19 |
| <b>Εικόνα 10:</b> Διάδοση σε συνθήκες μη οπτικής επαφής.....                 | 20 |
| <b>Εικόνα 11:</b> Διαφορά τεχνικής OFDM και CCK.....                         | 21 |
| <b>Εικόνα 12:</b> Φέροντα στην πολυπλεξία OFDM.....                          | 22 |
| <b>Εικόνα 13:</b> Τεχνική Πολυπλεξίας OFDM στο 802.16-2004.....              | 23 |
| <b>Εικόνα 14:</b> Τεχνική αμφίδρομης μετάδοσης με διαχωρισμό συχνοτήτων..... | 23 |
| <b>Εικόνα 15:</b> Τεχνική αμφίδρομης μετάδοσης με χρονική διαίρεση.....      | 24 |
| <b>Εικόνα 16:</b> Η τεχνική πολυπλεξίας SOFDMA.....                          | 25 |
| <b>Εικόνα 17:</b> Φέροντα στην τεχνική SOFDMA.....                           | 26 |
| <b>Εικόνα 18:</b> Κεραιοσυστήματα πολλαπλών εισόδων – εξόδων.....            | 26 |
| <b>Εικόνα 19:</b> Κεραιοσυστήματα MIMO.....                                  | 27 |
| <b>Εικόνα 20:</b> Πρωτόκολλο IEEE 802.16/16e.....                            | 29 |
| <b>Εικόνα 21:</b> Κυβελωτά δίκτυα MCNs.....                                  | 31 |
| <b>Εικόνα 22:</b> Σενάρια παράδοσης σε δίκτυα MCNs.....                      | 31 |
| <b>Εικόνα 23:</b> Αναμεταδότες με κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους.....          | 34 |
| <b>Εικόνα 24:</b> Αναμεταδότης για προσωρινή κάλυψη.....                     | 35 |
| <b>Εικόνα 25:</b> Αναμεταδότης σε κινητό όχημα.....                          | 35 |
| <b>Εικόνα 26:</b> Τοπολογία δικτύου κινητής αναμετάδοσης.....                | 37 |
| <b>Εικόνα 27:</b> OFDMA πλαίσιο.....   | 39 |
| <b>Εικόνα 28:</b> τεχνική TDD σε σχέση με την FDD.....                       | 39 |
| <b>Εικόνα 29:</b> Τύποι αναμετάδοσης: διαφανή tr και μη διαφανή non-tr.....  | 41 |
| <b>Εικόνα 30:</b> Amplify and Forward.....                                   | 42 |



|   |    |
|---|----|
| <b>Εικόνα 31:</b> Εκτίμηση του καναλιού των τριών τύπων λειτουργίας αναμετάδοσης.....         | 43 |
| <b>Εικόνα 32:</b> Δομή πλαισίου στη διαφανή λειτουργία αναμετάδοσης.....                      | 45 |
| <b>Εικόνα 33:</b> Δομή πλαισίου στη μη διαφανή λειτουργία αναμετάδοσης.....                   | 46 |
| <b>Εικόνα 34:</b> Τα δίκτυα 802.16j που χρησιμοποιήσαμε για την προσομοίωση.....              | 51 |
| <b>Εικόνα 35:</b> Προσαρμοστική και σταθερή ζώνη κατανομής.....                               | 52 |
| <b>Εικόνα 36:</b> Αποτελεσματική αλλαγή ποσοστού έναντι των ελάχιστων και ανώτατων ορίων..... | 53 |
| <b>Εικόνα 37:</b> Αποτέλεσμα αύξησης του ποσοστού.....  | 53 |
| <b>Εικόνα 38:</b> Αποτέλεσμα μείωσης του ποσοστού.....  | 54 |
| <b>Εικόνα 39:</b> Tunnel Packet.....  | 55 |
| <b>Εικόνα 40:</b> Τεχνική tunneling προώθησης των πακέτων.....                                | 56 |
| <b>Εικόνα 41:</b> Τεχνική CID-based προώθησης των πακέτων.....                                | 57 |
| <b>Εικόνα 42:</b> Τεχνική κωδικοποίησης forward error-correction (FEC).....                   | 58 |
| <b>Εικόνα 43:</b> Τεχνική AMC.....  | 60 |
| <b>Εικόνα 44:</b> Έλεγχος αποδοχής κλήσης CAC.....  | 62 |
| <b>Εικόνα 45:</b> Ανεπιθύμητη παροχή υπηρεσίας UGS.....                                       | 62 |
| <b>Εικόνα 46:</b> Τεχνική tunneling σύμφωνα με το HARQ πρωτόκολλο.....                        | 65 |
| <b>Εικόνα 47:</b> Συνδυασμός chase και HARQ.....  | 66 |
| <b>Εικόνα 48:</b> Αναπαράσταση του επαυξητικού πλεονασμού.....                                | 67 |
| <b>Εικόνα 49:</b> Επιλογή σταθμού για το δίκτυο.....  | 70 |
| <b>Εικόνα 50:</b> Επιτυχής ένωση των μονάδων UE σε μια κυψέλη.....                            | 73 |
| <b>Εικόνα 51:</b> Απόδοση ρυθμαπόδοσης στα διάφορα μοντέλα.....                               | 73 |
| <b>Εικόνα 52:</b> Προσαρμοστικό σύστημα της κεραίας (AAS).....                                | 76 |
| <b>Εικόνα 53:</b> Τεχνική MIMO.....   | 77 |
| <b>Εικόνα 54:</b> Εξοικονόμηση ενέργειας.....   | 78 |
| <b>Εικόνα 55:</b> Πρωτόκολλο βασικής διαχείρισης KMP.....                                     | 81 |
| <b>Εικόνα 56:</b> Κλειδί κρυπτογράφησης κυκλοφορίας TEK.....                                  | 82 |
| <b>Εικόνα 57:</b> Φόρμα αποστολής κλειδιού.....   | 83 |
| <b>Εικόνα 58:</b> IMT–Advanced.....   | 84 |
| <b>Εικόνα 59:</b> LTE-Advanced.....   | 86 |
| <b>Εικόνα 60:</b> Τεχνική εικονικής πολλαπλής εκπομπής MBSFN.....                             | 87 |

## Ευρετήριο Πινάκων

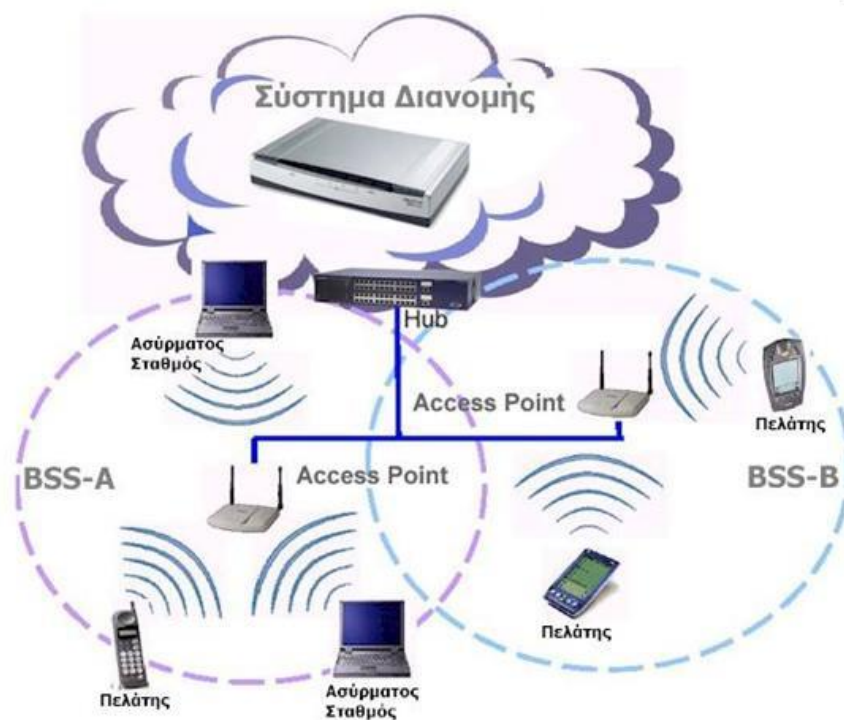
|   |    |
|---|----|
| <b>Πίνακας 1:</b> Η απόδοση του συστήματος σε μη διαφανή αναμετάδοση με την σταδιακή προσθήκη αναμεταδοτών.....                               | 41 |
| <b>Πίνακας 2:</b> Το σύνολο MCS και τα αντίστοιχα ποσοστά για τα δεδομένα του Mobile WiMAX και WiBro (Όπου (a) Downlink και (b) Uplink )..... | 61 |
| <b>Πίνακας 3:</b> υπηρεσίες παράδοσης δεδομένων, υπηρεσίες προγραμματισμού και παραδείγματα εφαρμογής τους.....                               | 64 |

# 1. Εισαγωγή

Μια από τις τεχνολογίες που υπόκεινται ταχυστάτη ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες, είναι αυτή των τηλεπικοινωνιών. Ως τηλεπικοινωνία θα μπορούσαμε να ορίσουμε την διαδικασία που ακολουθείται προκειμένου να μεταφερθεί η πληροφορία απ' τον ένα χρήστη στον άλλο σε μεγάλες αποστάσεις. Οι τηλεπικοινωνίες έκαναν την εμφάνισή τους από τα αρχαία πλέον χρόνια, με τη μορφή οπτικών και ακουστικών μηνυμάτων (σήματα καπνού, ακουστικά τύμπανα κ). Σπουδαίο ρόλο στην ανάπτυξη αυτή έπαιξε και η εισαγωγή του ηλεκτρισμού καθώς πλέον αποτελεί τεχνολογική επιστήμη. Έπειτα ακολούθησε η εφεύρεση του τηλέγραφου από τον Samuel Morse το 1854 καθώς και το τηλέφωνο το 1876 από τον Graham Bell. Από το 1950 κι έπειτα η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών καταλαμβάνει σημαντική θέση στην ζωή μας με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθώς και την ηλεκτρονική επεξεργασία της πληροφορίας. Σήμερα επικρατεί η ενσύρματη επικοινωνία, όπως η σταθερή τηλεφωνία και κατ'επέκταση οι επικοινωνίες που βασίζονται στο δίκτυο, καθώς και η ασύρματη επικοινωνία όπως η κινητή τηλεφωνία, οι δορυφορικές επικοινωνίες και τα ασύρματα δίκτυα υπολογιστών.

Η ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών καθώς και η ραγδαία εξάπλωση του διαδικτύου τα τελευταία χρόνια, έχουν ως ακόλουθο την απαίτηση για αύξηση του εύρους ζώνης από τον τελικό χρήστη. Η ευρυζωνικότητα αποτέλεσε μια σημαντική προοπτική για την επίτευξη μεταφοράς δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες. Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία ευρυζωνικών συστημάτων θεωρείται η ψηφιακή συνδρομητική γραμμή DSL (Digital Subscriber Line). Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί τις υπάρχουσες χάλκινες υποδομές τηλεφωνικών γραμμών με συνέπεια να υπάρχουν περιορισμοί στην απόδοση. Έτσι με τη χρήση οπτικών ινών αντί των χάλκινων καλωδίων, επιτυγχάνονται μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης, όμως αυτό συνεπάγεται σε δίκτυα με υψηλό κόστος και μεγάλο χρόνο εγκατάστασης.

Τα δίκτυα σταθερής ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης αποτελούν μια ιδιαίτερα ικανοποιητική οικονομικά λύση, κυρίως στις απομακρυσμένες περιοχές λόγω της απουσίας ενσύρματης πρόσβασης σε κάποιο τοπικό κέντρο. Τα ασύρματα δίκτυα, γνωρίζουμε ότι πρέπει να ακολουθούν κάποιες αρχές σχεδίασης προκειμένου τα προϊόντα διαφορετικών κατασκευαστών να είναι συμβατά μεταξύ τους και να μην υπάρχουν προβλήματα στην λειτουργία τους. Η υλοποίηση των δικτύων βασίζεται σε κάποια πρότυπα που θεσπίζει το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) και παίρνουν συνήθως κάποιο όνομα σχετικό με αυτόν. Έτσι και τα πρότυπα για την ασύρματη δικτύωση που έχουν επικρατήσει στη σημερινή αγορά είναι της μορφής IEEE 802.X. Αυτό που χαρακτηρίζει τα συγκεκριμένα δίκτυα είναι ο μικρός χρόνος και η απλότητα εγκατάστασης. Τα δίκτυα για τα οποία θα γίνει αναφορά, έχουν κυψελοειδή μορφή [2] [7] [10] [65].



**Εικόνα 1:** παράδειγμα κυψελοειδούς τοπικού δικτύου

## 1.1 Η πορεία ανάπτυξης της ασύρματης κινητής επικοινωνίας

Αρχικά η ιδέα της κυψελωτών δικτύων επικοινωνίας ξεκίνησε από τις Ηνωμένες Πολιτείες το 1947. Οι βασικές αρχές λειτουργίας ήταν σ' ένα αδημοσίευτο κείμενο του D.H.Ring που αφορούσε τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσαν να επικοινωνήσουν όσο το δυνατόν περισσότεροι κινητοί συνδρομητές σ' ένα σύστημα που θα χρειαζόνταν το λιγότερο δυνατό φάσμα ραδιοσυχνοτήτων. Παρόλο που τα κυψελωτά δίκτυα έκαναν την εμφάνιση τους στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα, η σημαντικότερη εξέλιξη τους έγινε τα τελευταία 20 χρόνια. Ανάλογα με εξελικτική τους πορεία τα δίκτυα χωρίζονται αντίστοιχα σε γενεές [1] [14].

Τα δίκτυα μηδενικής γενιάς <0G> αφορούν υπηρεσίες half duplex για χρήστες που κινούνται με αυτοκίνητα και οι οποίοι έπρεπε να πατούν ένα κουμπί όταν μιλούσαν, ενώ το υπόλοιπο διάστημα άκουγαν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το MTS (Mobile Telephone Service) που αναπτύχθηκε στο Saint Louis των ΗΠΑ το 1946. Το αρχικό αυτό στάδιο διήρκεσε πάνω από 40 χρόνια, μέχρι να περάσουν στα δίκτυα επόμενης γενιάς [1][66].



**Εικόνα 2:** Mobile Telephone System

Τα δίκτυα πρώτης γενιάς <1G> βασίστηκαν στα συστήματα μικροϋπολογιστών. Καινοτόμησαν με τη χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας για την αποκατάσταση της κλίσης και της ανάθεσης συχνοτήτων, ώστε να μειωθούν τα ενδεχόμενα ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής στην επικοινωνία. Η τεχνολογία των δικτύων αυτών θεωρείται ξεπερασμένη και στην Ελλάδα δεν χρησιμοποιήθηκε ποτέ. Το 1990 οι χρήστες αυτής της γενιάς αριθμούσαν 20 εκατομμύρια συνδρομητές παγκοσμίως [1] [15].

Τα συστήματα δεύτερης γενιάς <2G> χρησιμοποίησαν την ψηφιακή τεχνολογία για σηματοδότηση, επεξεργασία, κρυπτογράφηση και μετάδοση φωνής. Αφορούν δίκτυα με ρυθμούς μετάδοσης 9,6 Kbit/s. Τα δίκτυα αυτά χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, ανάλογα με την πολυπλεξία TDMA (Time Division Multiple Access) ή τον κώδικα CDMA (Code Division Multiple Access) για την πρόσβαση των χρηστών στο δίαυλο επικοινωνίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα του συστήματος TDMA είναι το GSM (Groupe Special Mobile), το οποίο έγινε πρότυπο το 1990. Λειτουργεί σε περιοχές συχνοτήτων 900, 1800 και 1900MHz ανάλογα με την υλοποίηση του. Χωρίζεται σε δυο υποπεριοχές συχνοτήτων μια για την εκπομπή και μια για την λήψη. Άλλα χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα συστήματα PDC και NADC τα οποία αναπτύχθηκαν μόνο στην Ιαπωνία και την Βόρεια Αμερική αντίστοιχα. Επίσης η πολυπλεξία CDMA χρησιμοποίησε το cdmaOne, το οποίο αναπτύχθηκε μόνο στην Αμερική και την Ασία. Με τα συστήματα δεύτερης γενιάς τροποποιείται πλέον ο τρόπος επικοινωνίας. Οι συνδρομητές μπορούν να επικοινωνούν και να λαμβάνουν δεδομένα εν κινήσει. Μια από τις υπηρεσίες που γνώρισε σημαντική ανάπτυξη κυρίως την δεκαετία του 90' είναι η υπηρεσία μηνυμάτων SMS (Short Message Service), η οποία αφορά την αποστολή σύντομων μηνυμάτων κειμένου μέχρι 160 χαρακτήρων και είχε ενσωματωθεί με το πρότυπο GSM. Είναι μια εμπορική χρεώσιμη υπηρεσία και αρκετά οικονομική για τον τελικό συνδρομητή [1][15][16][17].



**Εικόνα 3:** Συσκευή συστήματος δεύτερης γενιάς 2G.

Στα συστήματα δεύτερης γενιάς <2.5G> ανήκει το UMTS(W-CDMA) που είναι ουσιαστικά εξέλιξη του GSM, καθώς και το CDMA2000 το οποίο είναι εξέλιξη του cdmaOne. Το W-CDMA είναι πολύ πιο ανθεκτικό σε σχέση με το GSM , αλλά ο σχεδιασμός του δικτύου είναι αρκετά πιο δύσκολος και οι συσκευές είναι πιο πολύπλοκες.

Το CDMA2000 δίνει τη δυνατότητα στους παροχούς 2G να αναβαθμίσουν τα δίκτυα τους σε δυο φάσεις. Στην πρώτη έχουμε το πρότυπο 1X όπου επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων σε ταχύτητες που φθάνουν τα 144 kbps. Ενώ στη δεύτερη φάση έχουμε το πρότυπο 3X που επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων σε ταχύτητες που φθάνουν τα 2 Mbps καθώς και την παροχή προηγμένων multimedia υπηρεσιών [52].



**Εικόνα 4:** Σύστημα CDMA2000

Τα συστήματα τρίτης γενιάς <3G> ανήκουν στην οικογένεια προτύπων γνωστή ως IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000) από την ITU (International Telecommunication Union) το 1999 και παρέχουν υπηρεσίες δεδομένων με ρυθμούς μετάδοσης έως 14,4 Mbit/s στο downlink και 5,8 Mbit/s στο uplink. Το πρώτο σύστημα αυτής της γενιάς ήταν το i-mode το οποίο αντικαταστάθηκε από το UMTS. Αφορά συστήματα ασύρματων τεχνολογιών που επιτρέπουν τη μετάδοση φωνής και δεδομένων στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Η τρίτη γενιά μας προσφέρει υπηρεσίες που είναι αρκετά διαδεδομένες στις μέρες μας όπως: βιντεοκλίσεις σε πραγματικό χρόνο από το κινητό τηλέφωνο, υψηλές ταχύτητες ασύρματης μεταφοράς δεδομένων, video-streaming, υψηλής ποιότητας παιχνίδια που μπορούν να παίζονται σε πραγματικό χρόνο καθώς και υπηρεσίες εύρεσης θέσεως σε συνδυασμό με την τεχνολογία GPS [1][14][15][16][17].



**Εικόνα 5:** Συσκευή τρίτης γενιάς 3G

Τα συστήματα τέταρτης γενιάς <4G> προσφέρουν υπηρεσίες φωνής και δεδομένων με ρυθμούς μετάδοσης πολύ μεγαλύτερους από αυτούς που προσέφερε το 3G. Τα δίκτυα αυτά υλοποιούνται σε διαδικτυακή πλατφόρμα που βασίζεται στο IP πρωτόκολλο. Τα δίκτυα αυτά υιοθετούν την τοπολογία NGN (New Generation Networks), δηλαδή είναι κυψελοειδή δίκτυα χωρισμένα σε τομείς και αποτελούνται από δυο βασικά τμήματα. Το τμήμα που αναφέρεται στον τελικό συνδρομητή, περιλαμβάνει τον εξοπλισμό του CPE(Customer Premises Equipment), και το τμήμα που αναφέρεται στο Σταθμό Βάσης BS(Base Station),ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία των πελατών στη συγκεκριμένη περιοχή-κυψέλη και την προώθηση της κίνησης τους στα άλλα δίκτυα κορμού. Κάθε κυψέλη μπορεί να εξυπηρετεί συγκεκριμένο αριθμό χρηστών, ανάλογα με τους τεχνικούς περιορισμούς του σταθμού βάσης. Έτσι σε πυκνοκατοικημένες περιοχές η χωρητικότητα του δικτύου μπορεί να μεγαλώνει, μικραίνοντας τις κυψέλες και αυξάνοντας το πλήθος τους, ώστε να εξυπηρετηθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι χρήστες. Χαρακτηρίζονται και ως <3.5G> όπου η νέα γενιά εξασφαλίζει ασφάλεια στην επικοινωνία και ποιότητα υπηρεσίας σε διάφορα επίπεδα ανάλογα με τις απαιτήσεις των χρηστών. Επιπλέον υποστηρίζεται η κινητικότητα των χρηστών , καθώς αυτοί διασυνδέονται διαφανώς σε διαφορετικά δίκτυα πρόσβασης. Ως παράδειγμα αυτής της γενιάς αναφέρεται το IPTV, σύμφωνα με το οποίο ο χρήστης μπορεί να επιλέγει πιο πρόγραμμα θέλει να δει θέτοντας τα προσωπικά του κριτήρια, ενώ παράλληλα μπορεί να μιλήσει ή να "κατεβάξει" από το internet κ.α. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην κατηγορία των συστημάτων τέταρτης γενιάς ανήκει το LTE και το πρότυπο 802.16m για τα οποία θα γίνει αναφορά εκτενέστερα [1][14][15][16][17][64].



**Εικόνα 6:** Παράδειγμα τέταρτης γενιάς 4G



## 1.2 Τι είναι το WiMAX

Το πρότυπο WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) , ανήκει στην κατηγορία των ασύρματων δικτύων WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks). Αποτελεί εξελικτική πορεία δικτύων τέταρτης γενιάς και είναι γνωστό ως πρότυπο 802.16. Παρέχει κάλυψη σε μια εκτεταμένη περιοχή της οποίας η ακτίνα κυμαίνεται έως λίγες δεκάδες χιλιόμετρα, αλλά μπορεί να ξεπεράσει και τα 50 Km σε συνθήκες οπτικής επαφής. Η αρχική ιδέα ήταν η εγκατάσταση πομποδεκτών σε στέγες `ψηλών` κτηρίων οι οποίοι θα λειτουργούν ως σταθμοί βάσης και οι οποίοι θα είναι συνδεδεμένοι στο διαδίκτυο. Ο κάθε σταθμός θα χρησιμοποιεί την τεχνολογία WiMAX, ώστε να στέλνει και να λαμβάνει δεδομένα προς τις άλλες κεραιές άλλων συνδρομητών. Έτσι θα δημιουργούσε ένα ασύρματο δίκτυο δίνοντας πρόσβαση σε όλους. Η ιδέα αυτή υιοθετήθηκε από την IEEE το 2003 για να καλύψει τις ανάγκες ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης. Προορισμός του είναι να γίνει μια παγκοσμίως διαθέσιμη τεχνολογία αφού η βάση του αναγνωρίζεται ως πρότυπο αναφοράς από το ETSI (European Telecommunication and Standards Institute) για το αντίστοιχο ευρωπαϊκό HIPERMAN (High Performance Radio MAN) αλλά και το αντίστοιχο WiBro (Wireless Broadband) που αναπτύσσεται στην Κορέα [1].

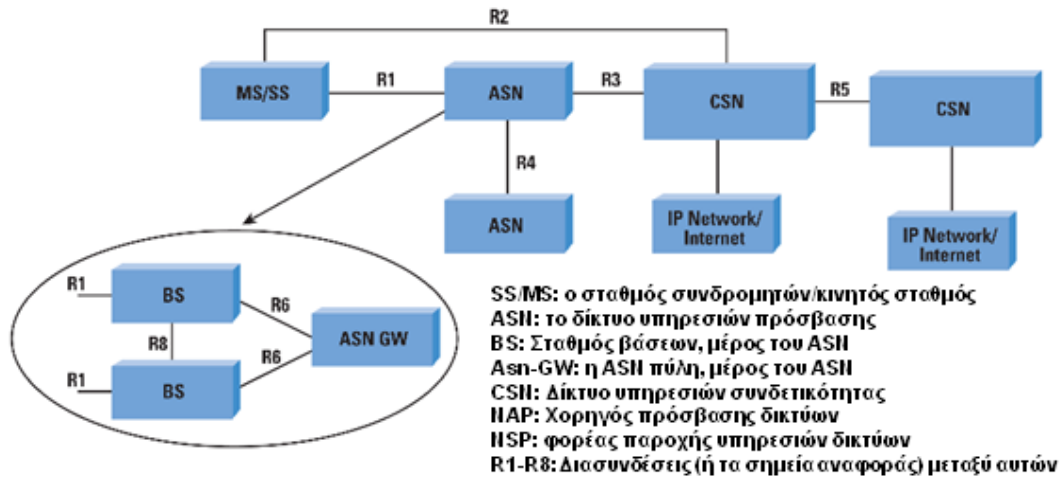
## 1.3 WiMAX Forum

Την εξέλιξη του WiMAX ξεκίνησε και συνεχίζει να προωθείται από το WiMAX Forum, που σήμερα αριθμεί πάνω από 500 μέλη στη λίστα των οποίων ανήκουν μεγάλα ονόματα όπως Nokia, Vodafone, Cisco Systems και Verizon. Είναι μία μη κερδοσκοπική οργάνωση που δημιουργήθηκε το 2003 και ιδρυτές του είναι μεγάλες εταιρίες όπως Intel Alvarion, ATT, Array Com, Nortel, Motorola ,Samsung κ.α. Τον Ιανουάριο του 2005 το WiMAX Forum αποτέλεσε την ομάδα Network Working Group (NWG) για να καθορίσει το συμπληρωματικό end-to-end αρχιτεκτονική δικτυού. Σκοπός του forum είναι να προάγει και να πιστοποιεί τη συμβατότητα και τη λειτουργικότητα των προϊόντων που προσφέρουν ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση καθώς επίσης και να πιστοποιεί ότι λειτουργεί στη βάση που καθορίζουν τα πρότυπα. Καθώς επίσης και την προώθηση των προϊόντων στην αγορά. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων υπάρχουν ανεξάρτητα εργαστήρια πιστοποίησης που διαχειρίζονται τον έλεγχο διόρθωσης και διαλειτουργικότητας των πιστοποιημένων προϊόντων που βασίζονται στις τροποποιήσεις του IEEE 802.16 [1] [7] [12].



**Εικόνα 7:** Το λογότυπο του WiMAX Forum

Το WiMAX Forum έχει καθορίσει μια αρχιτεκτονική που καθορίζει πώς ένα δίκτυο WiMAX συνδέεται με άλλα δίκτυα και ποικίλες άλλες πτυχές ώστε να το ενεργοποιήσει και να το επικυρώσει. Μια επισκόπηση της αρχιτεκτονικής αυτής δίνεται παρακάτω:



**Εικόνα 8:** Αρχιτεκτονική WiMAX δικτύου

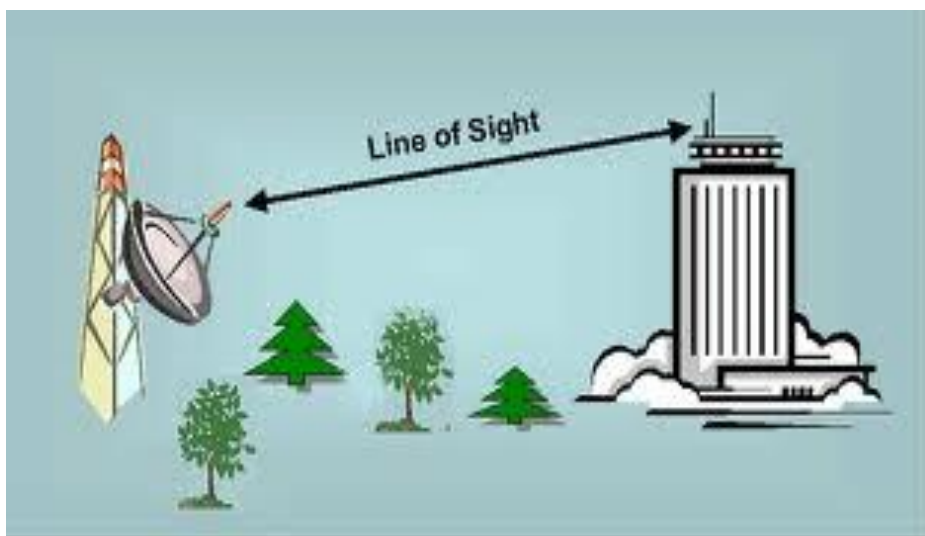
## 2. Το πρότυπο IEEE 802.16 και η εξέλιξη του

Από το 1998 μεγάλες εταιρίες ξεκίνησαν να αναπτύσσουν και να προσφέρουν προϊόντα για ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση. Προκειμένου τα προϊόντα αυτά να ακολουθούν το κανόνες του συγκεκριμένου προτύπου. Το 1999 αναπτύχθηκε μια ομάδα εργασίας στα πλαίσια του οργανισμού IEEE 802. Το πρότυπο αφορούσε ασύρματα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής WMAN για συχνότητες 10-66 GHz [1].

### 2.1 IEEE 802.16-2001

Το πρώτο πρότυπο τυποποιήθηκε ως 802.16-2001 και εκδόθηκε το 2002 σε συχνότητες 10-66 GHz, μόνο σε συνθήκες οπτικής επαφής LOS (Line Of Sight) εξαιτίας ισχυρών απωλειών που εμφανίζονται κυρίως σε υψηλές συχνότητες.

Με τον όρο LOS εννοούμε μια ζεύξη οπτικής επαφής, όπου απαιτείται το 60% της ακτίνας της πρώτης ζώνης Fresnel που δεν πρέπει να έχει κάποιο εμπόδιο στην επαφή. Αυτό εξαρτάται κυρίως από την συχνότητα λειτουργίας και την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη [1].

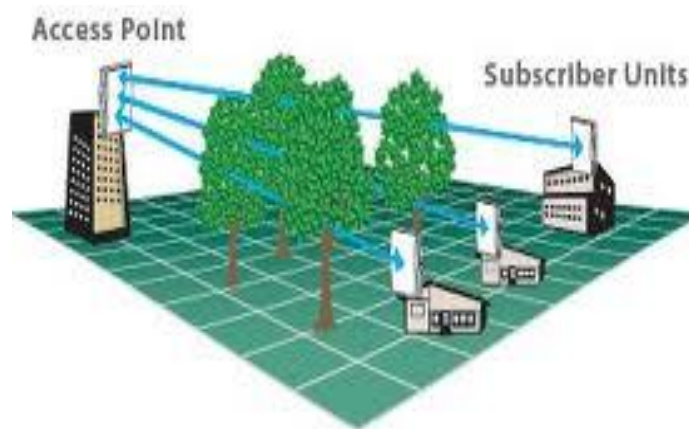


**Εικόνα 9:** Διάδοση σε συνθήκες οπτικής επαφής

## 2.2 IEEE 802.16a

Τον Απρίλιο του 2003 τυποποιήθηκε το πρότυπο IEEE 802.16a σε συχνότητες 2 - 11GHz, για επικοινωνίες μη οπτικής επαφής NLOS (Non Line of Sight) και επομένως σε περιβάλλον με ισχυρές απώλειες λόγω πολυδιαδρομικής παρεμβολής.

Με τον όρο NLOS (Non Line of Sight) εννοούμε μια ζεύξη μη οπτικής επαφής, στην οποία υπάρχει εμπόδιο εντός της ζώνης Fresnel κι έτσι να δημιουργούνται προβλήματα σηματοδότησης στη διάρκεια επικοινωνίας. Γι αυτό η παροχή υπηρεσίας είναι εφικτή μόνο σε μικρές αποστάσεις (έως 2 km) από το σταθμό βάσης [1][50].

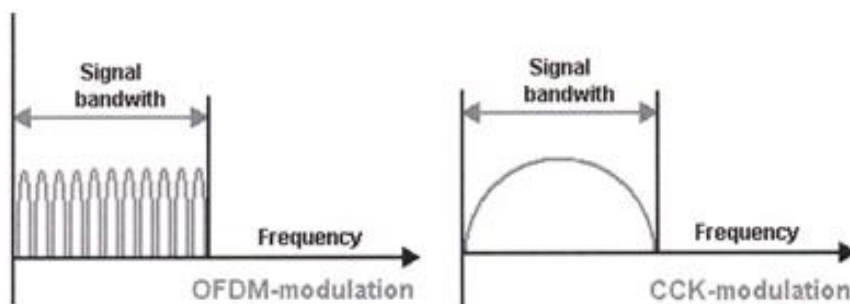


**Εικόνα 10:** Διάδοση σε συνθήκες μη οπτικής επαφής

## 2.3 IEEE 802.16b

Το πρότυπο αυτό επικυρώθηκε το 1999 με ρυθμό μετάδοσης 11Mbps και ως μέθοδο προσπέλασης στο μέσο χρησιμοποιεί την τεχνική CSMA/CA. Λόγω αυτού όμως επιτυχαίνει μέχρι 5Mbps ρυθμό μετάδοσης. Στην πραγματικότητα όμως η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιεί είναι η CCK (Complementary Code Keying).

Η τεχνική αυτή αποτελείται από ένα σύνολο 64 μπιτων λέξεων κώδικα που χρησιμοποιούνται για να κωδικοποιήσουν τα στοιχεία ώστε να πετύχουν ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων της τάξης των 5.5 ή 11Mbps στο φάσμα συχνοτήτων των 2.4GHz. Οι λέξεις αυτές με κάποιες μοναδικές μαθηματικές ιδιότητες που έχουν, διακρίνονται μεταξύ τους από τον δέκτη ακόμα και όταν υπάρχει θόρυβος και πολυδιαδρομική παρεμβολή. Ουσιαστικά η CCK χρησιμοποιεί όλο το εύρος ζώνης συχνοτήτων του κάθε υποκαναλιού για να διαμορφώνει τα σήματα του.



**Εικόνα 11:** Διαφορά τεχνικής OFDM και CCK

Έτσι το υποπρότυπο αυτό μπορεί να καλύψει μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και με διαφορετικούς τύπους μετάδοσης δεδομένων. Αυτός είναι και ο λόγος που παρέχει κάλυψη πολυμεσικών εφαρμογών όπως ήχο, video κ.α.[1].

#### **2.4 IEEE 802.16c**

Τον Ιανουάριο του 2003 δημοσιεύτηκε το πρότυπο IEEE 802.16c το οποίο βασίζονταν κυρίως στο IEEE 802.16-2001. Αναπτύχθηκε για ασύρματα δίκτυα σε ζώνες συχνοτήτων μεταξύ 10 και 66 GHz. Οι συχνότητες της τάξης των 66 GHz ήταν εφικτές μόνο σε συνθήκες οπτικής επαφής [1].

#### **2.5 IEEE 802.16d**

Το πρότυπο αυτό αναπτύχθηκε το 2003 για την βελτίωση των ήδη υπάρχοντων προβλημάτων που υπήρχαν μέχρι τότε που αφορούσαν κυρίως θέματα ασφάλειας και ποιότητας μεταξύ των σταθμών βάσης. Λειτουργεί πλέον σταθερή πρόσβαση κι έτσι το πρότυπο αυτό παρέχει ελάχιστη καθυστέρηση για την παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών [1].

