



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ**

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

-Πτυχιακή εργασία-

«Κινητά δίκτυα νέας γενιάς και η εξέλιξή τους»

Σπουδαστές: Βενετικίδη Σοφία

Κατζιλιέρη Μαρία

Επόπτης καθηγητής: Λουκάς Μάνδαλος

Πάτρα-2012

Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί την τελευταία μας πράξη ως φοιτήτριες του τμήματος Επιχειρηματικού Σχεδιασμού και Πληροφοριακών Συστημάτων.

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μας εργασίας, κ. Μάνδαλο Λουκά , για την αμέριστη υποστήριξη, συμπαράσταση και αποτελεσματική καθοδήγησή του, χωρίς την οποία δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της πτυχιακής.

Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μας που μας στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια, γιατί χωρίς αυτούς δεν θα είχαμε καταφέρει τίποτα.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Από την πρώτη γενιά αναλογικών κινητών δικτύων του 1980, η κινητή τηλεφωνία έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης. Με την εμφάνιση της 2^{ης} γενιάς δικτύων (2G) και του GSM το 1991, η κινητή τηλεφωνία εξαπλώθηκε ραγδαία και σταδιακά σχεδόν όλοι είχαν από ένα κινητό τηλέφωνο. Το 2002, εμφανίστηκε το UMTS και τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς (3G) ήταν γεγονός. Από τις πρώτες ημέρες του 3G ακόμα, είχε ήδη ξεκινήσει να ωριμάζει η ιδέα του 4G, ώστε να μπορεί να κάνει την εμφάνισή του την επόμενη δεκαετία. Η ιδέα ήταν η καθιέρωση αλλαγής γενεών κινητής τηλεφωνίας, περίπου κάθε δέκα χρόνια. Πριν την εμφάνιση της 4^{ης} γενιάς, κύριο μέλημα στη σχεδίαση δικτύων κινητής τηλεφωνίας ήταν η μετάδοση φωνής. Σήμερα με τις δυνατότητες που έχουν οι σημερινές κινητές συσκευές, στόχος των δικτύων 4G είναι η συνεργασία ασύρματων τεχνολογιών, για την άψογη υποστήριξη των όλο και αυξανόμενων multimedia εφαρμογών και του ίντερνετ, πετυχαίνοντας ταχύτητες μεγαλύτερες από αυτές που προσφέρουν τα σημερινά οικιακά δίκτυα.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο την παρουσίαση και περιγραφή των τεχνολογιών και προτύπων, που αποτελούν τη βάση των σημερινών και μελλοντικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Σε πρώτο στάδιο, στόχος της εργασίας είναι η εισαγωγή σε βασικές έννοιες των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, προκειμένου να γίνουν κατανοητές οι τεχνολογίες που περιγράφονται στη συνέχεια. Στο πλαίσιο αυτό περιγράφεται το πώς επιλέγονται και αξιοποιούνται οι διάφορες τεχνολογίες, ώστε να προσφέρουν όλο και καλύτερες επιδόσεις. Επιπλέον, η εργασία αποσκοπεί να αναδείξει τα στάδια από τα οποία περνάει ένα πρότυπο από τη σύλληψη μέχρι την υλοποίησή του, καθώς και με ποιον τρόπο διαφέρουν οι γενιές κινητής τηλεφωνίας μεταξύ τους. Όλα τα παραπάνω αποσκοπούν στο να δείξουν τα τεχνολογικά και κοινωνικά οφέλη, που έρχονται να προσφέρουν τα δίκτυα του μέλλοντος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για να περιγραφούν τα κινητά δίκτυα νέας γενιάς και τα οφέλη τους, αρχικά γίνεται μια εισαγωγή σε τεχνολογίες, έννοιες και τα βασικά μέρη ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας GSM. Μετά παρουσιάζονται οι οργανισμοί τυποποιήσεων, που κάνουν πραγματικότητα αυτές τις νέες τεχνολογίες και η εξέλιξη των γενεών μέχρι σήμερα. Ακολουθεί παρουσίαση των αναμενόμενων χαρακτηριστικών και υπηρεσιών των δικτύων 4^{ης} γενιάς, καθώς και των προτύπων LTE και WiMAX που την αποτελούν. Στη συνέχεια περιγράφονται οι τεχνολογίες MIMO και OFDM, οι οποίες αποτελούν τους βασικότερους λόγους που τα νέα δίκτυα φέρνουν την επανάσταση στο χώρο, με υψηλές ταχύτητες και αξιοπιστία. Ύστερα από τις σημαντικές έννοιες, ξεκινάει η σε βάθος ανάλυση των προτύπων LTE και WiMAX. Πρώτο παρουσιάζεται το LTE, αναλύοντας την αρχιτεκτονική και τα πρωτόκολλα του νέου δικτύου και κάνοντας σύγκριση με προηγούμενες τεχνολογίες για να αναδειχθούν τα οφέλη. Τέλος, παρουσιάζεται το WiMAX, όπου αναλύεται η φιλοσοφία γύρω από την ανάπτυξη του, οι τρόποι υλοποίησης, το δίκτυο και τα πρωτόκολλα που το απαρτίζουν.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 ^ο Εισαγωγή	1
1.1 Βασικές Αρχές Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας.....	1
1.1.1 Κυψελωτή τηλεφωνία	2
1.1.2 Συχνότητες.....	4
1.1.3 Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης.....	5
1.1.4 Τρόποι αμφίδρομης μετάδοσης.....	10
1.2 Οργανισμοί Τυποποιήσεων.....	12
1.2.1 Οργανισμοί.....	13
1.3 Εξέλιξη κινητών δικτύων επικοινωνιών.....	15
1.3.1 1ης γενιάς.....	16
1.3.2 2ης γενιάς.....	16
1.3.3 2.5ης γενιάς.....	19
1.3.4 3ης γενιάς.....	20
1.3.5 3.5ης γενιάς.....	22
Κεφάλαιο 2 ^ο Κινητά δίκτυα 4G	25
2.1 Χαρακτηριστικά και τεχνολογίες δικτύων 4 ^{ης} γενιάς.....	25
2.1.1 IMT-Advanced	25
2.1.2 Χαρακτηριστικά.....	28
2.1.3 All-IP δίκτυα	29
2.2 Υπηρεσίες και εφαρμογές 4 ^{ης} γενιάς.....	30
2.3 IPv6 και Handovers	32
2.3.1 Handovers	32
2.3.2 Mobile IPv6	33
2.4 Κατάσταση στην Ελλάδα και ανά τον κόσμο εξελίξεις στο 4G.....	34
2.5 LTE και WiMAX	36
2.5.1 LTE	36

2.5.2 Mobile WiMAX.....	37
Κεφάλαιο 3 ^ο Τεχνολογίες OFDM και MIMO	38
3.1 Χρήση των OFDM και MIMO τεχνολογιών στα δίκτυα 4G	38
3.2 Η τεχνολογία OFDM	39
3.3 Η τεχνολογία MIMO.....	43
Κεφάλαιο 4 ^ο LTE.....	50
4.1 Εισαγωγή	50
4.1.1 Προεπισκόπηση	51
4.2 Από το UMTS στο LTE.....	53
4.3 Αρχιτεκτονική και πρωτόκολλα	54
4.3.1 Βασικά μέρη δικτύου	56
4.3.2 Πρωτόκολλα.....	59
4.3.3 Φυσικό επίπεδο	62
4.3.4 Femtocells	64
4.4 Φάσμα	66
4.5 LTE Advanced.....	69
4.5.1 Carrier Aggregation.....	70
4.5.2 MIMO	72
4.5.3 Relay Nodes.....	73
Κεφάλαιο 5 ^ο WiMAX	75
5.1 Εισαγωγή	76
5.1.1 Wi-Fi και WiMAX	76
5.1.2 Εφαρμογές του WiMAX.....	77
5.2 Βασικά χαρακτηριστικά τεχνολογίας WiMAX.....	78
5.2.1 Λειτουργία συστήματος WiMAX.....	79
5.2.2 Φάσμα.....	81

5.3 WiMAX Mobile.....	81
5.3.1 Εισαγωγή	81
5.3.2 Αρχιτεκτονική	82
5.3.3 Διαστρωμάτωση πρωτοκόλλων	86
5.3.4 Handovers.....	88
5.3.5 Ασφάλεια.....	90
5.4 Mobile WiMAX εναντίον LTE	92
Κεφάλαιο 6 ^ο Συμπεράσματα	93
Βιβλιογραφία.....	94

Κεφάλαιο 1^ο Εισαγωγή

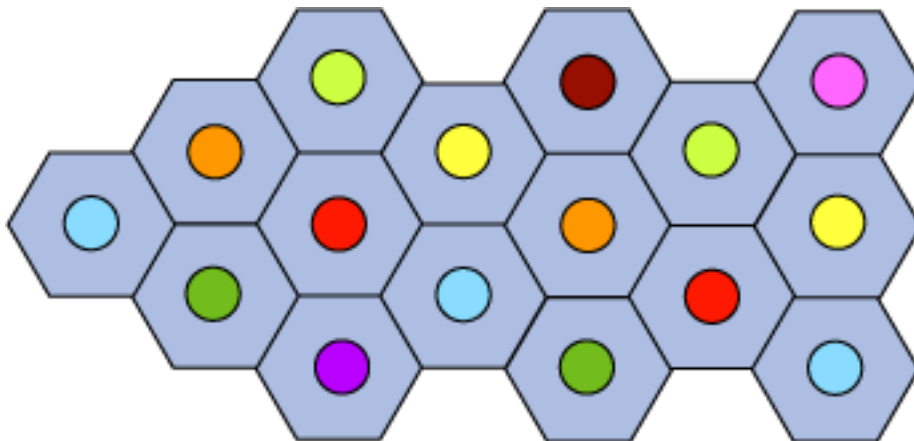
Η ασύρματη ή αλλιώς κινητή τηλεφωνία είναι μια παραλλαγή της κλασσικής τηλεφωνίας, που επιτρέπει στους συνδρομητές της να χρησιμοποιούν το τηλεφωνικό δίκτυο με την βοήθεια φορητών ασύρματων τηλεφωνικών συσκευών. Πλεονεκτήματα της κινητής τηλεφωνίας είναι η ελευθερία κίνησης του συνδρομητή με τη συσκευή του. Ιστορικά έχουμε τα πρώτα συστήματα, όπως TACS, NMT, CT1 και ακολούθησαν τα συστήματα κυψελωτής δομής όπως GSM, DCS-1800, DECT και TETRA. Κύριο χαρακτηριστικό και δυσκολία υλοποίησης της είναι ότι πρέπει να καλύψει εκτεταμένες περιοχές που απαιτούν μεγάλες ισχύεις εκπομπής και μεγάλο αριθμό συχνοτήτων. Τα πρώτα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας λειτούργησαν σε Ιαπωνία και Σκανδιναβία στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Τα πρώτα κινητά τηλέφωνα ήταν πολύ ακριβά, ογκώδη και κυρίως τα εγκαθιστούσαν σε αυτοκίνητα. Αντιπροσωπευτική συσκευή 1^{ης} γενιάς είναι το μοντέλο DynaTAC8000X της Motorola. Η δεκαετία του '90 έφερε το GSM και την ψηφιοποίηση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η 2^η γενιά βοήθησε στην εξάπλωση και πιο διαδεδομένη χρήση των κινητών τηλεφώνων με πιο φθηνές και εύχρηστες συσκευές και την εισαγωγή της υπηρεσίας αποστολής γραπτών μηνυμάτων. Στις αρχές της νέας χιλιετίας ήρθαν τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς και έφεραν την επανάσταση με πολλές multimedia εφαρμογές και δυνατότητα σύνδεσης στο ίντερνετ σε ικανοποιητικές ταχύτητες. Σήμερα ο όρος Smartphone έχει αντικαταστήσει τον όρο κινητό τηλέφωνο και με την ταχύτερη πρόοδο της τεχνολογίας πλέον κρατάμε μικρούς υπολογιστές στην παλάμη μας. Σελίδες κοινωνικής δικτύωσης, διαμοιρασμός φωτογραφιών και βίντεο, cloud computing και εκατοντάδες άλλες εφαρμογές χρειάζονται κάτι παραπάνω από μια απλή σύνδεση στο ίντερνετ. Τις αυξημένες ανάγκες μεταφοράς μεγάλου όγκου δεδομένων και φωνής έρχονται να λύσουν τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς (4G) τα οποία υπόσχονται ταχύτητες έως και 1 Gbps που ξεπερνούν ακόμα και τα σημερινά οικιακά ενσύρματα δίκτυα. Πέρα από τις υψηλές ταχύτητες, τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς φέρνουν τεχνολογικές εξελίξεις με νέες τεχνολογίες κάνοντας ένα βήμα προς τη σύγκληση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας με το ίντερνετ. Στο παρόν κεφάλαιο επεξηγείται η βασική λειτουργία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας και παρουσιάζονται οι πρώτες γενιές κινητών δικτύων.

1.1 Βασικές Αρχές Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας

Τα κινητά δίκτυα βασίζονται στην ασύρματη επικοινωνία. Στόχος είναι η κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης γεωγραφικής περιοχής ώστε οι χρήστες να μπορούν να κινούνται ελεύθερα και να επικοινωνούν εντός αυτής. Όπως είναι γνωστό ο χρήστης διαθέτει ασύρματη κινητή συσκευή και επικοινωνεί με άλλους χρήστες του δικτύου μέσω κεραιών που είναι στρατηγικά τοποθετημένες ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη κάλυψη μιας περιοχής. Η επικοινωνία ανάμεσα στις κεραιές και τις κινητές συσκευές γίνεται με ραδιοκύματα σε συγκεκριμένες συχνότητες. Πριν ξεκινήσουμε την ανάλυση των τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας θα γίνει μια εισαγωγή σε βασικές αρχές ώστε να είναι πιο εύκολη η ανάγνωση των παρακάτω κεφαλαίων. Κάποια από τα στοιχεία που θα παρουσιαστούν είναι της τεχνολογίας **GSM** καθώς είναι η πιο διαδεδομένη και οι ίδιες βασικές αρχές ισχύουν για τα περισσότερα δίκτυα επόμενων γενεών που ουσιαστικά αποτελούν αναβάθμιση της.

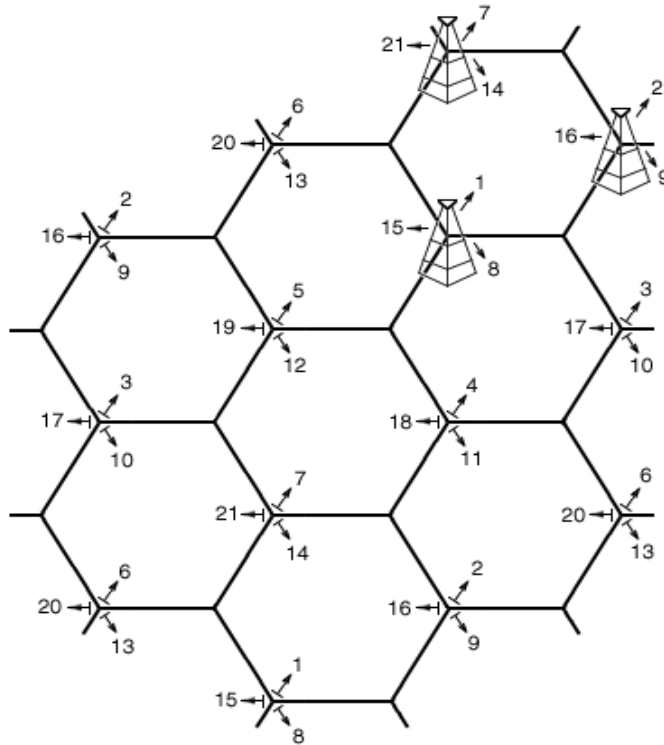
1.1.1 Κυψελωτή τηλεφωνία

Τα περισσότερα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούν την τεχνολογία των κυψελών και έτσι ο όρος κυψελωτή τηλεφωνία (Cellular Telephony) έχει γίνει συνώνυμο της κινητής τηλεφωνίας. Η ονομασία προκύπτει από τον χωρισμό μιας γεωγραφικής περιοχής που καλύπτει το δίκτυο σε μικρότερες περιοχές που ονομάζονται κυψέλες. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούν κυψέλες γιατί το εύρος συχνοτήτων που διατίθεται για την κινητή τηλεφωνία είναι περιορισμένο και δεν φτάνουν για να καλύψουν όλους τους χρήστες ενός δικτύου. Οι κεραιές και οι κινητές συσκευές διαθέτουν πομποδέκτες μικρής ισχύος ώστε ο περιορισμένος αριθμός διαθέσιμων συχνοτήτων να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα από πολλούς χρήστες με όσο το δυνατόν μικρότερες παρεμβολές. Τις περισσότερες φορές οι κυψέλες παρουσιάζονται στις εικόνες και τα διαγράμματα ως εξάγωνα σχήματα ενώ στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει. Τα όρια στα οποία φτάνει το σήμα σε κάθε μεριά της κεραιάς συνήθως είναι ασύμμετρα και η απόσταση την οποία καλύπτει μια κεραιά επηρεάζεται από την περιοχή που είναι τοποθετημένη. Εμπόδια όπως κτήρια, βουνά και άλλα αντικείμενα εξασθενούν το σήμα με αποτέλεσμα σε κάποιες περιοχές οι κυψέλες να υπερκαλύπτονται και σε άλλες να υπάρχουν κενά.



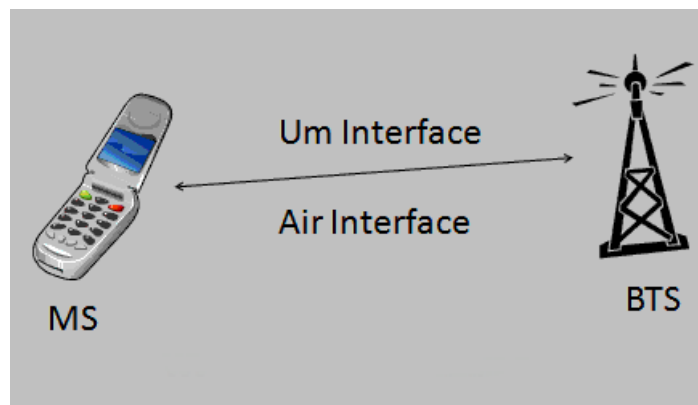
Εικόνα 1 Κυψέλες

Σε κάθε κελί υπάρχει ένας κεντρικός σταθμός πομποδέκτης που ονομάζεται **Base Station** (BS ή Σταθμός Βάσης) ή **Base Transceiver Station** (BTS). Ο BS μπορεί να βρίσκεται στο κέντρο του κελιού και να είναι μια πανκατευθυντική κεραιά ή στην γωνία που τέμνονται τρία κελιά και να έχει τρεις κεραιές στραμμένες προς κάθε κελί του οποίου την γωνία τέμνει με αποτέλεσμα να γίνεται επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων (Εικόνα 2). Η έκταση που καλύπτει μια κυψέλη εξαρτάται από τον τύπο της κεραιάς και την περιοχή, όσο πιο μικρή είναι η κυψέλη τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης (bandwidth) και ο αριθμός των συνδρομητών που υποστηρίζει. Σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές με πολλούς συνδρομητές υπάρχουν κελιά με διάμετρο μερικές εκατοντάδες μέτρα ενώ σε αραιοκατοικημένες περιοχές εκτός πόλεων η απόσταση που καλύπτει ένα κελί φτάνει και τα τριάντα χιλιόμετρα. Κάθε κυψέλη λόγω σχήματος περιβάλλεται από άλλες έξι γειτονικές κυψέλες. Για την αποφυγή παρεμβολών και θορύβου γειτονικές κυψέλες δεν μπορούν να χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα στα κανάλια που εκπέμπουν. Για να χρησιμοποιήσουν την ίδια συχνότητα δύο κυψέλες πρέπει να έχουν απόσταση περίπου ίση με το διπλάσιο της διαμέτρου τους.



Εικόνα 2 Σταθμοί Βάσης και Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

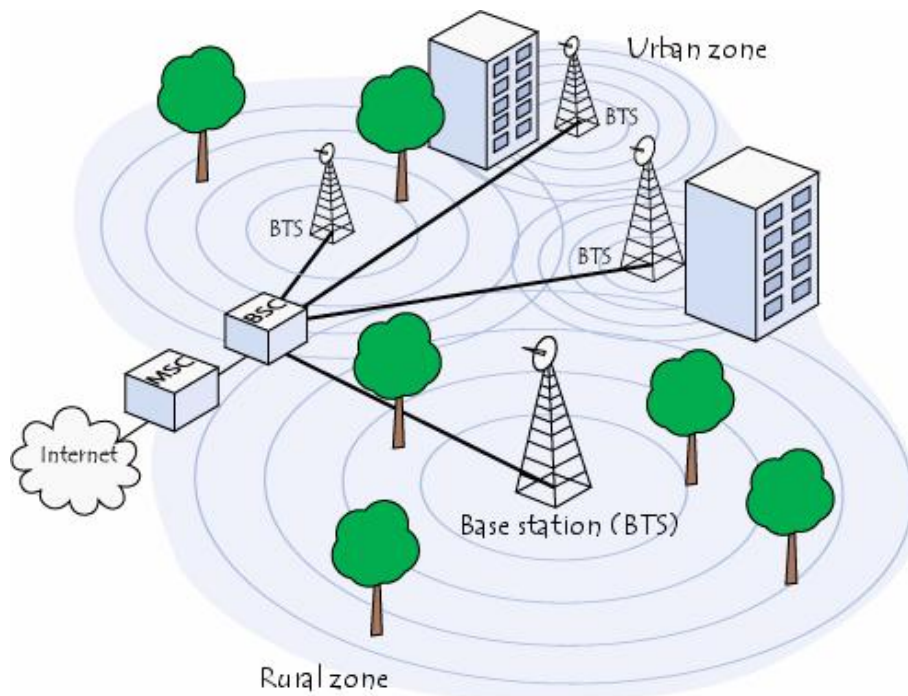
Η συσκευή με την οποία επικοινωνεί ο χρήστης ονομάζεται **Mobile Station (MS)**. Το MS αποτελείται από την κάρτα **SIM** (Subscriber Identity Module), η οποία είναι η ταυτότητα του χρήστη, και από το **UE** (User Equipment) η οποία είναι η συσκευή που χρησιμοποιεί ο χρήστης που συνήθως είναι ένα κινητό τηλέφωνο. Κάθε συσκευή διαθέτει έναν μοναδικό 15ψήφιο αριθμό που την χαρακτηρίζει μοναδικά και ονομάζεται **IMEI** (International Mobile Equipment Identity). Κάθε SIM κάρτα διαθέτει επίσης έναν μοναδικό αριθμό που ονομάζεται **IMSI** (International Mobile Subscriber Identity). Με αυτόν τον τρόπο η SIM κάρτα επιτρέπει την αυθεντικοποίηση του χρήστη στο δίκτυο ανεξάρτητα από την συσκευή που χρησιμοποιεί. Η επικοινωνία ανάμεσα σε BS και MS γίνεται μέσω ενός ασύρματου καναλιού που ονομάζεται **ραδιοδιεπαφή** (air interface ή Um interface πιο σπάνια) (Εικόνα 3).



Εικόνα 3 Ραδιοδιεπαφή - Air Interface

Όλοι οι σταθμοί βάσης συνδέονται σε ένα **Base Station Controller (BSC)** το οποίο αναλαμβάνει την κατανομή των πόρων του δικτύου. Το σύστημα που περιλαμβάνει τον BSC και τους BS που συνδέονται σε αυτό, ονομάζεται **Base Station Subsystem (BSS)**. Το BSC με την σειρά του συνδέεται στο **Mobile Switching Centre (MSC)** το οποίο συνδέεται με το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο και το ίντερνετ. Το MSC είναι τμήμα του **Network Station Subsystem (NSS)** το οποίο διαχειρίζεται την ταυτοποίηση των χρηστών, την τοποθεσία τους και την εγκαθίδρυση της επικοινωνίας με άλλους χρήστες.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των δικτύων κινητής τηλεφωνίας είναι η ελευθερία κίνησης που έχουν οι χρήστες μέσα στο δίκτυο και είναι κάτι που επιτυγχάνεται με την τεχνική που ονομάζεται **handover** ή **handoff**. Το handover ουσιαστικά είναι η αυτόματη αλλαγή καναλιού και συχνοτήτων που γίνεται όταν ο χρήστης μετακινείται από κυψέλη σε κυψέλη κατά την διάρκεια μιας ενεργούς επικοινωνίας. Ένα νέο κανάλι επιλέγεται αυτόματα για την κινητή συσκευή από τον σταθμό βάσης στον οποίον εισέρχεται ο χρήστης. Η κινητή συσκευή ενημερώνεται και αλλάζει αυτόματα στο νέο κανάλι, ώστε η επικοινωνία να συνεχιστεί αδιάκοπα. Επίσης η δυνατότητα των χρηστών να μετακινούνται ανάμεσα σε δίκτυα διαφορετικών παρόχων, ονομάζεται **Roaming** (περιαγωγή).



Εικόνα 4 Δίκτυο GSM

1.1.2 Συχνότητες

Οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας, δεν μπορούν να χρησιμοποιούν όποιες συχνότητες θέλουν στα δίκτυα τους. Η χρήση και η ανάθεση ραδιοσυχνοτήτων ρυθμίζεται από κυβερνήσεις και οργανισμούς τυποποιήσεων (1.2 Οργανισμοί Τυποποιήσεων). Για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους οι περισσότερες κυβερνήσεις ορίζουν ειδικούς οργανισμούς που ελέγχουν την κατανομή και την τυποποίηση του ραδιοφάσματος (radio spectrum). Ο σκοπός της συνετής διαχείρισης ραδιοφάσματος, είναι η μείωση παρεμβολών ανάμεσα στις διάφορες

τεχνολογίες που κάνουν χρήση ραδιοσυχνοτήτων και η σωστή αξιοποίηση των διαθέσιμων συχνοτήτων.

Οι συχνότητες που έχουν ανατεθεί στην κινητή τηλεφωνία είναι μέρος των συχνοτήτων τύπου **UHF** (Ultra High Frequency). Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας διαφέρουν ανά ήπειρο. Από τα πρώτα συστήματα ακόμα, το AMPS στην Αμερική λειτουργούσε στα 800 MHz. Στην Ευρώπη το NMT που εμφανίστηκε στις σκανδιναβικές χώρες λειτουργούσε στα 450 MHz, το TACS που λειτούργησε σε μερικές χώρες της Ευρώπης και στην Ιαπωνία χρησιμοποιούσε τα 900 MHz. Όταν εμφανίστηκε το GSM λειτουργούσε στα 900 MHz, αργότερα όταν οι απαιτήσεις μεγάλωσαν άρχισε να χρησιμοποιείται το φάσμα των 1800 MHz. Οι διαφοροποιήσεις αυτές δημιούργησαν την ανάγκη για συσκευές που υποστηρίζουν πολλές μπάντες συχνοτήτων ώστε να μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικά δίκτυα. Οι συσκευές αυτές συνήθως υποστηρίζουν τις συχνότητες 850, 900, 1800, 1900 MHz και ονομάζονται quad-band. Οι χαμηλές συχνότητες συνήθως χρησιμοποιούνται σε ανοιχτές περιοχές καθώς προσφέρουν μεγαλύτερη κάλυψη ενώ σε αστικές περιοχές προτιμούνται μεγαλύτερες συχνότητες που οδηγούν σε μικρότερες κυψέλες με μεγαλύτερη όμως χωρητικότητα ώστε να εξυπηρετούνται περισσότεροι συνδρομητές. Στις νέες γενιές δικτύων έγινε προσπάθεια να μειωθεί αυτή η ανομοιογένεια που υπάρχει στη χρήση διαφορετικών συχνοτήτων ανά γεωγραφική περιοχή και να δημιουργηθεί ένα περισσότερο «παγκοσμιοποιημένο» δίκτυο.

Από το εύρος συχνοτήτων που αναλογεί σε μια τεχνολογία, κάποιες χρησιμοποιούνται για εκπομπή από τον σταθμό βάσης (BS) και κάποιες άλλες από το κινητό (MS). Για παράδειγμα για το GSM 900 η εκπομπή από τον σταθμό βάσης έχει οριστεί στην περιοχή 890-915 MHz και η εκπομπή του κινητού στην περιοχή 935-960 MHz. Και ο σταθμός βάσης και το κινητό έχουν εύρος περιοχής εκπομπής 25 MHz. Με εύρος καναλιού 200 KHz προκύπτει με απλή διαίρεση ότι υποστηρίζονται 125 κανάλια ανά σταθμό βάσης. Επίσης για την αποφυγή παρεμβολών οι συχνότητες που εκπέμπει και λαμβάνει ο σταθμός βάσης έχουν απόσταση 45 MHz. Αν κάθε χρήστης απασχολούσε ένα ολόκληρο κανάλι τότε οι 125 χρήστες ανά σταθμό βάσης είναι ένας πολύ μικρός αριθμός. Στόχος των παρόχων είναι να μπορούν να υποστηρίζουν τον ταχύτατα αυξανόμενο αριθμό συνδρομητών και να εξυπηρετούν όλο και περισσότερους χρήστες ανά κυψέλη.

Κύριο χαρακτηριστικό της κυψελωτής τεχνολογίας είναι η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων (frequency reuse). Ο σκοπός του χωρισμού μια περιοχής σε κυψέλες εκτός από την καλύτερη γεωγραφική κάλυψη είναι η χρήση ίδιων συχνοτήτων σε διαφορετικές κυψέλες με την προϋπόθεση να μην είναι γειτονικές ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές. Με αυτόν τον τρόπο οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας μπορούν να βγάλουν το μέγιστο από το εύρος συχνοτήτων που τους αντιστοιχεί. Εκτός από την επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων υλοποιούνται εξειδικευμένες τεχνικές πολύπλεξης και μέθοδοι πρόσβασης στο κανάλι (access methods) ώστε σε κάθε κανάλι να συνομιλούν ταυτόχρονα πολλοί χρήστες.

1.1.3 Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης

Στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης (multiple access methods) χρησιμοποιούνται για να επιτρέψουν σε πολλούς χρήστες να μοιραστούν ταυτόχρονα ένα περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων. Το μοίρασμα του φάσματος είναι απαραίτητο προκειμένου να αυξήσουμε την χωρητικότητα ενός συστήματος, ενώ θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην υπάρχει σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης. Με την πρόοδο της κυψελωτής τηλεφωνίας έχουν εμφανιστεί αρκετές διαφορετικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης και αποτελούν τον πυρήνα της ασύρματης τεχνολογίας των κινητών

δικτύων. Επειδή μέσω αυτών των τεχνικών επικοινωνούν οι κινητές συσκευές με τον σταθμό βάσης συνηθίζεται να αναφερόμαστε σε αυτές και ως **ραδιοδιεπαφή (Air interface ή Radio interface)**. Οι απαιτήσεις στις οποίες πρέπει να ανταποκρίνονται οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης είναι :

- Υποστήριξη πολλών χρηστών με ταυτόχρονη αποφυγή αμοιβαίων παρεμβολών
- Μεγιστοποίηση αποτελεσματικής χρήσης ραδιοφάσματος
- Διευκόλυνση του handover μεταξύ των κυψελών

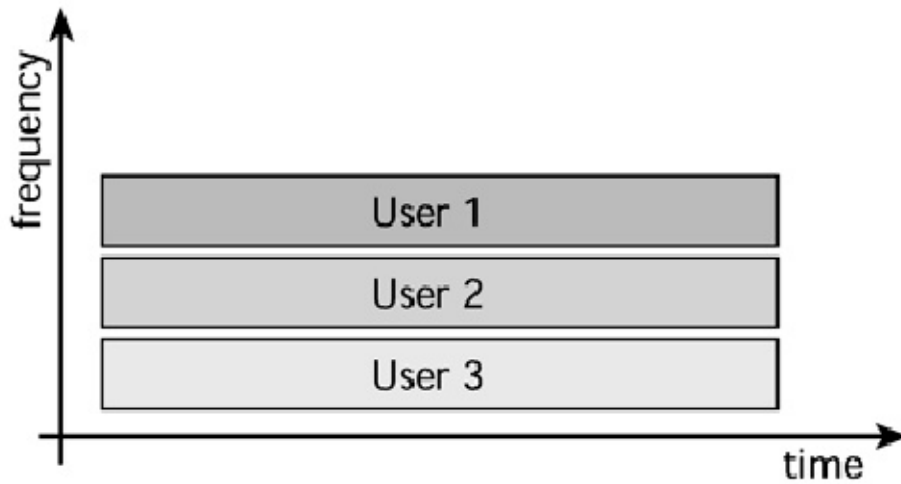
Υπάρχουν τέσσερις βασικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης ξεκινώντας από τα πρώτα αναλογικά δίκτυα 1^{ης} γενιάς έως και τα τελευταία εξελιγμένα δίκτυα 4^{ης} γενιάς. Οι τεχνικές αυτές είναι :

- FDMA
- TDMA
- CDMA
- OFDMA

FDMA

Η **FDMA (Frequency Division Multiple Access)**, χρησιμοποιείται σε κυψελωτά αναλογικά δίκτυα. Κάθε χρήστης εκπέμπει σε διαφορετική συχνότητα. Με την FDMA όλοι εκπέμπουν ταυτόχρονα, αλλά κάθε εκπομπή καταλαμβάνει διαφορετικό κανάλι συχνοτήτων. Για τις σημερινές απαιτήσεις, η χωρητικότητα των FDMA συστημάτων είναι μικρή, έτσι μόνο με αυτή την τεχνική δεν θα μπορούσε να εξυπηρετηθεί ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός ασύρματων χρηστών. Πλεονεκτήματα της FDMA, είναι το συγκριτικά χαμηλό κόστος υλοποίησης, καθώς και το ότι δεν χρειάζεται μηχανισμούς χρονισμού για τον συγχρονισμό σταθμών βάσης όπως η TDMA που περιγράφεται παρακάτω. Στην Εικόνα 5, φαίνεται πως στην FDMA όλοι οι χρήστες χρησιμοποιούν το σύστημα ταυτόχρονα, αλλά κάθε χρήστης χρησιμοποιεί διαφορετική συχνότητα.

FDMA

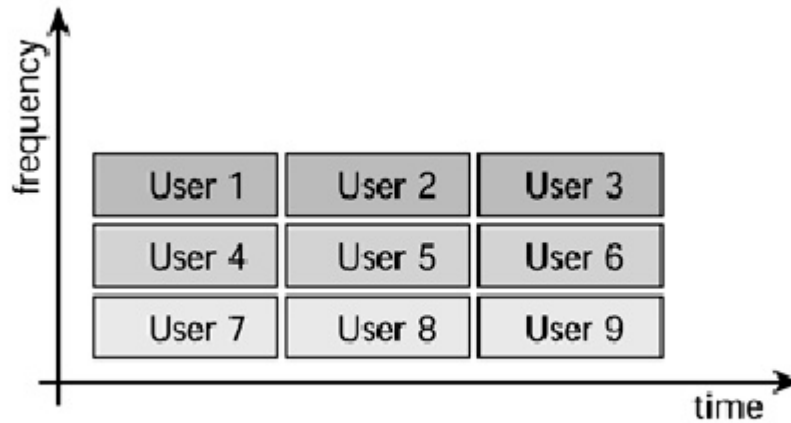


Εικόνα 5 FDMA

TDMA

Η **TDMA (Time Division Multiple Access)**, χρησιμοποιείται σε ψηφιακά κυψελωτά συστήματα. Στην ουσία είναι ένας συνδυασμός πολύπλεξης συχνότητας, όπως στην FDMA και πολύπλεξης χρόνου. Πρώτα διαιρείται το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων σε έναν αριθμό καναλιών. Έπειτα κάθε κανάλι χωρίζεται σε χρονοθυρίδες (timeslots) και εφαρμόζεται πολύπλεξη χρόνου (Time Division Multiplexing). Έτσι σε κάθε χρήστη αντιστοιχεί μια ξεχωριστή χρονοθυρίδα, κατά την οποία μπορεί να εκπέμψει ή να λάβει πληροφορία. Στο GSM, για παράδειγμα κάθε κανάλι μπορεί να εξυπηρετήσει οκτώ χρήστες, όπου ο καθένας εκπέμπει ή λαμβάνει σε διαφορετική χρονοθυρίδα. Πλεονεκτήματα σε σχέση με την FDMA είναι ότι παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα και απόδοση φάσματος.