#### **2.6 IEEE 802.16e-2004**

Το πρότυπο αυτό δημιουργήθηκε το 2004, ενώ τα πρώτα πιστοποιημένα προϊόντα εμφανίστηκαν το 2006. Αφορά δίκτυα σε μητροπολιτική περιοχή και παρέχουν σταθερή ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση. Οι αποστάσεις που μπορεί να καλύψει είναι έως 30 km , με ρυθμούς μετάδοσης που δεν υπερβαίνουν τα 10 Mbps σε κανάλι λειτουργίας 3.5 MHz. Υποστηρίζει περιβάλλοντα LOS και NLOS. Το πρότυπο αυτό αναφέρεται και ως σταθερό WiMAX και εντάσσεται στις τεχνολογίες νέας γενιάς καθώς παρέχονται οι νέες υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και απαιτούν ελάχιστο εύρος ζώνης. Προβλέπει παροχή υπηρεσίας οπτικής και μη οπτικής επαφής.

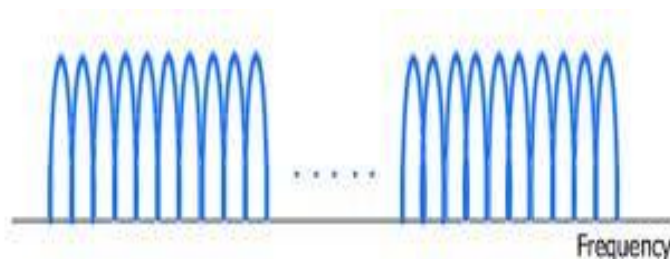
Η τεχνική που χρησιμοποιεί είναι η πολυπλεξία ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Ο εξοπλισμός που λειτουργεί στις μη δανειοδοτημένες ζώνες συχνότητων του προτύπου χρησιμοποιεί την τεχνική αμφίδρομης μετάδοσης με χρονική διαίρεση TDD (Time Division Duplexing), ενώ στις αδειοδοτημένες ζώνες είτε TDD είτε αμφίδρομη μετάδοση με διαχωρισμό συχνότητων FDD (Frequency Division Duplexing).

Η πολυπλεξία με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας OFDM είναι η ταυτόχρονη μετάδοση πολλών φερόντων μέσα από ένα κανάλι επικοινωνίας. Αποτελεί βελτιστοποίηση της τεχνικής FDM (Frequency Division Multiplexing), η οποία χρησιμοποιεί λιγότερα φέροντα πακέτα και σε διαφορετική συχνότητα. Σε σύγκριση με την FDM η OFDM αυξάνει δραστικά την φασματική απόδοση του διαύλου και μειώνει εντυπωσιακά τα προβλήματα που επιφέρει το φαινόμενο της πολυόδευσης. Η διαμόρφωση αυτή επιδιώκει την επίτευξη υψηλού ρυθμού μετάδοσης και παράλληλα αντιμετώπιση τυχών παρεμβολών στη σύνδεση. Αυτό επιτυγχάνεται με την μετάδοση και άλλων διαφορετικών φερόντων εκτός από αυτά των δεδομένων, όπως τα σταθερά υποφέροντα και τα υποφέροντα φύλαξης τα οποία είναι υπεύθυνα για τον συγχρονισμό του πομπού και του δέκτη και την διόρθωση σφαλμάτων.

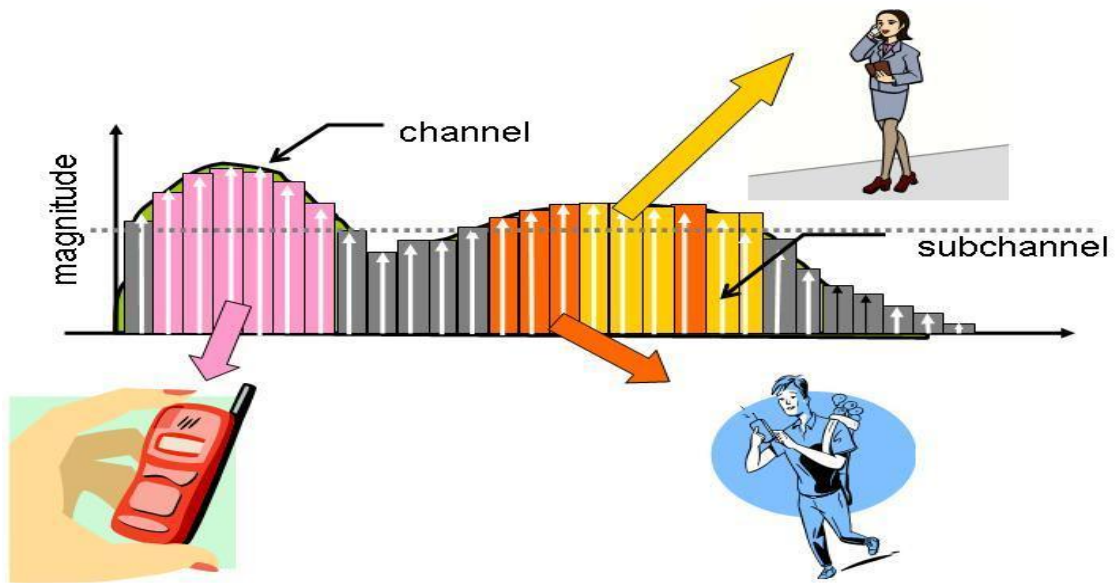
Στην OFDM μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μέχρι 256 υποφέροντα στο σταθερό WiMAX σε δίαυλο 3,5 MHz ή 7 MHz. Ενώ στο κινητό WiMAX, 512 ή 1024 ή 2048 υποφέροντα σε δίαυλο 5MHz ή 10MHz.

Στο σχεδιασμό ενός συστήματος OFDM λαμβάνονται υπόψη κάποιες παράμετροι, όπως το πλήθος των υποφερόντων που θα μεταδοθούν, το μήκος τους, η απόσταση μεταξύ τους και ο τύπος της διαμόρφωσης του καθενός. Οι παράμετροι αυτοί επηρεάζουν το εύρος ζώνης, το ρυθμό μετάδοσης και τις χρονικές καθυστερήσεις λόγω του φαινομένου της πολυόδευσης [1][49].

Από τεχνικής άποψης σε κάθε τερματικό των συνδρομητών αποδίδονται χρονοθυρίδες (timeslots) προς εκπομπή. Στο σταθερό WiMAX μια μόνο τερματική συσκευή μπορεί να είναι ενεργή στην διάρκεια μιας χρονοθυρίδας. Ο σταθμός βάσης αναθέτει κάθε φορά στα ενεργά τερματικά συγκεκριμένες χρονοθυρίδες. Η ανάθεση γίνεται ανάλογα με τον όγκο και την προτεραιότητα των δεδομένων που μεταδίδονται.

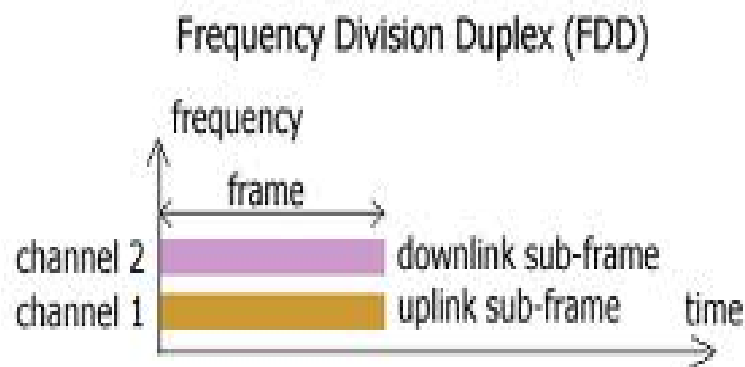


**Εικόνα 12:** Φέροντα στην πολυπλεξία OFDM



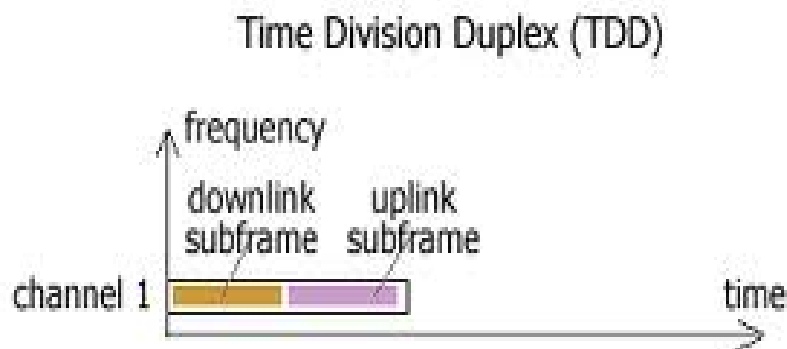
**Εικόνα 13:** Τεχνική Πολυπλεξίας OFDM στο 802.16-2004

Σύμφωνα με την τεχνική αμφίδρομης μετάδοσης με διαχωρισμό συχνοτήτων FDD, η εκπομπή από και προς το σταθμό βάσης διαχωρίζεται στο πεδίο των συχνοτήτων, σε δυο ανεξάρτητους διαύλους που κυμαίνονται στα 3,5 MHz ή 7 MHz. Με τη λογική αυτή, ο ένας δίαυλος χρησιμοποιείται για την κατερχόμενη κίνηση downlink από το σταθμό βάσης προς τα τερματικά και ο άλλος για την ανερχόμενη κίνηση uplink. Ανάμεσα από την πάνω και κάτω ζώνη παρεμβάλλεται ένα συχνοτικό διάστημα, για την αποφυγή πιθανών παρεμβολών. Η ενδιάμεση αυτή ζώνη φύλαξης είναι περίπου στα 100 MHz. Το κάθε τερματικό μεταδίδει σε διαφορετικό χρόνο καταλαμβάνοντας έτσι μια χρονοθυρίδα.



**Εικόνα 14:** Τεχνική αμφίδρομης μετάδοσης με διαχωρισμό συχνοτήτων

Σύμφωνα με την τεχνική αμφίδρομης μετάδοσης με χρονική διαίρεση TDD, η οποία είναι νεώτερη από την FDD, η εκπομπή από και προς το σταθμό βάσης διαχωρίζεται χρονικά σ' ένα μόνο δίαυλο εκπομπής και λήψης σε εύρος που κυμαίνεται στα 3,5 MHz ή 7 MHz για το σταθερό WiMAX, ενώ για το κινητό που αναφέρεται παρακάτω 5 MHz ή 10 MHz. Ο δίαυλος χωρίζεται σε χρονοθηρίδες, οι οποίες καθορίζονται από το σταθμό βάσης για εκπομπή και λήψη, βάση συγκεκριμένου σχεδίου το οποίο ακολουθούν υποχρεωτικά όλα τα τερματικά που μεταδίδουν. Για να μη συμβεί σύγκρουση δεδομένων λόγω των διαφορετικών κατευθύνσεων που ακολουθούν, μεσολαβεί ένας χρονικός διαχωρισμός ασφαλείας, το TTG (Transmit Transition Gap). Το κενό αυτό παρέχει τον ανάλογο χρόνο στο σταθμό βάσης ώστε να αλλάξει τη διαμόρφωση από πομπού σε δέκτη. Στο διάστημα αυτό ο σταθμός βάσης και οι συνδρομητικοί σταθμοί δεν εκπέμπουν διαμορφωμένα δεδομένα αλλά ενεργοποιούν τις κεραιές του πομπού ή του δέκτη, ανάλογα. Έπειτα ο σταθμός βάσης λαμβάνει τα δεδομένα και ελέγχει τα πρώτα σύμβολα της άνω ζώνης. Το κενό διάστημα που υπάρχει ανάμεσα από την uplink και downlink λέγεται RTG (Receive Transition Gap) [1].



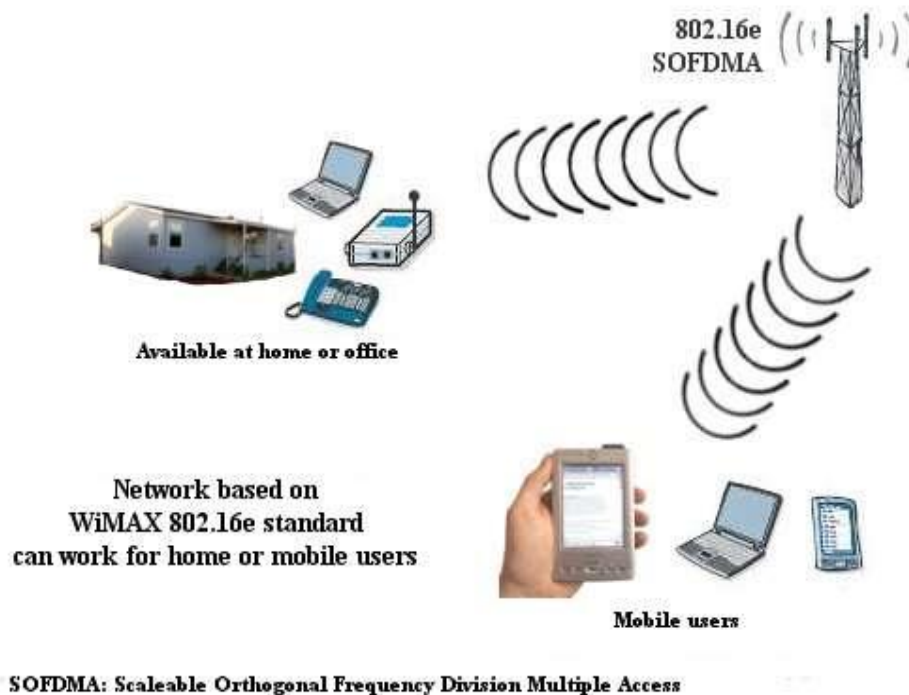
**Εικόνα 15:** Τεχνική αμφίδρομης μετάδοσης με χρονική διαίρεση



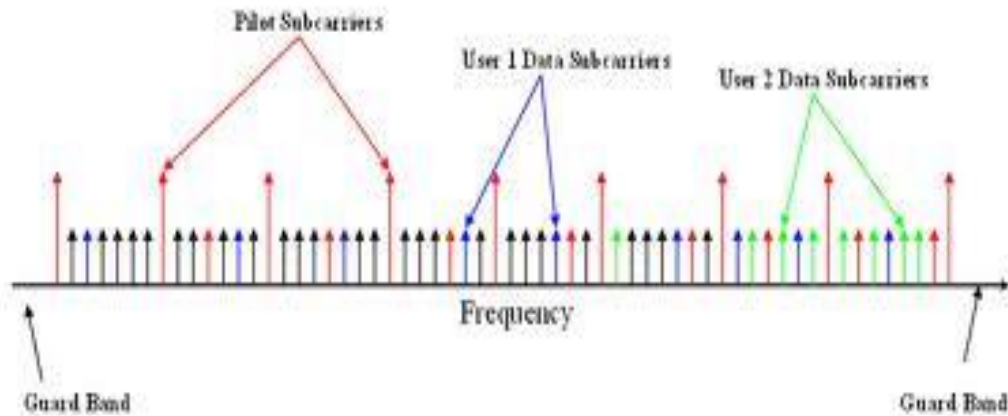
## 2.7 IEEE 802.16e-2005

Το Δεκέμβριο του 2005 εκδόθηκε το υποπρότυπο IEEE 802.16e-2005 ώστε να βελτιώσει την ποιότητα μετάδοσης. Το πρότυπο αυτό αναφέρεται και ως κινητό WiMAX. Βασικό του χαρακτηριστικό είναι η κινητικότητα των χρηστών μέσα στο δίκτυο, αντίστοιχη μ' αυτή της κινητής τηλεφωνίας. Γίνεται δηλαδή εφικτή η παροχή ασύρματης ευρυζωνικότητας σε κινητά τερματικά, με ρυθμούς που φτάνουν σχεδόν το σταθερό WiMAX. Το εύρος συχνοτήτων κυμαίνεται από 5GHz έως και 66GHz [1].

Η τεχνική που χρησιμοποιεί είναι η TDD, και η διαυλοποίηση γίνεται με διαύλους των 5MHz και 10 MHz. Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης είναι η SOFDMA (Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access), σύμφωνα με την οποία υποστηρίζονται περισσότερες υπηρεσίες και χρήστες από κάθε σταθμό βάσης. Επίσης, παρέχονται ισχυρότερες τεχνικές κρυπτογράφησης και πιστοποίησης ταυτότητας χρήστη. Επιπρόσθετα ενσωματώνονται διαδικασίες μεταπομπής από τον ένα σταθμό στον άλλο και επιπλέον παρέχεται διαλειτουργικότητα σε εξοπλισμό του δικτύου και στα τερματικά διαφορετικών κατασκευαστών [1][51].



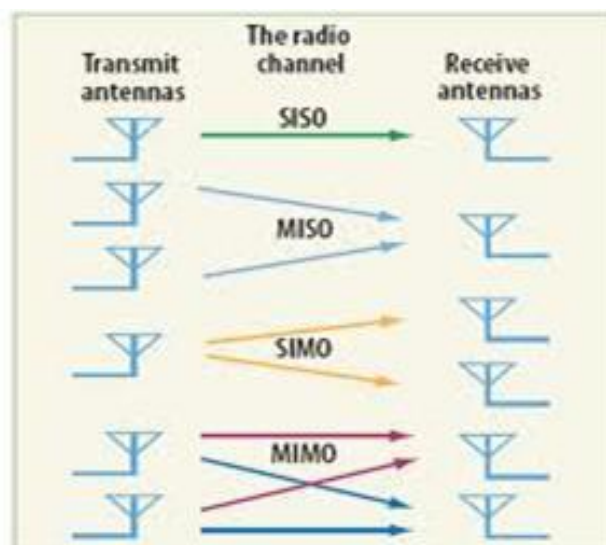
**Εικόνα 16:** Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης SOFDMA



**Εικόνα 17:** Φέροντα στην τεχνική SOFDMA

Η τεχνική πολυπλεξίας με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας SOFDMA επιτρέπει στα σήματα να διαιρεθούν σε πολλαπλά υποφέροντα sub-channels χαμηλής ταχύτητας, έτσι ώστε να μειώσει τις πολλαπλές διαδρομές του σήματος. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τη διόρθωση των λαθών που παρουσιάζονται στα υποφέροντα καθώς είναι πιο ευαίσθητη στη μετατόπιση της συχνότητας και το θόρυβο που οδηγούν στην παρεμβολή των υποφερόντων [1][53].

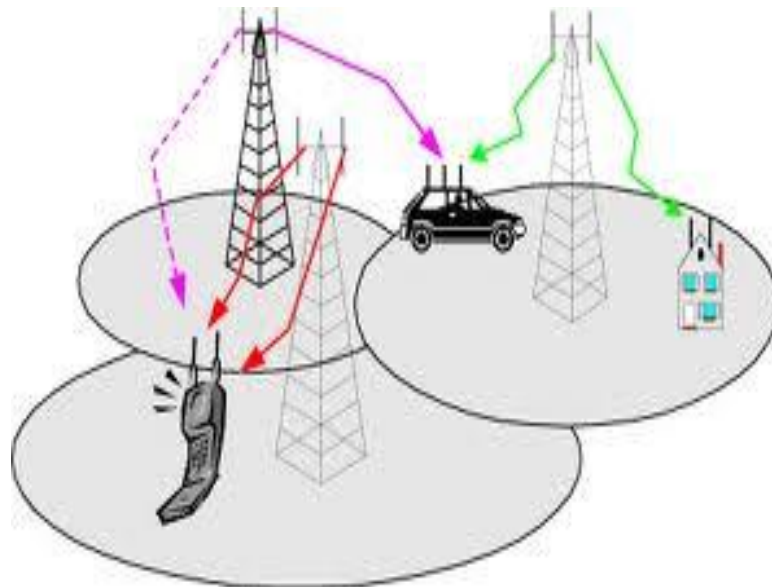
Τέλος ένα πολύ βασικό πλεονέκτημα αυτού του υποπροτύπου είναι η χρήση προσαρμοστικών κεραιοσυστημάτων και δυνατότητα χρήσης τεχνικών MIMO (Multiple Input and Multiple Output). Με σκοπό την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, βελτίωση της ποιότητας συνδέσεων, αύξηση της απόστασης για επικοινωνία χωρίς οπτική επαφή και εξάλειψη των προβλημάτων πολυδιάχυσης. Συμφώνα με την τεχνική αυτή υπάρχουν πολλά κεραιοσυστήματα σε πομπό και δέκτη, με πολλαπλές κεραίες.



**Εικόνα 18:** Κεραιοσυστήματα πολλαπλών εισόδων – εξόδων

Από τεχνικής άποψης, η λήψη των δεδομένων γίνεται διαφορετικά, καθώς ο σταθμός και το τερματικό διαθέτουν πολλαπλά κεραιοσυστήματα, που μπορούν να συνδέονται με τον ίδιο ή διαφορετικούς πομποδέκτες, από τους οποίους εκπέμπει και λαμβάνει ταυτόχρονα από την ίδια ροή, από και προς τον σταθμό βάσης. Η διαφορετική θέση των κεραιών αποσκοπεί στην καλύτερη λήψη του σήματος και ονομάζεται χωρικός διαφορισμός. Ο διαφορισμός λειτουργεί ουσιαστικά ως διακόπτης που επιλέγει το ισχυρότερο σήμα και το προσθέτει στην είσοδο των κεραιών.

Στα σύγχρονα κεραιοσυστήματα MIMO οι σταθμοί και τα τερματικά διαθέτουν από μόνα τους πολλαπλά κεραιοσυστήματα για εκπομπή και λήψη ταυτόχρονα από την ίδια ροή. Με την εφαρμογή των τεχνικών MIMO έχουμε σημαντική αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, βελτίωση της ποιότητας των ζεύξεων και αύξηση της απόστασης για επικοινωνία χωρίς οπτική επαφή [1].



**Εικόνα 19:** Κεραιοσυστήματα MIMO

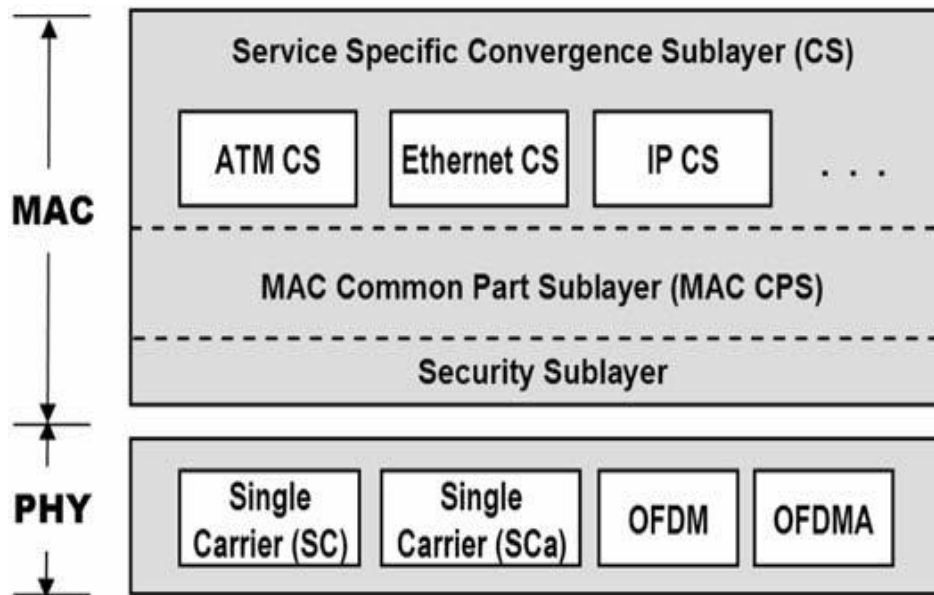
## 2.8 IEEE 802.16/16e

Το πρότυπο αυτό αποτελείται από το φυσικό (PHY) επίπεδο και το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC). Όπως φαίνεται και στο σχήμα, το στρώμα MAC του 802,16 μπορεί να καταταμηθεί περαιτέρω σε περισσότερα υποστρώματα, το υπόστρωμα σύγκλισης CS (Convergence Sublayer), το κοινό υπόστρωμα MAC CPS (Common Part Sublayer) και το υπόστρωμα ασφαλείας.

Με την άφιξη των δεδομένων SDU(Service Data Units) από το επίπεδο δικτύου, το υπόστρωμα σύγκλισης (το πρώτο στο MAC) ταξινομεί τα SDUs και τα τοποθετεί στην κατάλληλη σύνδεση. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το CS είναι συγκεκριμένη υπηρεσία, ώστε να συνδεθούν με τα πρωτόκολλα υψηλότερων επιπέδων.

Το υποεπίπεδο MAC CS είναι υπεύθυνο για τις coreMACfunctions, την διαχείριση σύνδεσης, την ποιότητα υπηρεσίας QoS και τις ενέργειες ARQ. Το υπόστρωμα ασφαλείας παρέχει κρυπτογράφηση / αποκρυπτογράφηση, πιστοποίηση και ασφαλή λειτουργία ανταλλαγής δεδομένων. Σύμφωνα με το πρότυπο 802.16, η σύνδεση μεταξύ του σταθμού βάσης και των σταθμών stationMACpeers για τη κυκλοφορία υπηρεσιών ορίζεται ως μονής κατεύθυνσης. Στο συγκεκριμένο υποπρότυπο η ροή είναι μονόδρομη και αναφέρεται ως MAC SDUs και αφορά μια σύνδεση στην οποία παρέχεται συγκεκριμένο QoS. Το 16-bit αναγνωριστικό σύνδεσης CID (Connection Identifier) χρησιμοποιείται για να ορίσει μια συγκεκριμένη σύνδεση στο δίκτυο, ενώ το αναγνωριστικό ροής υπηρεσίας SFID (Service Flow Identifier) μας βοηθά να αντιστοιχηθούν οι παράμετροι QoS που αφορούν την κάθε σύνδεση. Το wireless MAN-CS λειτουργεί στο φάσμα 10-66 Ghz σε συνθηκές οπτικής επαφής (Los).

Σε αντίθεση με άλλα ασύρματα πρότυπα, το χαρακτηριστικό αυτού του προτύπου είναι η στενή σύζευξη μεταξύ του φυσικού και MAC επιπέδου. Πιο συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός QoS και η κατανομή εύρους ζώνης που εκτελούνται στο MAC CPS καθώς επίσης και η τοπολογία του δικτύου, εξαρτώνται άμεσα από τις παραμέτρους του φυσικού επιπέδου. Για παράδειγμα η τεχνολογία του φυσικού επιπέδου Wireless MANOFDMA που ορίζεται για τα πρότυπα 802.16 σε περιβάλλον NLOS μπορεί να υποστηρίξει μόνο ένα hop σε PMP (point-to-Multipoint) τοπολογία, όπου ο σταθμός βάσης θα είναι υπεύθυνος από την αρχή μέχρι το τέλος για την διαχείριση της ροής και τον συντονισμό των άλλων κινητών σταθμών, ανεξάρτητα αν η επικοινωνία μεταξύ δυο MSs που συνδέονται άμεσα με το σταθμό βάσης ή μ' έναν απομακρυσμένο σταθμό. Όπως και να χει η κυκλοφορία ελέγχεται από το σταθμό βάσης [12][22].



Εικόνα 20: Πρωτόκολλο IEEE 802.16/16e

## 2.9 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην εξέλιξη του προτύπου 802.16. Αρχικά το πρότυπο 802.16-2001 που λειτουργεί μόνο σε συνθήκες οπτικής επαφής LOS, το πρότυπο IEEE 802.16a για επικοινωνίες μη οπτικής επαφής NLOS. Έπειτα το πρότυπο IEEE 802.16b με ρυθμό μετάδοσης 11Mbps και τεχνική διαμόρφωσης την CCK (Complementary Code Keying). Επιπλέον το πρότυπο IEEE 802.16c για ασύρματα δίκτυα σε ζώνες συχνοτήτων μεταξύ 10 και 66 GHz και το πρότυπο IEEE 802.16d για την βελτίωση των ήδη υπάρχοντων προβλημάτων που υπήρχαν μέχρι τότε που αφορούσαν κυρίως θέματα ασφάλειας και ποιότητας μεταξύ των σταθμών βάσης. Έπειτα το πρότυπο IEEE 802.16e-2004 που υποστηρίζει περιβάλλοντα LOS, NLOS και αναφέρεται και ως σταθερό WiMAX. Εντάσσεται στις τεχνολογίες νέας γενιάς καθώς παρέχονται οι νέες υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, η τεχνική που χρησιμοποιεί είναι η πολυπλεξία ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας OFDM. Επίσης το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 που αναφέρεται και ως κινητό WiMAX. Χρησιμοποιεί την τεχνική SOFDMA και προκειμένου να αυξήσει το ρυθμό μετάδοσης και τις αποστάσεις του δικτύου χρησιμοποιεί τα προσαρμοστικά κεραιοσυστήματα MIMO. Τέλος το πρότυπο 802.16/16e του οποίου το στρώμα MAC κατανέμεται περαιτέρω σε περισσότερα υποστρώματα, το υπόστρωμα σύγκλισης (CS), το κοινό υπόστρωμα MAC (MAC CPS) και το υπόστρωμα ασφαλείας.

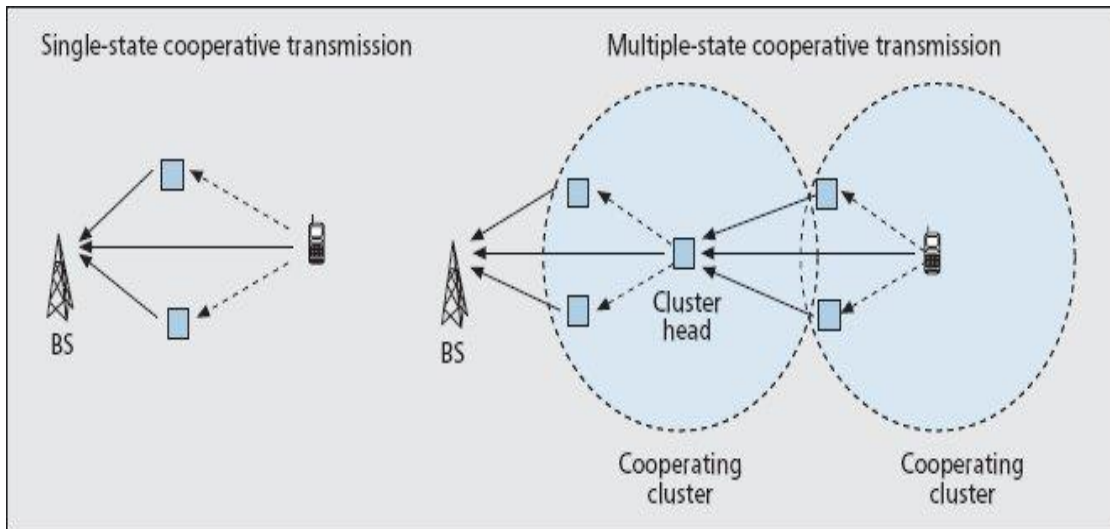
### **3. IEEE 802.16j ΔΙΚΤΥΑ MMR**

#### **3.1 Εισαγωγή στο IEEE 802.16j**

Αν και τα προβλήματα των μέχρι τότε δικτύων ήταν πολλά, παρ' όλα αυτά δημιουργήθηκε μια ομάδα εργασίας που ως στόχο είχε να επεκτείνει το πρότυπο 802.16e-2005. Το νέο πρότυπο καλείται IEEE 802.16j, αναφέρεται και ως 16j. Δημιουργήθηκε τον Μάρτιο του 2006, κυκλοφόρησε τον Μάιο του 2008 και επικυρώθηκε επίσημα στις αρχές του 2009. Ουσιαστικά τροποποιεί το τρέχον πρότυπο 802.16e, χρησιμοποιεί τον αέρα για διεπαφή σε ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση, με σκοπό την υποστήριξη κινητής multihop αναμετάδοσης MMR (Mobile Multi-hop Relay). Παρέχει δηλαδή ασύρματη συνδεσιμότητα πολλαπλών hop, όπου η κυκλοφορία μεταξύ ενός σταθμού βάσης BS (Base Station) και του σταθμού συνδρομητή SS (Subscriber Station) μπορεί να μεταδοθεί μέσω ενός σταθμού αναμετάδοσης RSS (Relay Subscriber Station) χαμηλού κόστους, ώστε να επεκταθεί το εύρος του δικτύου και να έχουμε την βέλτιστη ποιότητα (QoS) με οικονομικό και αποδοτικό τρόπο. Το σύστημα αυτό επιτρέπει στους κινητούς σταθμούς να επικοινωνούν μ' ένα σταθμό βάσης, μέσω ενδιάμεσου σταθμού αναμετάδοσης. Σκοπός της ομάδας εργασίας 802.16j δεν είναι να τυποποιήσει νέο κυψελοειδές multihop δίκτυο, αλλά να υποστηρίξει κινητή αναμετάδοση MMR στο παρόν ασύρματο ευρυζωνικό δίκτυο με βάση το WiMAX. Χρησιμοποιεί την τεχνική πολυπλεξίας PMP OFDMA και τα προσαρμοστικά κεραιοσυστήματα MIMO. Θα πρέπει να ανταγωνιστεί δίκτυα 3G ώστε να καλύψει τις ανάγκες των χρηστών για κινητικότητα [9] [3] [5] [6] [11] [12].

#### **3.2 Δίκτυα MCNs 802.16j**

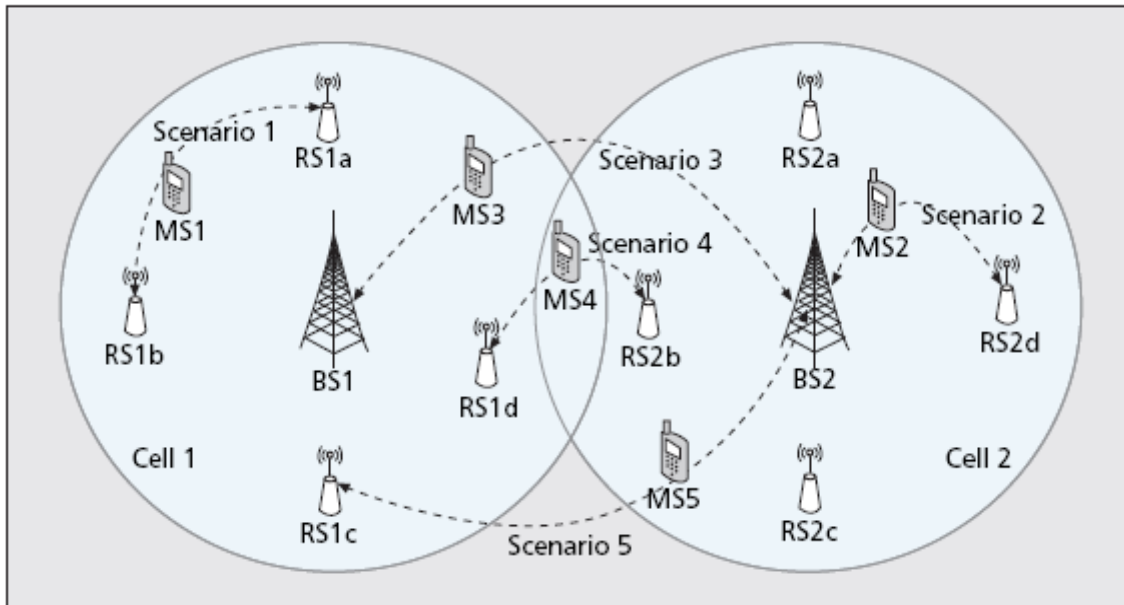
Η ιδέα να υπάρξουν μικρές κυψέλες μας παραπέμπει στο ότι οι σταθμοί βάσης θα είναι μεν αποδοτικότεροι καθώς ο αριθμός των χρηστών που θα εξυπηρετούν θα είναι μικρότερος και σαφώς οι χρήστες θα είναι πιο ευχαριστημένοι. Μειονεκτεί όμως στο ότι το κόστος δικτύου θα είναι υψηλότερο καθώς ο παροχέας θα πρέπει να πληρώνει για το χώρο της κεραίας του το ενσύρματο backhaul για το δίκτυο, αλλά και τον αντίστοιχο εξοπλισμό. Έτσι λοιπόν προτάθηκε μια πιο ελκυστική στρατηγική, να τοποθετηθούν σταθεροί αναμεταδότες σε κάθε κυψέλη, σκοπός τους να ενισχύουν την επικοινωνία μεταξύ του σταθμού βάσης BS και του απομακρυσμένου σταθμού MS και αντίστροφα. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται κυψελωτά MCNs (multihop cellular networks). Στα δίκτυα αυτά, μπορεί η μετάδοση να γίνεται μεταξύ σταθμού βάσης και αναμεταδοτών ή μεταξύ δυο διαφορετικών αναμεταδοτών. Οι πρόσθετες αυτές μεταβιβάσεις προκαλούν σοβαρά ring-rong προβλήματα και επιβαρύνουν τη σηματοδότηση. Στο σύστημα αυτό, ο κάθε απομακρυσμένος σταθμός θεωρείται ότι είναι σε θέση να συνδεθεί μ' έναν άλλο σταθμό, ώστε να σχηματίσουν ένα προσωρινό ασύρματο δίκτυο αναμετάδοσης. Ένας απομακρυσμένος σταθμός που είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο, χρησιμοποιεί έναν μη ενεργό σταθμό, ως σταθμό αναμετάδοσης για την μετάδοση των πακέτων του. Αν η παράδοση δεν γίνει σε ορισμένο χρονικό διάστημα, τότε απορρίπτεται [5][6][45][46][47].