TDMA



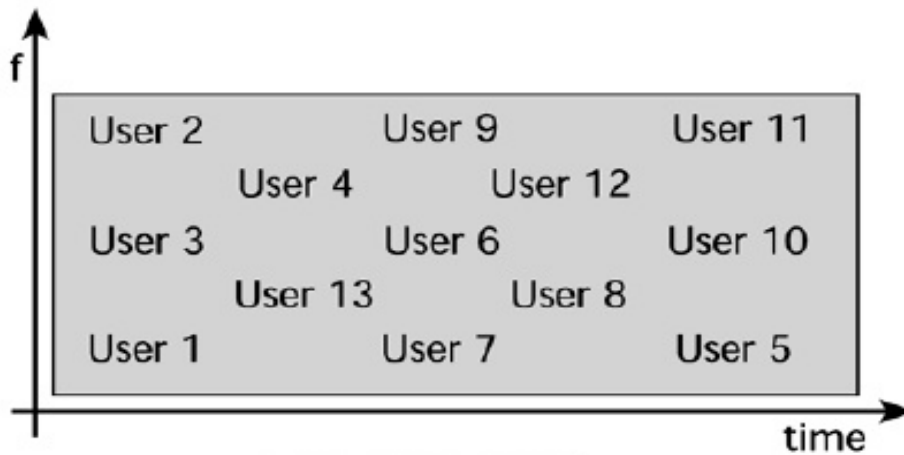
Εικόνα 6 TDMA

CDMA

Στην **CDMA (Code Division Multiple Access)**, οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα την ίδια χρονική στιγμή. Αυτό γίνεται δυνατό, γιατί κάθε συνομιλία κωδικοποιείται με μοναδικό τρόπο. Έτσι κάθε δέκτης μπορεί να ξεχωρίσει την εκπομπή που απευθύνεται σ' αυτόν. Είναι η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, που επιτυγχάνει τη μέγιστη πυκνότητα κάλυψης. Για την κατανόηση αυτής της τεχνικής, δίνεται το παράδειγμα του δωματίου που είναι γεμάτο με ανθρώπους, οι οποίοι μιλάνε ταυτόχρονα και ο καθένας τους μιλάει διαφορετική γλώσσα. Αρχικά το μόνο που ακούγεται είναι θόρυβος, όμως αν κάποιος ακούσει προσεκτικά μπορεί να ξεχωρίσει την συνομιλία που γίνεται στη γλώσσα που καταλαβαίνει, δηλαδή μπορεί να "φιλτράρει" τις συζητήσεις και να απομονώσει την γλώσσα που του είναι κατανοητή. Τα πρώτα συστήματα CDMA, έχουν εύρος ζώνης 1,25 MHz. Η επόμενη γενιά είναι γνωστή και ως WCDMA (Wideband CDMA), λειτουργεί με εύρος ζώνης 5, 10 ή 15 MHz. Η WCDMA μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερη πυκνότητα χρηστών, υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και είναι πιο ασφαλής από την CDMA.

Η CDMA είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στις παρεμβολές και παρέχει σαφώς μεγαλύτερη χωρητικότητα από τις FDMA και TDMA. Μειονέκτημα της CDMA είναι η υλοποίηση πολύπλοκων μηχανισμών ελέγχου ισχύος.

CDMA

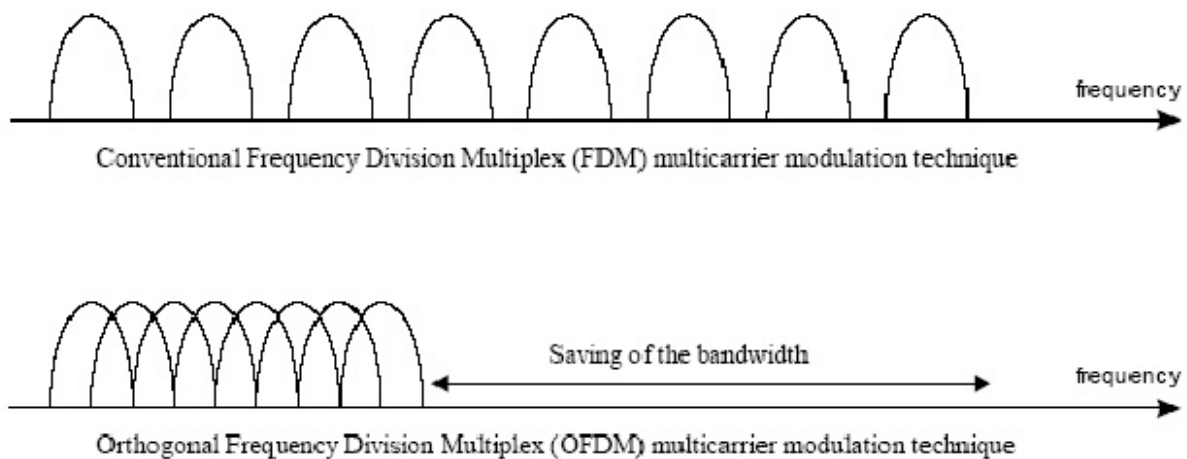


Εικόνα 7 CDMA

OFDMA

Η **OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)**, βασίζεται στην τεχνική πολυπλεξίας **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)** και είναι η επικρατούσα τεχνική για τις τεχνολογίες 4^{ης} γενιάς. Η OFDM είναι μια τεχνική, που χρησιμοποιείται για αποστολή μεγάλου όγκου πληροφορίας μέσω ραδιοκυμάτων. Στην OFDM το κεντρικό φέρων σήμα, διαιρείται σε μικρότερα υπο-φέροντα σήματα (subcarriers), τα οποία μεταδίδονται ταυτόχρονα σε διαφορετικές συχνότητες, οι οποίες είναι ορθογωνικές μεταξύ τους.

Η OFDMA, είναι η εκδοχή της OFDM για πολλαπλούς χρήστες, η οποία επιτρέπει πολλαπλή πρόσβαση στο ίδιο κανάλι. Η OFDMA κατανέμει τα υπο-φέροντα σήματα στους χρήστες οι οποίοι μπορούν να επικοινωνούν στο ίδιο κανάλι, χρησιμοποιώντας ουσιαστικά τις υποδιαιρέσεις του. Η OFDMA είναι μια τεχνική πολύπλεξης, που υποδιαιρεί το εύρος ζώνης του καναλιού σε πολλαπλά υπό-φέροντα σήματα με διαφορετική συχνότητα το κάθε ένα. Με την τεχνική αυτή, επιτυγχάνεται αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος, σε σχέση με την απλή πολύπλεξη συχνότητας (FDM), όπως φαίνεται στην Εικόνα 8 παρακάτω.



Εικόνα 8 Σύγκριση FDM και OFDM

Η χρήση ορθογωνικών υπο-φερόντων, δίνει τη δυνατότητα αποδιαμόρφωσης των υπο-φερόντων στον δέκτη, ακόμα και όταν υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των φασμάτων τους. Η τεχνική OFDMA έχει τα εξής πλεονεκτήματα :

- Αύξηση της απόδοσης φάσματος σε σύγκριση με τεχνικές διαμόρφωσης ενός φέροντος
- Δυνατότητα για Non-Line Of Sight κάλυψη
- Αντοχή σε θόρυβο και λοιπές παρεμβολές

Μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι η μεγάλη ευαισθησία στα σφάλματα, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε δημιουργία παρεμβολών μεταξύ γειτονικών υπο-φερόντων, και η μεγάλη πολυπλοκότητα και το κόστος εφαρμογής.

1.1.4 Τρόποι αμφίδρομης μετάδοσης

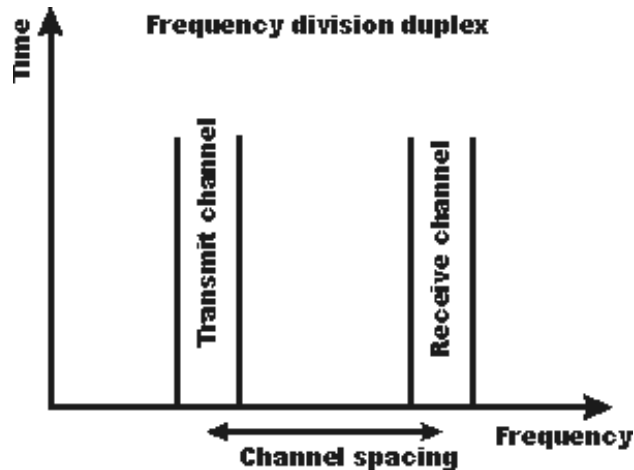
Στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, είναι σημαντικό οι χρήστες να μπορούν να ομιλούν και να ακούν ταυτόχρονα, που σημαίνει ότι η επικοινωνία πρέπει είναι αμφίδρομη (**full duplex**). Κατά την αμφίδρομη επικοινωνία, η μετάδοση γίνεται ταυτόχρονα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Για αυτήν την λειτουργία είναι απαραίτητο να υπάρχουν μηχανισμοί που να διαχωρίζουν τη μετάδοση ώστε οι συσκευές και οι σταθμοί βάσης να εκπέμπουν και να λαμβάνουν παράλληλα. Για να γίνει αυτό υπάρχουν δύο τρόποι :

- Διαίρεση συχνότητας με την τεχνική **FDD** (Frequency Division Duplex)
- Διαίρεση χρόνου με την τεχνική **TDD** (Time Division Duplex)

Και οι δύο παραπάνω τεχνικές χρησιμοποιούνται ευρέως. Κάποια συστήματα χρησιμοποιούν TDD, ενώ άλλα FDD. Μερικά στάνταρτς επιτρέπουν τη χρήση και των δύο τεχνικών ανάλογα με την περίπτωση, καθώς η κάθε μια έχει τα πλεονεκτήματά της και τα μειονεκτήματά της.

FDD

Η FDD επιτυγχάνει παράλληλη αποστολή και λήψη σήματος, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές συχνότητες. Η μία συχνότητα είναι για αποστολή και η άλλη για λήψη, ώστε να γίνεται ταυτόχρονη μετάδοση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9 παρακάτω.

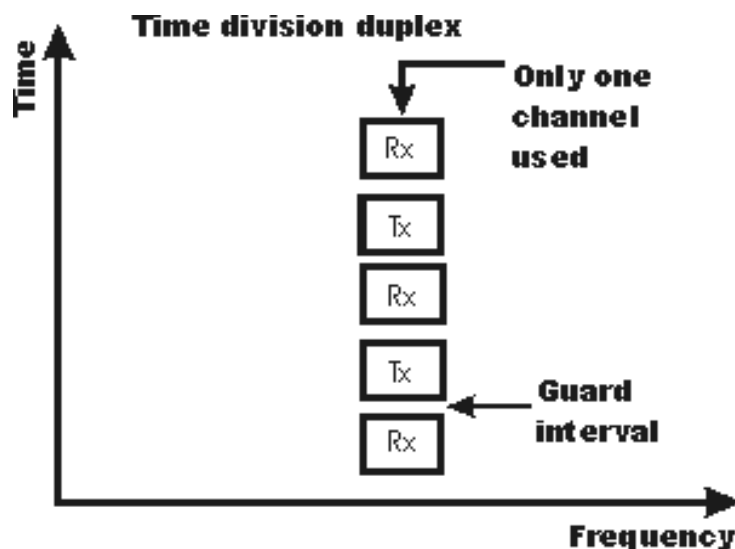


Εικόνα 9 FDD

Για να μην επικαλύπτονται τα δύο κανάλια και να μην υπάρχουν παρεμβολές ανάμεσα στις συχνότητες εκπομπής και λήψης, πρέπει να υπάρχει μια απόσταση ασφαλείας ανάμεσά τους. Τα μειονεκτήματα της FDD είναι ότι λόγω της χρήσης δύο καναλιών, πολλές φορές δεν γίνεται βέλτιστη χρήση του διαθέσιμου φάσματος και επίσης οι κινητές συσκευές πρέπει να διαθέτουν δύο ξεχωριστές κεραίες, με αποτέλεσμα να είναι λίγο μεγαλύτερες σε όγκο.

TDD

Η TDD χρησιμοποιεί μόνο μια συχνότητα και μοιράζεται το κανάλι μεταξύ εκπομπής και λήψης κάνοντας πολύπλεξη χρόνου. Δηλαδή, το κανάλι χωρίζεται σε χρονοθυρίδες, όπου διαφορετικές χρονοθυρίδες αντιστοιχούν για εκπομπή και διαφορετικές για λήψη, ώστε οι δύο λειτουργίες να εναλλάσσονται. Αυτή η λειτουργία φαίνεται στην Εικόνα 10 παρακάτω.



Εικόνα 10 TDD

Όπως στην FDD, πρέπει να υπάρχει απόσταση ασφαλείας ανάμεσα στις συχνότητες εκπομπής και λήψης, στην TDD πρέπει να υπάρχει αντίστοιχα ένα χρονικό διάστημα ανάμεσα στις εναλλαγές. Το χρονικό αυτό όριο πρέπει να είναι αρκετό, ώστε να προλάβει να φτάσει το σήμα από τον απομακρυσμένο πομπό, όσο η συσκευή είναι σε κατάσταση λήψης και το αντίστροφο. Ακόμα και αν αυτό το διάστημα είναι μικρό, όταν γίνονται πολλές εναλλαγές το δευτερόλεπτο, υπάρχει περίπτωση να μειωθεί η αποδοτικότητα του συστήματος. Για συστήματα, όπου η επικοινωνία γίνεται σε σχετικά μικρές αποστάσεις ο χρόνος μεταξύ των εναλλαγών είναι μικρός, χωρίς να επηρεάζεται η κανονική λειτουργία. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις όμως μπορεί να υπάρξουν καθυστερήσεις που θα επηρεάσουν την απόδοση. Συνήθως όμως στην κινητή τηλεφωνία οι καθυστερήσεις που εισέρχονται από την χρήση της TDD, δεν επηρεάζουν αρνητικά τη μετάδοση φωνής, καθώς δεν γίνονται αντιληπτές.

Έχει παρατηρηθεί, ότι στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πολλές φορές η κίνηση δεν είναι ισορροπημένη προς τις δύο κατευθύνσεις, ώστε περισσότερη κινητικότητα να υπάρχει στο κανάλι, στο οποίο η κινητή συσκευή λαμβάνει δεδομένα. Με την TDD, υπάρχει η δυνατότητα να αλλάξει η χωρητικότητα προς μια κατεύθυνση και να αφιερώνονται περισσότερες χρονοθυρίδες στην εκπομπή ή τη λήψη. Συχνά, αυτό ρυθμίζεται δυναμικά ανάλογα με τις απαιτήσεις της σύνδεσης.

Κατευθύνσεις μετάδοσης

Είναι απαραίτητο να γίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ του καναλιού, όπου η κίνηση πηγαίνει από την κινητή συσκευή, στον σταθμό βάσης και του καναλιού, όπου γίνεται το αντίστροφο. Το κανάλι από τον σταθμό βάσης προς την κινητή συσκευή, ονομάζεται **Downlink (DL)** και το κανάλι από την κινητή συσκευή προς τον σταθμό βάσης, ονομάζεται **Uplink (UL)**.

1.2 Οργανισμοί Τυποποιήσεων

Στην 1η Γενιά κινητής τηλεφωνίας δεν υπήρχαν στάνταρντ που να ορίζουν τις διάφορες τεχνολογίες και τα πρώτα δίκτυα που υλοποιήθηκαν ήταν τυποποιημένα μόνο σε εθνικό

επίπεδο. Κατασκευαστές και πάροχοι υλοποιούσαν την λειτουργικότητα των δικτύων με δικό τους ιδιόκτητο τρόπο. Στην 2η γενιά δεν ακολουθήθηκε ο ίδιος δρόμος και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας άρχισαν να υπακούν σε συγκεκριμένες τυποποιήσεις. Αυτό άνοιξε τις αγορές και νέες λειτουργίες όπως η περιαγωγή (roaming) ήταν δυνατές. Οι πάροχοι πλέον μπορούσαν να έχουν δίκτυα με εξοπλισμό από διαφορετικούς κατασκευαστές και οι τελικοί χρήστες μπορούσαν να χρησιμοποιούν συσκευές από οποιοδήποτε κατασκευαστή ακολουθούσε τις τυποποιήσεις.

Η τυποποίηση μπορεί να γίνει με διαφορετικούς τρόπους. Κάποιος για παράδειγμα μπορεί να αναπτύξει μια τεχνολογία, χωρίς να την τυποποιήσει και εν συνεχεία αν η τεχνολογία είναι επιτυχής και αποσπάσει μεγάλο μερίδιο της αγοράς, θα γίνει "de-facto" στο οποίο οι υπόλοιποι κατασκευαστές θα πρέπει να προσαρμοστούν, για να είναι συμβατοί με μια δημοφιλή τεχνολογία. Στην κινητή τηλεφωνία, ακολουθείτε μια πιο ασφαλής τακτική. Οι τεχνολογίες, που κατασκευάζονται, τυποποιούνται ταυτόχρονα. Ειδικό από διάφορες εταιρίες και ακαδημαϊκοί, συναντιούνται για να συζητήσουν τις τελευταίες εξελίξεις και την γραμμή που θα ακολουθηθεί.

Μια τυποποίηση δεν είναι ένα εγχειρίδιο κατασκευής για μια τεχνολογία. Η τυποποίηση ορίζει τις γραμμές που πρέπει να ακολουθηθούν, ώστε να είναι δυνατή η διαδίκτυωση ανάμεσα στα δίκτυα και τα μέρη που τα απαρτίζουν και όχι το υλικό και το λογισμικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα. Τα πιο ουσιώδη που ορίζει μια τυποποίηση είναι τα εξής:

- Αρχιτεκτονική του δικτύου, λειτουργία των βασικών στοιχείων του και τις διεπαφές με τις οποίες επικοινωνούν.
- Πρωτόκολλα επικοινωνίας
- Δομές δεδομένων του δικτύου και διαχείριση τους.