**Εικόνα 21:** Κυψελωτά δίκτυα MCNs

### 3.2.1 Σενάρια κυψελωτών δικτύων MCNs

Η απόδοση της μετάδοσης πακέτων στα συστήματα MCNs συγκρίνεται με το κυψελωτό δίκτυο πολλών βημάτων SCN (singlehop cellular network), την λανθάνουσα κατάσταση και τη σηματοδότηση. Όσον αφορά την παράδοση των πακέτων στα MCNs δίκτυα υπάρχουν διάφορα σενάρια ανεξάρτητα από την δομή των σταθμών αναμετάδοσης τα οποία αναφέρονται παρακάτω:



**Εικόνα 22:** Σενάρια παράδοσης σε δίκτυα MCNs

Σύμφωνα με το σενάριο 1 ένας απομακρυσμένος σταθμός MS1 συνδέεται με δυο διαφορετικούς αναμεταδότες RS1a και RS1b για την παράδοση των πακέτων του. Ο σταθμός βάσης ελέγχει την διαδικασία καθώς οι αναμεταδότες είναι υπό τον έλεγχο του και διαβιβάζονται πληροφορίες μεταξύ αυτών. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η διαδικασία αυτή, οι αναμεταδότες στέλνουν αίτηση αναμετάδοσης (ARQ) μεταξύ τους.

Στο σενάριο 2 ο απομακρυσμένος σταθμός MS2 μεταβάλλεται στη σύνδεση του από τον σταθμό βάσης BS2 στον σταθμό αναμετάδοσης RS2d και αντίστροφα. Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός βάσης ελέγχει πιο εύκολα την διαδικασία παράδοσης και την κατάσταση ARQ σε σχέση με το σενάριο 1 καθώς δεν αποστέλλονται επιπλέον πληροφορίες.

Το σενάριο 3 θεωρείται ότι είναι παρόμοιο με τα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας καθώς ο απομακρυσμένος σταθμός MS3 καθώς κινείται αλλάζει δίκτυο(κυψέλη) και συνεπώς συνδέεται αυτόματα από τον ένα σταθμό βάσης BS1 στον άλλο BS2. Η κατάσταση ARQ μεταφέρεται ανάλογα σε ποιον σταθμό είναι συνδεδεμένος.

Σύμφωνα με το σενάριο 4 ο απομακρυσμένος σταθμός MS4 κατά τη διάρκεια της σύνδεσης του, συνδέεται με δυο διαφορετικούς αναμεταδότες RS1d και RS1b αντίστοιχα, οι οποίοι όμως βρίσκονται σε διαφορετικές κυψέλες. Το σενάριο αυτό επιβαρύνει το δίκτυο καθώς απαιτούνται σηματοδοτήσεις μεταξύ των σταθμών βάσης με τους αναμεταδότες της κάθε κυψέλης κάθε φορά που ο χρήστης κινείται από την μια στην άλλη. Επιπλέον η ποιότητα καναλιού του απομακρυσμένου σταθμού είναι πιο χαμηλή καθώς το σήμα εξασθενεί και δέχεται παρεμβολές στην διάρκεια αλλαγής κυψέλης.

Τέλος στο σενάριο 5, ο απομακρυσμένος σταθμός MS5 μετακινείται από το σταθμό βάσης BS2 προς τον αναμεταδότη RS1c μιας άλλης κυψέλης και αντίστροφα. Στο σενάριο αυτό έχουμε πρόσθετη σηματοδότηση καθώς οι σταθμοί βάσης πρέπει να ενημερώνονται για τις κινήσεις του χρήστη [47][54].

### 3.3 Συνεργατικό σύστημα πολλών βημάτων

Τα κυψελωτά δίκτυα απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό για την επιτυχή εφαρμογή τους το σύστημα, το οποίο θα πρέπει να είναι συνεργατικό ώστε να έχουμε πολλαπλών βημάτων μετάδοση. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τα εξής:

Το *συνεργατικό σύστημα multiple-input multiple-output (MIMO)*, σύμφωνα με το οποίο αρχικά ο κινητός σταθμός και ο αναμεταδότης ακούνε τη μετάδοση του σταθμού βάσης. Έπειτα ο σταθμός βάσης και οι αναμεταδότες μεταδίδουν ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας το ίδιο κανάλι. Έτσι με την η συνεταιριστική space-time κωδικοποίηση οι απομακρυσμένοι σταθμοί μπορούν να συνδυάσουν τα ληφθέντα σήματα.

Έπειτα στο *συνεργατικό multiple-input single-output (MISO)*, αρχικά ο αναμεταδότης (μόνο) ακούει την μετάδοση του σταθμού βάσης. Στη συνέχεια οι αναμεταδότες και ο σταθμός βάσης μεταδίδουν χρησιμοποιώντας τους ίδιους πόρους. Έτσι με τη συνεταιριστική space-time κωδικοποίηση ο απομακρυσμένος



σταθμός συνδυάζει κατάλληλα τα σήματα που λαμβάνονται από το σταθμό βάσης και τους αναμεταδότες. Έτσι επωφελείται από την συνεταιριστική ποικιλομορφία. Επιπρόσθετα σύμφωνα με το *συνεργατικό single-input multiple-output (SIMO)*, αρχικά ο απομακρυσμένος σταθμός και ο αναμεταδότης ακούνε τη μετάδοση του σταθμού βάσης και έπειτα ο αναμεταδότης (μόνο) μεταδίδει τα πακέτα του. Αν ο απομακρυσμένος σταθμός μπορεί να συνδυάσει τα λαμβανόμενα σήματα κατάλληλα, τότε επωφελείται από την ποικιλία της συνεργασίας. Τέλος στη *συμβατική αναμετάδοση*, ο αναμεταδότης λαμβάνει τις μεταδόσεις των σταθμών βάσης που προορίζονται για τον απομακρυσμένο σταθμό και τις προωθεί. Σύμφωνα με το σχέδιο αυτό, πετυχαίνουμε εξοικονόμηση απώλειας διαδρομής [46].

### 3.4 Σενάρια λειτουργίας αναμετάδοσης

Επειδή πολλές εταιρείες είναι σε αρκετά προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης του WiMAX, θα πρέπει οι συσκευές να είναι συμβατές με το 802.16j. Αυτό περιορίζει μεν σημαντικά το πεδίο εφαρμογής και τις δυνατότητες του φυσικού επιπέδου, αλλά αυξάνει την πιθανότητα να εφαρμοστεί το 16j προφίλ.

Έτσι, το WiMAX forum δημιούργησε ένα προφίλ που βασίστηκε στα χαρακτηριστικά του 802.16j για να εξασφαλιστεί η διαλειτουργικότητα μεταξύ του εξοπλισμού και του χρήστη. Η διαδικασία δημιουργίας αυτού του προφίλ έχει αρχίσει, αλλά η τελική έκβαση αυτής της διαδικασίας εξακολουθεί να είναι ασαφής. Οι σταθμοί βάσης θα πρέπει να τροποποιηθούν προκειμένου να είναι συμβατοί με το νέο πρότυπο, όμως μέχρι τώρα δεν έχουν αναπτυχτεί σε όλους τους τομείς. Αυτό είναι ένα σημαντικό πρόβλημα καθώς όχι μόνο πρέπει να είναι συμβατές οι συσκευές, αλλά να πληρούν και τις προϋποθέσεις επίτευξης της αναμετάδοσης.

Το γεγονός ότι όλοι οι σταθμοί αναμετάδοσης είναι ίσοι, δημιουργείται το πρόβλημα ότι οι σταθμοί που είναι πιο κοντά στο σταθμό βάσης έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα, αυτό ισχύει και για τις κινητές συσκευές. Έτσι λοιπόν η ομάδα εργασίας δημιούργησε κάποια σενάρια λειτουργίας αναμεταδοτών.

Το πρώτο σενάριο είναι να τοποθετηθούν *αναμεταδότες με σταθερή υποδομή* όπως οι σταθμοί βάσης, όπου θα παρέχουν υπηρεσίες σε κάποιο αριθμό χρηστών σε “σταθερή” συγκεκριμένη περιοχή. Σκοπός είναι να αυξήσουν την ρυθμοαπόδοση και την κάλυψη της κυκλοφορίας στο δίκτυο, αφού θα είναι τοποθετημένοι στις στέγες ψηλών κτηρίων, ώστε να επιτρέπουν επικοινωνία LOS με το σταθμό βάσης, δεν ισχύει όμως πάντα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και εμπορικοί αναμεταδότες που μπορούν να τους προμηθεύονται οι χρήστες, ώστε συνδέονται ανά πάσα στιγμή στο δίκτυο.

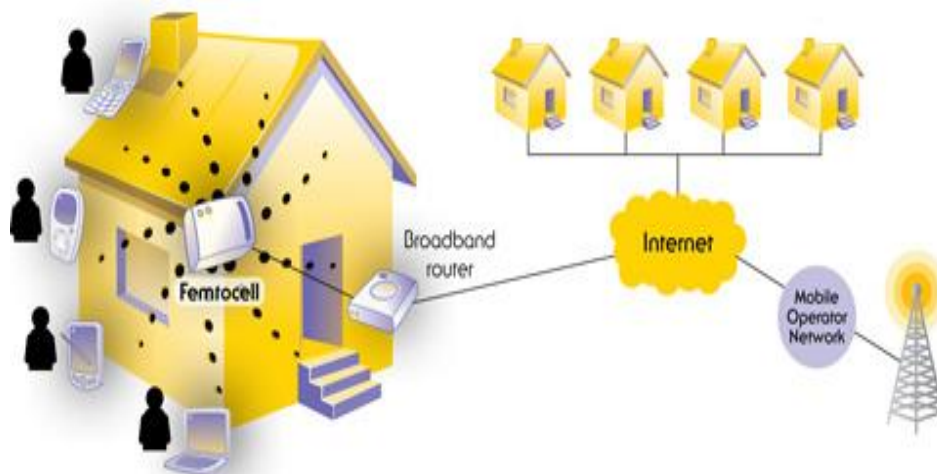
Ένα άλλο σενάριο είναι να τοποθετηθούν *αναμεταδότες με κάλυψη μέσα στο κτήριο*. Οι αναμεταδότες θα είναι τοποθετημένοι από τον παροχέα αλλά και από τον τελικό χρήστη που βρίσκετε κοντά στην κυψέλη. Η λειτουργία τους είναι αντίστοιχη με αυτή των femto-cell, οι οποίες είναι μικρές κυψέλες (περίπου 10m) που υλοποιούν μικρά κυψελωτά δίκτυα σε κλειστούς χώρους. Σύμφωνα με αυτές ο συνδρομητής μπορεί να απολαμβάνει υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, χωρίς

να έχει προβλήματα στη σύνδεση. Λειτουργούν σε αδειοδοτημένο φάσμα, ως εκ τούτου δεν απαιτούν εργασία μέσω της κινητής τηλεφωνίας. Οι αναμεταδότες αναμένεται να τοποθετηθούν ακόμη και σε κλειστές περιοχές όπως τούνελ με σκοπό να λειτουργούν σε NLOS κανάλια.

Σκοπός των femto-cell είναι να καλύψουν προβλήματα δικτύου (απώλεια σήματος με τα κινητά τηλέφωνα σε κλειστές περιοχές). Βασικό πλεονέκτημα για τις επιχειρήσεις είναι η βελτιστοποιημένη χρήση των πόρων του δικτύου.

Επιπλέον οι χρηστές μπορούν να συνδέονται με το δίκτυο της κινητής τηλεφωνίας μέσω μιας ευρυζωνικής σύνδεσης στο internet. Έτσι μειώνονται οι παρεμβολές που προκαλούν οι συσκευές οικιακής χρήσης όπως είναι τα ασύρματα τηλέφωνα και τα μικροκύματα. Μια femto-cell μπορεί υποστηρίζει τουλάχιστον τέσσερις ταυτόχρονες συνομιλίες από κινητό τηλέφωνο.

Σαν συσκευή μοιάζει με το κλασικό ασύρματο router. Έχει όμως χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας απ' ό τι μια κλασική κεραία. Είναι συμβατές με συσκευές τεχνολογίας τρίτης γενιάς. Λειτουργούν με μπαταρία και έχουν μικρή πολυπλοκότητα [1][61].



**Εικόνα 23:** Αναμεταδότες με κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους

Επόμενη ιδέα είναι οι αναμεταδότες για προσωρινή κάλυψη, σε περίπτωση καταστροφής κάποιου σταθμού βάσης. Μια άλλη εφαρμογή των συγκεκριμένων αναμεταδοτών είναι η τοποθέτησή τους σε μέρη που υπάρχουν μεγάλες ομάδες ατόμων (πχ. γήπεδο) ώστε να επιτρέψει την κίνηση προς το σταθμό βάσης, αυτοί μπορεί να τοποθετηθούν και μόνιμα. Οι αναμεταδότες αυτοί δουλεύουν με μπαταρία και μπορούμε να τους βρούμε στην αγορά σαν απλούς και σύνθετους.



**Εικόνα 24:** Αναμεταδότης για προσωρινή κάλυψη

Τέλος το γεγονός ότι υπάρχουν περιπτώσεις που πολλοί χρήστες κινούνται με το ίδιο όχημα (πχ. τρένο, λεωφορείο) και απαιτούν σύνδεση με το δίκτυο, είναι μια πρόκληση για τους τεχνικούς δικτύων. Έτσι με την τοποθέτηση ενός *αναμεταδότη* πάνω στο κινητό όχημα, επιτρέπει την πρόσβαση των χρηστών στο δίκτυο, αλλά και την μετακίνηση τους μαζικά από κυψέλη σε κυψέλη χωρίς να υπάρχει πρόβλημα στη σύνδεση. Προφανώς ο αναμεταδότης που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να υποστηρίζει μεγάλη κινητικότητα [5].



**Εικόνα 25:** Αναμεταδότης σε κινητό όχημα

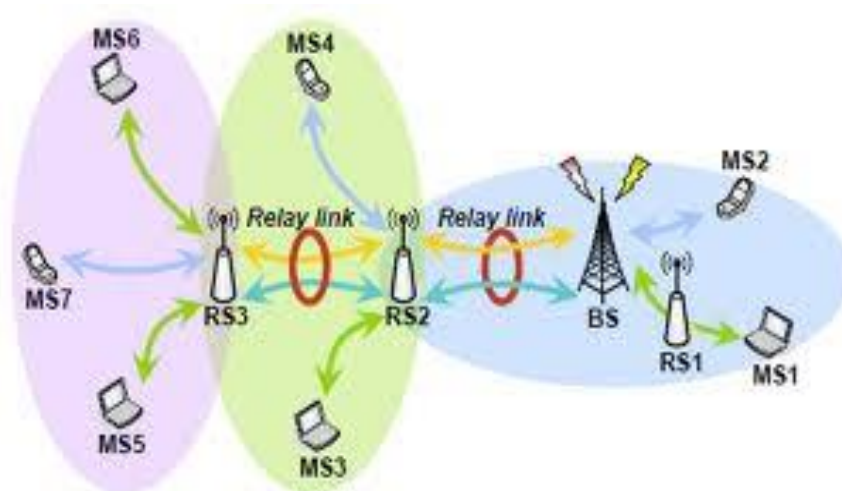
### 3.5 Τοπολογία

Η ομάδα εργασίας προκειμένου να επεκτείνει το εύρος κάλυψης του δικτύου χωρίς να έχει πρόβλημα συμβατότητας με τα προηγούμενα, επικεντρώθηκε στο σχεδιασμό ενός δικτύου με κινητή multi-hop αναμετάδοση. Σύμφωνα με την οποία οι σταθμοί βάσης συνεργάζονται ώστε να παρέχουν επικοινωνία στους απομακρυσμένους χρήστες. Συνδυάζεται με το κυψελοειδές δίκτυο καθώς ο κάθε σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για την περιοχή κάλυψης της εμβελείας του. Η τοπολογία του δικτύου 802.16j MMR φαίνεται στο σχήμα.

Η κατανομή των κόμβων του δικτύου ακολουθεί μια διαφορετική λογική δέντρου από σημείο σε πολλά σημεία (PMP), σύμφωνα με την οποία υπάρχουν κάποιοι σταθμοί αναμετάδοσης RS (Relay Station) οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την εξυπηρέτηση επικοινωνίας μεταξύ των απομακρυσμένων χρηστών MS (Mobile Station) και των σταθμών βάσης MR-BS (Multihop Relay-Base Station). Δεν υπάρχει όριο hops από τον BS προς τον MS, αρκεί ανάμεσα στη διαδρομή αυτή να υπάρχουν μόνο RSs ώστε να υποστηρίξουν τη multi-level τοπολογία δέντρου. Το μέγιστο εύρος λειτουργίας για κάθε κόμβο είναι περίπου 8 χιλιόμετρα, αλλά η πραγματική εμβέλεια είναι συνήθως μικρότερη ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη διαμόρφωση της κεραίας.

Οι αναμεταδότες συλλέγουν την κίνηση από τους πολλαπλούς κινητούς χρήστες που συνδέονται μ' αυτούς και αναμεταδίδουν την πληροφορία ο ένας μετά τον άλλο ώστε να φτάσει στο σταθμό βάσης. Έτσι προκύπτει και η έννοια της "άθροισης της κίνησης". Ουσιαστικά η περισσότερη δουλειά γίνεται από τους αναμεταδότες.

Το γεγονός ότι στην μέχρι τότε point-to-multipoint τοπολογία δικτύου, οι βασικές λειτουργίες (κατανομή πόρων, ποιότητα αξιοπιστίας κ.α) παρέχονταν ανά σύνδεση και όλοι οι απομακρυσμένοι σταθμοί αντιμετωπίζονταν το ίδιο, δεν ήταν και τόσο αποτελεσματικό σε ένα δίκτυο δέντρου multi-hop καθώς ο κάθε απομακρυσμένος σταθμός έχει διαφορετικές απαιτήσεις για την σύνδεση του. Έτσι για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος προτάθηκε μια νέα τεχνική, ονομαζόμενη ως tunneling τεχνική που ως σκοπό έχει την βελτίωση απόδοσης του δικτύου. Σύμφωνα με την οποία έχουμε αμφίδρομη σύνδεση μεταξύ σταθμού βάσης και αναμεταδότη. Με την ύπαρξη πολλών αναμεταδοτών στη θέση σταθμών βάσης μειώνεται σημαντικά το κόστος του δικτύου, καθώς οι σταθμοί αναμετάδοσης κοστίζουν πολύ λιγότερο σε σχέση με τους σταθμούς βάσης και είναι πιο απλή η εγκατάστασή τους.



**Εικόνα 26:** Τοπολογία δικτύου κινητής αναμετάδοσης

Ο μηχανισμός για την κατασκευή των πακέτων της παραπάνω τεχνικής ορίζεται κυρίως από το πρότυπο IEEE 802.16/16e. Χάρη στην εξαιρετική απόδοση του δικτύου στο περιβάλλον NLOS, και με την ορθογώνια διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (OFDMA), έχει υιοθετηθεί από το πρωτόκολλο IEEE 802.16j ως πρωταρχικό για το φυσικό στρώμα και το κανάλι μηχανισμού πρόσβασης στις επικοινωνίες στις ζώνες συχνοτήτων κάτω από 11 GHz [18][4][45][48].

### 3.6 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Το πρότυπο 802.16j υποστηρίζει κινητή multihop αναμετάδοση (MMR). Σύμφωνα με αυτό, υπάρχει ένας σταθμός βάσης σε κάθε κυψέλη, ο οποίος διαχειρίζεται την επικοινωνία των απομακρυσμένων σταθμών. Προκειμένου η επικοινωνία να καταστεί ευκολότερη και οικονομικότερη τοποθετηθήκαν σε κάθε κυψέλη σταθμοί αναμετάδοσης όπου μέσω αυτών μεταδίδονται οι πληροφορίες και τα πακέτα προς τους απομακρυσμένους σταθμούς. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται κυψελωτά MCNs. Με τον καιρό έχουν δημιουργηθεί διάφορα σενάρια για την παράδοση των πακέτων στα δίκτυα MCNs, ώστε να καλυφθούν όλα τα ενδεχόμενα επικοινωνίας. Επίσης με το συνεργατικό σύστημα, διακρίνονται οι διάφορες πτυχές σχεδιασμού δικτύου. Συμφώνα με τα σενάρια λειτουργίας αναμετάδοσης διαφαίνεται η εφαρμογή των αναμεταδοτών στην καθημερινή μας ζωή. Τέλος με την τεχνική tunneling όλοι οι κόμβοι είναι ισότιμοι καθώς οι αναμεταδότες συλλέγουν την κίνηση από τους απομακρυσμένους σταθμούς προς τον σταθμό βάσης.

## 4. Φυσικό Επίπεδο

Όσον αφορά το φυσικό επίπεδο, στην downlink ζώνη, η σύνδεση πολλών σημάτων δεν είναι δυνατή καθώς το φυσικό επίπεδο του απομακρυσμένου σταθμού υποστηρίζει μια σύνδεση (με το σταθμό βάσης). Στο 16j οι MSs μπορούν να λαμβάνουν από το σταθμό βάσης και από τους αναμεταδότες, γι αυτό θα πρέπει να υπάρχει συγχρονισμός και εκτίμηση του καναλιού και της συχνότητας.

### 4.1 Πλαίσιο OFDMA

Προκειμένου να υποστηριχθεί multihop επικοινωνία, θα πρέπει να γίνουν κάποιες αλλαγές στο φυσικό επίπεδο. Το πλαίσιο χωρίζεται στην downlink και uplink ζώνη. Η downlink χρησιμοποιείται από τον BS, ενώ η uplink από τον MS. Ο αναμεταδότης μπορεί να στέλνει και να λαμβάνει και στις δυο ζώνες. Στο 802.16j το πλαίσιο χωρίζεται στη ζώνη πρόσβασης και ζώνη αναμετάδοσης. Πρόσβαση ονομάζεται γιατί στη ζώνη αυτή ο MS στέλνει και λαμβάνει στο downlink και uplink, ενώ αναμετάδοσης ονομάζεται γιατί η ζώνη αυτή αποτελείται από αναμεταδότες.

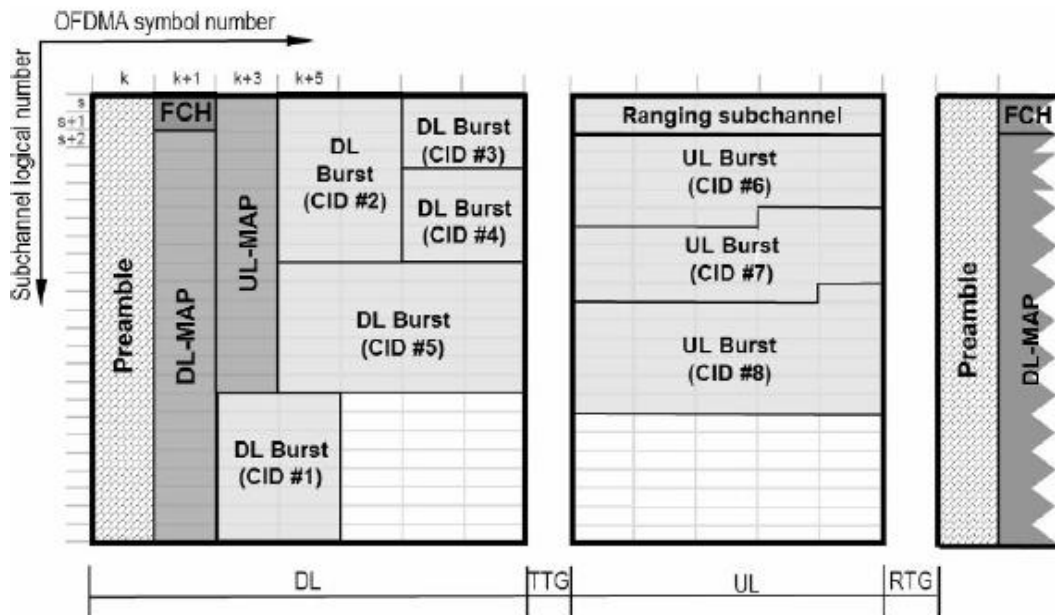
Σύμφωνα με το OFDMA, χωριστά σύνολα ορθογώνιων τόνων κατανέμονται στους χρήστες έτσι ώστε οι χρήστες να μπορούν να συμμετάσχουν στην παράλληλη επικοινωνία. Η βασική μονάδα για την κατανομή των πόρων είναι μια υποδοχή, η οποία αποτελείται από έναν αριθμό συμβόλων OFDMA στο πεδίο του χρόνου, και ένα ή πολλαπλά υποκανάλια στο πεδίο των συχνοτήτων.

Ο BS χωρίζει το χρονοδιάγραμμα σε συνεχόμενα πλαίσια, τα οποία αποτελούνται περαιτέρω από μια κατερχόμενη ζεύξη DL(Downlink) και μια ανερχόμενη ζεύξη UL(Uplink) υποπλαίσιο.

Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, ένα υποπλαίσιο DL ξεκινά μ' ένα προοίμιο, το οποίο βοηθά τους MSs να συγχρονιστούν και να εκτιμήσουν το κανάλι. Στο σύμβολο OFDMA που ακολουθεί αμέσως μετά το προοίμιο, ο BS στην κατερχόμενη ζώνη μεταδίδει το MAP (DL-MAP) και στην ανερχόμενη το MAP (UL-MAP), το μήνυμα ώστε να κοινοποιούν στους MSs των αντίστοιχων πόρων το πλαίσιο που τους χορηγείται, στην DL και UL κατεύθυνση, αντίστοιχα.

Με βάση το χρονοδιάγραμμα που έλαβε από το BS, κάθε απομακρυσμένος σταθμός μπορεί να καθορίσει πότε ( τα σύμβολα OFDMA), και που (υποκανάλια) θα πρέπει να παραλάβει και διαβιβάσει προς τον BS.

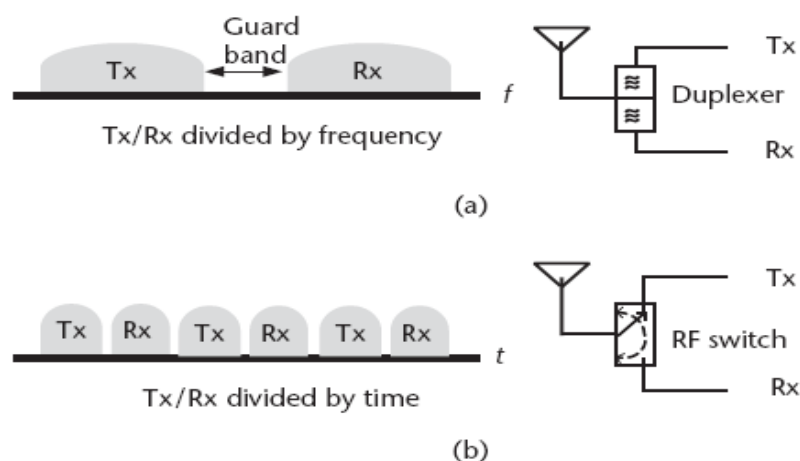
Προκειμένου να μην υπάρχουν παρεμβολές σε κάποιο υποπλαίσιο, στέλλεται από τους σταθμούς ένα κενό RTG (Receiver Transmit Gap) για να μεταδώσει και ένα κενό TTG (Transmit Transition Gap) για να διαβάσει τη λήψη, μεταξύ δυο διαδοχικών υποπλασιών, έτσι ώστε οι σταθμοί καθώς θα κινούνται, να τους δίνεται επαρκής χρόνος ώστε να αλλάζουν την κατάσταση μετάδοσης και λήψης [5] [7] [12][18][20].



Εικόνα 27: OFDMA πλαίσιο

## 4.2 Τεχνική TDD

Το πρότυπο 802.16j υιοθετεί την τεχνική TDD. Αρχικά τα κυψελοειδή συστήματα που σχεδιάστηκαν για υπηρεσίες φωνητικών μηνυμάτων, η τεχνική FDD ήταν επαρκής επιλογή με το δεδομένο φάσμα συχνότητας που διαιρέθηκε εξίσου την uplink και downlink σύνδεση. Όμως, το 802.16j σχεδιάστηκε για μεγαλύτερες υπηρεσίες δεδομένων. Έτσι υιοθετήθηκε η TDD για να μπορεί να καλύψει την κατανομής εύρους ζώνης. Το TDD απαιτεί συγχρονισμό εκπομπής και λήψης μεταξύ των καναλιών ή των χειριστών ώστε να ελαχιστοποιηθεί η παρέμβαση άλλων καναλιών που εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα ή από γειτονικούς χρήστες.



Εικόνα 28: τεχνική TDD σε σχέση με την FDD

Η τεχνική TDD είναι καλύτερη για εφαρμογές τεχνολογίας κεραιών σε σχέση με το FDD. Ο διακόπτης TDD RF έχει μικρότερη απώλεια παρεμβολής και χαμηλότερο κόστος από duplexer FDD. Η TDD έχει περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με το FDD δεδομένου ότι ο πομπός και ο δέκτης μπορούν να μοιραστούν κάποιες συσκευές όπως το φίλτρο και τον ταλαντωτή. Εν αντιθέσει, η TDD μειονεκτεί στο ότι το μήκος του ισοσταθμιστή είναι δύο φορές μεγαλύτερο, η ταχύτητα DAC/ADC είναι μικρότερη, και ο διακόπτης RF είναι πιο ακριβός.[13][55]

### 4.3 Τύποι λειτουργίας αναμετάδοσης

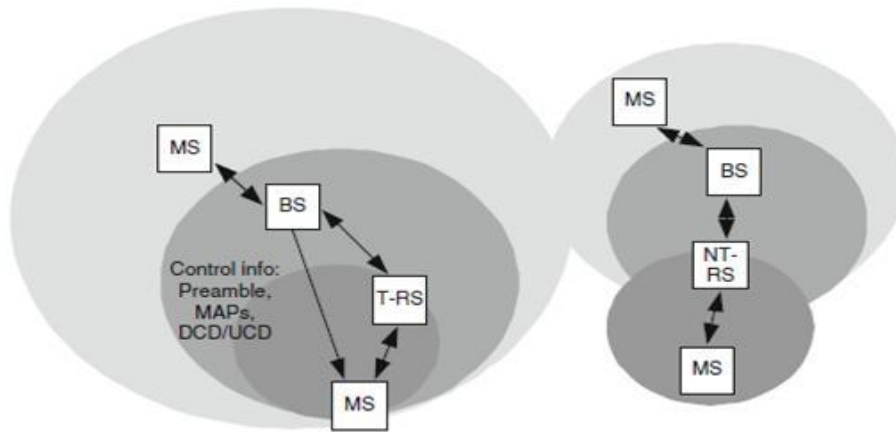
Η κινητικότητα των σταθμών στο δίκτυο υλοποιείται με τη λειτουργία των γειτονικών σταθμών αναμετάδοσης. Ο κλασικός τρόπος αναφέρεται στη λειτουργία μετατροπής της ασύρματης σύνδεσης που συνδέει έναν απομακρυσμένο σταθμό με το σταθμό βάσης, συνδυασμένη με την υπηρεσία όπου μια άλλη ασύρματη σύνδεση συνδέει έναν άλλο απομακρυσμένο σταθμό με το σταθμό βάσης, με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται στη σύνδεση το κατάλληλο ποσοστό QoS καθώς ο κάθε κινητός σταθμός θα μεταβαίνει από μια κυψέλη στην άλλη.

Το πρότυπο ορίζει δυο τύπους λειτουργίας αναμετάδοσης, τη διαφανή T\_RS (transparent relays) και μη διαφανή NT\_RS (non-transparent relays). Η βασική διαφορά μεταξύ αυτών είναι στο πως διαμορφώνεται και μεταδίδεται η πληροφορία.

Στην λειτουργία με *διαφανή αναμετάδοση*, οι σταθμοί αναμετάδοσης RSS εξυπηρετούν τους σταθμούς που διαμορφώνουν την πληροφορία πριν την μεταδώσουν. Οι τοπικοί σταθμοί που εξυπηρετούνται είναι άμεσα συνδεδεμένοι με το σταθμό βάσης, για να επιτευχθεί η καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας. Οι αναμεταδότες έχουν την ικανότητα κάλυψης πολλών διαδρομών ώστε να εξυπηρετούν όσο το δυνατό περισσότερους τοπικούς σταθμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη απόδοση δικτύου και η μετάδοση γίνεται με πιο γρήγορο τρόπο. Έχει ως αντίκτυπο, ότι η περιοχή κάλυψης της αναμετάδοσης, είναι περιορισμένη, λειτουργεί σε τοπολογία μόλις δυο κόμβων. Ονομάζεται διαφανής γιατί οι κινητοί σταθμοί δεν γνωρίζουν την ύπαρξη των αναμεταδοτών.

Αντίθετα στη *μη διαφανή αναμετάδοση*, οι σταθμοί αναμετάδοσης RSS εξυπηρετούν τους MSs που διαμορφώνουν την πληροφορία πριν την στείλουν στο σταθμό βάσης BS, καθώς ο σταθμός βάσης πρέπει να διαβάσει τις πληροφορίες ελέγχου όταν λάβει το πλαίσιο. Οι τοπικοί σταθμοί βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από το σταθμό βάσης κι έτσι μπορεί να καλύψει αναμετάδοση σε μεγαλύτερη περιοχή απ' ό,τι η προηγούμενη. Όμως αυτή μειονεκτεί στο ότι μπορεί να έχουμε παρεμβολές μεταξύ των σταθμών αναμετάδοσης. Οι αναμεταδότες αυτής της κατηγορίας εκτελούν IP προώθηση των πακέτων στο επίπεδο δικτύου ώστε να μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες στους απομακρυσμένους σταθμούς. Ονομάζεται μη διαφανής γιατί οι σταθμοί γνωρίζουν τότε οι πληροφορίες μεταβαίνουν στους αναμεταδότες [9] [4] [13].





**Εικόνα 29:** Τύποι αναμετάδοσης: διαφανή tr και μη διαφανή non-tr

Φυσικά ο αριθμός των σταθμών αναμετάδοσης σε μια κυψέλη παίζει σημαντικό ρόλο. Παρακάτω ο πίνακας μας δείχνει πως αλλάζουν τα δεδομένα ενός δικτύου καθώς αλλάζει ο αριθμός των αναμεταδοτών σε μια μη διαφανή αναμετάδοση όπου το εύρος ζώνης είναι 25MHz και η μετάδοση 37 dBm. Όπως φαίνεται αύξηση των αναμεταδοτών βελτιώνει σημαντικά την κάλυψη υπηρεσιών των απομακρυσμένων σταθμών. Η περίπτωση που δεν υπάρχουν αναμεταδότες σε σχέση μ' αυτή των 1,2,3 αναμεταδοτών αντίστοιχα η απόδοση του δικτύου αυξάνεται από 7.4 ,3.5 και 60.5 % [4].

**Πίνακας 1:** Η απόδοση του συστήματος σε μη διαφανή αναμετάδοση με την σταδιακή προσθήκη αναμεταδοτών.

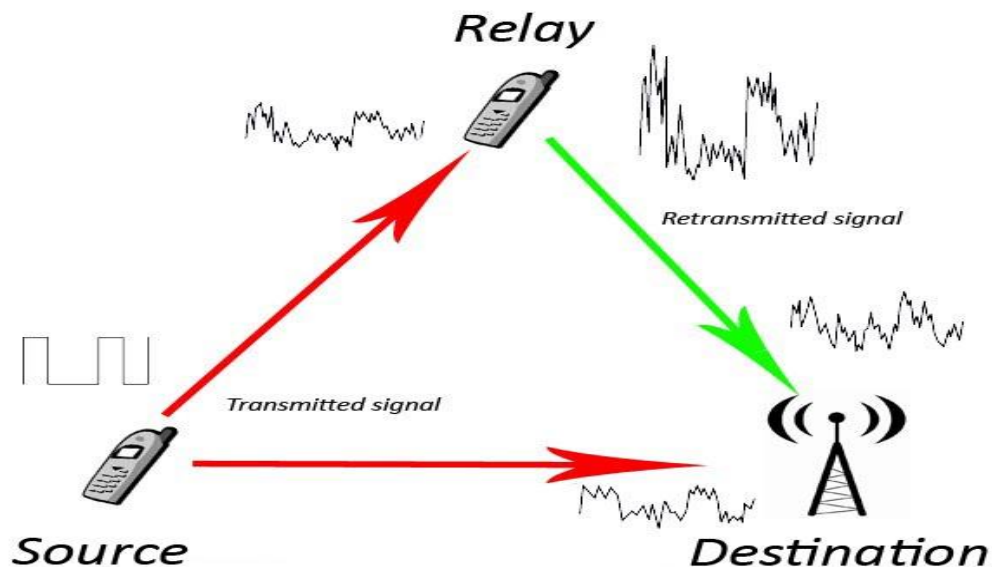
|                                   | No RS | One RS | Two RSs | Three RSs |
|-----------------------------------|-------|--------|---------|-----------|
| Throughput of local UE (Mb/s)     | 24.3  | 20.3   | 21.3    | 24.3      |
| Throughput of remote UE (Mb/s)    | 0     | 5.8    | 11.6    | 14.7      |
| Total throughput in a cell (Mb/s) | 24.3  | 26.1   | 32.9    | 39.0      |
| Throughput of edge UE (kb/s)      | 117.1 | 130.7  | 144.8   | 180.2     |

#### 4.4 Τεχνικές λειτουργίας αναμεταδοτών

Έχουν προταθεί διάφορα συστήματα αναμετάδοσης για την δημιουργία επικοινωνίας δυο-hop μεταξύ σταθμού βάσης και απομακρυσμένης μονάδας μέσω αναμεταδότη.

Πρώτη εκδοχή είναι η **AF** (Amplify and Forward). Σύμφωνα με αυτή ο αναμεταδότης λαμβάνει το σήμα από το σταθμό βάσης ή από τον απομακρυσμένο σταθμό κι έπειτα το ενισχύει και το μεταβιβάζει στον προορισμό του.

Υπάρχουν δίκτυα στα οποία τα ασύρματα τερματικά δεν είναι σε θέση να υποστηρίξουν πολλαπλές κεραίες πομπού και αυτό οφείλεται στον περιορισμένο αριθμό υλικού. Ωστόσο σε περιβάλλον MIMO μια κεραία κινητής τηλεφωνίας μπορεί να επιτρέψει στους χρηστές να μοιραστούν τις κεραίες τους ώστε να δημιουργηθεί ένα εικονικό δίκτυο, η τεχνική αυτή ονομάζεται συνεργατική επικοινωνία. Έτσι σύμφωνα με αυτή, όπως φαίνεται και στην εικόνα, τα δυο κινητά τηλέφωνα αποκτούν συνεργατική επικοινωνία με το σταθμό βάσης. Οπού το ένα τηλέφωνο είναι ο πομπός που μεταδίδει τις πληροφορίες. Το άλλο τηλέφωνο που είναι σε αδράνεια, παίζει το ρόλο του αναμεταδότη, οπού λαμβάνει και στέλνει πληροφορίες. Τέλος ο δέκτης είναι ο σταθμός βάσης που λαμβάνει τις πληροφορίες. Η τεχνική αυτή είναι πολύ απλή, έχει μικρή καθυστέρηση, αλλά ενισχύει το θόρυβο [4] [19].

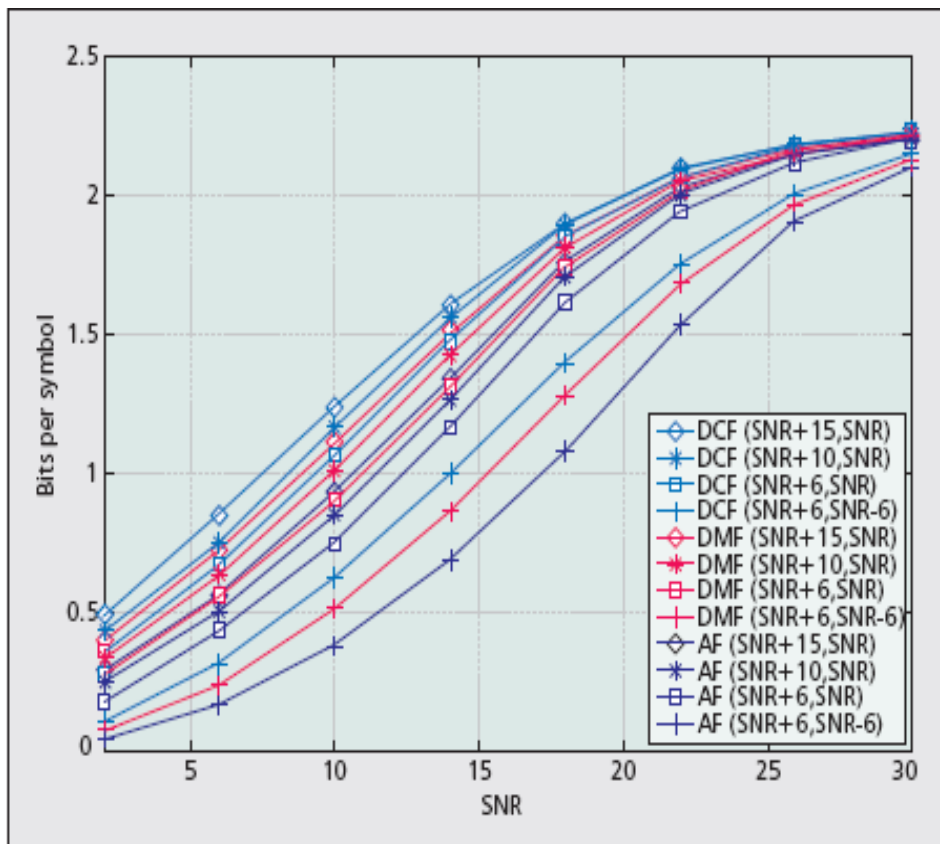


Εικόνα 30: Amplify and Forward

Έπειτα μια άλλη τεχνική είναι η **SDF** (Selective Decode and Forward) όπου ο αναμεταδότης αποκωδικοποιεί το λαμβανόμενο σήμα. Αν η αποκωδικοποίηση γίνει σωστά σύμφωνα με την CRC (cyclic redundancy check), τότε ο αναμεταδότης θα εκτελέσει την αποκωδικοποίηση του καναλιού και θα προωθήσει το νέο σήμα στον αντίστοιχο σταθμό. Η τεχνική αυτή μειώνει τη διάδοση σφαλμάτων μέσω των αναμεταδοτών, αλλά έχει μεγάλη καθυστέρηση [4][19].

Τέλος με την τεχνική **DMF** (DeModulation and Forward) ο αναμεταδότης αναδιαμορφώνει το λαμβανόμενο σήμα και αποφασίζει που θα το στείλει. Η τεχνική αυτή είναι απλή και έχει μικρή καθυστέρηση. Μειονεκτεί στο γεγονός ότι έχει μεγάλη διάδοση σφαλμάτων που οφείλονται στην απόφαση του αναμεταδότη για το ποια διαδικασία προώθησης θα ακολουθήσει.

Το σχήμα δείχνει μια εκτίμηση του καναλιού των τριών προηγούμενων συστημάτων μεταφοράς, σε τέσσερις συνδυασμούς δυο hops (SNR + 15 dB, SNR), (SNR + 10dB, SNR), (SNR + 16 dB, SNR), και (SNR + 6dB, SNR - 6 dB). Το πρώτο στοιχείο αντιπροσωπεύει την αναλογία σήματος προς θόρυβο, ενώ η δεύτερη την ταχύτητα μετάδοσης. Σύμφωνα με το σχήμα η απόδοση αυξάνεται σημαντικά όταν έχουμε δυο hop. Η SDF τεχνική προσφέρει καλύτερη απόδοση, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αποκωδικοποιείται το κανάλι και επιλέγεται η διαδικασία προώθησης, που μπορεί να ελέγξει τυχόν σφάλματα στο μέσο [4].



**Εικόνα 31:** Εκτίμηση του καναλιού των τριών τύπων λειτουργίας αναμετάδοσης

## 4.5 Μορφή του πλαισίου

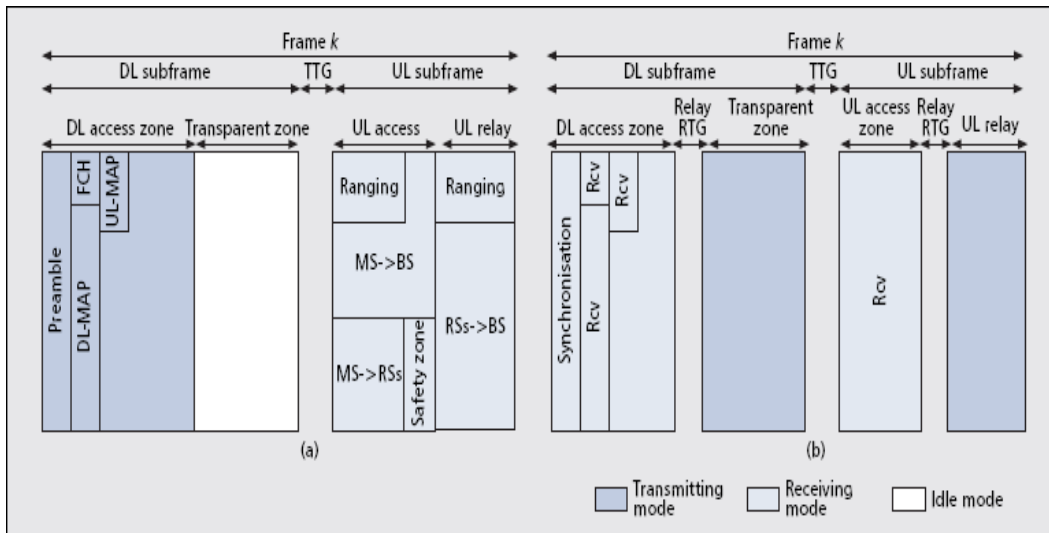
Προκειμένου να καταστεί δυνατή η πολλαπλή επικοινωνία, το υποπλαίσιο της άνω και κάτω ζώνης χωρίζονται σε άλλες υπό-ζώνες στο πεδίο του χρόνου. Στη διαφανή λειτουργία αναμετάδοσης όπου ορίζεται η διαφανής ζώνη (transparent zone) για την επικοινωνία μεταξύ του αναμεταδότη T\_RS με τον απομακρυσμένο χρήστη MS και στη μη διαφανή λειτουργία αναμετάδοσης που ορίζεται η ζώνη αναμετάδοσης (relay zones) για την επικοινωνία μεταξύ του σταθμού βάσης BS/NT\_R με τον αναμεταδότη NT\_RS [9] [3] [5].

Πιο συγκεκριμένα στη *διαφανή λειτουργία αναμετάδοσης η δομή του πλαισίου* όπως φαίνεται και στο σχήμα, στο downlink και uplink υποπλαίσιο είναι ενιαία η ζώνη πρόσβασης και η διαφανής ζώνη. Σε κάθε ζώνη αναμετάδοσης, ο σταθμός βάσης και ο αναμεταδότης μπορούν να στέλνουν, να λαμβάνουν ή να βρίσκονται σε κατάσταση αδράνειας. Όμως δεν μπορούν να αλλάζουν κατάσταση λειτουργίας μέσα στην ίδια ζώνη.

Οι αναμεταδότες μπορούν να στέλνουν και λαμβάνουν δεδομένα, ανάλογα με τη λειτουργία του συστήματος. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο οι δυο ζώνες να έχουν ένα κενό διάστημα ανάμεσα τους, ώστε να μπορούν οι συμμετέχοντες να αλλάζουν κατάσταση για μετάδοση ή λήψη ή αντίστροφα. Η μεταφορά υλοποιείται με MAPs που ορίζονται από το σταθμό βάσης. Επίσης ο κάθε αναμεταδότης έχει ένα μικρό buffer ώστε να μπορεί τη μια στιγμή να δέχεται ένα πλαίσιο από έναν αναμεταδότη και την άλλη να μπορεί να στέλνει άλλο πλαίσιο στο σταθμό βάσης.

Το downlink υποπλαίσιο χωρίζεται σε δυο ζώνες, στην downlink ζώνη όπου ο σταθμός βάσης και οι αναμεταδότες συγχρονίζονται για να διαβάζουν τα δεδομένα που θέλει να στείλει ο απομακρυσμένος χρήστης. Ενώ στην διαφανή ζώνη ο αναμεταδότης διαβιβάζει τα δεδομένα στον απομακρυσμένο χρήστη, εκείνη την ώρα ο σταθμός βάσης μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε κατάσταση.

Στην συνέχεια ακολουθεί το uplink υποπλαίσιο, το οποίο χωρίζεται κι αυτό με τη σειρά του σε δυο ζώνες. Στην uplink ζώνη ο απομακρυσμένος χρήστης επικοινωνεί με τον αναμεταδότη ώστε να στείλει στο σταθμό βάσης. Έπειτα στην ζώνη αναμετάδοσης, ο αναμεταδότης στέλνει το πλαίσιο στο σταθμό βάσης. Στο διάστημα αυτό ο απομακρυσμένος χρήστης δεν κάνει τίποτα, αφού συνειδητοποιεί ότι κάποιος μεταδίδει τα δεδομένα του. Προκειμένου να βελτιωθεί η συνολική απόδοση του δικτύου γίνεται αναμετάδοση του ιδίου σήματος στην ίδια ζώνη. Δηλαδή υπάρχει παράλληλη επικοινωνία μεταξύ δυο η περισσότερων ζευγών από κόμβους (από BS με RS, από RS με RS κτλ) στην ίδια ζώνη αναμετάδοσης και μ' αυτόν τον τρόπο αξιοποιούμε πλήρως τους πόρους του καναλιού. Μειονέκτημα της διαφανής αναμετάδοσης είναι ότι ένα μέρος από τις πληροφορίες ελέγχου που στέλνει ο σταθμός βάσης αποτελεί προοίμιο, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους απομακρυσμένους σταθμούς για έλεγχο του καναλιού. Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι ότι ο MS πρέπει να περιμένει κάποιο διάστημα, ώστε να αλλάξει συχνότητα από το σταθμό βάσης και οι αναμεταδότες να αλλάζουν το σήμα αντίστοιχα [9] [3] [5].



**Εικόνα 32:** Δομή πλαισίου στη διαφανή λειτουργία αναμετάδοσης.

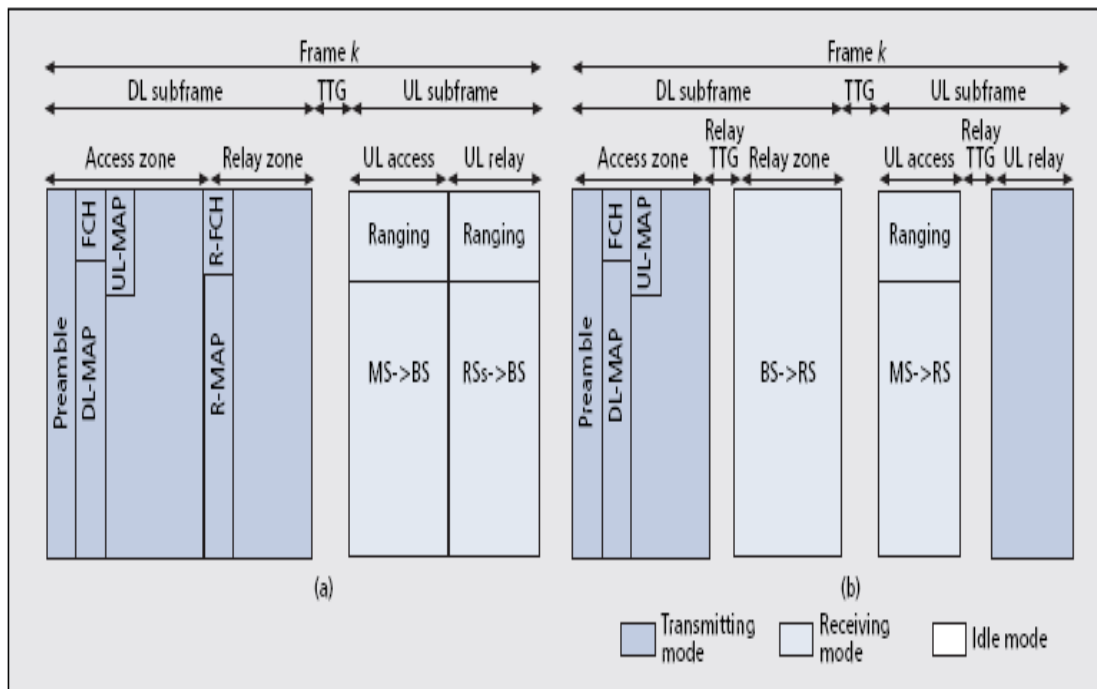
Γενικά οι αναμεταδότες λειτουργούν σύμφωνα με το μοντέλο decode-and-forward, αν και δεν αναφέρεται στο πρότυπο. Αυτό συμβαίνει γιατί το MAC επίπεδο απαιτεί κάποιες πληροφορίες στην κεφαλίδα του πλαισίου, οι οποίες αγνοούνται στο φυσικό επίπεδο. Εξαιρέση αποτελεί η απευθείας ζώνη αναμετάδοσης, όπου ο αναμεταδότης αποκωδικοποιεί το σήμα πριν το μεταδώσει. Ενώ χωρίς αποκωδικοποίηση, ο αναμεταδότης μπορεί να στέλνει και να λαμβάνει δεδομένα στο ίδιο πλαίσιο, αυτό επιτρέπεται μόνο στη διαφανή αναμετάδοση πλαισίου.

Αντίθετα στη μη διαφανή λειτουργία αναμετάδοσης η δομή του πλαισίου είναι πιο σύνθετη. Το γεγονός ότι ο σταθμός βάσης και ο αναμεταδότης μεταδίδουν πλαίσια κεφαλίδες προκύπτουν προβλήματα συγχρονισμού, τόσο στο downlink όσο και στο uplink, καθώς το πρότυπο ορίζει ότι και τα δυο πρέπει να στέλνονται την ίδια στιγμή.

Το downlink υποπλαίσιο περιλαμβάνει τουλάχιστον μια ζώνη πρόσβασης και μια ή περισσότερες ζώνες αναμετάδοσης. Στη ζώνη πρόσβασης ο αναμεταδότης και οι σταθμοί βάσης συγχρονίζονται για μεταδώσουν στο απομακρυσμένο σταθμό. Έπειτα στη ζώνη αναμετάδοσης γίνεται έλεγχος της πληροφορίας.

Το uplink υποπλαίσιο, περιλαμβάνει μία ή περισσότερες ζώνες πρόσβασης και μια ή περισσότερες ζώνες αναμετάδοσης. Και στις δυο περιπτώσεις ο σταθμός βάσης μεταδίδει τρεις χάρτες τους οποίους χρησιμοποιούν οι σταθμοί αναμετάδοσης. Δυο για τον απομακρυσμένο σταθμό, και έναν για την επικοινωνία μεταξύ σταθμού βάσης με τον αναμεταδότη, τον λεγόμενο R-MAP. Σε περίπτωση που πρέπει να ξαναστείλει ο αναμεταδότης το πλαίσιο, στέλλεται το μήνυμα RS\_ACCESS-MAP από τον σταθμό βάσης στον αντίστοιχο αναμεταδότη.

Κύριο μειονέκτημα της μη διαφανής αναμετάδοσης είναι ότι ο σταθμός βάσης και οι αναμεταδότες μπορεί να μεταδίδουν ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα. Έτσι θα πρέπει να γίνεται έλεγχος του καναλιού πριν την μετάδοση. Επιπλέον το γεγονός ότι οι μη διαφανείς αναμεταδότες είναι πιο εξελιγμένοι, τους κάνει πιο ακριβούς και μπορούν να πάρουν αποφάσεις για υψηλότερα στρώματα. [9] [3] [5]



**Εικόνα 33:** Δομή πλαισίου στη μη διαφανή λειτουργία αναμετάδοσης

Το πρότυπο έχει υιοθετήσει την χρήση της πρόσβασης OFDMA. Χρησιμοποιεί τεχνολογία που μειώνει τις πολλαπλές διαδρομές και δίνει τη δυνατότητα multi-user λειτουργικότητας με την καλύτερη χρήση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων. Η OFDMA τεχνολογία χωρίζει το πλαίσιο σε μια δισδιάστατη δομή της timeslot-subcarrier υποδοχής. Μια OFDMA τεχνική που βασίζεται σε MMR WiMAX δίκτυο πρέπει να προσδιορίσει την κατανομή των χρονοθυρίδων ώστε να κατανέμονται ιεραρχικά οι προτεραιότητες για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις εύρους ζώνης του δικτύου.

Το πρότυπο δεν προσδιορίζει συγκεκριμένο προγραμματισμό συστήματος. Στη συνέχεια γίνεται μια προσπάθεια να καθοριστεί ένας ευρετικός προσαρμοστικός αλγόριθμος ORS χρονοπρογραμματισμού για την προτεραιότητα κυκλοφορίας σε δίκτυα IEEE 802.16j. Τα βασικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι ο υπολογισμός των ορίων της ζώνης προσαρμογής, σε εύρος ζώνης και ο αριθμός των αναμεταδοτών και κινητών σταθμών του δικτύου. Έπειτα γίνεται καθορισμός του χρονοδιαγράμματος, δηλαδή πως θα γίνει η ανάθεση subcarrier time slot υποδοχών με προτεραιότητα κυκλοφορίας, βάση τη ζήτηση και τέλος επιλογής συχνότητας σε μια ζώνη [9].

## 4.6 Αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού

Μια περίοδος χρονοπρογραμματισμού αποτελείται από συγκεκριμένο αριθμό πλαισίων. Ο αριθμός αυτός μεταβάλλεται ανάλογα με το ρυθμό μετάδοσης. Ο χρόνος που προσδιορίζεται από μια χρονική στιγμή-subchannel είναι ανάλογος με ένα πλαίσιο OFDMA. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά μιας προσομοίωσης που έγινε από φοιτητές του τμήματος πληροφορικής του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια το 2008. Η προσομοίωση αυτή σχετίζεται με την OFDMA αναμετάδοση και σκοπός της είναι να αντιμετωπίσει τρία διαφορετικά προβλήματα που είναι τα εξής: την κατάσταση του πλαισίου 802.16j σε διαφορετικές ζώνες με βάση τις απαιτήσεις εύρους ζώνης των απομακρυσμένων σταθμών και των σταθμών αναμετάδοσης, επίσης τις συνθηκες κάτω από τις οποίες λειτουργεί το κανάλι και τέλος την αναδιάταξη των χρηστών αν αυξηθούν ή μειωθούν ο υποδοχές. Για την υλοποίηση της προσομοίωσης προτάθηκε ένας προσαρμοστικός αλγόριθμος ORS (OFDMA Relay Scheduler). Σύμφωνα με τον οποίο, για κάθε κυκλοφορία ανάμεσα στον απομακρυσμένο σταθμό και το σταθμό αναμετάδοσης αποτελεί μια περίοδος προγραμματισμού. Ο προγραμματισμός χωρίζεται στην εκτίμηση εύρους ζώνης και στον προγραμματισμό των slot.

Αρχικά υπολογίζεται η είσοδος κυκλοφορίας TA (Traffic Admittance) δηλαδή το ποσοστό κυκλοφορίας που καθορίζεται σ' ένα σύνολο κόμβων. Η κυκλοφορία είναι αποδεκτή αν υπάρχουν διαθέσιμες χρονοθυρίδες από την πηγή στον προορισμό και υπολογίζεται ως εξής:

$$TA = \frac{\sum_i w_i A_i}{\sum_i w_i T_i} \quad (4.1)$$

όπου  $w_i$  είναι το βάρος κάποιας συγκεκριμένης υπηρεσίας, το  $A_i$  είναι η κυκλοφορία της συγκεκριμένης κατηγορίας και  $T_i$  είναι η απαιτούμενη κυκλοφορία για την συγκεκριμένη κατηγορία [3].

Ένα πλαίσιο 802.16j διαιρείται στη ζώνη πρόσβασης και αναμετάδοσης. Η ζώνη πρόσβασης χρησιμοποιείται για να μεταδίδουν οι σταθμοί βάσης και η ζώνη αναμετάδοσης για να αναμεταδίδουν οι αναμεταδότες. Την ζώνη αναμετάδοσης την χωρίζουμε σε άρτιους και περιττούς αναμεταδότες για τη διατήρηση της half-duplex μετάδοσης των κόμβων. Οι κόμβοι μπορούν να εναλλάσσονται στους μόνους ή διπλούς. Στην ζώνη αναμετάδοσης με περιττό αριθμό κόμβων, οι σταθμοί βάσης εκχωρούν μια παραπάνω επισήμανση έτσι ώστε να γίνει γνωστό στους υπολοίπους, αντίστοιχα γίνεται και στους αρτίους. Η διαίρεση του πλαισίου μπορεί να γίνει οποιαδήποτε χρονική στιγμή ανάλογα με τις απαιτήσεις εύρους ζώνης των κόμβων και το ποσοστό εισόδου κυκλοφορίας που αναφέραμε προηγουμένως για τις διάφορες συνδέσεις. Σ' ένα πλαίσιο OFDMA το πρόβλημα είναι αρκετά σύνθετο γιατί κάθε φορά η συχνότητα εισόδου διαμορφώνεται ανάλογα με το σήμα που δεχόμαστε RSSI (Received Signal Strength Indication) και το CINR (Carrier to Interference-plus-Noise Ratio) του slot. Τα slot διατίθενται

ανάλογα με τη ζήτηση ώστε να δίνεται κάθε φορά προτεραιότητα στους κόμβους. Όταν ο σταθμός βάσης δεν γνωρίζει τις τιμές του CINR και RSSI, υποθέτει ότι τα υποκνήμια έχουν το ελάχιστο, πιο υψηλό ρυθμό. Όταν ο σταθμός λαμβάνει πληροφορίες σχετικά με το CINR και RSSI σε διαφορετική σύνδεση, δεν μπορεί να καθορίσει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που χρησιμοποιείται από το subchannel. Αν το RSSI / CINR για ένα subchannel μιας σύνδεσης έχει το χαμηλότερο ποσοστό τότε θεωρείται άχρηστο. Το υποκανάλι subchannel ξαναχρησιμοποιείται όταν αυξηθεί το ποσοστό. Ο αλγόριθμος υποθέτει ότι το σταθμός βάσης, ο αναμεταδότης και ο απομακρυσμένος σταθμός ανταλλάσσουν συχνά μηνύματα REP-REG και REPRSP έτσι ώστε το κανάλι να είναι ενημερωμένο [3].

Το εύρος ζώνης ενός συνδέσμου  $i$  συμβολίζεται με  $BW_i$  και τα ποσοστά του συνδέσμου για τα υποκανάλια δηλώνονται ως  $R_1, R_2, \dots, R_K$ . Ο αριθμός των slots που απαιτούνται από την σύνδεση  $i$  είναι ίσος με  $BW_i$  προς τον μέσο όρο των ποσοστών των υποκαναλιών στρογγυλοποιημένος προς την μεγαλύτερη υψηλή τιμή με την προϋπόθεση ότι ο συνολικός αριθμός του διαθέσιμου χρόνου δεν είναι υψηλότερος από το μέγεθος του πλαισίου. Οι απομακρυσμένοι σταθμοί που είναι άμεσα συνδεδεμένοι με τον σταθμό βάσης χαρακτηρίζονται με το σύμβολο  $M$ . Το  $MT$  αντιπροσωπεύει τους σταθμούς για διαφανή αναμετάδοση και  $MR$  τους σταθμούς για μη διαφανή αναμετάδοση. Ενώ με το σύμβολο  $NR$  αναφέρονται τα μη διαφανή κέντρα αναμετάδοσης και με  $TR$  τα διαφανή. Οι κόμβοι στέλνουν συνολικά τη ζήτηση εύρους ζώνης για κάποια υπηρεσία προς τους σταθμούς βάσης. Με βάση τον αλγόριθμο ο σταθμός βάσης υπολογίζει την συνολική ζήτηση του κάθε κόμβου με βάση το εύρος ζώνης και τις απαιτήσεις εισόδου κυκλοφορίας βάση τη συνολική ζήτηση και τις τιμές των συνδέσεων. Ο σταθμός βάσης στη συνέχεια υπολογίζει το άθροισμα της συνολικής απαίτησης όλων των απομακρυσμένων σταθμών που συνδέονται άμεσα μ' αυτόν και αυτών που συνδέονται με διαφανή αναμετάδοση [3].

$$\text{SumAccess} = M_{a1} + M_{a2} + M_{Ta6} + \dots \text{ Access Zone Proportion} \quad (4.2)$$

$$\text{Access Zone Proportion} = \max (\text{SumAccess}, \text{childMS} (NR_{a1}), \dots, \text{childMS} (NR_{an})) \quad (4.3)$$

Όπου  $\text{childMS} (RAI)$  αντιπροσωπεύει το άθροισμα των slots του απομακρυσμένου σταθμού στη διαφανή λειτουργία αναμετάδοσης  $i$ . Ο παραπάνω τύπος μεταφράζεται ως ο ανώτατος αριθμός διαθέσιμων χρόνων που απαιτούνται από μια ζώνη πρόσβασης θα είναι η μέγιστη ζήτηση υποδοχής των απομακρυσμένων σταθμών σε οποιοδήποτε επίπεδο, βάσει των σταθμών βάσης ή ενός συγκεκριμένου αναμεταδότη. Σ' ένα κατανομημένο μοντέλο ο σταθμός βάσης δεν γνωρίζει για το υποδέντρο της διαφανής αναμετάδοσης. Για τους υπολογιστές  $\text{AccessZoneProportion}$  ο σταθμός βάσης καθορίζει τη μέγιστη ζήτηση εισαγωγής όλων των απομακρυσμένων σταθμών και των αναμεταδοτών του. Για την  $\text{ORZoneProportion}$ , θα υπολογίζει το άθροισμα του συνολικού διαθέσιμου



χρόνου χρήσης που απαιτείται για τη λειτουργία των κόμβων που είναι one-hop από το σταθμό βάσης [3][21].

#### 4.6.1 Προσαρμοστική περίοδος σχεδίου

Μια περίοδος σχεδιασμού ορίζεται ως ένας ακέραιος αριθμός πλαισίων πέρα από αυτό που κρατά το πρόγραμμα. Χαρακτηριστικά, μια περίοδος σχεδιασμού είναι περισσότερα από ένα πλαίσια, δεδομένου ότι το κόστος και το πρόγραμμα σε κάθε πλαίσιο είναι πάρα πολύ υψηλό. Μια σταθερή περίοδος σχεδιασμού δεν απεικονίζει τη δυναμική φύση των ασύρματων δικτύων. Οι ποικίλοι όροι συνδέσεων και η κινητικότητα πελατών είναι βασικά χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων [3][21].

Ο αλγόριθμος ORS βασίζεται στη σταθερότητα, την αύξηση/μείωση του ποσοστού καθώς και την αλλαγή ζήτησης στο δίκτυο. Το SPmax είναι ο μέγιστος αριθμός πλαισίων σε οποιαδήποτε περίοδο σχεδιασμού. Πρέπει να είναι τέτοιο ώστε οι αλλαγές στην απαίτηση εύρους ζώνης να απεικονίζονται σε ένα πρόγραμμα σε έναν λογικό χρόνο που καθορίζεται από τον αλγόριθμο. Η ελάχιστη περίοδος σχεδίου βασίζεται στον όρο:

$$C + hd < SPmin \times f \quad (4.4)$$

όπου το C είναι το κόστος ενός προγράμματος, το h είναι ο αριθμός των hops για ένα δίκτυο, το d είναι η συνολική καθυστέρηση σε κάθε hop και f είναι το μέγεθος των πλαισίων. Το SPmin είναι ο μικρότερος ακέραιος αριθμός που ικανοποιεί τον παραπάνω όρο. Στην αρχή η περίοδος σχεδιασμού είναι SPmax, οπότε ο χρήστης ρυθμίζει το ποσοστό αυξομειώνοντας το κι έπειτα το ORS καθορίζει τον όρο για την περίοδο σχεδιασμού. Εάν ο όρος ικανοποιείται, η περίοδος σχεδιασμού διχοτομείται. Αυτό συνεχίζεται έως ότου η περίοδος σχεδιασμού γίνει SPmin έτσι ώστε να ισχύει για τον αριθμό των M frames  $M \geq SP$ . Εάν δεν μπορούμε να ξανά προγραμματίσουμε τα πλαίσια M, τότε διπλασιάζουμε την SP μέχρι αυτή να γίνει SPmax [3][21].