1.2.1 Οργανισμοί

Παρακάτω παρουσιάζονται οι οργανισμοί τυποποιήσεων που αναλαμβάνουν την τυποποίηση των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

ITU

Ο **ITU** ιδρύθηκε το 1865, ως International Telegraph Union με στόχο να τυποποιεί εξοπλισμό για τηλέγραφους. Το 1932, ο τίτλος άλλαξε σε **International Telecommunications Union** και η σκοπιά του περιλάμβανε όλο το φάσμα των τηλεπικοινωνιών. Από το 1947 λειτουργεί υπό την αιγίδα των Ηνωμένων Εθνών. Αποτελείται από 191 κράτη μέλη και 700 ακόμα μέλη που αποτελούνται από κατασκευαστές, παρόχους και διεθνής οργανισμούς. Τα 3 βασικά τμήματα του ITU είναι:

- **ITU-R** που ασχολείται με τις ραδιοεπικοινωνίες. Διαχειρίζεται το διεθνές φάσμα ράδιο συχνοτήτων και λεπτομέρειες σχετικά με τις δορυφορικές τροχιές. Κάθε τέσσερα χρόνια ο ITU-R οργανώνει το συνέδριο WRC (World Radio Conference) όπου συζητούνται θέματα, όπως ανάθεση ραδιοφάσματος σε συγκεκριμένες υπηρεσίες, π.χ. δορυφορικές επικοινωνίες, κινητή τηλεφωνία, μεταδόσεις ραδιοηλεκτρονικού σήματος, έρευνα, μετεωρολογία, GPS κλπ.

- **ITU-T** που ασχολείται με τις τυποποιήσεις που αφορούν όλα τα πεδία μετάδοσης πληροφορίας και τηλεπικοινωνιών. Παράδειγμα αποτελούν οι τυποποιήσεις IMT-2000 και IMT-Advanced, που περιγράφουν τις τεχνολογίες του 3G και 4G αντίστοιχα. Οι τυποποιήσεις του ITU-T δημοσιεύονται ως "Συστάσεις" (Recommendations) και είναι διαθέσιμες δωρεάν στο διαδίκτυο¹.
- **ITU-D** που παρέχει τεχνογνωσία και υποστήριξη σε αναπτυσσόμενες χώρες, ώστε να αναπτύξουν και να εξελίσσουν τα δίκτυά τους.

3GPP

Ο **3GPP² (3rd Generation Partnership Project)**, ιδρύθηκε τον Δεκέμβριο του 1998. Είναι μια συνεργασία μεταξύ οργανισμών τυποποιήσεων στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές ηπειρωτικές περιοχές. Οι οργανισμοί αυτοί είναι:

- ARIB (Ιαπωνία)
- ATIS (ΗΠΑ)
- CCSA (Κίνα)
- ETSI (Ευρώπη)
- TTA (Κορέα)
- TTC (Ιαπωνία)

Αρχικός σκοπός του 3GPP, ήταν η δημιουργία τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς ως εξέλιξη του GSM, οι οποίες θα είχαν παγκόσμια εφαρμογή και θα ακολουθούσαν αυτά που ορίζει η τυποποίηση IMT-2000, του ITU. Αργότερα το πεδίο δράσης του 3GPP, επεκτάθηκε και τώρα περιλαμβάνει την ανάπτυξη και την συντήρηση του GSM και των τεχνολογιών που το διαδέχτηκαν (GPRS, EDGE), του UMTS που αντιπροσωπεύει την 3^η γενιά, καθώς και του LTE που αποτελεί την εισαγωγή στο 4G. Ο 3GPP χωρίζεται σε ομάδες που ονομάζονται **TSGs** (Technical Specification Groups) και κάθε TSG υποδιαιρείται σε **WGs** (Working Groups). Τα TSG είναι τέσσερα:

- **GERAN** (GSM/EDGE Radio Access Network), που ορίζει τα GSM, GPRS, EDGE και αποτελείται από τρία WG.
- **RAN** που ασχολείται με το Radio Access Network του UMTS και αποτελείται από πέντε WG.
- **SA** (Service and System Aspects), που ορίζει την συνολική αρχιτεκτονική και της δυνατότητες του 3GPP συστήματος και αποτελείται από πέντε WG.
- **CT** (Core Network and Terminals), που ορίζει το κυρίως δίκτυο.

3GPP2

Μαζί με τον 3GPP ιδρύθηκε και ο **3GPP2**. Ενώ ο σκοπός του 3GPP είναι να ορίσει τεχνολογίες 3^{ης} γενιάς βασισμένες στο GSM, όπως το UMTS, ο 3GPP2 ορίζει το πρότυπο **CDMA2000**, ως εξέλιξη του **cdmaOne**, που είναι η τεχνολογία που ανταγωνίζεται το GSM.

¹ <http://www.itu.int/ITU-T/>

² <http://www.3gpp.org/>

IETF

Ο **IETF (Internet Engineering Task Force)**, είναι υπεύθυνος για την δημιουργία στάνταρντ για το ίντερνετ και πιο συγκεκριμένα για IP δίκτυα. Τα περισσότερα στάνταρντς του IETF αφορούν πρωτόκολλα, με καλύτερο παράδειγμα να είναι το πρωτόκολλο IP. Η έρευνα και το τεχνικό κομμάτι του IETF πραγματοποιείται από ομάδες, που ονομάζονται Working Groups, και οι οποίες οργανώνονται βάση τομέα (π.χ. δρομολόγηση (routing), security κλπ.). Συναντήσεις γίνονται τρεις φορές τον χρόνο και μεγάλο μέρος της επικοινωνίας γίνεται μέσω mailing lists. Οι εν εξέλιξη έρευνες καταγράφονται στα λεγόμενα **Internet Drafts (IDs)**. Τα τελικά στάνταρντ που προκύπτουν είναι γραμμένα σε έγγραφα που ονομάζονται **Request For Comments (RFCs)** και είναι διαθέσιμα στο ευρύ κοινό στην σελίδα της IETF³. Με τις νέες τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας 4^{ης} γενιάς, τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών και το ίντερνετ συγκλίνουν και σχηματίζουν ένα "All-IP" δίκτυο. Από το UMTS και μετά στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούνται εκτεταμένα πρωτόκολλα του IETF, ώστε να υπάρχει διαλειτουργικότητα με άλλα δίκτυα και το ίντερνετ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο IETF να ξεκινά να παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της νέας γενιάς δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Οι 3GPP και IETF πλέον συνεργάζονται και μέλη του 3GPP συμμετέχουν ενεργά σε Working Groups του IETF, για την δημιουργία στάνταρντς που είναι σημαντικά και για τον 3GPP.

IEEE

Η **IEEE⁴** (Institute of Electrical and Electronics Engineers ή I-Triple-E), είναι μια μη κερδοσκοπική επαγγελματική ένωση που ασχολείται με την «προαγωγή» της τεχνολογίας. Μετρά πάνω από 350.000 μέλη, που αποτελούνται από μηχανικούς και επιστήμονες από όλο τον κόσμο με το μεγαλύτερο κομμάτι τους να είναι από τις ΗΠΑ. Η IEEE εκδίδει συγγράμματα επιστημονικού και τεχνολογικού ενδιαφέροντος, οργανώνει συνέδρια και σχεδιάζει στάνταρντς. Το πιο γνωστό πρότυπο, είναι το **IEEE 802**, το οποίο αφορά τεχνολογίες για δίκτυα **LAN** (Local Area Network) και **MAN** (Metropolitan Area Network), κυρίως στα δύο τελευταία επίπεδα του μοντέλου OSI, δηλαδή τα Physical και MAC. Το IEEE 802 περιλαμβάνει πολλά working groups, ανάμεσα τα οποία είναι το γνωστό **802.11** για τα WLAN και το **802.16** για Broadband Wireless Access ή αλλιώς **WiMAX**. Η IEEE και η ομάδα του WiMAX συνεργάζονται επίσης με την IETF. Τα πρότυπα της IEEE είναι διαθέσιμα στο ευρύ κοινό και πιο συγκεκριμένα τα πρότυπα της ομάδας IEEE 802, είναι διαθέσιμα δωρεάν έξι μήνες μετά την οριστικοποίηση της τελικής έκδοσης.

1.3 Εξέλιξη κινητών δικτύων επικοινωνιών

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας χαρακτηρίζονται από γενιές. Οι γενιές συμβολίζονται από τον αριθμό της γενιάς και το κεφαλαίο λατινικό γράμμα G (Generation) στο τέλος. Οι γενιές που υπάρχουν σήμερα είναι τέσσερις, με την 3^η γενιά (3G) να είναι η πιο διαδεδομένη και την 4^η γενιά (4G), να έχει κάνει την εμφάνισή της σε ανεπτυγμένες τεχνολογικά χώρες, που οδηγούν τις εξελίξεις στον χώρο της κινητής τηλεφωνίας. Δεν υπάρχει αυστηρός κανόνας για την μετάβαση από μια γενιά στην επόμενη. Κάθε γενιά είναι μια σειρά από νέες τεχνολογίες που φέρνουν σημαντικές εξελίξεις και βελτιώσεις σε σχέση με τις προηγούμενες. Όταν οι νέες τεχνολογίες αφομοιώνονται από την αγορά και αρχίζουν να χρησιμοποιούνται ευρέως,

³ <http://www.ietf.org/>

⁴ <http://www.ieee.org>

θεωρείται ότι έχει γίνει η μετάβαση στην επόμενη γενιά, χωρίς βέβαια να σταματούν να υπάρχουν δίκτυα παλαιότερων γενεών. Ανάμεσα στις γενιές υπάρχουν τεχνολογίες που βελτιώνουν τις ήδη υπάρχουσες, αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό, ώστε να χαρακτηριστούν επόμενη γενιάς. Αυτές οι τεχνολογίες, συνήθως συμβολίζονται ως υποδιαιρέσεις των τρεχουσών γενιών, όπως για παράδειγμα το GPRS (2.5G) και το HSPA (3.5G). Κάθε γενιά κινητών δικτύων επικοινωνιών βασίστηκε σε μια κυρίαρχη τεχνολογία, η οποία βελτίωνε κατά πολύ την χωρητικότητα και την απόδοση του ραδιοφάσματος. Μέχρι την εμφάνιση των τυποποιήσεων IMT-2000 και IMT-Advanced, που προδιαγράφουν λεπτομερώς τις τεχνολογίες για 3G και 4G δίκτυα αντίστοιχα, η αγορά ήταν κατακερματισμένη, καθώς τα περισσότερα δίκτυα, ήταν ανοικτά μόνο προς τις εταιρίες που τα υλοποιούσαν και λειτουργούσαν μόνο σε τοπικό ή εθνικό επίπεδο των χωρών τους.

1.3.1 1ης γενιάς

Η 1^η γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας (1G), εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1980 και χαρακτηρίζονταν κυρίως από αναλογικά στάνταρτς τηλεπικοινωνιών, που υποστήριζαν μόνο μετάδοση φωνής. Η κατασκευή του πρώτου δικτύου ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1970, με την Ιαπωνία να πρωτοπορεί με το πρώτο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας στο Τόκιο. Μετά ακολούθησε το σκανδιναβικό πρότυπο **NMT** (Nordic Mobile Telephone) στην Ευρώπη, ενώ στην Αμερική αναπτύχθηκε το σύστημα **AMPS** (Advanced Mobile Phone System). Κάθε ένα από αυτά τα δίκτυα λειτουργούσε πάνω σε κλειστά ιδιόκτητα στάνταρτ και η δυνατότητα μετακίνησης σε άλλο δίκτυο (roaming) ήταν αδύνατη. Η υποστήριξη πολλών χρηστών ήταν μικρή λόγω περιορισμένου αριθμού καναλιών, καθώς και οι συσκευές είχαν απαγορευτικές τιμές για τον απλό καταναλωτή. Γίνεται εμφανές, ότι η πρώτη γενιά χαρακτηρίστηκε από κλειστά μη ομογενοποιημένα συστήματα, τα οποία ήταν διαθέσιμα σχεδόν αποκλειστικά μόνο στις χώρες των εταιριών που τα ανέπτυξαν. Αυτό οδήγησε σε μια κλειστή αγορά με κινητές συσκευές, που τις περισσότερες φορές δεν μπορούσαν να λειτουργήσουν σε άλλες χώρες με δίκτυα άλλων εταιριών. Ακολουθεί μια λίστα των τεχνολογιών που αποτέλεσαν την 1^η γενιά και που αναπτύχθηκαν :

- **NMT** (Nordic Mobile Telephone) – Αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε κυρίως στις σκανδιναβικές χώρες, καθώς και σε Ελβετία, Ολλανδία και Ανατολική Ευρώπη.
- **AMPS** (Advanced Mobile Phone System) – Ηνωμένες Πολιτείες και Αυστραλία.
- **TACS** (Total Access Communications System) – Ηνωμένο Βασίλειο
- **C-450** - Δυτική Γερμανία, Πορτογαλία και Νότια Αφρική
- **Radiocom 2000** – Γαλλία
- **RTMI** – Ιταλία
- **JTACS** (Japan Total Access Communications System) - Ιαπωνία

1.3.2 2ης γενιάς

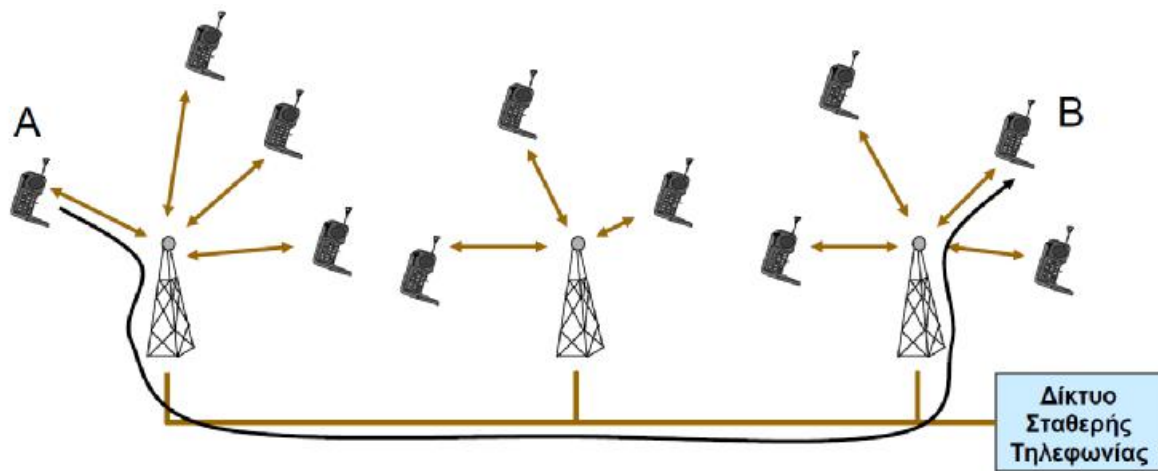
Η 2^η γενιά (2G) δικτύων κινητής τηλεφωνίας, εισήγαγε τη χρήση ψηφιακού σήματος για μετάδοση φωνής. Αυτό επέτρεψε στους παρόχους, να υποστηρίξουν μεγαλύτερο αριθμό συνδρομητών στην ίδια συχνότητα και να εξαλείψουν προβλήματα θορύβου. Μαζί με το ψηφιακό σήμα προστέθηκαν πολλές νέες υπηρεσίες, όπως αναγνώριση καλούντος, μηνύματα κειμένου(SMS) και η περιαγωγή(Roaming). Παρόλο που το 2G έχει ξεπεραστεί

από νεότερες τεχνολογίες, δίκτυα 2G χρησιμοποιούνται ακόμα σε πολλά μέρη του κόσμου. Το πιο γνωστό και διαδεδομένο πρότυπο της 2^{ης} γενιάς που θα αναλυθεί παρακάτω είναι το **GSM**. Άλλες λιγότερο διαδεδομένες τεχνολογίες 2^{ης} γενιάς είναι οι :

- **TDMA IS-136** – Είναι η ψηφιακή έκδοση του συστήματος 1^{ης} γενιάς AMPS που βασίζεται στην TDMA. Ονομαζόταν D-AMPS, όταν πρωτοεμφανίστηκε το 1991, με στόχο να αποτελέσει φθηνή λύση για εταιρίες που ήθελαν να αναβαθμίσουν τα υπάρχοντα AMPS δίκτυά τους.
- **CDMA IS-95** – Αλλιώς γνωστό και ως **cdmaOne**, αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί την τεχνική CDMA και αποτέλεσε τον βασικό συναγωνιστή του GSM.
- **PDC (Personal Digital Cellular)** – Είναι το δεύτερο μεγαλύτερο ψηφιακό δίκτυο 2^{ης} γενιάς, αν και χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά στην Ιαπωνία, όπου εμφανίστηκε το 1994. Όπως το GSM χρησιμοποιεί την τεχνική TDMA.
- **PHS (Personal Handyphone System)** – Είναι ένα ακόμα ψηφιακό σύστημα, που χρησιμοποιείται στην Ιαπωνία από το 1995 διαφημιζόμενο ως μια φθηνότερη εναλλακτική λύση, σε σχέση με τα άλλα δίκτυα. Αποτελεί μια διασταύρωση κινητής και ασύρματης τεχνολογίας, που χρησιμοποιείται σε οικιακές τηλεφωνικές ασύρματες συσκευές.

1.3.2.1 GSM

Τα πρώτα συστήματα κυψελωτής τηλεφωνίας, ήταν αναλογικά. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το πρότυπο **GSM** (Groupe Speciale Mobile), που προδιαγράφει ένα ψηφιακό δίκτυο κυψελωτής τηλεφωνίας. Το GSM έγινε αποδεκτό πρώτα από τις Ευρωπαϊκές χώρες και η υλοποίηση των εθνικών δικτύων, άρχισε από τον Ιούνιο του 1991. Η ομάδα έρευνας GSM δημιούργησε το σύστημα που αργότερα κράτησε τα ίδια αρχικά, αλλά μετονομάστηκε σε Global System for Mobile communications. Στο GSM δίκτυο, κάθε κυψέλη διαθέτει ένα σταθερό σταθμό βάσης με κατάλληλη κεραία, που καλύπτει όλη την έκτασή της. Ο σταθμός βάσης συνδέεται ασύρματα με τις φορητές συσκευές και από την άλλη πλευρά συνδέεται με καλωδιακό τρόπο με το κέντρο, που ονομάζεται MTSO (Mobile Telephone Switching Office) (Εικόνα 11).



Εικόνα 11 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας

Τα Cellular συστήματα δημιουργήθηκαν αρχικά για να ικανοποιήσουν απαιτήσεις κινητής τηλεφωνίας. Αργότερα άρχισαν να γίνονται σοβαρές προσπάθειες να επιλυθούν προβλήματα που επηρεάζουν τη μετάδοση δεδομένων, όπως είναι οι θόρυβοι, οι παρεμβολές σημάτων κλπ. Τα απλά δίκτυα GSM υποστηρίζουν μετάδοση δεδομένων σε ταχύτητες 9,6 Kbps.

Η τεχνολογία του GSM, βασίζεται στην μετατροπή του σήματος φωνής σε ψηφιακό σήμα και τη μετάδοσή του σε συχνότητες UHF (900 περίπου MHz), μέσα από κανάλι εύρους ζώνης συχνοτήτων 200 KHz. Το σύστημα GSM, επιτρέπει στους συνδρομητές με κινητά τηλέφωνα να κινούνται τόσο μέσα στο ίδιο κελί όσο και μεταξύ διαφορετικών κελιών, χωρίς να υπάρχει διακοπή της επικοινωνίας. Η εκπομπή από τον σταθμό βάσης, γίνεται στην περιοχή 935 – 960 MHz, ενώ η λήψη του σταθμού βάσης από τους κινητούς σταθμούς στην περιοχή 890 – 915 MHz. Οι περιοχές αυτές των 25 MHz, έχουν χωρητικότητα 125 καναλιών μιας και το κάθε κανάλι έχει bandwidth 200 KHz.

Το κανάλι επικοινωνίας που χρησιμοποιείται κάθε φορά μεταξύ κινητού και σταθμού βάσης ορίζεται από τον σταθμό βάσης. Κάθε σταθμός βάσης, μπορεί να χειριστεί ταυτόχρονα ένα μεγάλο πλήθος καναλιών χρησιμοποιώντας την τεχνική **FDMA** (Frequency Division Multiple Access). Το πλήθος των καναλιών, που θα χειριστεί ένας σταθμός βάσης καθορίζεται από τον σχεδιαστή του δικτύου βάση των αναγκών σε όγκους κίνησης της κυψέλης και των γειτονικών κυψελών και βεβαίως δεν μπορεί να ξεπεράσει το επιτρεπτό όριο.

Σε κάθε κανάλι του σταθμού βάσης μπορούν να συνομιλούν ταυτόχρονα οκτώ διαφορετικά κινητά τηλέφωνα. Η κοινή χρήση του καναλιού επιτυγχάνεται με την τεχνική **TDMA** (Time Division Multiple Access), οκτώ χρονοθυρίδων. Για την ακρίβεια το μήκος του TDMA πλαισίου είναι 4,615 msec. Τα κινητά GSM δεν εκπέμπουν συνεχώς αλλά έχουν επαναλαμβανόμενη και διακοπτόμενη εκπομπή, που επιβάλλει η τεχνική TDMA. Ο ρυθμός που εκπέμπει το κάθε κινητό είναι μια φορά κάθε πλαίσιο, δηλαδή μια φορά κάθε 4,615 msec ή ισοδύναμα 217 εκπομπές ανά δευτερόλεπτο. Σε αυτήν την διακοπτόμενη εκπομπή οφείλεται ο ενοχλητικός πολλές φορές θόρυβος που κάνουν τα ηχεία όταν χρησιμοποιούμε κινητό τηλέφωνο δίπλα σε στερεοφωνικό.

Μια ακόμη τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η μη ταυτόχρονη εκπομπή και λήψη του κινητού με την τεχνική TDD (Time Division Duplex) που είναι απλή και επιτρέπει να έχουμε μικρού μεγέθους και βάρους κινητά. Κάθε κανάλι των 200 KHz, μεταφέρει στα συστήματα

GSM ένα ψηφιακό σήμα 270,833 Kbps, το οποίο μοιράζεται όπως αναφέραμε με τεχνική TDMA σε οκτώ συνδρομητές, που μπορούν να συνομιλούν ταυτόχρονα. Κάθε συνδρομητής έτσι έχει στη διάθεση του ένα μέσο εύρος ζώνης 33,8 Kbps. Από τα 33,8 Kbps η ψηφιακή φωνή απαιτεί 13 Kbps, ενώ τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται για λόγους κωδικοποίησης καναλιού, διαχείρισης και ελέγχου. Τα πλεονεκτήματα του GSM έναντι των αναλογικών συστημάτων είναι:

- Καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος και συνεπώς χωρητικότητα περισσότερων καναλιών σε κάθε κυψέλη.
- Ψηφιακή τεχνολογία που κάνει μικρότερους και ελαφρύτερους του φορητούς πομποδέκτες.
- Σημαντικά καλύτερη ποιότητα φωνής.
- Συμβατότητα με το πρότυπο OSI και με το ISDN.
- Ευρεία διεθνής αποδοχή που έχει σαν αποτέλεσμα συμβατότητα και χαμηλότερο κόστος κατασκευής και λειτουργίας.

1.3.3 2.5ης γενιάς

Στη γενιά 2.5G, ανήκουν οι τεχνολογίες που ξεπερνάνε σε επιδώσεις αυτές της 2^{ης} γενιάς και εισάγουν νέα χαρακτηριστικά, αλλά δεν πληρούν τις προδιαγραφές που ορίζονται από την τυποποίηση IMT-2000 για να χαρακτηριστούν 3G. Αυτή η ενδιάμεση γενιά, δεν προσφέρει αλλαγές στον τρόπο μετάδοσης φωνής, αλλά εισάγει την αρχιτεκτονική δικτύου μεταγωγής πακέτων που επιτρέπει αυξημένες ταχύτητες στην μεταφορά δεδομένων . Οι κυριότερες τεχνολογίες που αντιπροσωπεύουν αυτήν την μετάβαση από το 2G στο 3G, είναι οι GPRS και EDGE.

1.3.3.1 GPRS

Το GPRS (General Packet Radio Service) είναι ένα πρόσθετο χαρακτηριστικό του GSM, που παρέχει μια αρχιτεκτονική δικτύου μεταγωγής πακέτων, για τη διακίνηση δεδομένων, παράλληλα με την αρχιτεκτονική μεταγωγής κυκλώματος για φωνή. Πρόκειται για στάνταρντ του ETSI⁵, για μετάδοση πακέτων δεδομένων πάνω από GSM συστήματα, με ταχύτητες που φθάνουν τα 115 Kbps, σε αντίθεση με τη δυνατότητα των GSM δικτύων για μετάδοση δεδομένων με 9,6 Kbps. Με την πρόσθεση του GPRS οι τηλεπικοινωνιακοί οργανισμοί κινητής τηλεφωνίας μπορούν να δίνουν πρόσβαση σε δίκτυα IP. Επιπλέον το GPRS, επιτρέπει σε κάποιους χρήστες να μοιράζονται κοινούς πόρους και παρέχει την ευχέρεια στους παρόχους να βασίζονται στην τιμολόγηση τους στην ποσότητα των δεδομένων και όχι στον χρόνο σύνδεσης. Στην κλασική GSM κινητή τηλεφωνία, ο χρήστης για να επικοινωνήσει ξεκινά μια κλήση η οποία δεσμεύει ένα κανάλι για όση ώρα επικοινωνεί και το αποδεσμεύει μετά το τέλος της, η δε χρέωση σχετίζεται με τον χρόνο κατάληψης του καναλιού. Με το GPRS, αντιθέτως δεν υπάρχει διαδικασία κλήσης για την επικοινωνία data, η δε χρέωση σχετίζεται με τον όγκο των δεδομένων που διακινεί.

Για να υποστηριχθεί μια αποδοτική πολύπλεξη της κυκλοφορίας πακέτων από και προς τα κινητά , έχει προσδιορισθεί ένα νέο κανάλι, το Packet Data Channel (PDCH). Ένα

⁵ <http://www.etsi.org/WebSite/homepage.aspx>

PDCH αντιστοιχεί σε μια από τις 8 χρονοθυρίδες του GSM. Σε κάθε χρήστη μπορεί να δοθούν περισσότερες της μιας χρονοθυρίδες κατά τη διάρκεια μετάδοσης πακέτων, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης. Το πλήθος των καναλιών PDCH ενός χρήστη μπορεί να είναι σταθερό ή να ρυθμίζεται δυναμικά ανάλογα με τις ανάγκες της μετάδοσης.

1.3.3.2 EDGE

EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) ή EGPRS (Enhanced GPRS) είναι μια προς τα πίσω συμβατή τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας, που αποτελεί προέκταση του GSM και επιτυγχάνει μεγαλύτερες ταχύτητες στην μεταφορά δεδομένων. Το EDGE αναπτύχθηκε πάνω σε GSM δίκτυα το 2003, από την εταιρία AT&T, στις ΗΠΑ. Το EDGE επιτρέπει μεταφορά δεδομένων με ταχύτητες που φτάνουν θεωρητικά τα 384 Kbps, βασιζόμενο στην αρχιτεκτονική δικτύου μεταγωγής πακέτων, όπως και το GPRS. Αυτές οι ταχύτητες κάνουν πρόσφορο το έδαφος για εισαγωγή νέων multimedia εφαρμογών και υπηρεσιών για τους τελικούς χρήστες, που μπορούν να αξιοποιήσουν της νέες ταχύτητες που προσφέρουν τα EDGE δίκτυα. Τα δίκτυα αυτά, χρησιμοποιούν το εύρος ζώνης του GSM και τις ήδη υπάρχουσες συχνότητες των 800, 900, 1800 και 1900 MHz που αυτό χρησιμοποιεί.

Η ιδέα πίσω από το EDGE είναι η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων μέσα στο κανάλι εύρους ζώνης των 200 KHz που χρησιμοποιεί το GSM. Αυτό γίνεται με την εισαγωγή της νέας διαμόρφωσης (modulation) 8PSK και την χρήση των ήδη υπάρχουσων σταθμών βάσης του GSM και GPRS. Καθώς δεν χρειάζεται να γίνουν μεγάλες αλλαγές στο βασικό δίκτυο και χρησιμοποιείτε το ίδιο φάσμα συχνοτήτων, το EDGE αποτέλεσε μια φθηνή λύση για της εταιρίες κινητής τηλεφωνίας που ήθελαν να αναβαθμίσουν τα υπάρχοντα δίκτυα τους και να προσφέρουν στους συνδρομητές multimedia υπηρεσίες.

1.3.4 3ης γενιάς

Το 2000, για πρώτη φορά πάρθηκε ομόφωνη απόφαση για τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κινητών δικτύων 3^{ης} γενιάς, κάτω από την ονομασία **IMT-2000** (International Mobile Telecommunications). Όλη η βιομηχανία τηλεπικοινωνιών μαζί με εθνικούς και διεθνείς οργανισμούς τυποποιήσεων, που ορίζουν την ανάθεση ραδιοφάσματος έκαναν μια συντονισμένη προσπάθεια για να αποφύγουν τα λάθη του παρελθόντος και να μειώσουν την ανομοιογένεια τεχνολογιών και προτύπων, που χαρακτήριζε της προηγούμενες γενιές. Η 3^η γενιά (3G) δικτύων κινητής τηλεφωνίας, σχεδιάστηκε με γνώμονα τις μεγάλες ταχύτητες στη μεταφορά δεδομένων και προσφορά υψηλής ποιότητας multimedia υπηρεσιών στους συνδρομητές. Ο οργανισμός ITU (International Telecommunications Union) με την τυποποίηση IMT-2000, όρισε τους στόχους που πρέπει να πληρούν μελλοντικές τεχνολογίες, ώστε να μπορούν να χαρακτηριστούν 3G. Κύρια χαρακτηριστικά της τυποποίησης IMT-2000 είναι τα παρακάτω:

- **Ευελιξία** – Τα 3G δίκτυα είναι ευέλικτα και χρησιμοποιούν συγκεκριμένες τεχνολογίες, ώστε πάροχοι με διεθνή κάλυψη να μην χρειάζεται να συντηρούν πολλά δίκτυα με ανομοιογενείς τεχνολογίες μεταξύ τους.
- **Προσιτότητα** – Το κόστος εφαρμογής είναι σημαντικό ώστε οι νέες τεχνολογίες να είναι προσβάσιμες και προσιτές οικονομικά παρόχους και συνδρομητές.

- **Συμβατότητα με υπάρχοντα συστήματα** – Η συμβατότητα με προηγούμενα συστήματα 2^{ης} γενιάς όπως το GSM ήταν αναγκαία ώστε να μπορούν στην αρχή να συνυπάρξουν και να γίνει μια ομαλή μετάβαση από το ένα σύστημα στο άλλο.
- **Επεκτασιμότητα** – Το μεγάλο δέλεαρ για τους παρόχους είναι δίκτυα τα οποία είναι εύκολα επεκτάσιμα και μπορούν να επεκταθούν ως προς τον αριθμό των χρηστών που υποστηρίζουν την κάλυψη του δικτύου και την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών με μικρό κόστος.

Κύριος αντιπρόσωπος της 3^{ης} γενιάς είναι το UMTS, που αποτελεί εξέλιξη του GSM. Το UMTS, σχεδιάστηκε για να συντηρείται και βελτιώνεται από τον οργανισμό 3GPP. Ένας άλλος οργανισμός με παρόμοιο όνομα, ο 3GPP2 ανέπτυξε μια ανταγωνιστική τεχνολογία, το CDMA2000, βασισμένο στο cdmaOne (CDMA IS-95) της 2^{ης} γενιάς, το οποίο όμως δεν υποστηρίχτηκε πολύ.

1.3.4.1 UMTS

Το **UMTS** (Universal Mobile Telecommunications System), είναι μια τεχνολογία δικτύων κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς. Ο Σκοπός του UMTS είναι να παρέχει τηλεπικοινωνίες φωνής, δεδομένων και πολυμέσων σε ενοποιημένο περιβάλλον κινητής επικοινωνίας, υποστηρίζοντας τη διασύνδεση με το GSM. Το UMTS είναι ο αντικαταστάτης των GSM και GPRS παρέχοντας υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και περισσότερες ευκολίες. Γι αυτό το λόγο μερικές φορές παίρνει και την ονομασία 3GSM. Χρησιμοποιεί το W-CDMA ως τη βασική τεχνική πολλαπλής πρόσβασης. Το W-CDMA είναι ραδιοδιεπαφή (radio interface) και δημιουργήθηκε από την Ιαπωνική NTT DoCoMo, για το 3G δίκτυο της FOMA. Αργότερα υπέβαλε της προδιαγραφές στην ITU, ώστε το W-CDMA να μπει στην IMT-2000. Το W-CDMA έγινε δεκτό και αργότερα χρησιμοποιήθηκε ως η ραδιοδιεπαφή για το UMTS που είναι ο 3G διάδοχος του GSM. Το W-CDMA βασίζεται στην τεχνική πολύπλεξης CDMA λόγω της υπεροχής της έναντι άλλων τεχνικών όπως το TDMA. Το UMTS, χρησιμοποιεί ένα ζευγάρι καναλιών των 5 MHz, το ένα στα 1900 MHz για uplink και το άλλο στα 2100 MHz για downlink. Πιο συγκεκριμένα το εύρος συχνοτήτων που έχει οριστεί για το UMTS, είναι 1885-2025 MHz για uplink και 2110-2200 MHz για downlink. Τα 3 βασικά μέρη του UMTS είναι:

- Core Network(CN)
- UMTS Terrestrial Radio Access Network(UTRAN)
- User Equipment(UE)

Το **UE** αποτελείται από τη κινητή συσκευή και την κάρτα SIM (Subscriber Identity Module) ή USIM (Universal SIM). Η USIM περιέχει δεδομένα που βοηθούν την ταυτοποίηση του συνδρομητή στο δίκτυο. Το UE μπορεί να λειτουργήσει σε τρεις καταστάσεις:

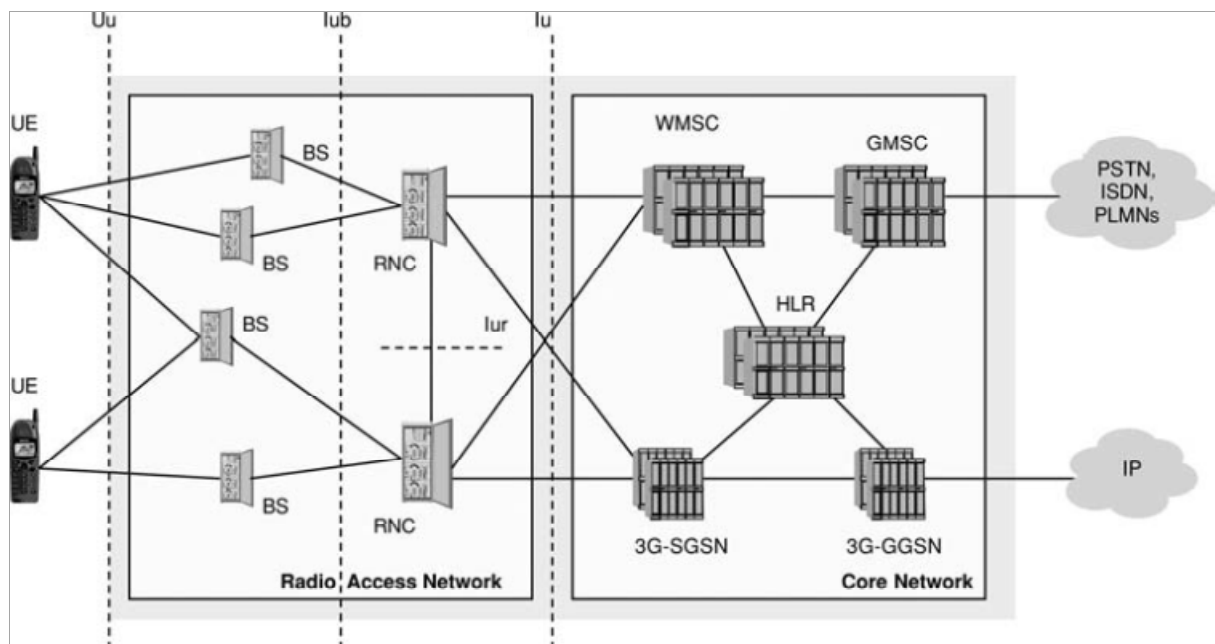
- CS(Circuit Switched) mode
- PS(Packet Switched) mode
- CS/PS mode

Στην CS το UE, είναι συνδεδεμένο μόνο στο βασικό δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος, στην PS μόνο στο δίκτυο μεταγωγής πακέτων για μεταφορά δεδομένων και στην CS/PS και στα δύο. Τα βασικά μέρη του **UTRAN** είναι:

- Base Station (BS)
- Radio Network Controllers (RNC)

Κάποιες βασικές λειτουργίες του BS (σταθμός βάσης), είναι κωδικοποίηση καναλιού, διαμόρφωση-αποδιαμόρφωση, διαχείριση ραδιοδιεπαφής, διαχείριση λαθών κλπ. Βασικές λειτουργίες του RNC, είναι διαχείριση πόρων δικτύου, κατανομή καναλιών, κρυπτογράφηση, κατάτμηση και επαναδιάταξη πακέτων κ.α.