#### 4.6.2 Αύξηση-μείωση του ποσοστού

Το ORS παρακολουθεί τον αριθμό πιθανών αυξήσεων του ποσοστού σε μια περίοδο σχεδιασμού. Εάν ο αριθμός αυξήσεων ποσοστού είναι μεγαλύτερος από το ορισμένο του προγράμματος κατώτατο όριο, τότε ο ευρετικός κανόνας αποφασίζει εάν θα το αυξήσει. Η τιμή του κατώτερου ορίου χρησιμοποιείται για να καθορίσει τη σταθερότητα της σύνδεσης. Ο ευρετικός κανόνας καθορίζει εάν ο αριθμός των πλαισίων από την τελευταία περίοδο σχεδιασμού είναι μεγαλύτερος ή ίσος από το SPmin. Αυτό πρόκειται να εξασφαλίσει ότι το κόστος και ένα νέο πρόγραμμα δεν είναι ένας περιοριστικός παράγοντας. Εάν το ποσοστό, μας ικανοποιεί τότε ο ευρετικός χρησιμοποιεί τον ακόλουθο όρο:

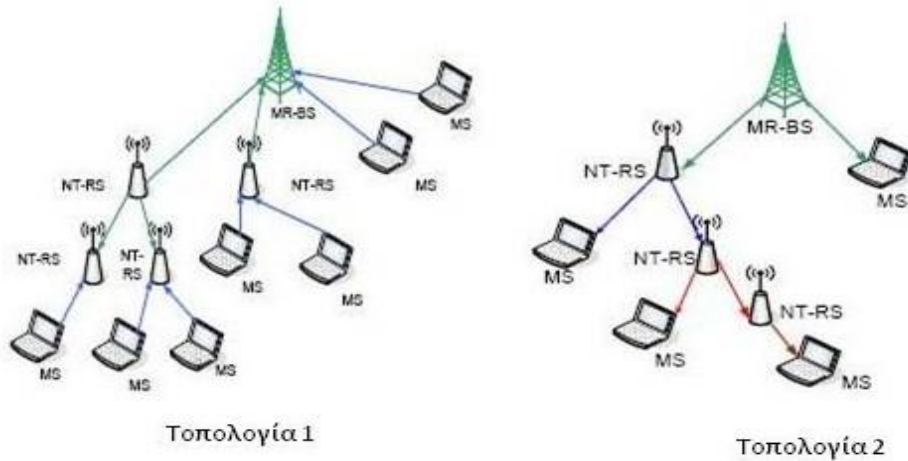
$$\left( \sum s_i (r_i^{new} - r_i^{old}) \geq p \sum s_i * r_i^{old} \right) \cap (Bw - \sum s_i r_i^{old} > 0) \quad (4.5)$$

Στο πρώτο μισό αυτού του όρου, το  $S_i$  δείχνει την τιμή ενός νέου slot, στο οποίο αναφέρεται η παλιά και νέα τιμή του αντίστοιχα, σε περίπτωση που υπάρχει αλλαγή του ποσοστού. Το  $p$  δείχνει την αξία του ποσοστού που μπορεί να διευκρινιστεί από το διαχειριστή του δικτύου. Αυτό χρησιμοποιείται πρώτιστα για να καθορίσει εάν το κέρδος στη ρυθμοαπόδοση θα δικαιολογούσε το ξανά προγραμματισμένο κόστος. Το δεύτερο μισό αυτού του όρου, ποσοτικοποιεί εάν υπάρχει αν υπάρχει ανικανοποίητη ζήτηση. Εάν δεν υπάρχει, τότε η αναδιόρθωση μπορεί να αναβληθεί αφού δεν θα υπάρχει κάποιο κέρδος στην απόδοση που θα προκύψει. Το  $bw$  αναφέρεται στην τρέχοντα ζήτηση εύρους ζώνης και το υπόλοιπο άθροισμα υποδηλώνει την ικανοποιητική η ζήτηση εύρους ζώνης. Εάν η συνθήκη είναι true, τότε ο αλγόριθμος κάνει αναδιόρθωση και μειώνει στο μισό την προγραμματισμένη περίοδο. Η μείωση συνεχίζεται μέχρι η  $SP$  να γίνει  $SP_{min}$  [3][21].

Η μείωση του ποσοστού μπορεί να επηρεάσει κι άλλες συνδέσεις, δηλαδή μπορεί να μειωθεί το εύρος ζώνης κάποιου κόμβου με αποτέλεσμα να μην είναι σε θέση να μεταδώσει, γι αυτό θα πρέπει να ελέγχεται πριν απ' το σταθμό βάσης. Εάν η απαίτηση εύρους ζώνης της σε πραγματικό χρόνο κυκλοφορίας δεν ικανοποιείται αλλά η σύνδεση υποστηρίζει υψηλό ρυθμό, ο ευρετικός κανόνας ξανά προγραμματίζει. Ωστόσο, εάν η σύνδεση δεν είναι σε θέση να διατηρήσει το ελάχιστο πιο υψηλό ρυθμό σε όλα τα υποκανάλια, τότε διακόπτεται η σύνδεση κι έπειτα ο ευρετικός κανόνας αλλάζει τη διαδικασία προγραμματισμού. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης προσπαθεί να ανακαλύψει ένα πιο ισχυρό μονοπάτι, όπου οι αναμεταδότες που θα επιλέξει θα υποστηρίζουν υψηλότερους ρυθμούς. Για όσο θα ανακαλύπτονται νέα μονοπάτια θα υπολογίζεται και ένα νέο πρόγραμμα, τα παλιά δεν λαμβάνονται υπόψη. Κάθε φορά που δημιουργείται χρονοδιάγραμμα ο  $SP$  μειώνεται κατά το ήμισυ μέχρι να φτάσει στο  $SP_{min}$ . Εάν μια προηγούμενη "άχρηστη" σύνδεση μπορεί να υποστηρίξει τον ελάχιστο υψηλό ρυθμό και να βελτίωση την ποιότητα των πλαισίων τότε ξανά χρησιμοποιείται [3].

### 4.6.3 Αποτελέσματα της προσομοίωσης

Για την υλοποίηση της προσομοίωσης, οι τοπολογίες που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Η τοπολογία 1 έχει μεγαλύτερο αριθμό hops και οι απομακρυσμένοι σταθμοί MSs συνδέονται με το σταθμό βάσης MR-BS, ενώ στην τοπολογία 2 το δεξί μέρος είναι σαν μια τοπολογία δέντρου. Τα δίκτυα των κόμβων είναι μικρά λόγω του μεγάλου εύρους των σταθμών βάσης BS και των σταθμών αναμετάδοσης RSS [3].



**Εικόνα 34:** Τα δίκτυα 802.16j που χρησιμοποιήσαμε για την προσομοίωση

Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε τοπολογία δέντρου. Η διάρκεια ζωής μιας ροής διανέμεται εκθετικά και χρησιμοποιείται για να παράγει τον χρόνο αναχώρησης των ροών. Ο αριθμός των ροών που δημιουργούνται κάθε φορά είναι διαφορετικός, επειδή δημιουργούνται τυχαία. Ο κάθε τύπος αντιστοιχίζεται με ένα διαφορετικό εύρος ζώνης. Κάθε ροή έχει μια διαφορετική διαδρομή που υπολογίζεται από την πηγή και την τοπολογία που προσθέτει ο χρήστης. Στις προσομοιώσεις λαμβάνεται υπόψη μόνο η ροή της uplink, παρόλο που το χρονοδιάγραμμα επεκτείνεται και στην downlink. Το μήκος των frames και ο αριθμός των υποκαναλιών μπορεί να τροποποιείται ανάλογα με το διάγραμμα [3].

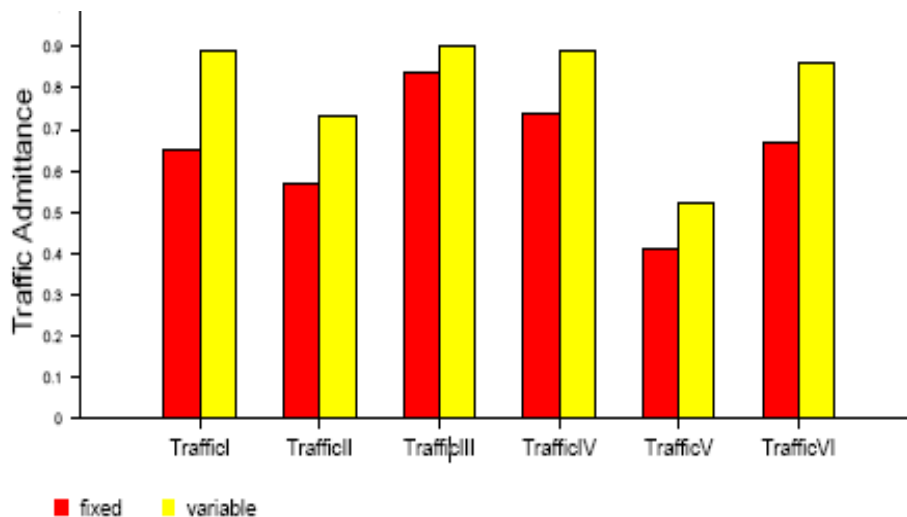
Ο κάθε κόμβος υπολογίζει το συνολικό εύρος ζώνης που χρειάζεται ανάλογα με την κίνηση, συμπεριλαμβανομένου και της κίνησης των κόμβων παιδιών του. Ο προγραμματιστής στη συνέχεια υλοποιεί το πρόγραμμα ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Αυτό περιλαμβάνει τον υπολογισμό του ορίου ζώνης καθώς και την κατανομή κυκλοφορίας των χρονοθυρίδων των υποκαναλιών.

Αρχικά οι τιμές των υποκαναλιών διαβάζονται από ένα αρχείο ώστε να αποφασιστεί πιο υποκανάλι θα επιλεγεί σε κάθε σύνδεση καθώς επίσης και για τον αριθμό των slot που θα χρειαστούν. Σε κάθε hop για κάθε κατηγορία υπηρεσίας ο προγραμματιστής διαθέτει το ανάλογο εύρος ζώνης. Το πρόγραμμα που υπολογίζεται για κάθε σύνδεση αποθηκεύεται σαν ένα δισδιάστατο υποκανάλι που αποτελείται από timeslots. Στόχος του είναι να διαθέσει το λιγότερο εύρος ζώνης για την κυκλοφορία κάθε υπηρεσίας [3].

Ο μεσολαβητής προσαρμοστικότητας παρακολουθεί τις τιμές των κατώτατων ορίων και αλλάζει τα ποσοστά των τυχαία επιλεγμένων υποκαναλιών για τις διάφορες συνδέσεις του κάθε πλαισίου. Επίσης, αλλάζει τη ζήτηση, δηλαδή την απαίτηση εύρους ζώνης των τυχαία επιλεγμένων κόμβων του κάθε πλαισίου. Έτσι με τις τιμές αυτές, αλλά και τις τιμές των κατώτατων ορίων, δημιουργείται ένα νέο χρονοδιάγραμμα πριν την ολοκλήρωση του τρέχοντος. Τα αποτελέσματα

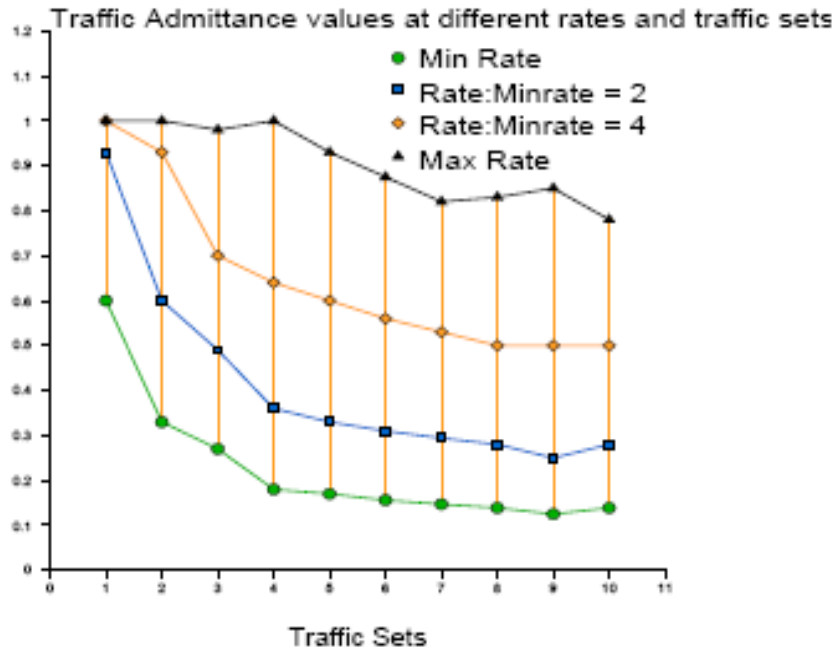
συγκρίνονται με βάση την κυκλοφορία ΤΑ (Traffic Admittance) και είναι ανάλογη με τα διάφορα δίκτυα που χρησιμοποιούνται. Τα αποτελέσματα αναλύονται παρακάτω:

Σύμφωνα με το πρώτο αποτέλεσμα αναδεικνύεται η αποδοτικότητα της προσαρμοστικής ζώνης κατανομής σε σύγκριση με της σταθερής ζώνης κατανομής. Οι τιμές ροής εισαγωγής ήταν ίδιες και για τα δύο δίκτυα. Στην προσαρμοστική ζώνη, η ζώνη πρόσβασης και αναμετάδοσης υπολογίζονται βασισμένες στο ποσοστό ζήτησης κυκλοφορίας. Στη σταθερή ζώνη κατανομής διαιρέθηκε το uplink σε δυο ίσα μέρη, ένα για κάθε ζώνη. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που φαίνονται στο σχήμα, η προσαρμοστική ζώνη παράγει καλύτερες τιμές ΤΑ. Αυτό γιατί στην προσαρμοστική οι απαιτήσεις της τοπολογίας καθώς επίσης και των συνδέσεων είναι λιγότερες. Η προσαρμοστική ζώνη κατανομής είναι αποδοτικότερη, καθώς το διαφορετικό ποσοστό της σταθερής κατανομής μπορεί να παρέχει ένα καλύτερο αποτέλεσμα. Αυτό μπορεί να ισχύει για μερικά συγκεκριμένα σενάρια κίνησης αλλά όχι όλα [3].



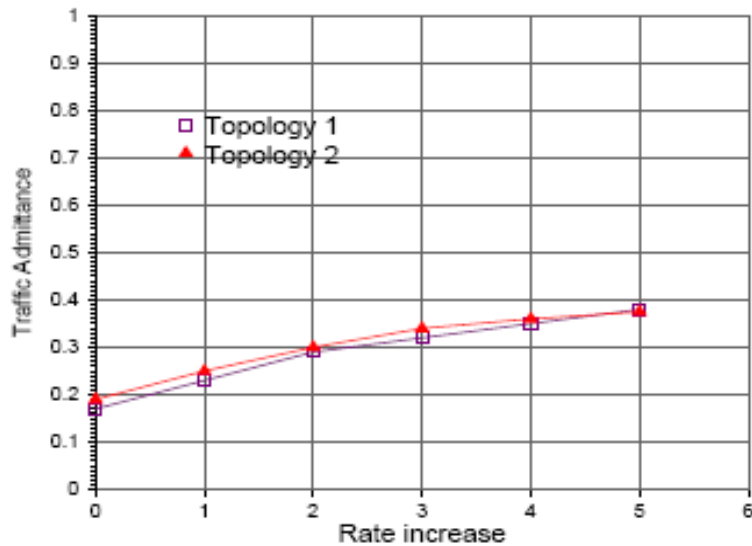
**Εικόνα 35:** Προσαρμοστική και σταθερή ζώνη κατανομής

Το επόμενο αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι η αποτελεσματική αλλαγή του ρυθμού σε σύγκριση με το ανώτερο και κατώτερο όριο. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται το σύνολο της κυκλοφορίας στα υποκανάλια όπου έχουν συνδέσεις με το ελάχιστο και το μέγιστο δυνατό ποσοστό ρυθμού αντίστοιχα. Έπειτα διπλασιάστηκαν τα ποσοστά σύνδεσης των υποκαναλιών, τα οποία αναφέρονται για όλα τα σύνολα της κίνησης. Το σχήμα που φαίνεται παρακάτω είναι το αποτέλεσμα και αναφέρεται στην πρώτη τοπολογία [3].



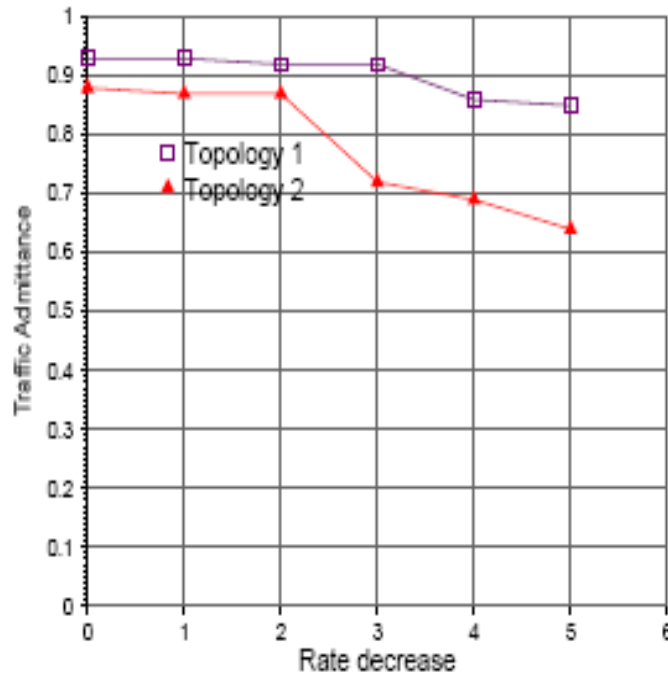
**Εικόνα 36:** Αποτελεσματική αλλαγή ποσοστού έναντι των ελάχιστων και ανώτατων ορίων

Σύμφωνα με το σχήμα που φαίνεται παρακάτω, διακρίνουμε την αύξηση της τιμής των δυο τοπολογιών χρησιμοποιώντας την ίδια κίνηση. Η αύξηση των τιμών δεν είναι ομοιόμορφη σε όλα τα υποκανάλια και τις συνδέσεις. Αυτή εξαρτάται από την σύνδεση που θα επιλεγεί, άλλα και από τις απαιτήσεις κυκλοφορίας της συγκεκριμένης σύνδεσης [3][21].



**Εικόνα 37:** Αποτέλεσμα αύξησης του ποσοστού

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το αποτέλεσμα μείωσης του ποσοστού και στις δυο τοπολογίες, για την ίδια κυκλοφορία. Η μείωση του ποσοστού δεν είναι ομοιόμορφη για τα τυχαία υποκανάλια που έχουν επιλεχτεί. Το ποσοστό στην αρχή είναι σταθερό για τις δυο τοπολογίες, γιατί ο αλγόριθμος ξανά υπολογίζει τη ζώνη διαχωρισμού για να αντισταθμίσει το μειωμένο ποσοστό. Έπειτα η διαφορά της μείωσης φαίνεται ότι είναι μεγάλη. Η πρώτη τοπολογία φαίνεται να αποδίδει καλύτερα, γιατί έχει δυο απομακρυσμένους σταθμούς MSs που συνδέονται άμεσα με το σταθμό βάσης, ενώ η δεύτερη έχει ένα σταθμό [3].



**Εικόνα 38:** Αποτέλεσμα μείωσης του ποσοστού

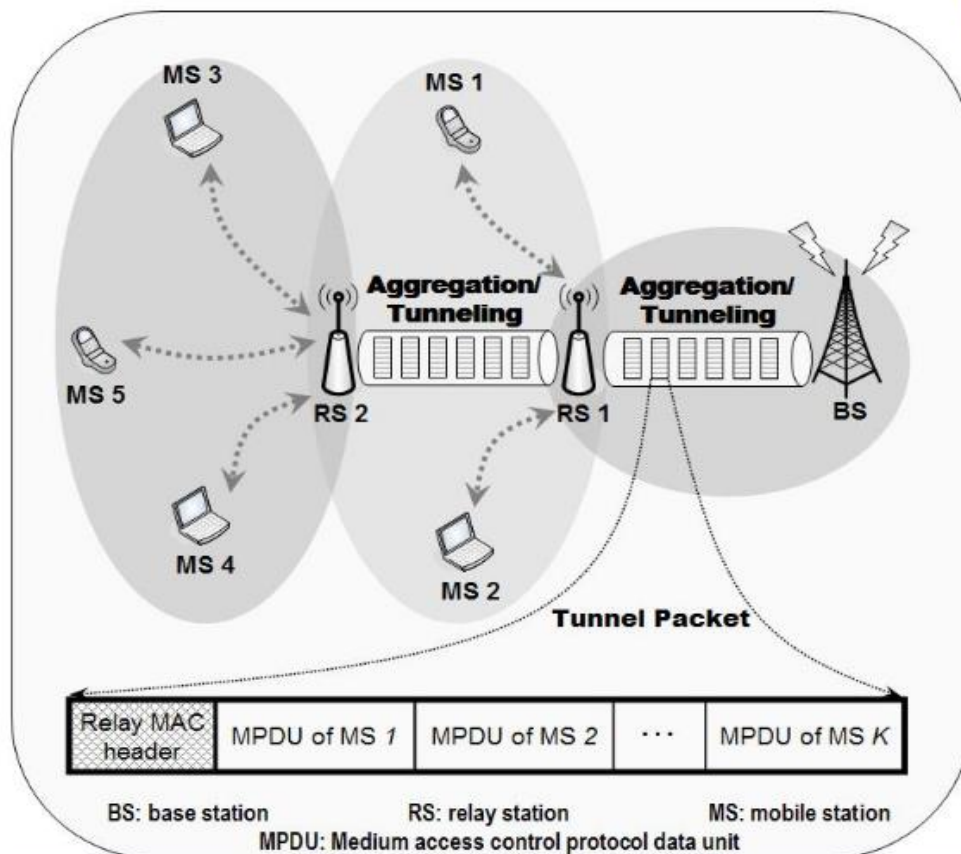
#### 4.7 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται το φυσικό επίπεδο του προτύπου, όπου το πλαίσιο χωρίζεται στην downlink και uplink ζώνη και χρησιμοποιείται από τον BS και MS αντίστοιχα. Επίσης αναλύεται το πλαίσιο OFDMA και οι τεχνικές TDD και FDD. Επιπλέον στη διαφανή αναμετάδοση οι απομακρυσμένοι χρήστες είναι άμεσα συνδεδεμένοι με το σταθμό βάσης ενώ στην μη διαφανή βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση. Επίσης αναφέρονται οι τεχνικές λειτουργίας των αναμεταδοτών που είναι η AF, η DSF και η DMF. Τέλος αποδεικνύεται ότι η προσαρμοστική ζώνη κατανομής είναι αποδοτικότερη σε σχέση με τη σταθερή καθώς αλλάζει ο αριθμός των κόμβων σε ένα δίκτυο.

## 5. Επίπεδο MAC

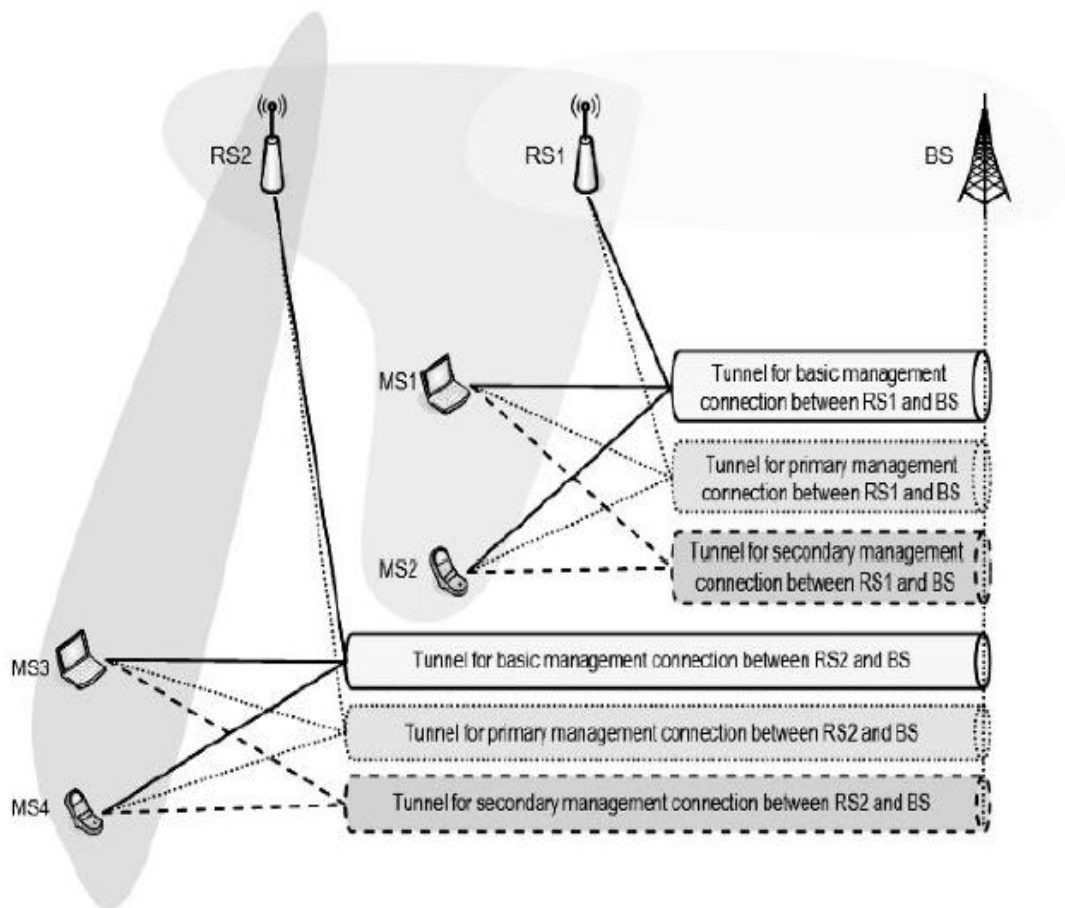
### 5.1 Προώθηση των πακέτων

Η προώθηση των δεδομένων βασίζεται στην τεχνική της “άθροισης της κίνησης” που αναφέρεται πιο πάνω και ορίζεται με δυο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος λέγεται tunnel-Packet, σύμφωνα με αυτόν όταν ο απομακρυσμένος σταθμός που θέλει να εισέρθει στο ‘τούνελ’ των αναμεταδοτών για να στείλει, προσθέτει ένα MAC header στο πακέτο του. Έτσι ο σταθμός αναμετάδοσης βλέπει τότε το πακέτο φτάνει στον προορισμό του. Το τούνελ προσφέρει τη δυνατότητα να υπάρχουν πολλές συνδέσεις για τούς απομακρυσμένους σταθμούς, οι οποίοι εξυπηρετούνται από τον ίδιο αναμεταδότη. Για παράδειγμα κάποιοι χρήστες κινούνται με κάποια οχήματα, έπειτα τα οχήματα αυτά μεταβιβάζονται σε κάποιο πλοίο, έτσι όλα τα οχήματα χρησιμοποιούν ένα πλοίο για να φτάσουν στον προορισμό τους.



Εικόνα 39: Tunnel Packet

Οι ξεχωριστές σήραγγες, που ονομάζονται συνδέσεις διαχείρισης σήραγγας, μπορούν να μεταφέρουν πακέτα διαχείρισης πολλαπλών hops. Το γεγονός ότι ο αναμεταδότης δεν κάνουν διάκριση μεταξύ των συνδέσεων, θα πρέπει να τηρούνται κάποιοι κανόνες ώστε όλοι να έχουν την δυνατότητα να στέλνουν και ο αριθμός των συνδέσεων, να αντιστοιχίζεται με αυτόν της σήραγγας. Όπως φαίνεται στο σχήμα υπάρχουν τρεις βασικές σήραγγες διαχείρισης. Η πρώτη και η δεύτερη είναι για την σύνδεση ανάμεσα στο σταθμό βάσης και τον αναμεταδότη (π.χ., RS1 και RS2). Στις σήραγγες εκτός από τα μηνύματα των σταθμών (π.χ., MS1 και MS2), υπάρχουν και εκείνα που δημιουργούνται από τους σταθμούς αναμετάδοσης (π.χ., RS2). Η δεύτερη σήραγγα χρησιμοποιείται ανάλογα με την κατάσταση της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Έτσι γίνεται καλύτερη διανομή της κίνησης στο δίκτυο [9][12][22].

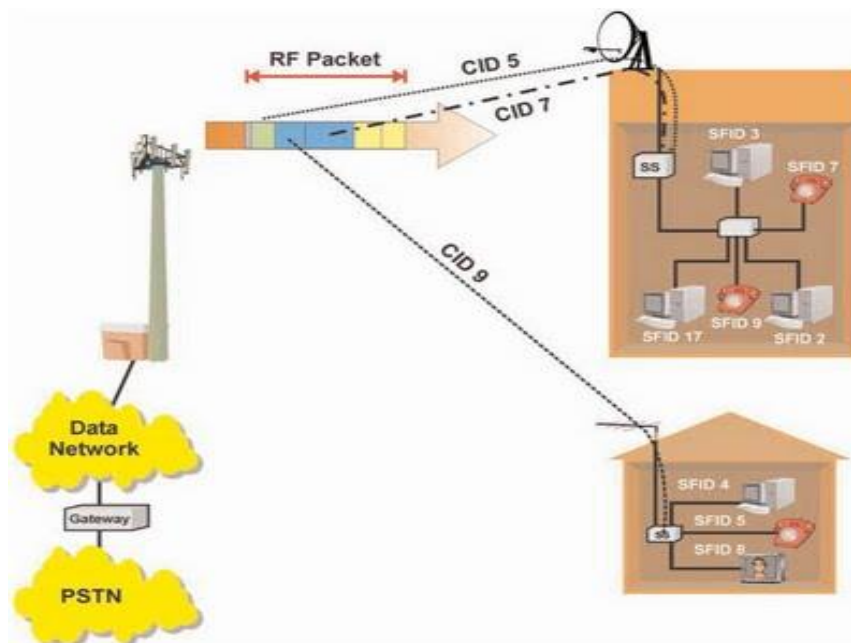


**Εικόνα 40:** Τεχνική tunneling προώθησης των πακέτων



Ο δεύτερος τρόπος λέγεται CID-based, σύμφωνα μ αυτόν τα πακέτα προωθούνται με βάση το CID του σταθμού προορισμού. Το CID (Cell Ids) καθορίζει τον αριθμό ταυτότητας των σταθμών βάσης από τις οποίες διέρχεται ο χρήστης. Το T-CID και MT-CID προέρχονται από τον ίδιο χώρο όπως CIDs και συνδέονται με ιδιαίτερες υπηρεσίες ροής. Το MT-CID εξυπηρετεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εισόδου του δικτύου χρησιμοποιώντας REG-RSP ή SBC-RSP μηνύματα, ενώ στις συνδέσεις σήραγγας μεταφέρονται με τη δυναμική προσθήκη (DSA) μηνυμάτων υπηρεσιών.

Για να προσδιοριστεί με μοναδικό τρόπο το κάθε τούνελ και οι παράμετροι QoS, προστίθεται ένα αναγνωριστικό ροής υπηρεσίας (SFID). Έτσι παρέχεται ένα σύνολο «ελάχιστων διαδρομών» (σύνολο από CIDs) οι οποίες δημιουργούν ένα «χάρτη κινητικότητας» της περιοχής κίνησης. Πιο συγκεκριμένα ο σταθμός βάσης, σύμφωνα με τις πληροφορίες που κατέχει, στέλνει το μήνυμα DSA προς τον αναμεταδότη, δηλαδή ένα SFID και T-CID δηλαδή προσθέτει ένα επιπλέον πεδίο σε κάθε πακέτο είτε στο downlink είτε στο uplink, που ενημερώνει για την κατάσταση του καναλιού και την καθυστέρηση των πακέτων. Επιπλέον τροποποιεί τις QoS παραμέτρους της σήραγγας ώστε να συμπεριλάβει τις απαιτήσεις QoS για τη συγκεκριμένη ροή. Έτσι ο αναμεταδότης θα πρέπει να αποφασίσει πιο πακέτο πρέπει να μεταδοθεί γρηγορότερα ώστε να μην υπάρχουν καθυστερήσεις στο δίκτυο [9][12][56].



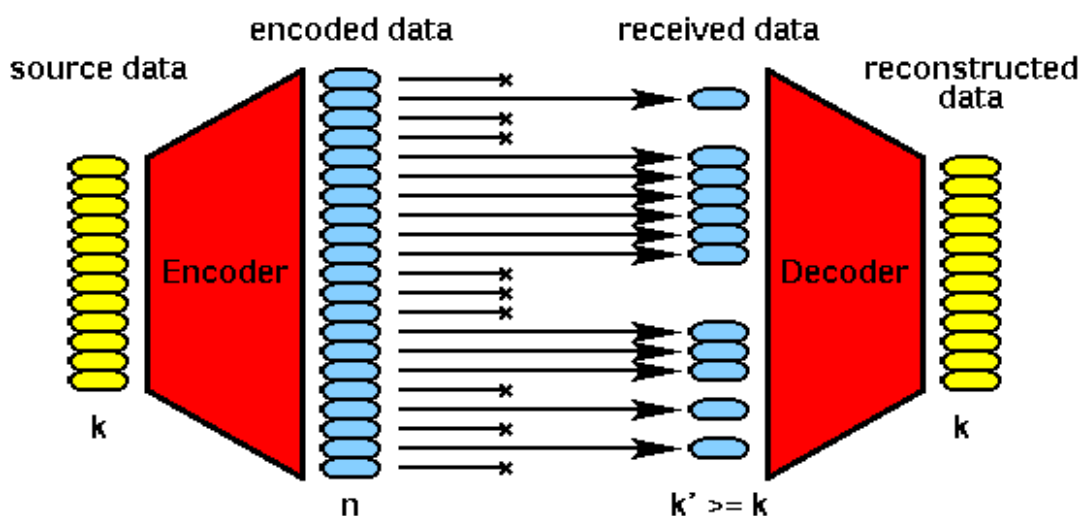
**Εικόνα 41:** Τεχνική CID-based προώθησης των πακέτων

## 5.2 Τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης σήματος

Στο ασύρματο περιβάλλον επικοινωνίας υπάρχουν πολλοί θόρυβοι και παρεμβολές. Η κατάσταση του καναλιού επικοινωνίας μεταβάλλεται στο χρόνο ακόμη και σε σταθερές ασύρματες επικοινωνίες. Προκειμένου να διορθωθεί η κατάσταση χρησιμοποιούνται τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Τα κινητά ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν τις τεχνικές BPSK και QPSK για διαμόρφωση μετατόπισης της φάσης στα δυαδικά δεδομένα των subcarriers κατά τη λήψη σε 180 και 90 μοίρες αντίστοιχα.

### 5.2.1 Τεχνική FEC

Η κωδικοποίηση του καναλιού είναι μια τεχνική που σκοπεύει να διορθώνει τα λάθη κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Τα περιττά αυτά «κομμάτια» προστίθενται στα δεδομένα πριν την μετάδοση. Για το λόγο αυτό, η κωδικοποίηση του καναλιού αναφέρεται και ως FEC (forward error-correction). Τα πρόσθετα αυτά κομμάτια δεν περιέχουν κάποιο νέο στοιχείο, απλώς διαβιβάζονται στο κομμάτι της πληροφορίας. Επιπλέον, η αύξηση της διάστασης του χώρου σήματος, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόστασης μεταξύ των διαφορετικών κωδικοποιημένων ακολουθιών των bits πληροφορίας. Έτσι τα σφάλματα της μετάδοσης μπορούν να διορθωθούν, εφόσον ο αριθμός των bits ανά σφάλμα δεν υπερβαίνει το μισό της ελάχιστης απόστασης του καναλιού που απασχολεί το σύστημα κωδικοποίησης. Αυτό που επιτυγχάνει η κωδικοποίηση, είναι να μειώσει το ρυθμό κωδικοποίησης λάθους και να αυξηθεί τη καθαρή πληροφορία (χωρίς πρόσθετα bits). Η κωδικοποίηση του καναλιού είναι μια σημαντική τεχνική ώστε να ξεπεραστεί η αναξιόπιστία των ασύρματων καναλιών και να επιτευχτεί αξιόπιστη επικοινωνία.



Εικόνα 42: Τεχνική κωδικοποίησης forward error-correction (FEC)

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα κωδικοποίησης καναλιού, όπως ο γραμμικός, ο συνελκτικός και ο συνδεδεμένος κώδικας. Ο γραμμικός κώδικας χρησιμοποιεί διάφορα bits ισοτιμίας σε ένα συγκεκριμένο block δεδομένων, για την ανίχνευση και διόρθωση λαθών της μετάδοσης. Τα bits της ισοτιμίας καθορίζονται από γραμμικούς συνδυασμούς των bits δεδομένων σε ένα πεπερασμένο πεδίο. Πολλαπλασιάζοντας το bits ισοτιμίας, ο πίνακας έλεγχου παίρνει τα κατάλληλα κομμάτια κι έτσι ο γραμμικός κώδικας μπορεί να προσδιορίσει και να ανιχνεύσει τα λάθη της μετάδοσης, όσο αυτά είναι ανιχνεύσιμα.

Ο συνελκτικός κώδικας δημιουργεί μια κωδικοποιημένη ακολουθία κομματιών. Κάθε κομμάτι της ακολουθίας είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των bits στοιχείων του πίνακα μετατόπισης. Τα πρώτα κομμάτια πληροφορίας δεδομένων μπορούν να ανακτηθούν με την επισήμανση κατάστασης της εκάστοτε ακολουθίας από τον πίνακα μετατόπισης. Η λειτουργία αυτή, σε συνδυασμό με κάποιο αλγόριθμο ανίχνευσης μπορεί να ανιχνεύσει την ελάχιστη πιθανότητα λάθους στην ακολουθία. Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιείται επίσης και στο mobile WiMAX.