Η βασική λειτουργία του **CN** είναι να παρέχει μεταγωγή, δρομολόγηση δεδομένων. Το CN περιλαμβάνει τις βάσεις δεδομένων και λειτουργίες διαχείρισης δικτύου. Η αρχιτεκτονική του CN για το UMTS, είναι βασισμένη στα GSM δίκτυα με GPRS. Όλος ο εξοπλισμός πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να υποστηριχθούν οι υπηρεσίες του UMTS. Το CN χωρίζεται στους τομείς CS και PS. Οι ταχύτητες που υποστηρίζει το UMTS, με βάση τα πρότυπα της IMT-2000, κυμαίνονται από 144 Kbps έως 2 Mbps και φτάνουν από 7.2 Mbit/s έως και 42 Mbit/s σε δίκτυα HSPA και HSPA+ αντίστοιχα. Η τεχνολογία HSPA, είναι περισσότερο γνωστή ως 3.5G και αναλύεται παρακάτω.



Εικόνα 12 Δίκτυο UMTS

1.3.5 3.5ης γενιάς

Στην 3.5G ανήκουν τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας, που σχεδιάστηκαν να έχουν καλύτερες επιδόσεις από τα 3G συστήματα και αποτελούν το ενδιάμεσο σκαλοπάτι προς την υλοποίηση του 4G. Η τεχνολογία που αντιπροσωπεύει αυτή τη γενιά, είναι το **HSPA** (High Speed Packet Access). Το HSPA είναι μια βελτίωση του UMTS, που προσφέρει μεγαλύτερες ταχύτητες στη μεταφορά δεδομένων και αυξάνει την ποιότητα των υπηρεσιών

που απολαμβάνουν οι τελικοί χρήστες. Με το HSPA οι ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων φτάνουν θεωρητικά τα 14 Mbps στο downlink και τα 5.8 Mbps στο uplink. Η αύξηση στον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων γίνεται με την προσθήκη ενός επιπλέον καναλιού στο downlink που λέγεται **HS-DSCH** (High Speed Downlink Shared Channel), με το οποίο μειώνονται οι καθυστερήσεις (latency) και αυξάνεται η απόδοση του δικτύου. Το HSPA αποτελείται από δύο μέρη:

- **HSDPA** (High Speed Downlink Packet Access)
- **HSUPA** (High Speed Uplink Packet Access)

Όπως υποδηλώνουν και τα ονόματα, το HSDPA είναι υπεύθυνο για το downlink και το HSUPA είναι υπεύθυνο για το uplink. Όπως και με προηγούμενες γενιές, το HSPA σχεδιάστηκε, ώστε να μπορεί να υλοποιηθεί σχετικά εύκολα πάνω σε υπάρχουσα δίκτυα. Έτσι ένα δίκτυο WCDMA - UMTS με μερικές αναβαθμίσεις σε υλικό και λογισμικό μπορεί να λειτουργήσει σαν ένα HSPA δίκτυο. Οι ρυθμοί μετάδοσης στο HSDPA, κυμαίνονται από 1.8 Mbps έως 10 Mbps και μπορούν να φτάσουν και τα 20 Mbps με την χρήση κεραιών MIMO. Στο HSUPA η ταχύτητα μετάδοσης φτάνει τα 4 Mbps.

1.3.5.1 HSDPA

Είναι γνωστό ότι οι εφαρμογές δεδομένων δημιουργούν διαφορετική κίνηση στο δίκτυο από ότι η μεταφορά φωνής. Η μεταφορά φωνής απαιτεί δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος με αφιερωμένες γραμμές και κανάλια με μικρό εύρος ζώνης για να υποστηρίζεται η ικανοποιητική μεταφορά φωνής. Η μετάδοση πρέπει να είναι συνεχόμενη και χωρίς καθυστερήσεις, για να μην αλλοιώνεται η ποιότητα της μετάδοσης. Η μετάδοση δεδομένων από την άλλη πλευρά, εξαρτάται από το είδος των εφαρμογών που τρέχουν στην κινητή συσκευή και χαρακτηρίζεται από αυξομειώσεις και «εκρήξεις» στη μετάδοση που ακολουθούνται από περιόδους αδράνειας του καναλιού. Η συμπεριφορά αυτή κάνει επιτακτική την ανάγκη για ευέλικτη ανάθεση πόρων του δικτύου στους χρήστες, ώστε το δίκτυο να προσαρμόζεται στις συνεχόμενες αλλαγές στη ζήτηση δεδομένων. Για να το επιτύχει αυτό το HSDPA, χρησιμοποιεί ένα νέο κανάλι για την μετάδοση δεδομένων, το **HS-DSCH** (High Speed Downlink Shared Channel). Το κανάλι αυτό μοιράζονται πολύ χρήστες ώστε να εξυπηρετηθούν αποδοτικά ανάλογα με τη ζήτηση σε δεδομένα που έχει ο καθένας. Το κοινό κανάλι είναι μια καινούργια έννοια σε σύγκριση με το UMTS, όπου το δίκτυο αφιέρωνε πόρους σε κάθε χρήστη ξεχωριστά. Οι κύριες αλλαγές που επέφερε το HSDPA είναι:

- Κοινό κανάλι δεδομένων, όπου χρησιμοποιείται πολύπλεξη χρόνου (TDM).
- Νέα διαμόρφωση (16QAM) και νέες κωδικοποιήσεις.
- Τροποποίηση του επιπέδου MAC, για γρήγορη ανταπόκριση και προσαρμογή στις αλλαγές ζήτησης δεδομένων.
- Τεχνική Adaptive Modulation and Coding (AMC), για γρήγορη προσαρμογή του καναλιού μετάδοσης και νέος μηχανισμός διόρθωσης λαθών HARQ στο επίπεδο MAC.

1.3.5.2 HSUPA

Όταν οι χρήστες σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, χρησιμοποιούν εφαρμογές για πρόσβαση στο ίντερνετ είναι πιθανότερο να κατεβάζουν δεδομένα από αυτό, παρά να στέλνουν. Έτσι η κίνηση που δημιουργείται είναι ασύμμετρη. Αυτό αποδεικνύεται αν παρατηρήσουμε ότι εφαρμογές που αφορούν τα βασικά πράγματα που κάνουν οι χρήστες όταν συνδέονται στο ίντερνετ όπως web browsing, κατέβασμα αρχείων, streaming μουσικής και βίντεο δημιουργούν περισσότερη κίνηση στο downlink. Η εμφάνιση όμως υπηρεσιών κοινωνικής δικτύωσης, όπως το YouTube και Facebook κάνει αναγκαία την ύπαρξη ικανοποιητικών ταχυτήτων και στο uplink, καθώς πλέον οι περισσότεροι χρήστες ανεβάζουν καθημερινά μεγάλο όγκο φωτογραφιών και βίντεο. Αυτές τις ανάγκες των νέων εφαρμογών για μεγαλύτερες ταχύτητες στο uplink έρχεται να λύσει το HSUPA, το οποίο συμπληρώνει το HSDPA και δίνει στους χρήστες μια ολοκληρωμένη εμπειρία με ταχύτητες στο uplink που φτάνουν τα 4 Mbps.

Τα νέα χαρακτηριστικά που εισάγει το HSUPA στον τομέα του uplink, είναι παρόμοια με αυτά του HSDPA για το downlink. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι :

- Διαμόρφωση 16QAM και νέες κωδικοποιήσεις.
- Τροποποιήσεις στο επίπεδο MAC.
- Τεχνικές AMC και HARQ.

Αν και τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι παρόμοια με του HSDPA, το HSUPA εν τέλει διαφέρει διότι για την λειτουργία του uplink σε κάθε χρήστη αφιερώνεται ένα ξεχωριστό κανάλι που ονομάζεται E-DCH, κάτι που σημαίνει ότι ο χειρισμός των πόρων του δικτύου αλλάζει σημαντικά.

1.3.5.3 HSPA+

Η τεχνολογία **HSPA+**, είναι μια εξέλιξη του συστήματος HSPA και αποτελεί μέρος της έκδοσης 7 (Release 7) της 3GPP. Αναπτύχθηκε με σκοπό:

- Την αποδοτικότερη χρήση των πόρων του συστήματος HSPA, κυρίως στο δίκτυο κορμού (core network), μέσω της πλήρους διανομής υπηρεσιών, μέσω Packet-Switched (PS) κυκλώματος, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ποιότητα των υπηρεσιών διαδικτύου και μεταφοράς δεδομένων
- Την περαιτέρω αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων στους κινητούς χρήστες
- Την αποτελεσματική μείωση του latency

Οι καλύτερες επιδόσεις επιτυγχάνονται με την χρήση της τεχνολογίας κεραιών MIMO και της κωδικοποίησης 64 QAM. Η τεχνολογία MIMO, χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές σε πομπό και δέκτη για να βελτιώσει την ποιότητα του σήματος και την ταχύτητα μετάδοσης. Στην αύξηση του ρυθμού μετάδοσης βοηθάει σημαντικά και η χρήση κωδικοποίησης 64 QAM, με την προϋπόθεση όμως ότι επικρατούν καλές συνθήκες μετάδοσης. Το HSPA+ προσφέρει 21 Mbps στο downlink και 11,5 Mbps στο uplink με εύρος ζώνης καναλιού 5 MHz. Ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά, η ταχύτητα στο HSPA+ μπορεί να φτάσει έως και τα 42 Mbps.

Κεφάλαιο 2^ο Κινητά δίκτυα 4G

2.1 Χαρακτηριστικά και τεχνολογίες δικτύων 4^{ης} γενιάς

2.1.1 IMT-Advanced

Για τα δίκτυα νέας γενιάς (4G) ακολουθήθηκε ο ίδιος δρόμος με το 3G και έτσι οι νέες τεχνολογίες 4^{ης} γενιάς ακολουθούν την νέα τυποποίηση **IMT-Advanced**, που αποτελεί το επόμενο βήμα της IMT-2000. Μετά την IMT-2000 που ορίζει τα σημερινά 3G συστήματα, η ITU καθόρισε τα στάνταρτ για την IMT-Advanced, που αποτελεί το επόμενο βήμα στις ασύρματες ευρυζωνικές επικοινωνίες παγκοσμίως. Η IMT-Advanced παρέχει ολοκληρωμένη υποστήριξη για ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα, φέρνοντας πολλές βελτιώσεις όπως:

- Βελτιωμένη χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος για διαχείριση μεγαλύτερου αριθμού χρηστών, υποστηρίζοντας παράλληλα υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων ανά κανάλι επικοινωνίας
- Νέα αρχιτεκτονική εξολοκλήρου βασισμένη στην μεταγωγή πακέτων και το IP
- Μείωση καθυστερήσεων (latency), που οδηγεί σε καλύτερη απόκριση στο ίντερνετ και στις multimedia εφαρμογές
- Βελτίωση ελέγχου και διαχείρισης των πόρων του δικτύου, για καλύτερη ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών (QoS – Quality of Service)
- Νέες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης (OFDMA), για κανάλια με μεγαλύτερο εύρος ζώνης και χρήση νέων κεραιών MIMO (Multiple Input Multiple Output) σε σταθμούς βάσης και συσκευές για μεγαλύτερη απόδοση.

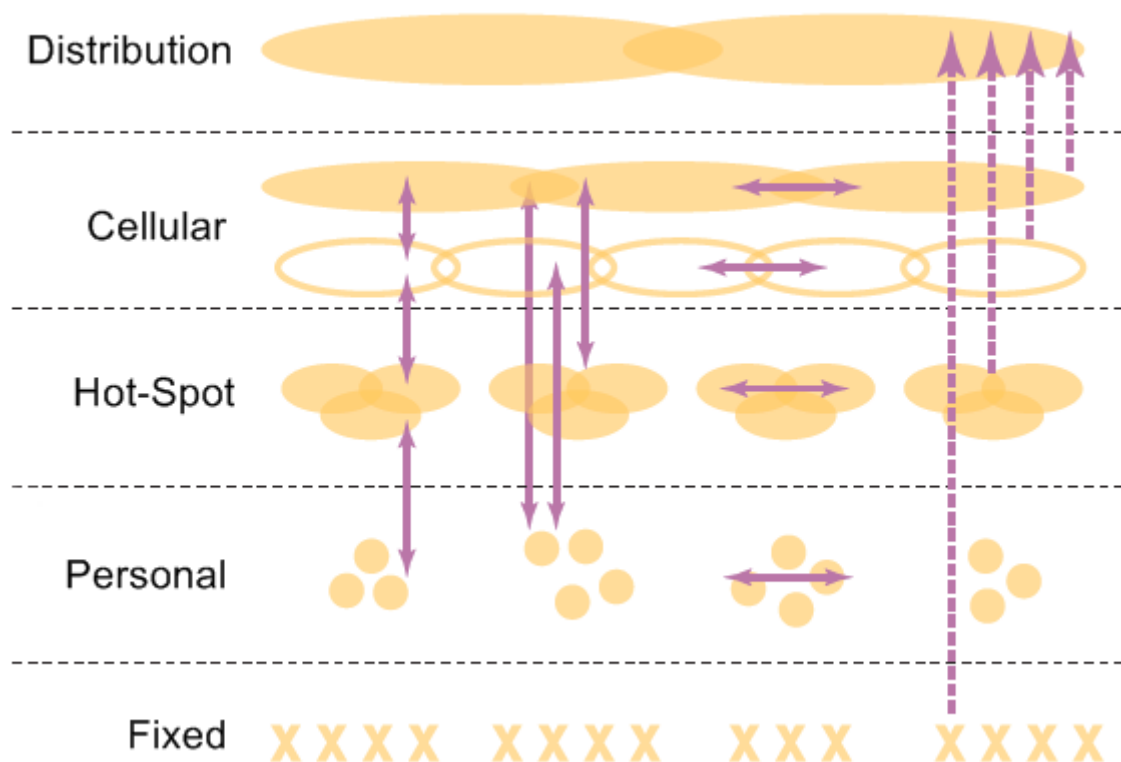
Παρακάτω στον Πίνακα 1 γίνεται μια αντιπαράθεση των χαρακτηριστικών των 3G και 4G δικτύων.

Πίνακας 1 Διαφορές 3G και 4G

	3G	4G
Κίνητρο	Προσανατολισμός στη μετάδοση φωνής. Η μετάδοση δεδομένων αποτελεί δευτερεύοντα στόχο.	Φωνή και δεδομένα συγκλίνουν σε ένα δίκτυο βασισμένο στο πρωτόκολλο IP.
Αρχιτεκτονική δικτύου	WAN (Wide Area Networks)	Συνδυασμός WAN και WLAN (Wireless LAN)
Εύρος ζώνης	384 Kbps – 2 Mbps	100 Mbps εν κινήσει και 1 Gbps σε στάση.

Φάσμα (GHz)	1.8 – 2.4	2 – 8
Κύκλωμα	Μεταγωγή κυκλώματος για φωνή και μεταγωγή πακέτων για δεδομένα	Μεταγωγή πακέτων για φωνή και δεδομένα.
Πολλαπλή πρόσβαση	CDMA	OFDMA
Qos και Ασφάλεια	Όχι	Ναι
Πολλαπλές κεραίες (MIMO)	Περιορισμένη υποστήριξη	Υποστηρίζονται
Multicast / Broadcast	Όχι	Ναι

Θεμελιωδώς, η 4^η γενιά επιχειρεί να αλλάξει το συμβατικό μοντέλο επικοινωνίας των προηγούμενων γενεών, όπου μια συσκευή συνδέεται μόνο σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο. Υπάρχει η λογική της πάντα βέλτιστης σύνδεσης (**Always Best Connected – ABC**), που παρέχει στον χρήστη τον καλύτερο δυνατό τρόπο δικτύωσης, ανάλογα με την περίπτωση. Στην Εικόνα 13, φαίνεται ο στόχος της τυποποίησης IMT-Advanced, ο οποίος είναι ετερογενή δίκτυα διαφορετικών τεχνολογιών και διαφορετικών δυνατοτήτων, αλληλοσυνδεδεμένα για να σχηματίσουν ένα ενιαίο δίκτυο, που θα κρατάει τον χρήστη συνδεδεμένο ανά πάσα στιγμή.