Ο συνδεδεμένος κώδικας χρησιμοποιεί δυο επίπεδα κωδικοποίησης του καναλιού που συνήθως χωρίζονται από ένα interleaver που χρησιμοποιείται για την τυχαιοποίηση της κωδικοποιημένης ακολουθίας.

Πλεονέκτημα του συνδεδεμένου κώδικα είναι ότι μπορεί να εκμεταλλευτεί την αξία της επαναληπτικής αποκωδικοποίησης, όπου ένας αποκωδικοποιητής μπορεί να χρησιμοποιήσει την παραγωγή του άλλου αποκωδικοποιητή ως *preknowledge*. Λόγο αυτού, οι συνδεδεμένοι κώδικες υιοθετούνται επίσης και στο κινητό WiMAX, επιτυγχάνοντας γενικά την πολύ χαμηλή πιθανότητα λάθους σε λογικό επίπεδο πολυπλοκότητας [13][57].

### 5.2.2 Τεχνική AMC

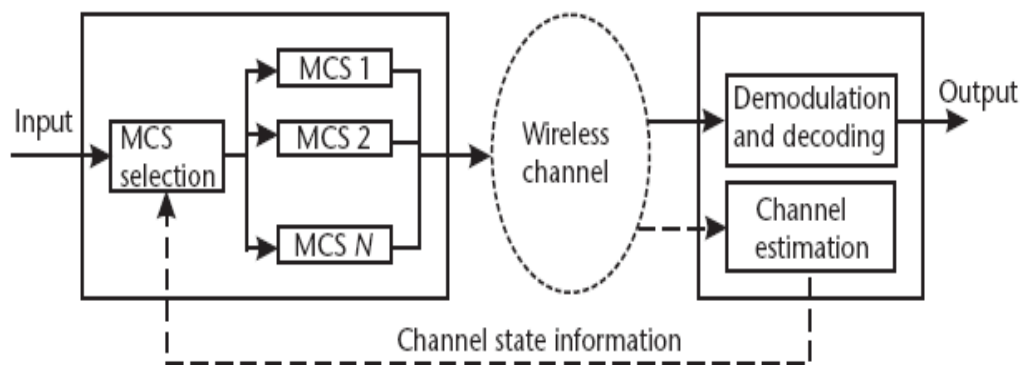
Προκειμένου να ενισχυθεί η ευρωστία των επικοινωνιών στο ασύρματο κινητό περιβάλλον, οι τεχνικές κωδικοποίησης του καναλιού χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τις τεχνικές διαμόρφωσης. Ως μέσο για την αύξηση της απόδοσης του συστήματος σε διάφορες καταστάσεις του καναλιού, το κινητό WiMAX χρησιμοποιεί μια συνδυασμένη μορφή τεχνικής κωδικοποίησης διαμόρφωσης του καναλιού, η οποία ονομάζεται προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση AMC (Adaptive Modulation and Coding).

Η AMC αλλάζει δυναμικά τις τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ανάλογα με τη κατάσταση του καναλιού. Όταν η κατάσταση του καναλιού είναι καλή, τότε επιλέγει υψηλής απόδοσης τεχνική κωδικοποίησης και υψηλή διαμόρφωση (πχ 64-QAM). Ενώ όταν είναι χαμηλή, χρησιμοποιεί χαμηλή κωδικοποίηση (πχ BPSK ή QPSK). Η OFDM τεχνική είναι κατάλληλη για χρήση σε συνδυασμό με την AMC, καθώς μπορεί να χρησιμοποιήσει διαφορετικούς τύπους διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για διαφορετικές ομάδες των subcarriers .

Για την αποτελεσματική λειτουργία της AMC, κάθε απομακρυσμένος σταθμός αναφέρει την κατάσταση του καναλιού του, στον BS, όπου γίνεται κυρίως αναφορά στο λόγο σήματος προς θόρυβο SNR (Signal-to- Noise Ratio) ή το λόγο φορέα

προς παρεμβολή (CIR ή C/I). Έπειτα ο σταθμός βάσης αποφασίζει ποια τεχνική διαμόρφωσης και κωδικοποίησης θα χρησιμοποιηθεί. Επόμενος, η τεχνική AMC απαιτεί κάποια διαδικασία εκτίμησης του καναλιού που είναι προς τον δέκτη και ένα μηχανισμό ώστε να τροφοδοτήσει το κανάλι με κατάλληλο σήμα, προκειμένου να σταλεί στον παραλήπτη.

Είναι σημαντικό για την εφαρμογή AMC, οι αποστολείς να αναφέρουν την τρέχουσα κατάσταση του καναλιού στον πομπό όσο το δυνατόν ακριβέστερα. Έτσι, η καθυστέρηση που προκαλείται για τον υπολογισμό και την παράδοση της κατάστασης του καναλιού, θα πρέπει να εκτελείται κάτω απ το συνεπή χρόνο του καναλιού. Έτσι η τεχνική AMC θα εκτελέσει χαμηλή απόδοση, αν το κανάλι αλλάζει ταχύτερα από αυτή την καθυστέρηση. Η συσκευή αποστολής (πομπός) βλέπει την κατάσταση του ανατροφοδοτημένου καναλιού ως τρέχον, και έτσι επιλέγει την τεχνική διαμόρφωσης και κωδικοποίησης MCS (*modulation and Coding scheme*) που θεωρεί ότι είναι πιο κατάλληλη για την εκάστοτε κατάσταση. Η παρακάτω εικόνα μας δείχνει τη συνολική λειτουργία της τεχνικής AMC.



**Εικόνα 43:** Τεχνική AMC

Η τιμή CIR αυξάνεται για όσο το κινητό τερματικό κινείται κοντά στον BS και μειώνεται όταν απομακρύνεται απ αυτόν. Δηλαδή η τιμή CIR μειώνεται όταν το κινητό τερματικό προσεγγίζει το όριο της κυψέλης όπου βρίσκεται. Το κάθε τερματικό αναφέρει περιοδικά στον BS πληροφορίες που αφορούν την κατάσταση του καναλιού μέσω του δείκτη ποιότητας CQI (*channel quality indicator*). Έτσι ο σταθμός βάσης αλλάζει δυναμικά στην κατάλληλη διαμόρφωση και κωδικοποίηση. Έτσι, με τη χρήση αυτής της λειτουργίας το κινητό WiMAX μπορεί να διατηρεί την κατάσταση μετάδοσης σε υψηλά επίπεδα. Ο πίνακας παρακάτω δείχνει το σύνολο MCS και τα αντίστοιχα ποσοστά για τα δεδομένα του Mobile WiMAX (10 MHz) και WiBro (8,75 MHz) [13][23][58][59][61].

**Πίνακας 2:** Το σύνολο MCS και τα αντίστοιχα ποσοστά για τα δεδομένα του Mobile WiMAX και WiBro (Όπου (a) Downlink και (b) Uplink )

| Data rate (kbps) WiMAX | Data rate (kbps) WiBro | FEC rate | Modulation |
|------------------------|------------------------|----------|------------|
| 624                    | 576                    | 1/12     | QPSK       |
| 936                    | 864                    | 1/8      | QPSK       |
| 1872                   | 1728                   | 1/4      | QPSK       |
| 3744                   | 3456                   | 1/2      | QPSK       |
| 5616                   | 5184                   | 3/4      | QPSK       |
| 7488                   | 6912                   | 1/2      | 16QAM      |
| 11232                  | 10368                  | 3/4      | 16QAM      |
| 11232                  | 10368                  | 1/2      | 64QAM      |
| 14976                  | 13824                  | 2/3      | 64QAM      |
| 16848                  | 15552                  | 3/4      | 64QAM      |
| 18720                  | 17280                  | 5/6      | 64QAM      |

(a)

| Data rate (kbps) WiMAX | Data rate (kbps) WiBro | FEC rate | Modulation |
|------------------------|------------------------|----------|------------|
| 280                    | 224                    | 1/12     | QPSK       |
| 420                    | 336                    | 1/8      | QPSK       |
| 840                    | 672                    | 1/4      | QPSK       |
| 1680                   | 1344                   | 1/2      | QPSK       |
| 2520                   | 2016                   | 3/4      | QPSK       |
| 3360                   | 2688                   | 1/2      | 16QAM      |
| 5040                   | 4032                   | 3/4      | 16QAM      |
| 5040                   | 4032                   | 1/2      | 64QAM      |
| 6720                   | 5376                   | 2/3      | 64QAM      |
| 7560                   | 6048                   | 3/4      | 64QAM      |
| 8400                   | 6720                   | 5/6      | 64QAM      |

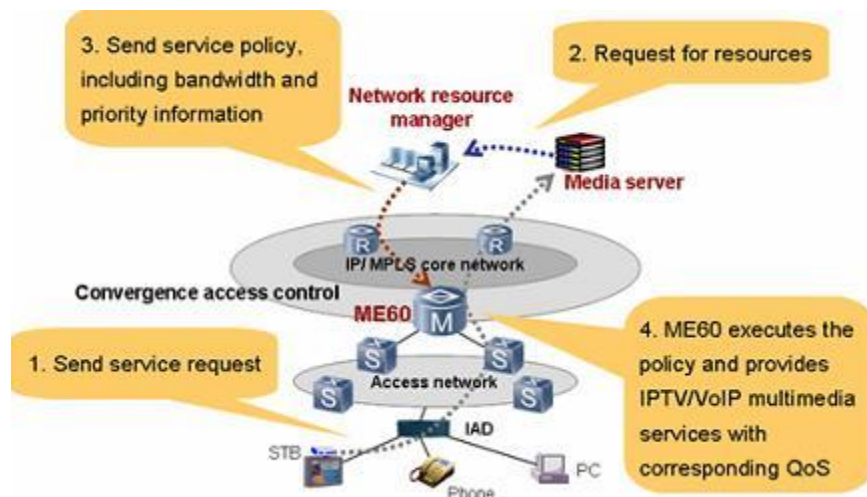
(b)

### 5.3 Διαχείριση εύρους ζώνης

Ένας πολύ σημαντικός στόχος του κινητού συστήματος WiMAX είναι η παροχή ποιοτικών υπηρεσιών, ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις QoS των συνδρομητών. Ο κύριος μηχανισμός για την παροχή υπηρεσιών QoS είναι να συνδέσει τα πακέτα που διέρχονται από το περιβάλλον MAC σε μια ροή υπηρεσίας. Έτσι όλοι οι απομακρυσμένοι σταθμοί καθώς και ο σταθμός βάσης παρέχουν QoS σύμφωνα με τις παραμέτρους που ορίζονται για κάθε ροή υπηρεσιών.

Η MAC είναι καθορισμένη για κάποια σύνδεση, έτσι οι υπηρεσίες που προσφέρονται σε κάθε κυψέλη είναι στα πλαίσια αυτής της σύνδεσης. Φυσικά η σύνδεση καθορίζει την αντιστοίχιση μεταξύ των ομότιμων διαδικασιών σύγκλισης που χρησιμοποιούν τη MAC και τη σχετική ροή των υπηρεσιών.

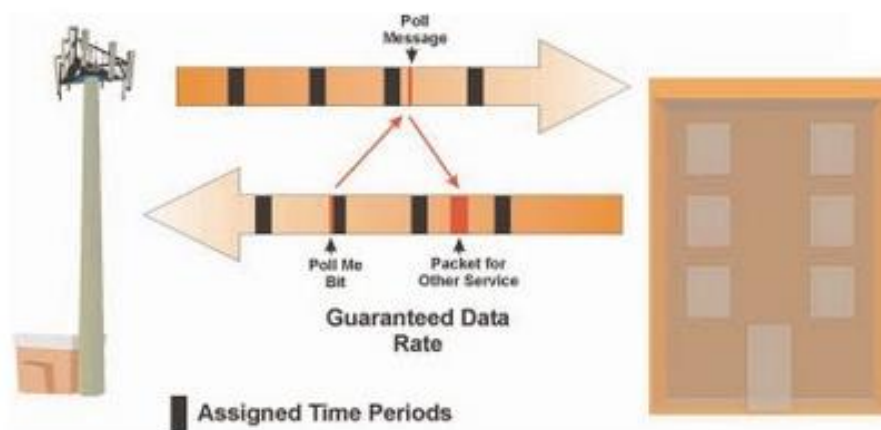
Όσον αφορά την εφαρμογή του QoS, υπάρχουν τρεις λειτουργίες επιβολής: ο προγραμματισμός, η σύνδεση ελέγχου εισόδου CAC (*connection admission control*), και η αστυνόμευση. Ο προγραμματισμός ασχολείται με το πώς θα μεγιστοποιήσει το σύστημα, όσον αφορά το βαθμό ικανοποίησης QoS για κάθε σύνδεση. Η CAC ασχολείται με τον έλεγχο των συνδέσεων που είναι σε εξέλιξη. Όταν μια νέα σύνδεση φτάσει στο σύστημα, γίνεται αποδέκτη με την προϋπόθεση ότι δεν θα προκαλέσει διακοπή πάνω απ' το καθορισμένο κατώτατο όριο. Έτσι η πιθανότητα αποκλεισμού μιας σύνδεσης εξαρτάται από την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος, αλλά και από το απαιτούμενο εύρος ζώνης της νέας σύνδεσης. Τέλος η αστυνόμευση ασχολείται με την προστασία του QoS από κακόβουλες συνδέσεις.



**Εικόνα 44:** Έλεγχος αποδοχής κλήσης CAC

Τον πιο σημαντικό ρόλο ανάμεσα στις διάφορες παραμέτρους του QoS, είναι το εύρος ζώνης και η καθυστέρηση μετάδοσης. Αυτές οι δύο παράμετροι του QoS σχετίζονται άμεσα με το πόσο γρήγορα κατανέμεται το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Στην πραγματικότητα, το εύρος ζώνης είναι ένας πολύτιμος πόρος στην ασύρματη επικοινωνία, γιατί η αποδοτική της χρήση εξαρτάται από αυτό. Το εύρος ζώνης της downlink ρυθμίζεται από τον προγραμματιστή, ενώ της uplink διατίθεται από τον σταθμό βάσης στις κυψέλες μέσω της διαδικασίας αιτήματος και επιχορήγησης των πόρων.

Η διαχείριση εύρους ζώνης υποστηρίζεται από πέντε διαφορετικούς τύπους σχεδιασμού των υπηρεσιών. Αυτοί είναι: η ανεπιθύμητη παροχή υπηρεσίας UGS (unsolicited grant service), υπηρεσία επιλογής σε πραγματικό χρόνο rtPS (real-time polling service), εκτεταμένο rtPS ertPS (extended rtPS), επιλογή μη πραγματικού χρόνου nrtPS (nonreal-time polling service) και η υπηρεσία καλύτερης προσπάθειας BE (best effort).



**Εικόνα 45:** Ανεπιθύμητη παροχή υπηρεσίας UGS

Όταν ο σταθμός βάσης λάβει αίτημα μεταξύ των πέντε υποκατηγοριών, τότε ορίζει την ρυθμοαπόδοση και την λανθάνουσα κατάσταση που απαιτούνται για την αντίστοιχη κυκλοφορία την uplink κι έτσι κινείται ανάλογα.

Το UGS υποστηρίζει υπηρεσίες ροής σε πραγματικό χρόνο, που δημιουργεί πακέτα σταθερού μεγέθους σε περιοδική βάση. Γι αυτό τα μηνύματα του σταθμού βάσης είναι σταθερού μήκους ώστε να αποφεύγεται η επιπλέον επιβάρυνση του συστήματος από τις αιτήσεις των σταθμών. Αυτό εγγυάται ότι τα μηνύματα παραχώρησης πόρων θα ανταπεξέρχονται στις ανάγκες της ροής.

Το rtPS υποστηρίζει υπηρεσίες ροής σε πραγματικό χρόνο που παράγουν πακέτα δεδομένων με μεταβλητό μέγεθος όπως βίντεο συμπιεσμένο κατά MPEG, έτσι ώστε να δίνεται η δυνατότητα από το σταθμό βάσης, ευκαιρίες αιτήματος που θα ανταποκρίνονται σε πραγματικό χρόνο και να επιτρέπουν στους απομακρυσμένους σταθμούς να καθορίζουν το επιθυμητό μέγεθος επιχορήγησης.

Το ertPS είναι παρόμοιο με το rtPS, διαφέρει στο ότι υποβάλει αιτήματα όταν φτάνει στο επιθυμητό εύρος ζώνης και με αυτόν τον τρόπο μειώνει τα γενικά έξοδα αιτήματος.

Το nrtPS υποστηρίζει ροές υπηρεσιών σε μη πραγματικό χρόνο, είναι ανεκτικές σε καθυστερήσεις και που απαιτούν δεδομένα με μεταβλητό μέγεθος, έτσι ώστε να προσφέρει τακτικά επιλογές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η μεταφορά δεδομένων συμφώνα με το πρωτόκολλο FTP (File Transfer Protocol).

Η υπηρεσία BE (Best Effort) έχει ως σκοπό να εξυπηρετήσει με την καλύτερη δυνατή προσπάθεια την κυκλοφορία, που σημαίνει ότι οι υπηρεσίες που προσφέρονται έχουν άμεση σχέση με την κατάσταση του ασύρματου καναλιού και τα επίπεδα συμφόρησης του δικτύου την δεδομένη στιγμή.

Οι πέντε αυτές υπηρεσίες, συνδέονται στενά και με τις πέντε υπηρεσίες παράδοσης των δικτύων της κινητής τηλεφωνίας unsolicited grant service (UGS), real-time variable-rate (RT-VR) service, nonreal-time variable-rate (NRT-VR) service, best effort (BE) service, και extended real-time variable-rate (ERT-VR) service.

Ο πίνακας παρακάτω παραθέτει τις πέντε υπηρεσίες παράδοσης δεδομένων, σε συνδυασμό με τις πέντε υπηρεσίες προγραμματισμού, συμπεριλαμβανομένων και των αντίστοιχων παραδειγμάτων εφαρμογής τους [13][24][25][60].

**Πίνακας 3:** υπηρεσίες παράδοσης δεδομένων, υπηρεσίες προγραμματισμού και παραδείγματα εφαρμογής τους.

| Service type   | Scheduling type                               | Example  |
|--|---|--|
| UGS<br>(unsolicited grant service)                   | UGS<br>(unsolicited grant service)            | T1/E1 leased line,<br>VoIP without silence suppression |
| ERT-VR<br>(extended real-time variable-rate service) | ertPS<br>(extended real-time polling service) | VoIP with silence suppression                          |
| RT-VR<br>(real-time variable-rate service)           | rtPS<br>(real-time polling service)           | MPEG video   |
| NRT-VR<br>(non-real-time variable-rate service)      | nrtPS<br>(Non-real-time polling service)      | FTP  |
| BE<br>(best effort service)                          | BE<br>(best effort service)                   | HTTP   |

#### 5.4 Πρωτόκολλο HARQ – Διασφάλιση αξιόπιστης μεταφοράς

Προκειμένου να ενισχυθεί η αξιοπιστία των επικοινωνιών στον τομέα της ασύρματης σύνδεσης, προτάθηκε η αναμετάδοση των δεδομένων. Για την αναμετάδοση των εσφαλμένων δεδομένων μιας σύνδεσης χρησιμοποιήθηκε η τεχνική αυτόματης επανάληψης ARQ (Automatic Repeat Request).

Εάν σε μια σύνδεση ανιχνευτεί σφάλμα, τότε γίνεται αίτημα ARQ ώστε ο αποστολέας να επαναμεταδώσει το τελευταίο στοιχείο που έστειλε και στη συνέχεια διορθώνεται το σφάλμα. Η τεχνική ARQ είναι αποτελεσματικότερη όταν λειτουργεί σε συνδυασμό με την τεχνική FEC στο φυσικό επίπεδο.

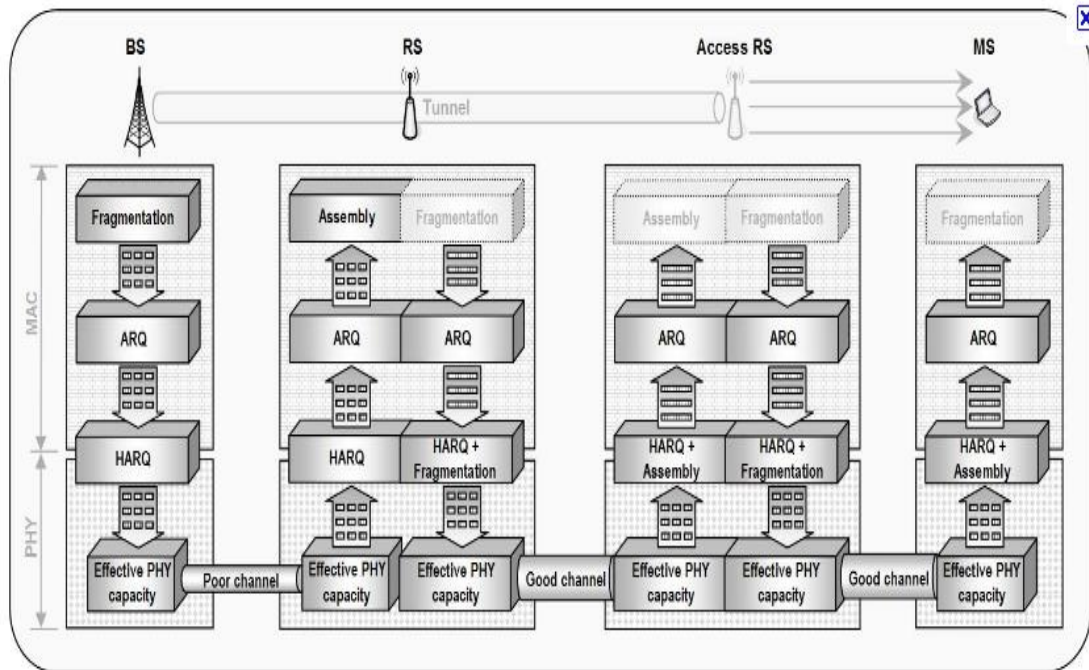
Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του συστήματος WiMAX είναι το υβριδικό ARQ (hybrid ARQ) που διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο για τη διασφάλιση της αξιόπιστης μεταφοράς. Σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα το HARQ εκτελεί κατακερματισμό του καναλιού και παρέχει υποστήριξη άθροισης της κίνησης (τεχνική tunneling). Το HARQ εκτείνεται όχι μόνο στο MAC επίπεδο, αλλά και στο φυσικό.

Στόχος του είναι να αντιμετωπίζει ζητήματα που έχουν σχέση με την επίδοση του δικτύου και να επιτύχει αλληλεπίδραση μεταξύ ARQ του MAC επιπέδου και HARQ του φυσικού επιπέδου. Παρ' όλα αυτά, μελέτες έδειξαν ότι οι επιδόσεις



HARQ μπορεί να επιφέρει προβλήματα στην αναμετάδοση του δικτύου, λόγω πιθανής μη αντιστοιχίας.

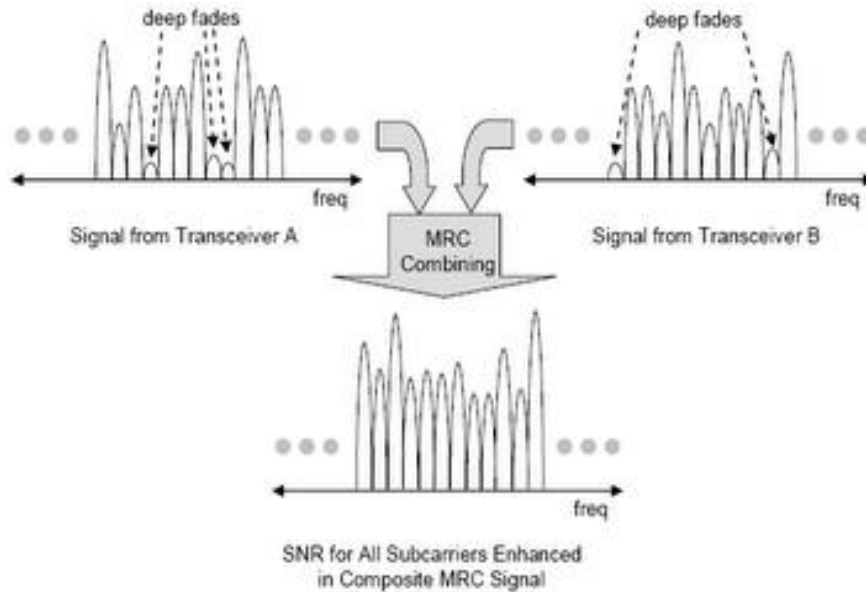
Ως λύση, προτάθηκε ένα προσαρμοστικό πρωτόκολλο HARQ, το οποίο τεμαχίζει το πακέτο στο ανώτερο στρώμα MAC αντί του HARQ, αν η κατάσταση του καναλιού είναι κάτω από το ορισμένο κατώτατο όριο και μια σειρά νέων χαρακτηριστικών για το HARQ έτσι ώστε να μπορεί να υποστηρίξει την tunneling τεχνική στις συνδέσεις των αναμεταδοτών [5][7][1][13].



**Εικόνα 46:** Τεχνική tunneling σύμφωνα με το HARQ πρωτόκολλο

#### 5.4.1 Chase σε συνδυασμό με το HARQ

Το ARQ βελτιώνει την απόδοση του δικτύου ως ένα βαθμό. Ένα σημαντικό κέρδος της απόδοσης του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί με το να εκμεταλλευτεί το λαμβανόμενο πακέτο, συνδυάζοντας την τεχνική που χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που περιλαμβάνονται στο μπλοκ των λανθασμένων δεδομένων. Στο πακέτο αυτό, τα εσφαλμένα δεδομένα αποθηκεύονται στο δέκτη και συνδυάζονται με κάποιο κώδικα διόρθωσης σφαλμάτων. Όταν μια συσκευή αποστολής, στείλει πολλές φορές τα ίδια δεδομένα, τότε λαμβάνει ένα νέο πακέτο το οποίο συνδυάζει τα προηγούμενα εσφαλμένα δεδομένα με την εφαρμογή της μέγιστης αναλογίας MRC (maximal ratio combining), δηλαδή, το πλάτος και τη φάση κάθε διαμορφωμένου σύμβολου πριν τη διαδικασία λήψης. Ο συνδυασμός αυτών των δεδομένων ονομάζεται συνδυασμός Chase.



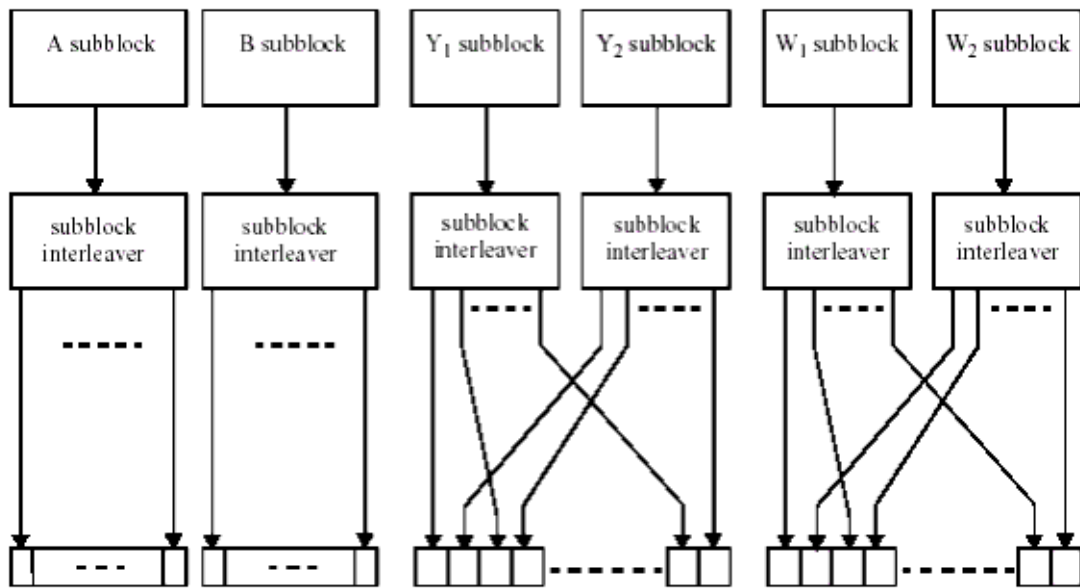
**Εικόνα 47:** Συνδυασμός chase και HARQ

Σκοπός της τεχνικής αυτής είναι να εκμεταλλεύεται τις χρήσιμες πληροφορίες από τα εσφαλμένα μπλοκ δεδομένων ώστε να βελτιωθεί η απόδοση ανίχνευσης δεδομένων. Αυτό επιτυγχάνεται με κόστος εγκατάστασης επιπλέον επέκτασης μνήμης στο δέκτη [13][26].

#### 5.4.2 Επαυξητικός πλεονασμός HARQ

Η απόδοση του πακέτου που γίνεται σε συνδυασμό με την τεχνική Chase μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, χρησιμοποιώντας διάφορους κώδικες στα πακέτα/δεδομένα που έχουν επαναμεταδωθεί, σε αντίθεση με την Chase που συνδυάζει μόνο τους κωδικούς για τα δεδομένα που είχαν επαναμεταδωθεί. Στην τεχνική αυτή, τα δεδομένα που έχουν ληφθεί συνδυάζονται σε μια ενιαία κωδικό-λέξη (codeword), όπου αυτή αποκωδικοποιείται με περισσότερη αξιοπιστία και έτσι η επαναμετάδοση γίνεται αποτελεσματικότερα.

Συγκεκριμένα η λειτουργία έχει ως εξής: Αρχικά, τα bits της πληροφορίας κωδικοποιούνται από έναν κωδικοποιητή χαμηλού ποσοστού. Στη συνέχεια, στην πρώτη μετάδοση, τα bits της πληροφορίας μεταδίδονται με έναν επιλεγμένο αριθμό ιστοιμίας. Αν η μετάδοση δεν είναι επιτυχής, ο πομπός στέλνει επιπλέον bits ιστοιμίας για τις επόμενες μεταδόσεις. Έπειτα ο δέκτης τοποθετεί τα bits ιστοιμίας που μόλις έλαβε, σε αυτά που είχε λάβει από πριν. Με τη λειτουργία αυτή, παράγουμε μια μεγάλη κωδικό – λέξη με περισσότερα bits ιστοιμίας (δηλαδή με χαμηλότερο ποσοστό κώδικα).



**Εικόνα 48:** Αναπαράσταση του επαυξητικού πλεονασμού

Έτσι ο δέκτης μπορεί να αποκωδικοποιεί μια ισχυρότερη κωδικό – λέξη καθώς ο αριθμός αναμετάδοσης έχει αυξηθεί. Δεδομένου ότι ο συνολικός αριθμός bits ισοτιμίας αυξάνεται σε κάθε αναμετάδοση, το σύστημα αυτό ονομάζεται επαυξητικός πλεονασμός [13].

### 5.4.3 Μέθοδος LR-ARQ

Προκειμένου να ενισχυθεί η αξιοπιστία του ασύρματου συνδέσμου, μια ομάδα εργασίας από το Πανεπιστήμιο της Victoria πρότεινε την μέθοδο LR-ARQ. Σύμφωνα μ' αυτή, προκειμένου ο αναμεταδότης να αποκωδικοποιήσει τα πακέτα που απευθύνονται στους χρήστες της κυψέλης του χρησιμοποιεί μια θύρα overhear/decode που διατίθεται για τον απομακρυσμένο σταθμό της κάτω ζεύξης. Όταν ένα πακέτο χάνεται, ο σταθμός βάσης βάζει τους αναμεταδότες στην DL-MAP ζώνη για την εκτέλεση της απαραίτητης αναμετάδοσης σε τοπικό επίπεδο. Έτσι η κατάσταση του καναλιού είναι καλύτερη σε σχέση με μια που θα ήταν απομακρυσμένη και ως εκ τούτου υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα ένα πακέτο να ληφθεί σωστά, ακόμη κι αν χαθεί στη διαδρομή προς τον απομακρυσμένο σταθμό. Έτσι ο συνολικός χρόνος μετάδοσης του πακέτου είναι συγκριτικά μικρότερος, υπάρχει μεγαλύτερη αξιοπιστία καθώς μειώνονται οι επαναμεταδώσεις και οι παρεμβολές καθώς η εμβέλεια αναμετάδοσης είναι μικρότερη [46].

## 5.5 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στο επίπεδο MAC. Πιο συγκεκριμένα στην προώθηση των πακέτων, στο τρόπο δηλαδή που θα δρομολογηθούν τα πακέτα. Επίσης αναφέρονται οι τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης του σήματος FEC και AMC. Επιπλέον αναλύεται ο τρόπος διαχείρισης εύρους ζώνης, ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις QoS των συνδρομητών. Τέλος αναφέρονται τα πρωτόκολλα ARQ, HARQ και LR-ARQ που ως σκοπό έχουν να ενισχύσουν την αξιοπιστία των επικοινωνιών.

## 6. Επιλογή διαδρομής

Το γεγονός ότι τα δίκτυα 802.16j αποτελούνται από πολλά multihop μονοπάτια μεταξύ των σταθμών βάσης και των απομακρυσμένων σταθμών, θα πρέπει να παρθούν αποφάσεις που αφορούν την διαχείριση της διαδρομής που πρέπει να ακολουθήσουν τα πακέτα έτσι ώστε να δρομολογηθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στον προορισμό τους. Οι αποφάσεις αυτές βασίζονται κυρίως στους πόρους τους συστήματος, στην ποιότητα της σύνδεσης και στο ωφέλιμο φορτίο που μεταφέρουν οι αναμεταδότες. Οι σταθμοί βάσης είναι αυτοί που θα καθορίσουν την διαδρομή με βάση κάποιων πληροφοριών που παρέχονται από τους αναμεταδότες, και στη συνέχεια να δεσμεύσουν το κανάλι για τη σύνδεση. Το πρότυπο ορίζει δυο προσεγγίσεις για την πορεία των πακέτων [9]

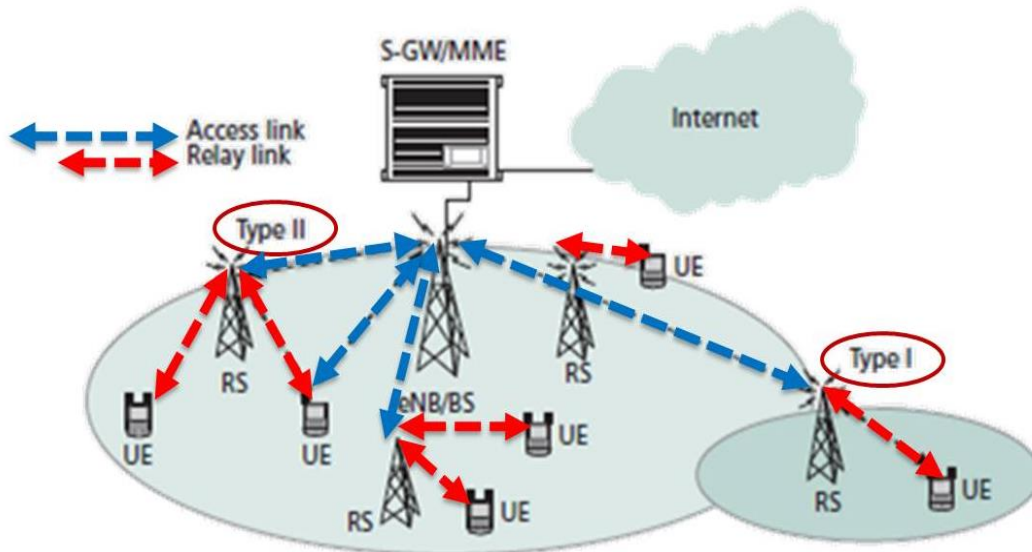
Στην πρώτη εκδοχή, ο σταθμός βάσης διαθέτει κάποιες πληροφορίες που έχει συλλέξει από τους αναμεταδότες και με βάση το CID κατατάσσει τους σταθμούς που θα στείλουν. Έτσι ο κάθε αναμεταδότης θα πρέπει να ενημερώνεται με τις πληροφορίες διαδρομής. Η προσέγγιση αυτή είναι αρκετά απλή.

Στη δεύτερη εκδοχή, χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός σηματοδότησης για τη διανομή του πίνακα δρομολόγησης κατά μήκος της διαδρομής που ονομάζεται end-to-end. Ο σταθμός βάσης στέλνει απαραίτητες πληροφορίες στους σταθμούς αναμετάδοσης που έχουν σχέση με την με την πορεία της διαδρομής. Κάθε διαδρομή προσδιορίζεται από κάποιο αναγνωριστικό που έχει σχέση με το CID. Ο κάθε δρομολογητής κατέχει ένα πίνακα με τις διαδρομές και τα CIDs και αναλαμβάνει να τον ενημερώνει, ώστε να γίνεται σωστά η δρομολόγηση των πακέτων στον προορισμό τους [9].

### 6.1 Επιλογή σταθμού για το δίκτυο

Στα δίκτυα όπως είναι το 802.16j θα πρέπει να καθορίζεται από την αρχή πότε ένας απομακρυσμένος σταθμός θα εισέλθει στο δίκτυο, και τα τερματικά που θα χρησιμοποιούν πρέπει να είναι συμβατά με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Επιπλέον να γίνεται γνωστός ο κόμβος πρόσβασης για τον απομακρυσμένο σταθμό χρήστη. Παρακάτω αναφέρονται ορισμένες εκδοχές.

*Ο απομακρυσμένος σταθμός χρήστη λειτουργεί - βρίσκεται σε διαφανή λειτουργία αναμετάδοσης:* Οι σταθμοί αναμετάδοσης παρακολουθούν την κατάσταση της uplink ζώνης και τους κωδικούς που υπάρχουν μπροστά από αυτό. Ο σταθμός βάσης όταν αντιληφτεί μήνυμα με τον συγκεκριμένο κωδικό, καθορίζει την καταλληλότερη διαδρομή για το σταθμό, αν δηλαδή θα είναι άμεση η επικοινωνία του ή θα είναι έμμεση (μέσο αναμεταδότη). Αν είναι άμεση στέλνει απάντηση άμεσα στον απομακρυσμένο σταθμό, διαφορετικά το στέλνει στον αναμεταδότη και αυτός με τη σειρά του στον απομακρυσμένο σταθμό.



**Εικόνα 49:** Επιλογή σταθμού για το δίκτυο

Ο απομακρυσμένος σταθμός χρήστη λειτουργεί – βρίσκεται σε μη διαφανή λειτουργία αναμετάδοσης: Ο απομακρυσμένος σταθμός επικοινωνεί με τον αναμεταδότη, προκειμένου να στείλει δεδομένα, αφού έχει πάρει την έγκριση από τον σταθμό βάσης να εισέλθει στο δίκτυο. Έπειτα ο αναμεταδότης διασταυρώνει την απόφαση αυτή, επικοινωνώντας με τον σταθμό βάσης και συνέχεια ακολουθεί η μετάδοση. Η διαδικασία επιλογής των αναμεταδοτών καθορίζεται από την καταλληλότητα τοποθεσίας εγκατάστασης του, δηλαδή κατά πόσο θα διευκολύνει το μονοπάτι της διαδρομής από τον MS στον BS.

Η επιλογή του καταλληλότερου αναμεταδότη για κάποια μετάδοση γίνεται από τον σταθμό βάσης. Σκοπός είναι να επιλεγεί ο αναμεταδότης που θα επιφέρει μεγαλύτερο κέρδος στο μονοπάτι. Η επιλογή που συνόλου των αναμεταδοτών για κάποια διαδρομή αντιστοιχεί σ' αυτό το κέρδος. Οι αναμεταδότες θα πρέπει να συνεργάζονται ώστε να βελτιώσουν την απόδοση του δικτύου, αλλά και την κάλυψη απόδοσης για μελλοντική αναμετάδοση. Η διαδικασία επιλογής αναμεταδότη μπορεί να γίνει με κεντρικό ή κατακεντρωμένο τρόπο.

Στον κεντρικό, ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί έναν κόμβο ελέγχου με τον οποίο συλλέγει τις απαραίτητες πληροφορίες (κατάσταση καναλιού, θέση αναμεταδότη και κινητού σταθμού, ισχύ σήματος κ.α.) ώστε να αποφασίσει ποια είναι η κατάλληλη διαδρομή.

Αντίθετα στον κατακεντρωμένο τρόπο, κάθε αναμεταδότης επιλέγει κάποια κοντινή κινητή μονάδα ώστε να αντιστοιχηθεί μ' αυτή, αυτό γίνεται με την βοήθεια των πληροφοριών που έχει για την κατάσταση του καναλιού καθώς και το μηχανισμό ελέγχου πρόσβασης στο μέσο MAC. Γενικά το συγκεντρωτικό μοντέλο απαιτεί περισσότερη σηματοδότηση σε σχέση με το κατακεντρωμένο για να επιτύχει το καλύτερο κέρδος.

## 6.2 Σενάρια για την απόδοση του δικτύου σε σχέση με την επιλογή του σταθμού

Παρακάτω αναλύονται οι περιπτώσεις αντιστοίχισης στο καταμεμημένο και συγκεντρωτικό μοντέλο καθώς και η αξιολόγηση των δυο μοντέλων σε συγκεκριμένο δίκτυο.

### 6.2.1 Αντιστοίχιση στο συγκεντρωτικό μοντέλο

Το συγκεντρωτικό μοντέλο βασίζεται στο min-max κριτήριο, σύμφωνα με το οποίο ελαχιστοποιείται η πιθανότητα να διακοπεί η λειτουργία των κινητών μονάδων που βασίζονται στον συγκεκριμένο σταθμό αναμετάδοσης και επίσης εγγυάται δίκαιη κατανομή όλων των μονάδων.

Στο μοντέλο αυτό η κάθε μονάδα UE καταχωρείται σ' ένα κατάλογο για τη μέτρηση του καναλιού κι έπειτα με βάση τον κατάλογο ο αναμεταδότης χρησιμοποιεί το ελάχιστο κατώτατο όριο αυτών των σταθμών. Η πληροφορία αυτή στέλνεται στο σταθμό βάσης, όπου αυτός θα αποφασίσει την τελική λίστα αντιστοίχισης των UE. Η λίστα αυτή γίνεται γνωστή στους υπόλοιπους σταθμούς μέσω των αναμεταδοτών, ώστε να έχουμε την βέλτιστη δυνατή απόδοση [4].

Στο συγκεντρωτικό μοντέλο ο κάθε αναμεταδότης προσδιορίζει το σύνολο των UE μονάδων που μπορεί να εξυπηρετήσει και ελέγχει την κατάσταση του καναλιού για τις συνδέσεις μεταξύ αναμεταδότη και σταθμού βάσης καθώς και μεταξύ αναμεταδότη και UE μονάδων. Η πληροφορία αυτή ενημερώνεται κάθε φορά και στέλνεται στο σταθμό βάσης.

Έπειτα ο σταθμός βάσης δημιουργεί ένα δισδιάστατο πίνακα  $C = [c_{i,j}]$ , όπου οι σειρές αντιστοιχούν στις μονάδες UE και οι στήλες στους αναμεταδότες. Στον πίνακα τα στοιχεία  $c_{i,j}$  αντιπροσωπεύουν το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων μιας αναμετάδοσης του UE και RS αντίστοιχα. Αν το  $i$ -UE δεν ανήκει στο σύνολο των  $j$ -RS τότε το  $c_{i,j}$  είναι μηδέν. Διαφορετικά υπολογίζονται με βάση την κατάσταση του καναλιού εκείνης της στιγμής μεταξύ του  $i$ -UE και  $j$ -RS, καθώς και μεταξύ  $j$ -RS με το σταθμό βάσης. Με την προϋπόθεση ότι ο κάθε αναμεταδότης εξυπηρετεί ένα μόνο UE.

Στόχος του συγκεντρωτικού μοντέλου είναι να εξυπηρετηθούν όσες γίνεται περισσότερες μονάδες UE. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τον πίνακα ο σταθμός βάσης προσπαθεί να κρατά όσες λιγότερες μη μηδενικές σειρές, δηλαδή πάντα μα υπάρχει ένα ενεργό στοιχείο, αλλά πάντα θα υπάρχει το πολύ ένα μη μηδενικό στοιχείο σε κάθε στήλη επειδή κάποιος αναμεταδότης δεν μπορεί να εξυπηρετεί δυο σταθμούς ταυτόχρονα. Οι μονάδες UE που είναι άμεσα συνδεδεμένες με μόνο ένα RS έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα. Όταν ένας αναμεταδότης δεσμευτεί με μια μονάδα, τότε καμιά άλλη μονάδα δεν μπορεί να συνδεθεί με αυτόν. Με αυτόν τον τρόπο ο σταθμός βάσης καθορίζει τις τιμές του πίνακα (τα μηδενικά) και κατά συνέπεια τις αντιστοιχίες γραμμής και στήλης. Η απόδοση των UE μονάδων υπολογίζεται με την προσθήκη μη μηδενικών στοιχείων [4].

### 6.2.2 Αντιστοίχιση στο καταναμημένο μοντέλο

Για να μειωθεί η περιοδική ανταλλαγή πληροφοριών, χρησιμοποιήθηκε το καταναμημένο μοντέλο το οποίο βασίζεται στο μηχανισμό MAC. Συγκεκριμένα ένα κοινό slotted κανάλι επικοινωνίας χρησιμοποιείται από τους αναμεταδότες της κάθε κυψέλης. Κάθε  $N$  slots ομαδοποιούνται σε μια ζεύξη και οι  $M$  ομαδοποιήσεις αποτελούν την κυψέλη. Οι παράμετροι  $N$  και  $M$  ρυθμίζονται ανάλογα με την πυκνότητα των RSs και UE της κάθε κυψέλης, ώστε να έχουμε καλύτερη απόδοση.

Στο μοντέλο αυτό, ο κάθε αναμεταδότης προσδιορίζει τις μονάδες UE που μπορεί να υποστηρίξει και αξιολογεί την κατάσταση του καναλιού ανάμεσα στο σταθμό βάσης και των UE που συνδέονται μ αυτόν. Έπειτα στην πρώτη αντιστοίχιση, οι αναμεταδότες με μια single-UE υπηρεσία επιλέγουν τυχαία ένα slot. Αν πολλαπλοί αναμεταδότες επιλέξουν την ίδια χρονοσχισμή τότε έχουμε σύγκρουση και αναγκαστικά προσπαθούν πάλι. Οι υπόλοιποι αναμεταδότες ακούν στο κανάλι μήνυμα εκπομπής και στη συνέχεια αφαιρούν την αντιστοίχιση τους με τις μονάδες UE.

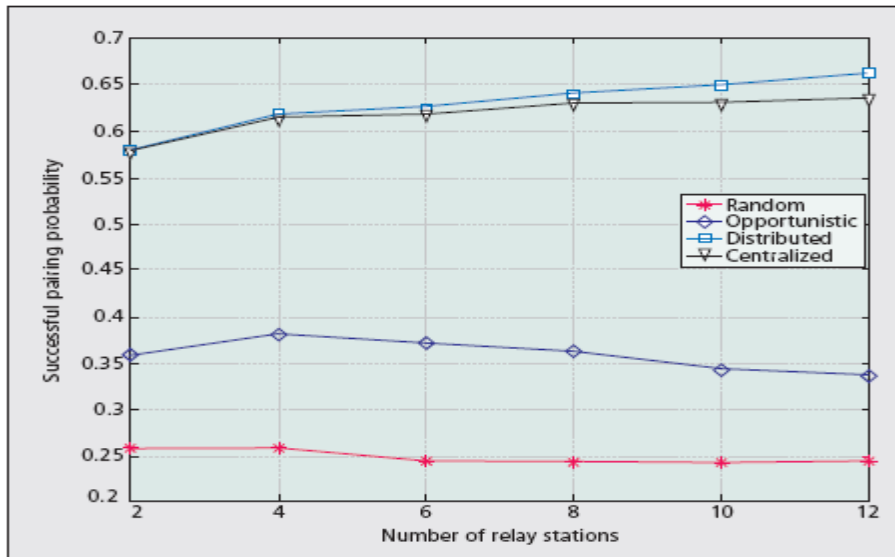
Η δεύτερη αντιστοίχιση αφορά αυτούς που συγκρούστηκαν(αν υπάρχουν) ανεξαρτήτως αν υπάρχουν κι άλλοι που επιθυμούν να μεταδώσουν. Οι αναμεταδότες όταν τελειώσουν την αντιστοίχιση με επιτυχία, το ανακοινώνουν στις εμπλεκόμενες μονάδες UE. Παρόμοια συνεχίζονται και οι επόμενες αντιστοιχήσεις. Όταν οι αναμεταδότες βρίσκονται σε διαδικασία αντιστοίχισης, θεωρούνται ότι είναι σε υψηλή προτεραιότητα, ώστε να μειωθούν οι συγκρούσεις και να επιτευχθεί ο στόχος του μοντέλου [4].

### 6.2.3 Αξιολόγηση της απόδοσης των δυο μοντέλων

Η αξιολόγηση της απόδοσης έγινε με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή σε μια πραγματική κυψέλη ενός δικτύου. Επιλέχτηκαν τυχαία 4 έως 14 αναμεταδότες και 2 έως 12 UE μονάδες. Κάθε μονάδα UE απαιτεί για την μετάδοση των δεδομένων της ρυθμό που κυμαίνεται 0.75R, 1.5R, ή 3R, όπου το R συμβολίζει το μέσο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων μεταξύ όλων των μονάδων UE και των RSs. Η τιμή αυτή δεν επηρεάζει άλλες αντιστοιχήσεις. Στη συγκεκριμένη αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκαν  $N=4$  αντιστοιχήσεις από  $M=3$  τμήματα και η τεχνική DCF.

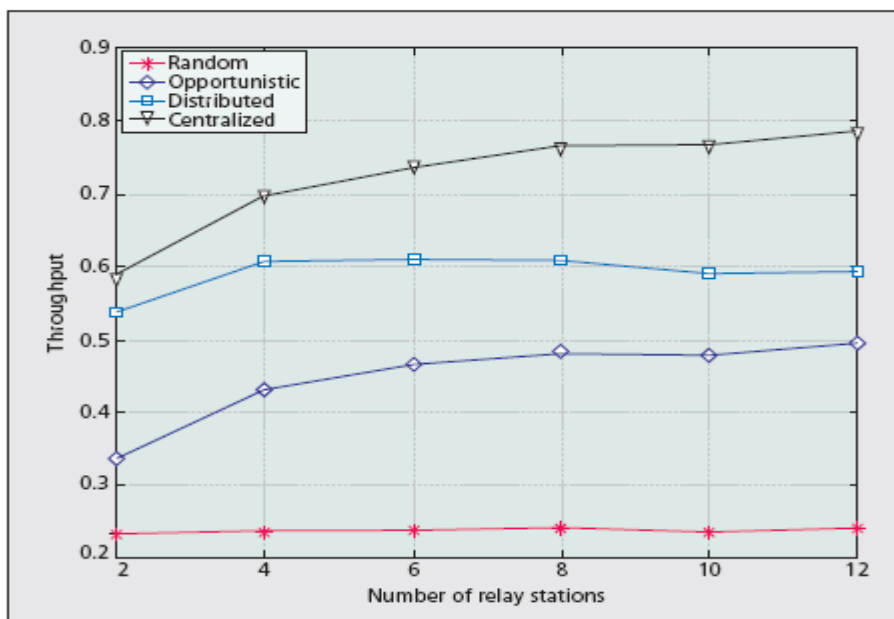
Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα ποσοστά επιτυχής πιθανότητας ένωσης των μονάδων UE σε μια κυψέλη. Ο αριθμός των μονάδων UE αυξάνεται σε σχέση με τον αριθμό των αναμεταδοτών. Μια επιτυχημένη πιθανότητα αντιστοίχισης ορίζεται ως, ο λόγος μεταξύ των εξυπηρετούμενων μονάδων / των ζευγών μονάδων και το συνολικό αριθμό των μονάδων. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, στόχος του κεντρικού και καταναμημένου μοντέλου είναι να μεγιστοποιήσουν τον αριθμό των UE μονάδων σε μια κυψέλη. Συγκριτικά με την τυχαία αντιστοίχιση τα δυο μοντέλα επιτυχαίνουν μεγαλύτερα ποσοστά. Αυτό δείχνει ότι τα προτεινόμενα μοντέλα αξιοποιούν καλύτερα την αντιστοίχιση των αναμεταδοτών [4].





**Εικόνα 50:** Επιτυχής ένωση των μονάδων UE σε μια κυψέλη

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η ρυθμοαπόδοση του δικτύου. Βλέπουμε ότι το κεντρικό και καταναμημένο μοντέλο μεγιστοποιούν την χρήση των αναμεταδοτών και προσφέρουν καλύτερη απόδοση. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των RSs και UE μονάδων, τόσο μεγαλώνει και το μέγεθος των υπηρεσιών των RSs. Αυτό συνεπάγεται σε λιγότερες ανακοινώσεις (στην πρώτη και δεύτερη αντιστοίχιση) και λιγότερες συγκρούσεις (στην τρίτη αντιστοίχιση). Έτσι η απόδοση διακίνησης είναι πεσμένη όταν ο αριθμός των αναμεταδοτών είναι μεγάλος. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται μέσω της δυναμικής προσαρμογής των τιμών  $M$  και  $N$  του συστήματος [4].



**Εικόνα 51:** Απόδοση ρυθμοαπόδοσης στα διάφορα μοντέλα

### **6.3 Συμπεράσματα κεφαλαίου**

Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα για το πρότυπο, είναι η επιλογή σχεδιασμού του συστήματος, αν δηλαδή θα είναι κεντρική ή κατανεμημένη καθώς έχει επιπτώσεις στο σύστημα. Σαφώς για ένα μεγάλο σύστημα η κατανεμημένη λειτουργία, επιφέρει πολλά οφέλη, ωστόσο όμως η ύπαρξη πολλών μικρών τοπολογιών με κεντρική λειτουργία μοιάζει να είναι προτιμότερη καθώς έχουμε μείωση της πολυπλοκότητας και του συνολικού κόστους. Το πρότυπο 802.16j με την χρήση της tunneling αποκτά καλύτερη απόδοση του συστήματος. Επιπλέον όσον αφορά τη διαχείριση των πόρων του συστήματος θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί όπως είναι η αξιοπιστία του συστήματος και η λάθος κατάσταση.

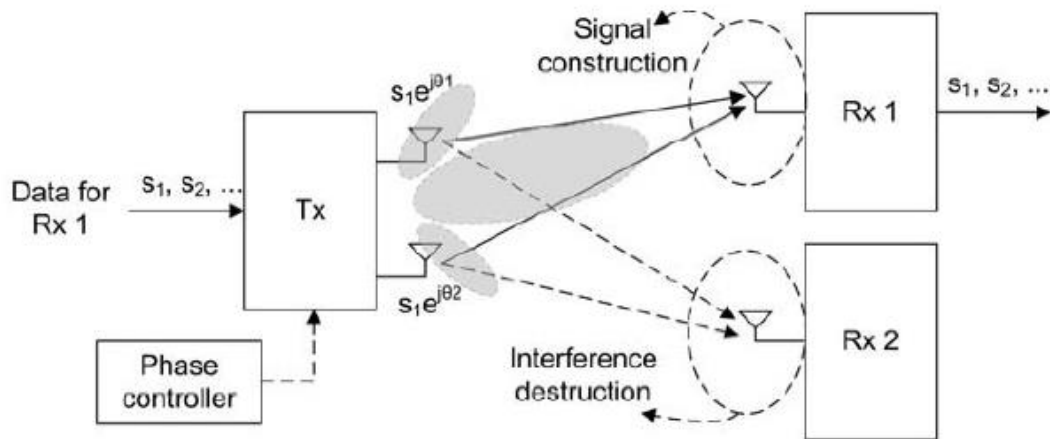
## 7. Multiantenna - Σύστημα πολλαπλών κεραιών

Η ενιαία κεραία έχει θεωρηθεί από παλιά ως ο φυσικός τρόπος για ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνιών. Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι η χρήση των πολλαπλών κεραιών μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την αξιοπιστία ή και να αυξήσει την ικανότητα. Η τεχνολογία πολλαπλών κεραιών (Multiantenna) ταξινομούνται στο προσαρμοστικό σύστημα της κεραίας AAS (*adaptive antenna system*) και στις MIMO τεχνολογίες. Η τεχνολογία AAS έχει ως σκοπό να εκμεταλλευτεί διαμόρφωση δέσμης BF (*beamforming*), ενώ η τεχνολογία MIMO προορίζεται να εκμεταλλευτεί το διάστημα ποικιλομορφίας SD (*space diversity*) ή τη χωρική πολυπλεξία SM (*spatial multiplexing*). Στη συνέχεια γίνεται αναφορά των δυο τεχνολογιών [13].

### 7.1 Προσαρμοστικό σύστημα κεραίας (AAS)

Το προσαρμοστικό σύστημα κεραίας (AAS) παρέχει χωρική πρόσβαση τμήματος με τη χρήση των πολλαπλών κεραιών σε σειρά. Με τη χρησιμοποίηση των ιδιαίτερα κατευθυντήρων κεραιών ή των παραταγμένων κεραιών, είναι δυνατό να βελτιστοποιηθεί η χρήση και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος του συστήματος των πόρων.

Το AAS δίνει πολύ καλή ποιότητα μετάδοσης αλλά έχει ως αντίκτυπο να περιορίζεται η κινητικότητα. Οι πολλαπλές κεραίες που χρησιμοποιούνται στο AAS έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση κέρδους της επεξεργασίας, αλλά και την μείωση των πολλαπλών διαδρομών λόγω της ποικιλομορφίας των κεραιών. Επιπλέον μπορεί να παρασχεθεί επικοινωνία μη οπτικής επαφής (NLOS) στους χρηστές, καθώς αυτοί μπορούν να εκμεταλλευτούν τις ακτίνες που αντανακλούνται από γειτονικά κτίρια ή αντικείμενα. Έτσι η κινητικότητα είναι αρκετά περιορισμένη λόγω των χαρακτηριστικών της κεραίας, αφού είναι δύσκολο να κατευθυνθούν οι ακτίνες αρκετά γρήγορα ώστε να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις της υψηλής κινητικότητας του τερματικού χρήστη. Έτσι λοιπόν, το ASS τίθεται να ενισχύσει το σήμα, ενώ παράλληλα θα πρέπει να ελαχιστοποιήσει τα σήματα που προκαλούν παρεμβολές στην κατευθυντήρια δέσμη. Με τη λογική αυτή, οι διάφορες μορφές ακτινών που δημιουργούνται, μπορούν να διαμορφώσουν τον έλεγχο των μεγεθών και φάσεων των σημάτων που στέλλονται και λαμβάνονται από τις κεραίες. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η δομή ενός ASS η οποία αποτελείται μια σειρά κεραιών.



**Εικόνα 52:** Προσαρμοστικό σύστημα της κεραίας (AAS)

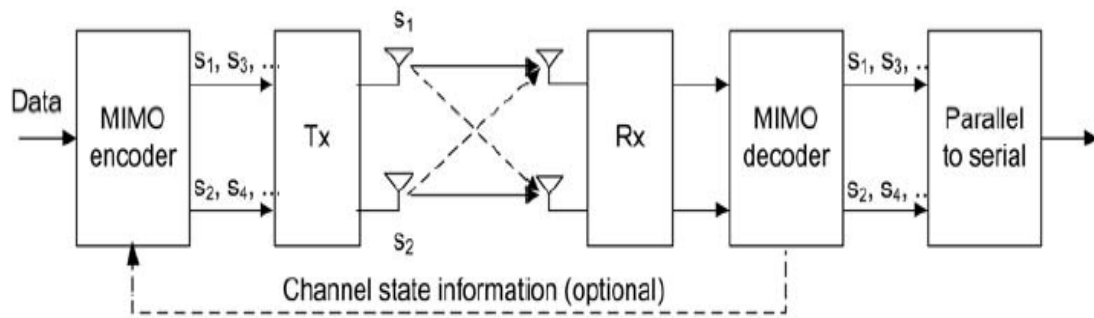
Οι κεραίες είναι τοποθετημένες σε σειρά και είναι υπεύθυνες για τον έλεγχο της φάσης των σημάτων ώστε να διαβιβαστεί επιλεκτικά το σήμα προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις των παρεμβολών και σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του σήματος επιλέγεται ο επιθυμητός προορισμός (πχ Rx1). Αυτό επιτρέπει την επέκταση κάλυψης ή την αύξηση της ρυθμαπόδοσης από το σύστημα στο επίπεδο που ισοδυναμεί με τη μείωση παρεμβολών ή της αυξημένης CINR [13][27][28][29].

## 7.2 Σύστημα πολλαπλών κεραιών MIMO

Τα συστήματα MIMO αποτελούνται από πολλαπλές κεραίες τόσο στον πομπό, όσο και στο δέκτη. Τα κεραιοσυστήματα αυτά αυξάνουν την αξιοπιστία της μετάδοσης και λήψης. Η ποικιλομορφία του διαστήματος προορίζεται να συνδυάσει τα πολλαπλάσια σήματα που μεταδίδονται από την ίδια πηγή, αλλά η πορεία που ακλούθησαν μέχρι να φτάσουν στον προορισμό τους, ήταν από ανεξάρτητα κανάλια.

Το σήμα μπορεί να στέλνεται από κεραίες που είναι για εκπομπή ή λήψη. Η χωρική πολυπλεξία προορίζεται για τη μετάδοση πολλαπλών σημάτων, όπου στην ίδια συχνότητα μπορούν να εκπέμπουν και να λαμβάνουν ταυτόχρονα κι άλλες κεραίες.

Προκειμένου να εκμεταλλευτούν στο μέγιστο την χωρική πολυπλεξία, τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με πολλαπλές κεραίες. Το αρχικό σήμα δεν μπορεί να κατατμηθεί σε πολλαπλά ρεύματα πριν την μετάδοση κάθε κεραίας ή από πολλαπλές κεραίες που φέρουν διαφορετικά σήματα, αυξάνοντας έτσι τον ρυθμό μετάδοσης του κάθε χρήστη.



**Εικόνα 53:** Τεχνική MIMO

Η κάθε κεραία λαμβάνει ένα συνδυασμό της διαβιβαζόμενης ροής δεδομένων μέσω άλλων πολλαπλών κεραιών και ο αποπολυπλέκτης MIMO αποκωδικοποιεί την αρχική ροή δεδομένων. Εάν η πληροφορία για την κατάσταση του καναλιού (CSI) είναι διαθέσιμη στον πομπό, τότε αυτός ενισχύει την ικανότητα περαιτέρω, να επιλεγεί το κατάλληλο υποσύνολο / ομάδα κεραιών για την μετάδοση ή να κωδικοποιηθεί το σήμα εισόδου, έτσι ώστε να έχουμε μια καλύτερη συνολική απόδοση στο δίκτυο [13][29].

### 7.3 Συμπεράσματα κεφαλαίου

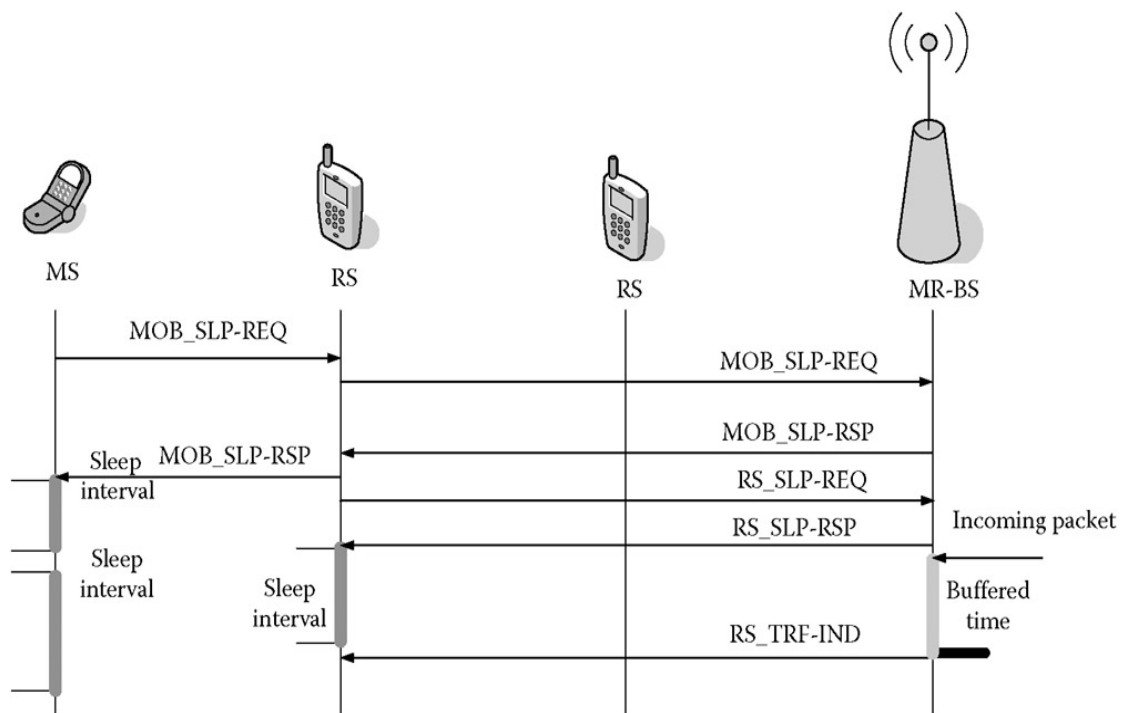
Το σύστημα πολλαπλών κεραιών παίζει καθοριστικό ρολό στην επικοινωνία των κινητών χρηστών, καθώς σε συνδυασμό με το προσαρμοστικό σύστημα της κεραίας AAS και την τεχνολογία MIMO μειώνονται οι παρεμβολές στο σήμα και αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης του χρήστη μειώνονται οι πολλαπλές διαδρομές.

## 8. Εξοικονόμηση ενέργειας

Δεδομένου ότι οι κινητές συσκευές είναι συμπαγείς, το μέγεθος της μπαταρίας αναμένεται να είναι περιορισμένο. Έτσι τίθεται το πρόβλημα που αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας της κινητής συσκευής.

Προκειμένου να επιτευχθεί ως ένα βαθμό εξοικονόμηση ενέργειας μιας συσκευής, το κινητό WiMAX πρότεινε την κατάσταση αναμονής και αδράνειας από τις τρέχοντες εργασίες, με τέτοιο τρόπο ώστε οι απομακρυσμένοι σταθμοί που δεν έχουν κάποια λειτουργία/ διεργασία εκείνη την ώρα να υπόκεινται σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας και να επανέρχονται σε κανονική λειτουργία όποτε είναι απαραίτητο.

Για καλύτερο αποτέλεσμα, χρησιμοποιούνται κάποιοι σταθμοί αναμετάδοσης με χαμηλό κόστος και μικρή καύση ενέργειας. Χωρίζονται στις τρεις ακόλουθες κατηγορίες: fixed RS, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι σε σταθερές θέσεις, οι NRS (nomadic RS) που εγκαθίστανται προσωρινά και οι MRS (mobile RS) που είναι κινητές μονάδες που λειτουργούν με μπαταρία κυττάρων.



Εικόνα 54: Εξοικονόμηση ενέργειας

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, στη λειτουργία κατάστασης αδράνειας, ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για το συντονισμό των απομακρυσμένων σταθμών. Το σύστημα επιτρέπει στους απομακρυσμένους σταθμούς να απουσιάζουν από το περιβάλλον / διεπαφή αέρα του σταθμού βάσης, στέλνοντας μήνυμα RS\_SLP-REQ προς τον σταθμό βάσης όταν δεν είναι σε χρήση.

Στο διάστημα αυτό ο κάθε απομακρυσμένος σταθμός θα είναι σε θέση να ακούει μηνύματα εκπομπής περιοδικά. Όταν κάποιος σταθμός είναι σε κατάσταση

αδράνειας, στέλνει περιοδικά μηνύματα RS\_SLP-REQ για να ενημερωθεί ο σταθμός βάσης για την κατάσταση που βρίσκεται ο συγκεκριμένος σταθμός. Στο μήνυμα αυτό περιλαμβάνεται ο χρόνος που άρχισε η κατάσταση αδράνειας και το χρονικό διάστημα που σκοπεύει να μείνει (στην κατάσταση αυτή). Στο διάστημα αυτό, ο σταθμός βάσης στέλνει μήνυμα εκπομπής, ώστε να ενημερωθούν όλοι οι σταθμοί για την κατάσταση των υπολοίπων σταθμών ( κατάσταση αδράνειας ή όχι). Έτσι, βλέποντας ο κάθε απομακρυσμένος σταθμός το μήνυμα αυτό αποφασίζει πως θα κινηθεί, δηλαδή αν θα μείνει σε κανονική κατάσταση στέλνοντας το μήνυμα MOB\_TRF-IND ή αν θα αλλάξει σε κατάσταση αδράνειας. Στην περίπτωση αδράνειας ο απομακρυσμένος σταθμός δεν εγγράφεται στο σταθμό βάσης, αλλά λαμβάνει μόνο μηνύματα εκπομπής για την κυκλοφορία. Η κατάσταση αναμονής δεν απαιτεί καμιά λειτουργία, το μόνο που απαιτεί είναι να κάνει ανίχνευση (ώστε να φαίνεται η ύπαρξη του). Έτσι το κάθε τερματικό ακολουθεί πιστά την διαδικασία και συνεισφέρει στην προσπάθεια για εξοικονόμηση ενέργειας [13][30][62][63].

## **8.1 Συμπέρασμα κεφαλαίου**

Η κατάσταση αδράνειας ενός σταθμού που δεν έχει κάποια διεργασία μια δεδομένη στιγμή ενισχύει την εξοικονόμηση ενέργειας του δικτύου καθώς ο σταθμός βάσης αλλά και οι υπόλοιποι χρήστες αγνοούν τον σταθμό αυτό, αλλά και ο ίδιος συνεισφέρει στην εξοικονόμηση καθώς τίθεται εκτός λειτουργίας.

## 9. Ασφάλεια

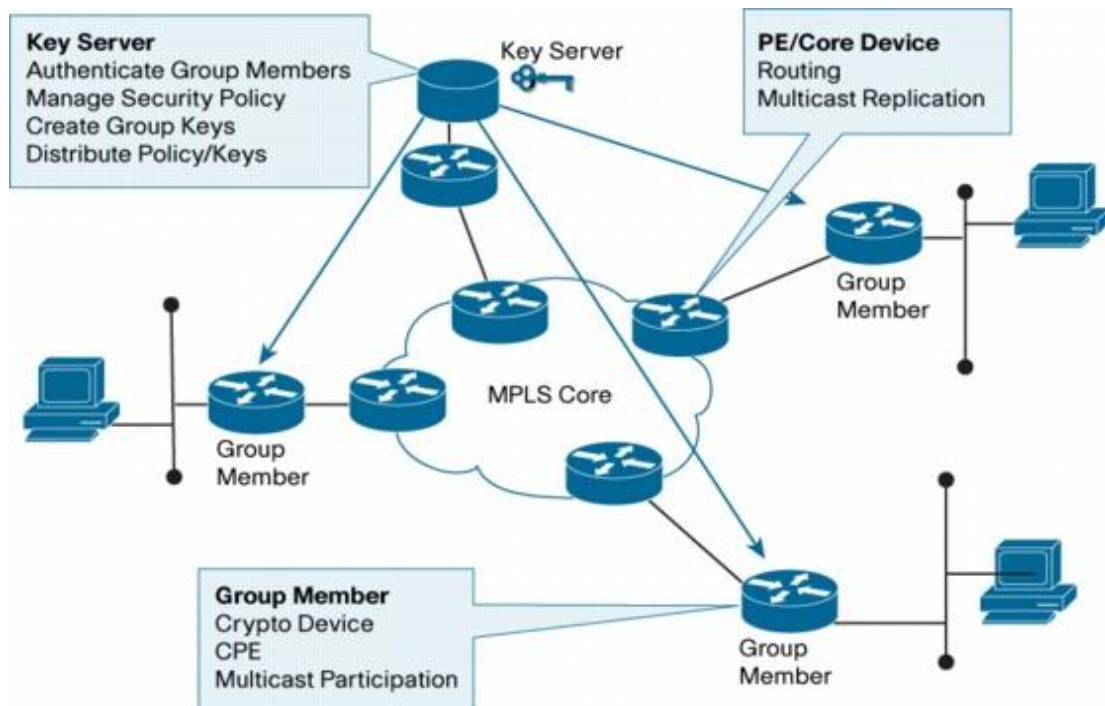
Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφάλεια στο δίκτυο, το κινητό WiMAX εγκατέστησε ένα αποκλειστικό επίπεδο ασφαλείας ανάμεσα από το MAC και φυσικό επίπεδο. Τα κυψελοειδή συστήματα δεν έδωσαν ιδιαίτερη προσοχή στο θέμα ασφαλείας, διότι τα κανάλια των χρηστών προστατεύονται από τη λειτουργία του κυκλώματος.