Εικόνα 13 Στρώματα 4G Δικτύου
26

Για να συμβεί αυτό έχουν οριστεί διαφορετικά στρώματα δικτύου, βασισμένα στις δυνατότητες χωρικής κάλυψης κάθε τεχνολογίας. Τα στρώματα του δικτύου είναι :

- **Fixed** (DSL, Cable, Οπτική ίνα) – Περιλαμβάνει τεχνολογίες σταθερής δικτύωσης, που επίσης θα αποτελούν μέρος των δικτύων 4^{ης} γενιάς.
- **Personal** (Bluetooth) – Σε αυτό το επίπεδο θα χρησιμοποιούνται τεχνολογίες μικρών αποστάσεων, όπως είναι το Bluetooth. Λόγω απόστασης, η κινητικότητα θα είναι περιορισμένη, αλλά θα υποστηρίζεται με ευκολία η μετάβαση προς τα επόμενα στρώματα μεγαλύτερης εμβέλειας.
- **Hot-Spot** (Wi-Fi/802.11) – Αυτό το επίπεδο θα βασίζεται στα γνωστά ασύρματα δίκτυα WLAN – 802.11, που χρησιμοποιούνται στα περισσότερα σπίτια με την υποστήριξη απλών ασύρματων δρομολογητών (wireless routers). Θα προσφέρονται υψηλές ταχύτητες και το δίκτυο θα καλύπτει μικρές περιοχές, όπως γραφεία ή κτήρια.
- **Cellular** (UMTS, WiMAX, LTE) – Εδώ θα λειτουργούν τα κλασικά κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Πέρα από της νέες τεχνολογίες, θα υποστηρίζονται πλήρως δίκτυα 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς. Στόχος είναι να παρέχονται μεγάλες ταχύτητες σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα χρηστών, όπως είναι οι αστικές.
- **Distribution** – Σε αυτό το επίπεδο θα υπάρχουν μεγαλύτερες κυψέλες και θα παρέχονται σχετικά μικρότερες ταχύτητες σε σχέση με τα προηγούμενα στρώματα. Προορίζεται για κάλυψη μεγάλων αγροτικών περιοχών με μικρή πυκνότητα χρηστών.

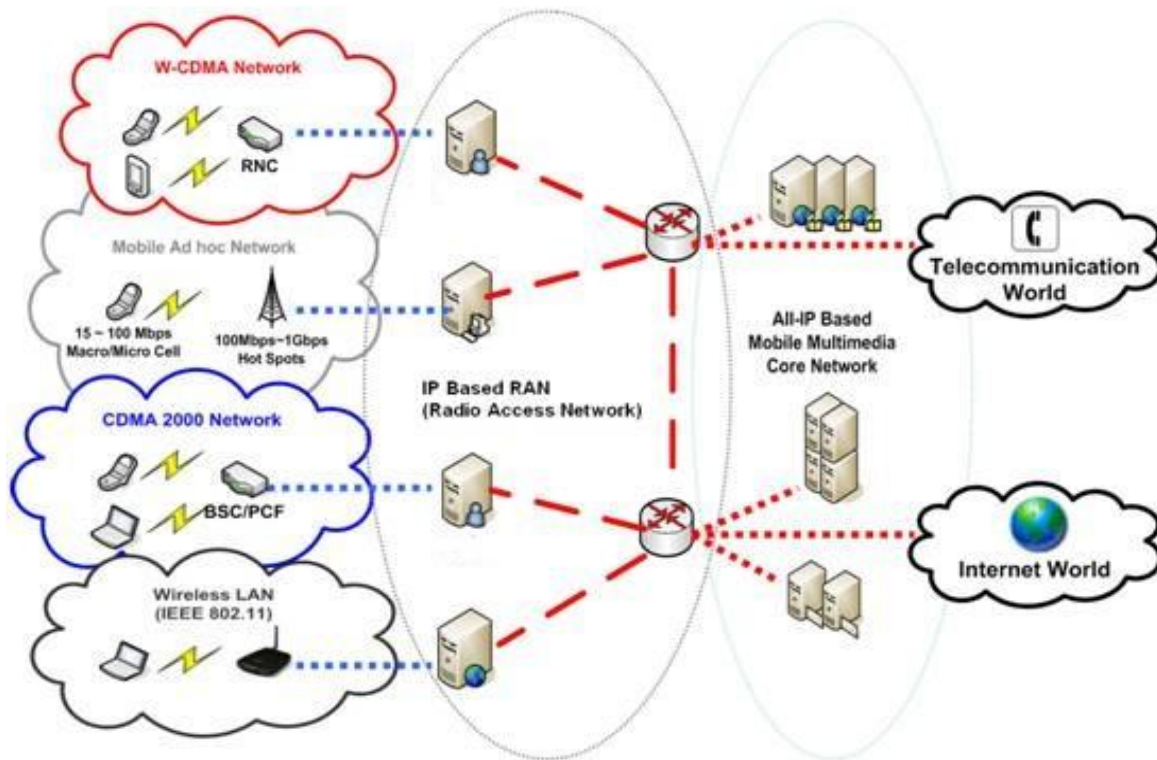
Η αλληλεπίδραση μεταξύ των δικτύων δεν περιορίζεται μόνο στα handovers για παροχή συνεχόμενης επικοινωνίας, αλλά περιλαμβάνει και συνεργασία σε πολύπλοκους τομείς, όπως είναι η ασφάλεια, η εμπιστευτικότητα, η ποιότητα (QoS), η ανθεκτικότητα του δικτύου κ.α. ώστε οι χρήστες να έχουν μια ολοκληρωμένη αίσθηση ενός ενιαίου δικτύου. Στόχος του 4G είναι ουσιαστικά να εξαλείψει την ανάγκη του χρήστη να ξέρει λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο που συνδέεται στο δίκτυο. Θα υπάρχει ένα στρώμα που θα «αποκρύπτει» από τον χρήστη λεπτομέρειες, όπως ο πάροχος, η τοπολογία και το είδος της τεχνολογίας με το οποίο συνδέεται στο δίκτυο, γιατί πλέον τέτοιο είδους παραμέτρους θα τις διαχειρίζεται αυτόματα το εκάστοτε δίκτυο και η συσκευή του χρήστη. Το όραμα που υπάρχει για τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω έννοιες :

- **Ubiquity (Πανταχού παρουσία)** – Παντού και πάντα διαθέσιμες υπηρεσίες για κάθε χρήστη σε οποιοδήποτε δίκτυο.
- **Convergence (Σύγκλιση)** – Σύγκλιση διαφορετικών δικτύων σε ένα ενιαίο δίκτυο που προσφέρει ελευθερία κινήσεων και συνεχόμενη παροχή υπηρεσιών.
- **Broadband (Ευρυζωνικότητα)** – Υπηρεσίες προσφερόμενες από δίκτυα μεγάλων ταχυτήτων.

2.1.2 Χαρακτηριστικά

Βάση των απαιτήσεων για αδιάκοπη επικοινωνία και της συνεχόμενης αλληλεπίδρασης μεταξύ των δικτύων, το 4G πρέπει να περιλαμβάνει τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- **Quality of Service (QoS)** – Πρέπει να εφαρμόζονται με συνέπεια έλεγχοι εισόδου-εξόδου και αλγόριθμοι συντονισμού, που θα φροντίζουν την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών ανεξαρτήτως παρόχου και τοπολογίας.
- **Εύρεση και επιλογή δικτύου** – Μια κινητή συσκευή που υποστηρίζει πολλές ασύρματες τεχνολογίες, μπορεί να συνδέεται σε πολλαπλά δίκτυα ταυτόχρονα και στη συνέχεια να επιλέγει το δίκτυο που είναι πιο κατάλληλο για τις ανάγκες του χρήστη, από άποψη κόστους, ποιότητας και ταχύτητας ανάμεσα στα άλλα. Μια τέτοια λειτουργία προϋποθέτει την ύπαρξη μιας ομοιόμορφης διαδικασίας επιλογής, που θα επιτρέπει στην συσκευή να αναγνωρίζει και να συνδέεται στο πιο αποδοτικό δίκτυο.
- **Handover και αδιάκοπη παροχή υπηρεσιών** – Οι σταθμοί βάσης πρέπει να υποστηρίζουν handovers μεταξύ σταθμών βάσης της ίδιας (intra system) και διαφορετικών (inter system) τεχνολογιών δικτύου, και παράλληλα ο χρόνος μετάβασης να είναι τόσο μικρός, ώστε η οποιαδήποτε είδους επικοινωνία ή ενεργή υπηρεσία, να μην διακόπτεται.
- **Υπηρεσίες ανεξάρτητες από τοπολογία και τεχνολογία** – Οι δυνατότητες των υπηρεσιών στα δίκτυα 4^{ης} γενιάς, πρέπει να προσαρμόζονται στα χαρακτηριστικά του δικτύου που χρησιμοποιείται κάθε δεδομένη χρονική στιγμή από την φορητή συσκευή, και να μην περιορίζονται από τα όρια που θέτει το κάθε δίκτυο.



Εικόνα 14 Παράδειγμα Ενοποιημένου 4G Δικτύου

2.1.3 All-IP δίκτυα

Με την σύγκλιση των τεχνολογιών και υπηρεσιών, η βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών άρχισε να βαδίζει προς τα λεγόμενα “**All-IP**” δίκτυα. Στα δίκτυα αυτά, φωνή και δεδομένα προσφέρονται σε καλύτερη ποιότητα απ’ ό,τι στα σημερινά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας με την αποκλειστική χρήση δικτύων μεταγωγής πακέτων (PS ή Packet Switched), που προσφέρουν μια πιο απλοποιημένη αρχιτεκτονική και τρόπους διαχείρισης δικτύου. Λόγω της παγκόσμιας διείσδυσης του ίντερνετ, τα All-IP δίκτυα είναι ευκολότερα και φθηνότερα στην υλοποίηση και στη διαχείριση απ’ ό,τι τα συμβατικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Επιπλέον, ευνοούν την γρήγορη διείσδυση νέων τεχνολογιών και υπηρεσιών ώστε αυτές να είναι έτοιμες για χρήση από τους τελικούς χρήστες. Στην κινητή τηλεφωνία, η μετάβαση προς τα All-IP δίκτυα άρχισε να γίνεται με το HSPA+ και την εισαγωγή των **LTE** και **WiMAX**, δύο τεχνολογιών που αντιπροσωπεύουν την 4^η γενιά (4G) δικτύων κινητής τηλεφωνίας και πλέον σταματούν να υποστηρίζουν δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος (CS ή Circuit Switched). Κλειδί σε αυτήν την μετάβαση αποτελεί η μεταφορά της φωνής από CS σε PS δίκτυα, δηλαδή η μεταφορά να γίνεται με VoIP (Voice over IP) και έτσι να γίνει ενοποίηση του κεντρικού δικτύου σε ένα δίκτυο που θα διαχειρίζεται αποκλειστικά πακέτα δεδομένων.

Η τυποποίηση και η σχετικά γρήγορη διάθεση του **WiMAX** της IEEE το 2004 και του Mobile WiMAX, το 2005 προκάλεσε πολλές συζητήσεις ανάμεσα στους οργανισμούς τυποποίησης που είναι υπεύθυνοι για τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας. Αυτό έγινε, καθώς είδαν πως ο IEEE μπήκε δυναμικά στο παιχνίδι και το WiMAX μπορούσε να αποτελέσει το επόμενο βήμα στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Το WiMAX, είναι μια τεχνολογία που κάνει αποδοτική χρήση του φάσματος (spectrum), με την τεχνική OFDMA (Orthogonal Frequency

Division Multiple Access). Το WiMAX επίσης εισήγαγε την τεχνολογία των κεραιών MIMO (Multiple Input Multiple Output) στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και σε συνδυασμό με την νέα λιγότερο πολύπλοκη αρχιτεκτονική του, προσέφερε ένα δίκτυο με μικρές καθυστερήσεις (latency).

Το 2005, η 3GPP ξεκίνησε την τυποποίηση μιας νέας εναλλακτικής τεχνολογίας γνωστής και ως UTRAN Long Term Evolution ή **LTE**. Το LTE σχεδιαστικά βασίζεται σε παρόμοιες έννοιες με αυτές του WiMAX και αποτελεί μια σημαντική εξέλιξη προς μια νέα κατεύθυνση από αυτήν που χάραξε η οικογένεια των τεχνολογιών GSM/UMTS. Το κέρδος των παρόχων από την υλοποίηση αυτών τεχνολογιών στα δίκτυα τους είναι :

- Υψηλές ταχύτητες.
- Φασματική Απόδοση (Spectral Efficiency).
- Χαμηλές καθυστερήσεις
- Απλούστερα δίκτυα με μικρότερο κόστος συντήρησης και λειτουργίας από τα ήδη υπάρχοντα.

2.2 Υπηρεσίες και εφαρμογές 4^{ης} γενιάς

Δύο κύρια χαρακτηριστικά των δικτύων 4^{ης} γενιάς, θα είναι η ταχύτητα και η αδιάκοπη σύνδεση των χρηστών στο δίκτυο φωνής και δεδομένων. Πάνω σε αυτούς τους δύο παράγοντες θα στηριχτούν νέες και ήδη υπάρχουσες εφαρμογές, για να προσφέρουν στους χρήστες υπηρεσίες απaráμιλλης ποιότητας. Η μεγάλη ταχύτητα, θα ωφελήσει κυρίως εφαρμογές με μεγάλες απαιτήσεις σε κίνηση, όπως το streaming υψηλής ευκρίνειας (High Definition), βίντεο στο κινητό και το κατέβασμα μεγάλων σε όγκο αρχείων, σε μικρό χρονικό διάστημα, με αυτές και παρόμοιες δραστηριότητες να μπορούν να γίνουν, όσο ο χρήστης βρίσκεται σε κίνηση. Οι πολλές ήδη υπάρχουσες υπηρεσίες 3^{ης} γενιάς, θα συνεχίσουν να λειτουργούν, προσφέροντας όμως σημαντικές βελτιώσεις στην ποιότητα, καθώς θα υποστηρίζονται από τα ταχύτερα και πιο σταθερά δίκτυα 4^{ης} γενιάς. Γενικότερα οι καταναλωτές θα έχουν την δυνατότητα να κάνουν πράγματα εν κινήσει, που μέχρι στιγμής μπορούσαν να κάνουν μόνο στο οικιακό τους δίκτυο. Αν αυτή η ελευθερία συνδυαστεί με δελεαστικά πακέτα από τους παρόχους, το ηλεκτρονικό εμπόριο αναμένεται να γνωρίσει μεγάλη άνοδο.

Κάποιος μπορεί να παρατηρήσει ότι οι τελευταίες εκδόσεις του 3G, όπως το HSPA+ προσφέρουν και σήμερα παρόμοιες υπηρεσίες στους καταναλωτές. Τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς μπορούν επίσης να πετύχουν αρκετά υψηλές ταχύτητες και ποιότητα στις προσφερόμενες υπηρεσίες τους, αλλά μόνο κάτω από βέλτιστες συνθήκες, και επίσης έγκειται περιορισμός στον αριθμό των χρηστών και στην εμβέλεια. Για παράδειγμα, τα πραγματικά υψηλής ταχύτητας δίκτυα, καλύπτουν μόνο αστικές περιοχές, όπου και πάλι αν πολλοί χρήστες ταυτόχρονα θέλουν να αποκτήσουν πρόσβαση σε μια υπηρεσία, η ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας θα είναι χαμηλότερη. Αυτό είναι ένα ακόμα από τα προβλήματα που έρχονται να λύσουν τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς. Το 4G θα μπορεί να υποστηρίξει τον όλο και αυξανόμενο αριθμό συνδρομητών και τις «ορέξεις» τους για υπηρεσίες δεδομένων. Προς το

παρόν οι data-based υπηρεσίες δεν είναι τόσο διαδεδομένες, με δημοφιλέστερη εφαρμογή να είναι το web browsing. Στο μέλλον όμως προβλέπεται θεαματική αύξηση τους και όσο ο αριθμός των χρηστών και οι ανάγκες τους σε δεδομένα θα αυξάνεται, τόσο θα γίνεται ορατή η αξία των δικτύων 4^{ης} γενιάς. Παρακάτω ακολουθεί μια λίστα με υπηρεσίες και εφαρμογές 4^{ης} γενιάς :

- **Υψηλής ποιότητας multimedia εφαρμογές.** Υπηρεσίες, όπως Web Tv, Web Radio, προβολή βίντεο υψηλής ευκρίνειας από υπηρεσίες, όπως το YouTube και βιντεοκλήσεις.
- **Μεγάλες ταχύτητες και χαμηλό κόστος ανά bit.** Δελεαστικά πακέτα χρεώσεων για διευκόλυνση της εξάπλωσης νέων υπηρεσιών και κίνητρο για τους χρήστες να χρησιμοποιήσουν υπηρεσίες δεδομένων.
- **Φορητότητα εφαρμογών** και αξιοποίηση ελευθερίας κίνησης που προφέρει το δίκτυο.
- **Mobile Marketing.** Νέοι τρόποι διαφήμισης και διείσδυσης των εταιριών προς τους χρήστες.
- **Mobile Search.** Εύκολη και γρήγορη αναζήτηση περιεχομένου οποιαδήποτε στιγμή, όπως και στους σταθερούς υπολογιστές.
- **Mobile Gaming.** Ισχυρές κινητές συσκευές σε συνδυασμό με την ταχύτητα του δικτύου ανοίγουν τον δρόμο προς το λεγόμενο “casual gaming”.
- **Ανταλλαγή περιεχομένου.** Η ποιότητα του δικτύου θα κάνει ευκολότερη την δημιουργία και διακίνηση περιεχομένου από τους χρήστες, δηλαδή το λεγόμενο “user generated content”, που αποτελείται από διαμοιρασμό φωτογραφιών, μουσικής, βίντεο και οποιουδήποτε κοινωνικού περιεχομένου.
- **Cloud storage.** Όλες οι μεγάλες εταιρίες προσφέρουν πλέον δωρεάν πολλά Gb χώρου αποθήκευσης στο λεγόμενο cloud. Με τα δίκτυα 4G οι χρήστες θα

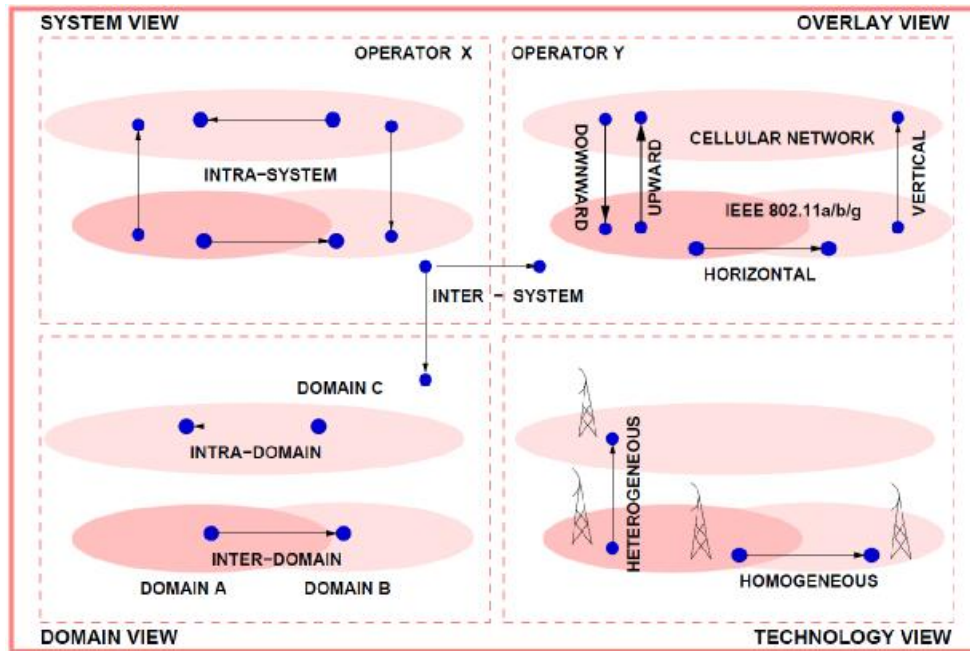
εκμεταλλεύονται πλήρως τέτοιες υπηρεσίες και θα έχουν πάντα εύκολη πρόσβαση σε πολλά Gb αποθηκευτικού χώρου όπου και αν βρίσκονται.