Στην περίπτωση όμως που το δίκτυο είναι ευρείας περιοχής θα πρέπει να δοθεί περισσότερη προσοχή. Το υποστρώμα ασφαλείας έχει σχεδιαστεί για να παρέχει στους χρήστες προστασία των δεδομένων, επικύρωση ή επαλήθευση ταυτότητας και εμπιστευτικότητα στο δίκτυο. Παρέχει επίσης την δυνατότητα, οι χειριστές να απομακρύνουν οποιονδήποτε δεν έχει πρόσβαση ή δικαιοδοσία στο δίκτυο. Επιπλέον ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί ένα επικυρωμένο πρωτόκολλο client / server με το οποίο μπορεί να ελέγχει αν κάποιος σταθμός μπορεί να εισέλθει αν κατέχει το κλειδί ή όχι. Η λειτουργία ασφαλείας έχει δυο πρωτόκολλα, το πρωτόκολλο KMP (key management protocol) Version 1 και το KMP Version 2.

Το πρωτόκολλο KMP Version 1 είναι για να τη μεταφορά πακέτων δεδομένων σε ολόκληρο το δίκτυο. Αναφέρεται και ως Δεσμοί Ασφαλείας SA(Security Association). Ο δεσμός SA είναι πληροφορίες που μοιράζονται ο σταθμός βάσης με τους απομακρυσμένους σταθμούς. Υπάρχουν τρεις τύποι SA: ο primary για τον απομακρυσμένο σταθμό, ο Static για το σταθμό βάσης και ο Dynamic για τις συγκεκριμένες υπηρεσίες ροής. Ορίζει έναν κανόνα κρυπτογράφησης, έναν αλγόριθμο επικύρωσης χρήστη και έναν αλγόριθμο για το ωφέλιμο φορτίο για τη MAC PDU.

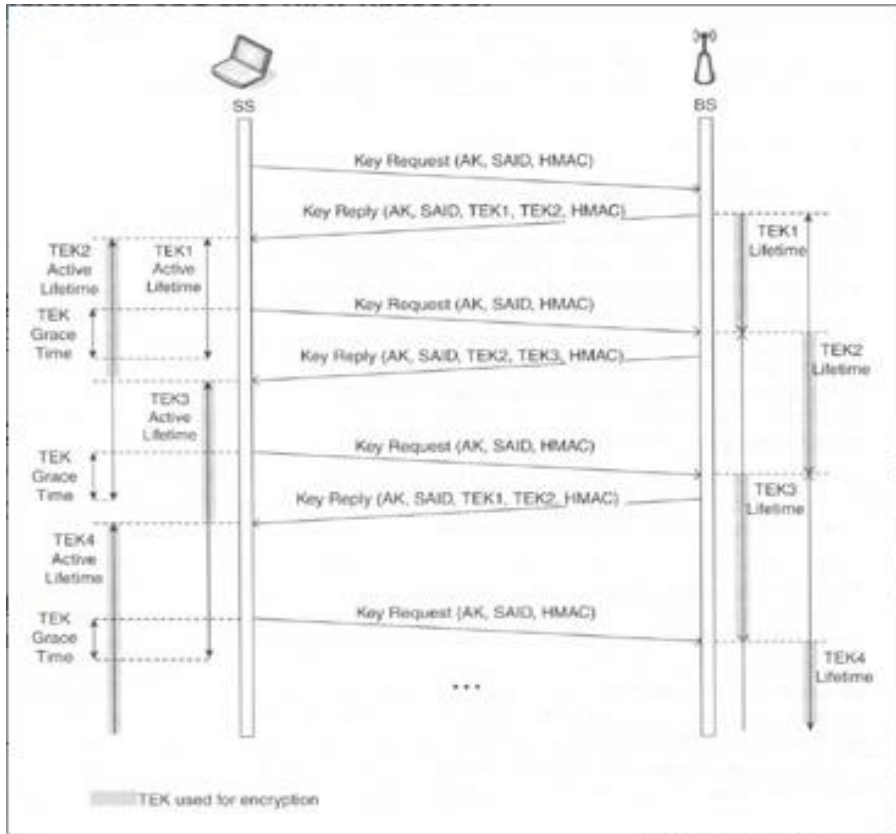
Το πρωτόκολλο KMP παρέχει ασφαλή διανομή δεδομένων από τον σταθμό βάσης προς τον απομακρυσμένο σταθμό. Το κάθε SA ταυτοποιείται με ένα SAID (Security Association Identifier). Οι απομακρυσμένοι σταθμοί συγχρονίζουν τα δεδομένα τους με τον σταθμό βάσης και αυτός αποφασίζει ποιες υπηρεσίες δικτύου θα τους παρέχει. Το σύστημα ασφαλείας παρέχει εγγύηση ασφαλής μεταφοράς δεδομένων με τη λειτουργία κρυπτογράφησης των δεδομένων, χρησιμοποιώντας το κλειδί κρυπτογράφησης κυκλοφορίας TEK (traffic encryption key).





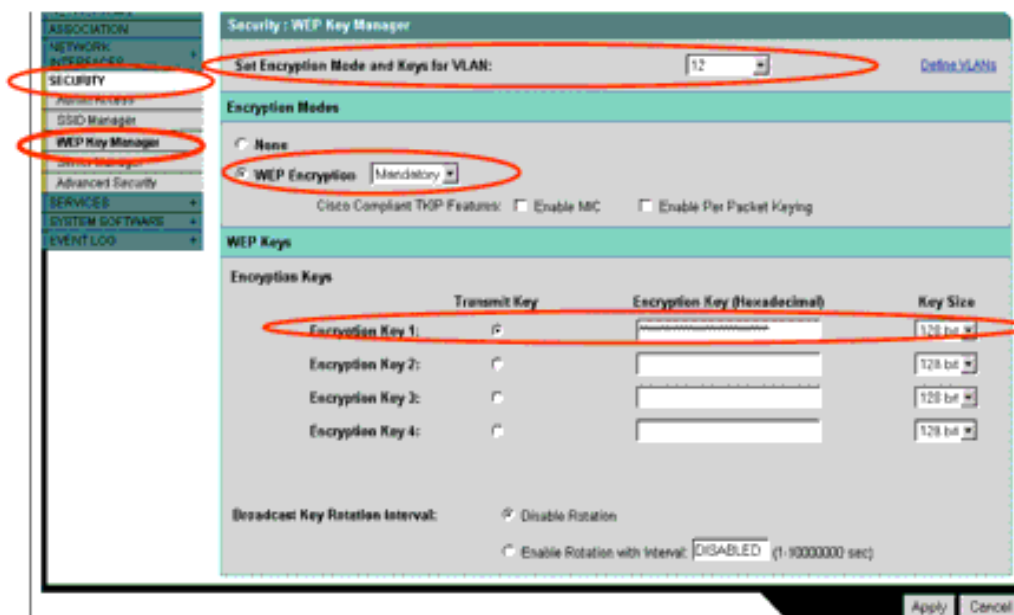
**Εικόνα 55:** Πρωτόκολλο βασικής διαχείρισης KMP

Η διαδικασία της λειτουργίας έχει ως εξής: Αρχικά ο απομακρυσμένος σταθμός στέλνει πληροφορίες επικύρωσης στον σταθμό βάσης αυτό για να γίνει εξακρίβωση των στοιχείων με κατάλληλους ελέγχους. Έπειτα ο σταθμός στέλνει μήνυμα αίτησης έγκρισης προς τον σταθμό βάσης, ώστε να του παρασχεθεί το κλειδί έγκρισης AK (authorization key). Όταν ο σταθμός παραλάβει το AK δημιουργεί δυο επιπλέον κλειδιά, το βασικό κλειδί TEK και το κλειδί HMAC.



**Εικόνα 56:** Κλειδί κρυπτογράφησης κυκλοφορίας TEK

Το TEK χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση και το HMAC χρησιμοποιείται για την προστασία των μηνυμάτων αιτήματος TEK και της απάντησης. Στη συνέχεια ο σταθμός στέλλει μήνυμα αιτήματος TEK στο σταθμό βάσης και αυτός με την σειρά του ελέγχει το HMAC χρησιμοποιώντας το δικό του κλειδί. Έπειτα δημιουργεί ένα νέο κλειδί κρυπτογράφησης και το διανέμει στους υπολοίπους σταθμούς. Μετά τη λήψη του κρυπτογραφημένου κλειδιού, ο κάθε σταθμός το αποκρυπτογραφεί και κρατά το αποκρυπτογραφημένο TEK για τη χρήση στην κρυπτογράφηση κυκλοφορίας των στοιχείων του. Με το κλειδί αυτό ο κάθε σταθμός θα μπορεί να κρυπτογραφεί / αποκρυπτογραφεί τα δεδομένα του.



**Εικόνα 57:** Φόρμα αποστολής κλειδιού

Το πρωτόκολλο KMP Version 2 ή αλλιώς ανταλλαγή TEK χρησιμοποιείται σε περίπτωση που οι σταθμοί δεν έχουν εξουσιοδότηση και επομένως δεν μπορούν να πραγματοποιήσουν χειραψία SA-TEK, αλλά ούτε και κλειδί για πρόσβαση και η τιμή του SAID είναι μηδενική. Έτσι ο απομακρυσμένος σταθμός ξεκινά ένα ξεχωριστό TEK για κάθε SAID που προσδιορίζονται στο μήνυμα KMP, αν η κρυπτογράφηση είναι για περισσότερες ροές στο δίκτυο. Κάθε μηχανισμός TEK είναι υπεύθυνος για την κάθε τιμή SAID κάθε ροής υπηρεσίας. Έπειτα ο μηχανισμός TEK στέλνει περιοδικά μηνύματα αίτησης κλειδιού προς τον σταθμό βάσης, ώστε να ενημερώσει τη βάση του με τους κωδικούς που αντιστοιχούν στα SAIDs. Στη συνέχεια ο σταθμός βάσης αφού ενημερωθεί απάντα μ' ένα κλειδί προς τον απομακρυσμένο σταθμό κι αυτός με τη σειρά του περνά στο δίκτυο [13][31][32][33][34][35].

## 9.1 Συμπέρασμα κεφαλαίου

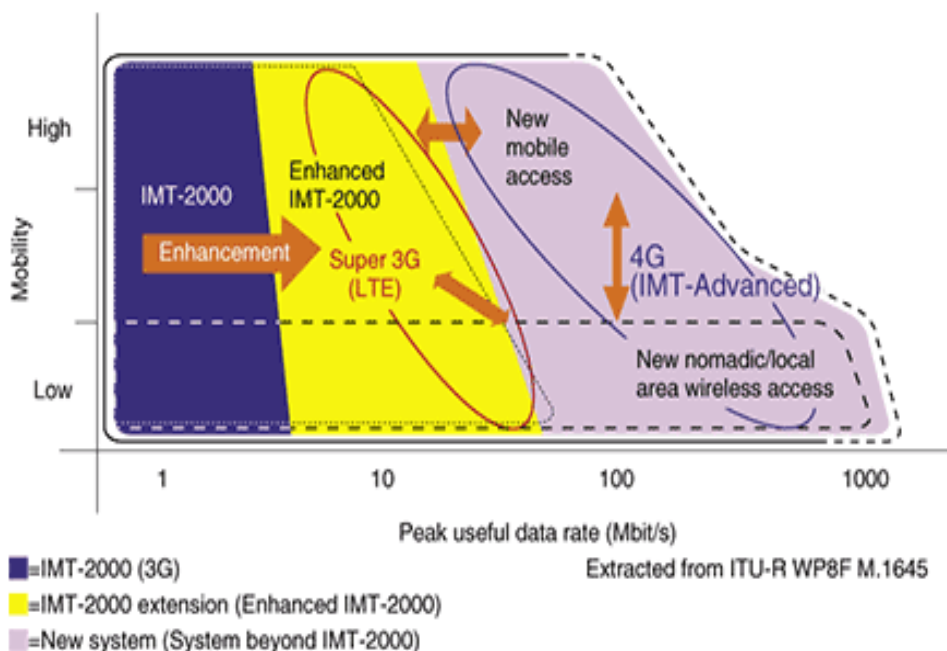
Σαφώς το επίπεδο ασφαλείας είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την ασφάλεια του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, με πρωτόκολλο KMP(key management protocol) Version 1 και Version 2 γίνεται κρυπτογράφηση στα δεδομένα με οι χρήστες προκειμένου να «εισέρθουν» στο δίκτυο χρησιμοποιούν το κλειδί και διάφορες τεχνικές.

## 10. Ανταγωνιστές του 802.16j

Τα ασύρματα συστήματα προκειμένου να επιτύχουν υψηλές ταχύτητες σε κινητές υπηρεσίες ασύρματης πρόσβασης, χωρίζονται σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη καλείται ως WiMAX και είναι πρότυπο τέταρτης γενιάς. Αφορά τα πρότυπα που καθορίζονται από την επιτροπή IEEE 802.16, συγκεκριμένα τα πρότυπα IEEE 802.16e, IEEE 802.16j, και IEEE 802.16m που αναφέραμε παραπάνω. Η δεύτερη ομάδα είναι οι Διεθνείς κινητές τηλεπικοινωνίες-2000 ή IMT-2000 (International Mobile telecommunications-2000), οι οποίες περιλαμβάνουν τα wideband code division multiple access (W-CDMA), high speed downlink packet access (HSDPA), high speed uplink packet access (HSUPA), High speed packet access plus (HSUPA+), το LTE/ LTEAdvanced που καθορίζεται από τεχνολογίες τρίτης γενιάς 3GPP (3rd Generation Partnership Project), και το UMB (Ultra Mobile Broadband) που καθορίζεται από το 3GPP2, κάποια από αυτά αναλύονται παρακάτω [11].

### 10.1 IMT- Advanced

Σύμφωνα με την ITU το όνομα της επόμενης γενιάς (4G) ασύρματων κινητών ευρυζωνικών συστημάτων επικοινωνίας είναι το IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications - Advanced). Το IMTAdvanced πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές του 2011, ενώ οι υπηρεσίες του αναμένεται να είναι διαθέσιμες μετά το 2015. Θεωρείται ότι θα είναι η επόμενη γενιά δικτύων, η οποία θα έχει ως σκοπό να εξυπηρετούνται όσο το δυνατόν περισσότεροι χρήστες μέσα στην κυψέλη.



Εικόνα 58: IMT-Advanced

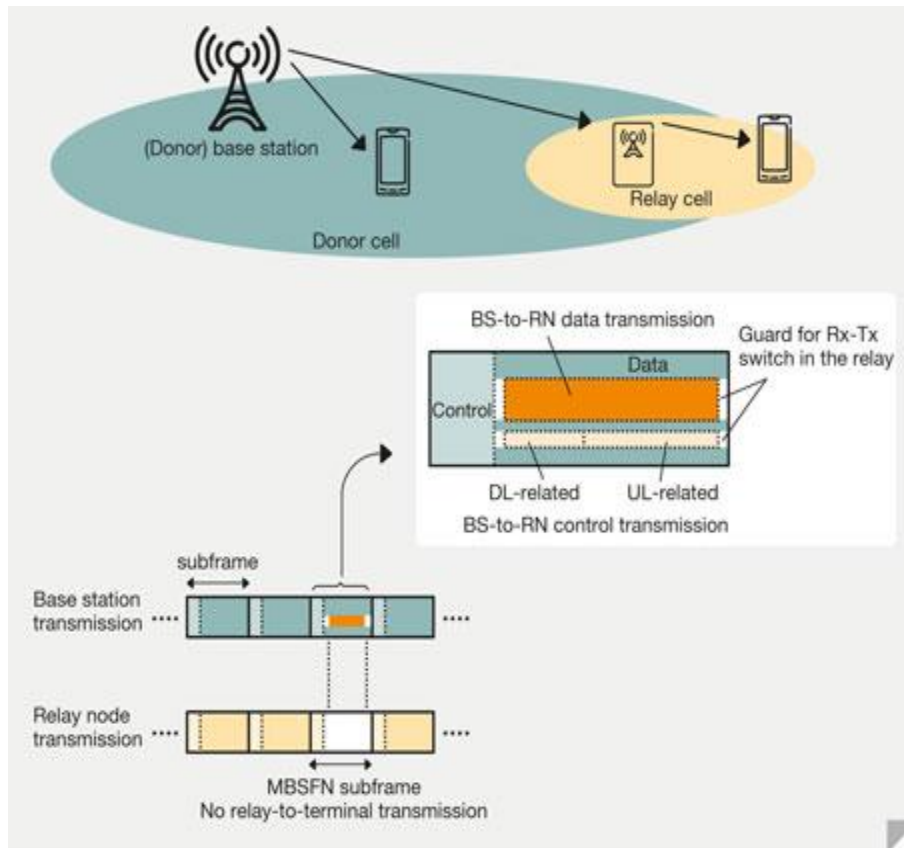
Τα δίκτυα αυτά είναι φιλικά προς τον χρήστη και οι τιμές τους είναι σχετικά χαμηλές σε σχέση με τις υπηρεσίες που προσφέρουν. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν όλες τις υπηρεσίες που τους προσέφερε η προηγούμενη γενιά και ο εξοπλισμός του είναι συμβατός με τον προηγούμενο.

Σύμφωνα με την ITU, τα συστήματα αυτά μπορούν να υποστηρίξουν μέγιστο ποσοστό δεδομένων 100 Mb/s και 1 Gb/s ταχύτητες σε περιβάλλον με υψηλή κινητικότητα (μέχρι 350 Km/h) και σε σταθερό προβάλλον (μέχρι 10Km/h) αντίστοιχα. Το εύρος ζώνης κυμαίνεται ανάμεσα σε 20-100 MHz. Στην downlink ζώνη η απόδοση φάσματος είναι [1.1, 15 b/s/MHz] , ενώ στην uplink [0.7, 6.75 b/s/MHz]. Επιπλέον η ελάχιστη απαίτηση φωνής για το IP (VoIP) 30 και 50 ενεργό χρήστη/ τομέα / MHz και η καθυστέρηση θα πρέπει να είναι μικρότερη από 100ms και 10 ms.

Στόχος τους είναι να ενοποιήσουν όλα τα υπάρχοντα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας και η διαχείριση να γίνεται μέσα στην ίδια πλατφόρμα ώστε να μην έχουμε προβλήματα διακοπής σύνδεσης στη διάρκεια της μεταπομπής [8][36][37][38][39].

## 10.2 LTE- Advanced

Προκειμένου η Third Generation Partnership Project (3GPP) να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις για καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών(QoS) ξεκίνησε την Long Term Evolution (LTE) , η τυποποίηση της έγινε στο τέλος του 2004 και ολοκληρώθηκε επιτυχώς στα τέλη του 2007. Αποτελεί πρότυπο για την ασύρματη επικοινωνία και είναι η εξέλιξη του GSM/UMTS. Σχεδιάστηκε για να αντικαταστήσει το GPRS Core Network και να υποστηρίξει την απρόσκοπτη μετάδοση τόσο δεδομένων όσο και της φωνής ακόμα και σε δίκτυα με παλαιότερη τεχνολογία δικτύου (GSM, UMTS, CDMA2000). Είναι πιο απλή τεχνική και υπολογίζεται ως φθηνότερη επιλογή. Θεωρείται ότι η κινητή ευρυζωνικότητα σύμφωνα με το πρότυπο θα είναι 10 φορές ταχύτερη από την προηγούμενη. Χρησιμοποιεί τον αέρα ως μέσο μετάδοσης, η διεπαφή του είναι συμβατή με τα συστήματα δεύτερης και τρίτης γενιάς και χρησιμοποιεί κεραιοσυστήματα MIMO. Επίσης ακολουθεί την OFDMA για downlink, SC-FDMA(Single Carrier Frequency Division Multiple Access) για την uplink ως τεχνικές πολυπλεξίας. Το 3GPP προκειμένου να αντιμετωπίσει τις απαιτήσεις και τις προκλήσεις της IMT-Advanced, ξεκίνησε την διαδικασία LTE-Advanced το οποίο είναι πρότυπο για κινητά συστήματα.

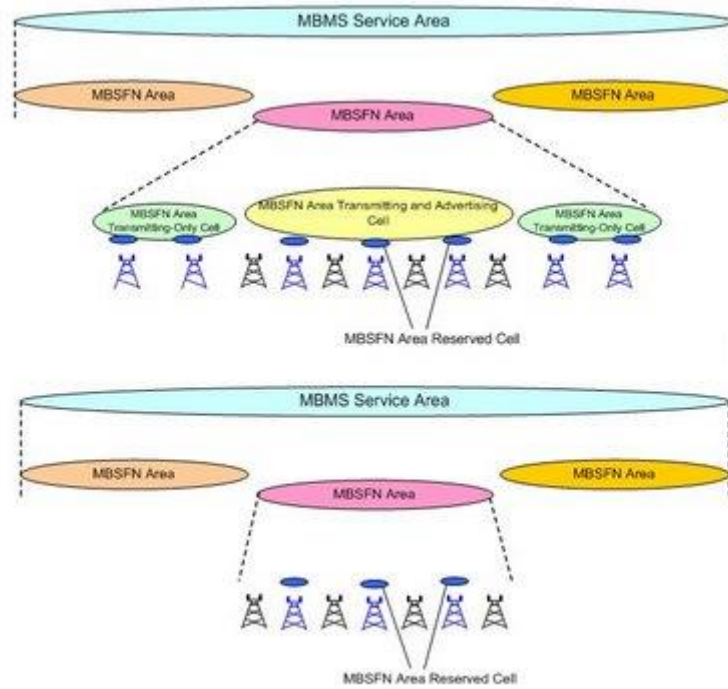


**Εικόνα 59:** LTE-Advanced

Σύμφωνα με την 3GPP στο LTE-Advanced και το 802.16j, η θύρα αναμεταδότη μπορεί να λειτουργεί και ως σταθμός βάσης για την εξυπηρέτηση των τοπικών σταθμών UE (user equipment). Θα πρέπει να είναι σε θέση να μεταδώσει σύμβολα αναφοράς και πληροφορίες ελέγχου της downlink ζώνης. Έτσι ένας αναμεταδότης έχει τον πλήρη έλεγχο ενός ENB / BS.

Δεν πρέπει να υπάρχει διάφορα ανάμεσα σε μια κυψέλη που ελέγχεται από ένα RS και ένα ENB. Η βασική διαφορά είναι ότι το 802.16j υποστηρίζει multihop επικοινωνία σε μια κυψέλη με αποτέλεσμα να παράγει καθυστέρηση στη μετάδοση, ενώ το LTE-Advanced υποστηρίζει μόνο δυο-hop αναμετάδοσης κι έτσι μειώνεται η καθυστέρηση.

Προκειμένου τα συστήματα αυτά να είναι συμβατά με τα προηγούμενα τους, το LTE-Advanced πρόσθεσε μια εικονική πολλαπλής εκπομπής τεχνική δικτύου MBSFN (multicast broadcast single-frequency network), ώστε οι "παλιές" μανάδες UE να είναι συμβατές με το νέο δίκτυο κινητής αναμετάδοσης UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).



**Εικόνα 60:** Τεχνική εικονική πολλαπλής εκπομπής MBSFN

Σύμφωνα με το MBSFN, τα δεδομένα μεταδίδονται ταυτόχρονα στην ασύρματη διεπαφή από πολλαπλά, αυστηρώς συγχρονισμένα κελιά. Οι κινητοί χρήστες μπορούν να λαμβάνουν τα πολυμεσικά δεδομένα πέρα από την κυψέλη τους και από γειτονικές, τα οποία εκπέμπουν συγχρονισμένα τα ίδια δεδομένα στις ίδιες συχνότητες. Η απόδοση του MBSFN εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης [4][40][41][42][43][44].

### 10.3 Συμπέρασμα κεφαλαίου

Οι Διεθνείς κινητές τηλεπικοινωνίες-2000 ή IMT-2000 θεωρούνται τεχνολογίες τρίτης γενιάς 3GPP και είναι οι ανταγωνιστές του WiMAX. Πιο συγκεκριμένα το IMT-Advanced που είναι τεχνολογία τέταρτης γενιάς, ως σκοπό έχει να εξυπηρετούνται όσο το δυνατόν περισσότεροι χρήστες μέσα στην κυψέλη και να μην έχουμε προβλήματα διακοπής σύνδεσης στη διάρκεια της μεταπομπής. Επίσης το LTE-Advanced υποστηρίζει την απρόσκοπτη μετάδοση τόσο δεδομένων όσο και της φωνής και σε δίκτυα με παλαιότερη τεχνολογία δικτύου.

## Αναφορές

- [1] Δ. Ξενικός, Π. Βούδδας, “Δίκτυα Πρόσβασης Νέας Γενιάς”, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2010.
- [2] Άρης Αλεξόπουλος, Γιώργος Λαγογιάννης “Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών”, Αθήνα 2003.
- [3] Debalina Ghosh, Ashima Gupta, Prasant Mohapatra, “Adaptive Scheduling of Prioritized Traffic in IEEE 802.16j Wireless Networks”, Department of Computer Science, University of California, Davis, 2008.
- [4] Yang Yang, Honglin Hu and Jing Xu, Guoqiang Mao, “Relay Technologies for WiMAX and LTE-Advanced Mobile Systems”, IEEE Communications Magazine , October 2009.
- [5] Steven W. Peters, Robert W. Heath, “The Future of WiMAX: Multihop Relaying with IEEE 802.16j”, University of Texas at Austin, January 2009.
- [6] Zhifeng Tao, Anfei Li, Koon Hoo Teo, Jinyun Zhang, “Frame Structure Design for IEEE 802.16j Mobile Multihop Relay (MMR) Networks”, MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES, September 2008.
- [7] <http://www.wimaxforum.org/news/549>
- [8] <https://www.nttreview.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr200811sf4.html>
- [9] Vasken Genc, Sean Murphy, Yang Yu, John Murphy, “IEEE 802.16J RELAY-BASED WIRELESS ACCESS NETWORKS: AN OVERVIEW”, IEEE Wireless Communications , October 2008.
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.16](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.16)
- [11] D. Satish Kumar, N. Nagarajan, “Technical Issues in IEEE 802.16j Mobile Multi-Hop Relay (MMR) Networks”, <http://www.europeanjournalofscientificresearch.com>, EuroJournals Publishing, Inc. 2011.
- [12] Kwang-Cheng Chen, J. Roberto B. de Marca, “Mobile WiMAX”, West Sussex PO19 8SQ, England, 2008.
- [13] Byeong Gi Lee, Sunghyun Choi, ” Broadband Wireless Access and Local Networks Mobile WiMAX and WiFi ”, London ,2008.



- [14] <http://www.otherside.gr/2011/09/exelixi-kinitwn-1946-simera/>
- [15] [http://www.myphone.gr/library/glossary.html?do=search&search\\_word=amps](http://www.myphone.gr/library/glossary.html?do=search&search_word=amps)
- [16] <http://www.4pi.gr/hitech/data/pdf/0601.pdf>
- [17] [http://el.wikipedia.org/wiki/Global\\_System\\_for\\_Mobile\\_Communications](http://el.wikipedia.org/wiki/Global_System_for_Mobile_Communications)
- [18] <http://www.merl.com/reports/docs/TR2007-120.pdf>
- [19] [http://www.s3.kth.se/signal/project\\_course/2008/green/objective.htm](http://www.s3.kth.se/signal/project_course/2008/green/objective.htm)
- [20] [http://www.cisco.com/web/about/ac123/ac147/archived\\_issues/ipj\\_11-2/112\\_wimax.html](http://www.cisco.com/web/about/ac123/ac147/archived_issues/ipj_11-2/112_wimax.html)
- [21] Ashima Gupta, "Scheduling for Energy Conservation and Quality Enhancement in Multi-hop Wireless Networks", California, 2009.
- [22] Tao, Z., Teo, K.H., Zhang, J., "Aggregation and Concatenation in IEEE 802.16j Mobile Multihop Relay (MMR) Networks", IEEE Mobile WiMAX Symposium, March 2007.
- [23] Basak Can, Halim Yanikomeroglu, Furuzan Atay Onat, Elisabeth De Carvalho και Hiroyuki Yomo, "Efficient Cooperative Diversity Schemes and Radio Resource Allocation for IEEE 802.16j", Canada, 2009.
- [24] Kejie Lu, Yi Qian, Hsiao-Hwa Chen, Shengli Fu, "WiMAX Networks: From Access to Service Platform", IEEE Network, May/June 2008.
- [25] Δημητράκοπουλος Νικόλαος, Παπαδημητρίου Αργύρης, "Δίκτυα Δεδομένων WiMAX", μελέτη στα πλαίσια του μαθήματος Ειδικά θέματα Δικτύων, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, 2006.
- [26] Dr. Hari Ραμακρίσνα, "Μια μελέτη για *WiFi* και *WiMAX* Layered Δομές", Chaitanya Bharathi Institute of Technology, Κύπρος, 2009.
- [27] <http://www.javvin.com/wireless/AAS.html>
- [28] Rajinder Kumar, Kaushik Adhikary, Mr.Rohit Vaid, "VERSIONS OF 802.16", Mullana, India, SPT-OCT 2011.
- [29] Loutfi Nuaymi, "WiMAX: technology for broadband wireless access", England, June 2007.

- [30] <http://wimax-made-simple.blogspot.com/2011/04/sleep-mode-operation-in-wimax-relaying.html>
- [31] Adnan Shahid khan, Norsheilafisal, Sharifah Kamilah, Mazlan Abbas, "Efficient Distributed Authentication Key Scheme for Multi-hop Relay In IEEE 802.16j Network", International Journal of Engineering Science and Technology, Malaysia, 2010
- [32] Chin-Tser Huang, J. Morris Chang, "Responding to Security Issues in WiMAX Networks", *University of South Carolina*, September/October 2008.
- [33] WiMAX Forum, Mobile WiMAX-Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation \_arch 2006
- [34] Massato Okuda, Chenxi Zhu, Dorin Viorel, "Multihop Relay Extension for WiMAX Networks-Overview and Benefits of IEEE 802.16j Standard", January 16 2008.
- [35] IEEE, IEEE Std 802.16-200: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems 24-6-2004
- [36] [http://en.wikipedia.org/wiki/IMT\\_Advanced](http://en.wikipedia.org/wiki/IMT_Advanced)
- [37]<http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=imt-advanced&lang=en>
- [38] Moray Rumney BSc, C. Eng, MIET, "IMT-Advanced: 4G Wireless Takes Shape in an Olympic Year", [www.agilent.com/go/journal](http://www.agilent.com/go/journal).
- [39] <https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr200811sf4.html>
- [40] [http://www.ericsson.com/news/101221\\_next\\_generation\\_lte\\_244218599\\_c](http://www.ericsson.com/news/101221_next_generation_lte_244218599_c)
- [41] <http://pcnea.blogspot.com/2011/06/lte-advanced-10.html>
- [42] <http://el.wikipedia.org/wiki/LTE>
- [43] [http://www.nikolaskaralis.gr/projects/sfhmmy4/sfhmmy4\\_abstracts-short.pdf](http://www.nikolaskaralis.gr/projects/sfhmmy4/sfhmmy4_abstracts-short.pdf)
- [44] <http://3g4g.blogspot.com/2009/07/embms-evolved-multimedia-broadcast.html>
- [45] Cristiana Gomes, Jérôme Galtier<sup>2</sup>, "Optimal and Fair Transmission Rate Allocation Problem in Multi-hop Cellular Networks", Univ. Nice Sophia, France, 2009.

- [46] Basak Can, Maciej Portalski, Hugo Simon Denis Lebreton, Simone Frattasi, "Implementation Issues for OFDM-Based Multihop Cellular Networks" Victoria University, September 2007
- [47] Sunghyun Cho, Edward W. Jang, John M. Cioffi, "Handover in Multihop Cellular Networks", Stanford University, July 2009.
- [48] Karen Scarfone, Cyrus Tibbs, Matthew Sexton "Guide to Securing WiMAX Wireless Communications", National Institute of Standards and Technology, September 2010.
- [49] <http://www.wimax.com/wimax-technologies-standards/what-is-ieee-80216e>
- [50] <http://www.awmn.net/showthread.php?t=944>
- [51] <http://en.kioskea.net/contents/wimax/wimax-intro.php3>
- [52] <http://www.umtsworld.com/umts/faq.htm>
- [53] <http://www.conniq.com/WiMAX/fdm-ofdm-ofdma-sofdma-03.htm>
- [54] Mischa Dohler, Djamel-Eddine Meddour, Sidi-Mohammed Senouci, Hassnaa Moustafa, "Cooperative Communication System Architectures for Cellular Networks", France, 2010
- [55] abd-Elhamid Taha, Najah Abu Ali, Hossam Hassanein, "LTE, LTE-Advanced and WiMAX", United Kingdom, 2012.
- [56] Bernard H. Walke, Stefan Mangold, Lars Berlemann, "IEEE 802 wireless systems", England, 2006.
- [57] Nikolaos s.voros, Alberto Rosti, Michael Hubner, "Dynamic System Reconfiguration in Heterogenous Platforms: The MORPHEUS Approach", Berlin, 2009.
- [58] Hua Wang, Chunlin Xiong, Villy B. Iversen, "Uplink Capacity of Multi-class IEEE 802.16j Relay Networks with Adaptive Modulation and Coding", China, 2009.
- [59] Shie-Yuan Wang\*, Hsin-Yu Chen, and Shih-Wei Chuan, "NCTUNS TOOL FOR IEEE 802.16J MOBILE WIMAX RELAY NETWORK SIMULATIONS", University, Hsinchu, Taiwan, 2009.
- [60] Georgios Thodoridhs, Foteinh Pavlidoy, "A combined resource management and admission control scheme for optimizing uplink performance of M-WiMAX systems", New York, December 2011.
- [61] <http://www.scribd.com/doc/56400907/Wimax-vs-Lte>
- [62] Shao-Fei Lu, Jian-Xin Wang, Yue-Juan Kuang, "An Efficient Power Saving Mechanism for Sleep Mode in IEEE 802.16e Networks", London, 2010.

[63] Ashish Kumar Singh, Vidyasagar M Potdar, " Torpid Mode: Hybrid of Sleep and Idle Mode as Power Saving Mechanism for IEEE 802.16j", ieeexplore.ieee.org, 2010.

[64] <http://www.4gnetwork.com/>

[65][http://conta.uom.gr/conta/ekpaideysh/metaptyxiaka/strathgikes\\_diktywn/ergasies/mobile\\_eu\\_asia.pdf](http://conta.uom.gr/conta/ekpaideysh/metaptyxiaka/strathgikes_diktywn/ergasies/mobile_eu_asia.pdf)

[66] <http://www.privateline.com/PCS/history5.htm>