- **Ηλεκτρονικό Εμπόριο.** Γρήγορες και ασφαλείς αγορές και συναλλαγές υψηλής ασφάλειας και ποιότητας.
- **VoIP.** Η μετάδοση φωνής κατά την κλήση θα γίνεται πλέον μέσω του ενιαίου δικτύου φωνής/δεδομένων, πάνω από το πρωτόκολλο IPv6.

2.3 IPv6 και Handovers

2.3.1 Handovers

Το handover στα δίκτυα 4^{ης} γενιάς αποτελεί πρόκληση, καθώς πρέπει να υποστηρίζει διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών τύπων δικτύων. Το κλασικό handover αφορά την μετακίνηση του χρήστη μεταξύ διαφορετικών κυψελών εντός ενός ενιαίου δικτύου κινητής τηλεφωνίας ή την μετάβαση σε δίκτυο διαφορετικού παρόχου. Το handover μέσα στο ίδιο δίκτυο ονομάζεται οριζόντιο (**horizontal handover**) και μεταξύ δικτύων διαφορετικού τύπου, όπως για παράδειγμα μετάβαση από δίκτυο GSM σε WLAN, ονομάζεται κάθετο (**vertical handover**). Οι διαφορετικοί τύποι handover μεταξύ συστημάτων ίδιου και διαφορετικού τύπου φαίνονται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15 Διαφορετικοί τύποι Handover

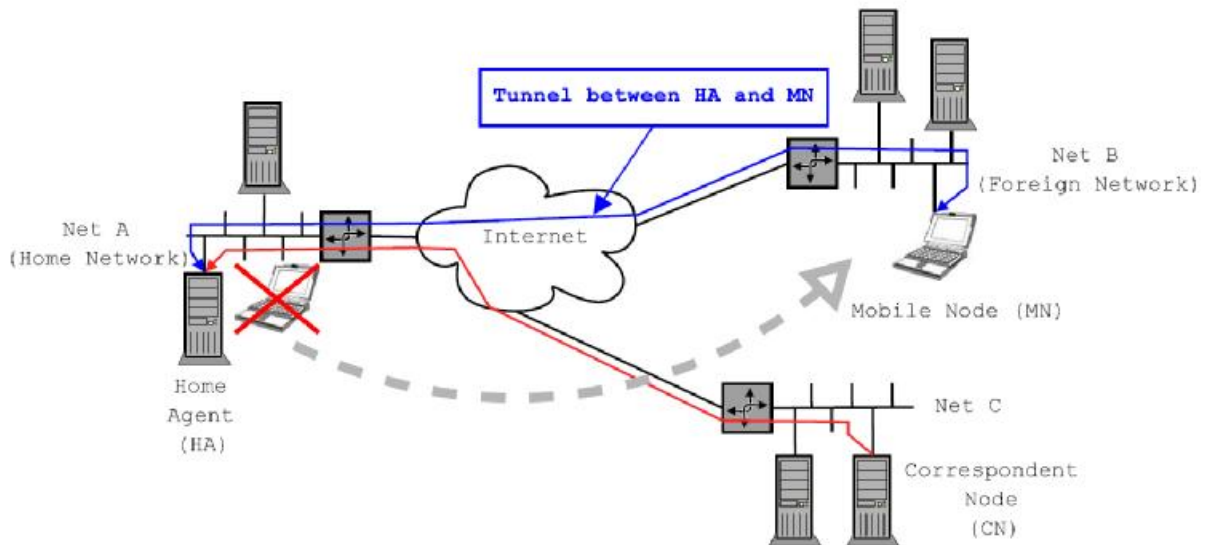
Η ομαλή διασύνδεση ετερογενών δικτύων είναι δυνατή μόνο αν υπάρχει κάποιου είδους συσχέτιση μεταξύ τους. Η 4^η γενιά προσφέρει το προνόμιο της σύνδεσης τεχνολογιών, όπως το WiMAX, το LTE, WLAN κ.α. σε μία πλατφόρμα στην οποία μπορούν να συνεργάζονται αρμονικά. Όταν ένας χρήστης μεταβαίνει από ένα δίκτυο GPRS για παράδειγμα σε ένα δίκτυο WLAN τότε κατά την διάρκεια του handover υπάρχει κίνδυνος να διακοπεί στιγμιαία η επικοινωνία. Γι αυτό τον λόγο το 4G παρέχει τον τρόπο για κινητούς χρήστες να επικοινωνούν αδιάλειπτα κατά τα handovers μεταξύ ετερογενών δικτύων. Την "ραχοκοκαλιά" αυτής της λειτουργίας,, αποτελεί το **Mobile IPv6** (MIPv6).

2.3.2 Mobile IPv6

Το **Mobile IPv6** ορίζει τους μηχανισμούς που επιτρέπουν σε έναν κινητό σταθμό (**Mobile Node** – MN), να αλλάζει σημεία πρόσβασης στο ίντερνετ, διατηρώντας μια σταθερή διεύθυνση και να παραμένει προσβάσιμος από άλλους σταθμούς.

Η λειτουργία του MIPv6 φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 16. Όσο ο MN είναι συνδεδεμένος στο τοπικό του δίκτυο (**Home Network** – HN), του αντιστοιχεί μια τοπική διεύθυνση, που ονομάζεται **Home Address** (HoA). Η δρομολόγηση των πακέτων μεταξύ του MN και των σταθμών που επικοινωνεί (**Correspondent Nodes** – CN), όσο ο MN βρίσκεται στο τοπικό δίκτυο γίνεται κανονικά. Όταν ο MN συνδεθεί σε ένα διαφορετικό δίκτυο (**Foreign Network** – FN), του δίνεται μια νέα IPv6 διεύθυνση από το FN δίκτυο που ονομάζεται **Care-of-Address** (CoA). Ο MN για να κάνει γνωστή την νέα διεύθυνση στέλνει ένα μήνυμα **Binding Update** (BU) σε έναν ειδικό σταθμό του τοπικού του δικτύου που ονομάζεται **Home Agent** (HA). Ο HA είναι ένας ειδικός δρομολογητής (router), ο οποίος παίρνει το μέρος του MN όταν αυτός είναι συνδεδεμένος σε άλλο δίκτυο. Ο HA παρακολουθεί τις κινήσεις του MN από τα BU μηνύματα που λαμβάνει από αυτόν και κάνει τις απαραίτητες αντιστοιχήσεις μεταξύ της τοπικής διεύθυνσης HoA και των διευθύνσεων CoA που παίρνει ο MN από διαφορετικά δίκτυα. Έτσι όλοι οι σταθμοί που επικοινωνούσαν πριν με τον MN συνεχίζουν να

επικοινωνούν μαζί του μέσω του HA, όταν ο MN συνδεθεί σε άλλο δίκτυο. Ο HA όταν λάβει πακέτο στην HoA διεύθυνση του MN, το προωθεί στην νέα CoA διεύθυνση που έχει εκείνη τη στιγμή.



Εικόνα 16 Λειτουργία Mobile IPv6

2.4 Κατάσταση στην Ελλάδα και ανά τον κόσμο εξελίξεις στο 4G

Τον Φεβρουάριο του 2012, στο WRC 2012 (World Radio Conference)⁶ της ITU, που διοργανώνεται κάθε τέσσερα χρόνια αποφασίστηκε ότι οι τεχνολογίες **LTE-Advanced** και **WirelessMAN-Advanced** (Mobile WiMAX 2), αναγνωρίζονται ως επίσημοι αντιπρόσωποι της τυποποίησης IMT-Advanced. Πρακτικά σε τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες, όπως η Αμερική το πραγματικό 4G στην καλύτερη περίπτωση αναμένεται από το 2013. Ήδη όμως κατασκευαστές κινητών συσκευών και πάροχοι κινητής τηλεφωνίας διαφημίζουν και πουλούν τις πρώτες “4G” συσκευές. Στην πραγματικότητα, οι υπάρχουσες ταχύτητες είναι καλύτερες από τα πρώτα 3G δίκτυα, αλλά σε καμία περίπτωση δεν φτάνουν αυτά που ορίζει η τυποποίηση IMT-Advanced. Το “4G”, ήρθε πρόωρα σε μερικές χώρες, για λόγους μάρκετινγκ και επίσης λόγω του ότι η ITU παρόλο που συντονίζει μια ομαδική προσπάθεια για την ανάπτυξη των τεχνολογιών του μέλλοντος, δεν ορίζει αυστηρά την ετικέτα που θα δώσουν οι εταιρίες σε αυτές τις τεχνολογίες. Κατά συνέπεια η τελευταία έκδοση του HSPA το HSPA+, το LTE και το WiMAX διαφημίζονται ως 4G ενώ πιο σωστά αποτελούν δίκτυα 3.9G. Το WiMAX υποστηρίζει 128 Mbps στο downlink και 56 Mbps στο uplink, ενώ το LTE 100 και 50 Mbps αντίστοιχα, εκεί όπου η IMT-Advanced ορίζει ταχύτητες που θα φτάνουν θεωρητικά τα 100 Mbps για χρήστες εν κινήσει και το 1 Gbps για χρήστες σε στάση. Σημερινές εκδόσεις των WiMAX, HSPA+ και LTE προωθούνται ως 4G, ενώ στην πραγματικότητα αποτελούν το μεταβατικό στάδιο προς το 4G καθώς πολλές εταιρίες ακόμα ενσωματώνουν το απλό LTE στα 3G δίκτυα και τις υπηρεσίες τους. Τελικά όμως το 2010, ύστερα από συνεννόηση με τις μεγάλες εταιρίες κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως η ITU-R αναγνώρισε τις LTE και WiMAX

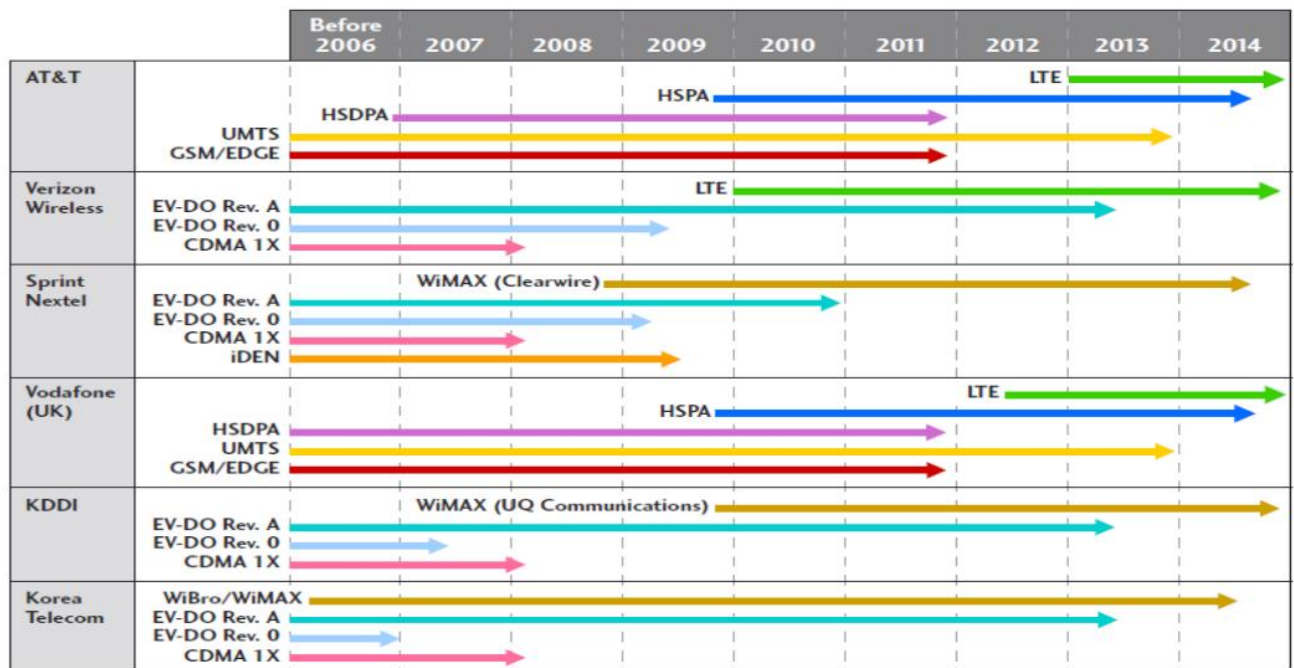
⁶ <http://www.itu.int/net/newsroom/wrc/2012/index.aspx>

ως “4G”, διότι παρόλο που έχουν χαμηλότερες προδιαγραφές από το πραγματικό 4G, θεωρούνται σημαντική τεχνολογική εξέλιξη, από τα δίκτυα 3G. Τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς σχεδιάζονται από την αρχή να είναι ALL-IP, με στόχο την υποστήριξη multimedia εφαρμογών, και απομακρύνονται από τα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος, που επικεντρώνονταν στη μετάδοση φωνής.

Σήμερα οι περισσότερες 4G συσκευές ανά τον κόσμο υποστηρίζουν το LTE. Στην Ελλάδα η πιο γνωστή συσκευή που υποστηρίζει 4G, είναι η τελευταία έκδοση του iPad της εταιρίας Apple. Οι τρεις μεγάλοι πάροχοι στην Ελλάδα (Cosmote, Vodafone, Wind) έχουν ανακοινώσει σχέδια για αναβάθμιση των δικτύων τους σε LTE, αλλά προς το παρόν δεν υπάρχει κάποια γνωστή υλοποίηση. Η Vodafone αναμένεται να ανακοινώσει τα πρώτα HSPA+ προγράμματα για αξιοποίηση του νέου iPad και η Cosmote από το 2010 είχε κάνει λόγω για πιλοτική υλοποίηση LTE δικτύου μικρής αρχικά κάλυψης. Η Wind το 2011 είχε ανακοινώσει ότι σε συνεργασία την κινέζικη εταιρία Huawei με πρόγραμμα τριών ετών θα αναβαθμίσει το δίκτυό της, ώστε μέχρι το 2013 το νέο δίκτυο να καλύπτει Αθήνα και Θεσσαλονίκη. Οι εταιρίες κινητής τηλεφωνίας στην Ελλάδα, πέρα από το πρόβλημα του μεγάλου κόστους που απαιτείται για αναβάθμιση του δικτύου σε μια νέα τεχνολογία, αντιμετωπίζουν και το θέμα των διαθέσιμων ραδιοσυχνοτήτων. Το πρώτο βήμα αναμένεται να γίνει αρχές του 2013, με την υποχρεωτική μετάβαση στην ψηφιακή τηλεόραση και την ελευθέρωση της μπάντας των 800 MHz. Επίσης, ακόμα δεν είναι ξεκάθαρο το ποιες συχνότητες θα χρησιμοποιεί το LTE στην Ελλάδα, όπως φαίνεται από ανακοίνωση⁷ που δημοσίευσε το Υπουργείου Υποδομών Μεταφορών και Δικτύων τον Μάρτιο του 2012. Για παράδειγμα από την παραπάνω ανακοίνωση προκύπτει ότι οι συχνότητες που υποστηρίζει το 4G chip του iPad (700 και 2100 MHz), δεν θα είναι διαθέσιμες στη χώρα μας.

Ρεαλιστικά υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν και καθορίζουν το χρονικό πλαίσιο της μετάβασης των παρόχων στην νέα τεχνολογία. Σε πολλές χώρες ακόμα, τα δίκτυα 3G δεν έχουν ωριμάσει αρκετά, ώστε να φτάσουν στα επιθυμητά επίπεδα κέρδους που θέλουν οι πάροχοι. Κέρδος το οποίο αφορά κατά κύριο λόγο υπηρεσίες δεδομένων. Τα περισσότερα 3G δίκτυα κυμαίνονται σε πραγματικές ταχύτητες, μεταξύ 0.5 με 5 Mbps βασιζόμενα σε UMTS και HSPA δίκτυα, ανάλογα πάντα από τον πάροχο. Παρά τις σχετικά ικανοποιητικές ταχύτητες, οι εταιρίες δεν βλέπουν μεγάλο κέρδος από την χρήση υπηρεσιών δεδομένων. Πέρα από το απλό «σερφάρισμα» στο ίντερνετ, τα απαγορευτικά σε πολλές περιπτώσεις πακέτα ογκοχρέωσης, περιορίζουν τους χρήστες από το να χρησιμοποιήσουν υπηρεσίες με μεγαλύτερες ανάγκες σε δεδομένα. Πρέπει να περάσει κάποιος καιρός, ώστε οι χρήστες να μπορούν να εκμεταλλεύονται ελεύθερα τις διαθέσιμες ταχύτητες, και οι εταιρίες να κάνουν κατά κάποιον τρόπο απόσβεση της αρχικής επένδυσης πάνω στο 3G. Πρέπει δηλαδή, να γίνει εμφανές το κέρδος της παροχής υψηλών ταχυτήτων προς τους χρήστες ώστε οι εταιρίες να μπορούν να δουν θετικά την αναβάθμιση σε μια νέα τεχνολογία, όπως είναι το 4G. Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει τη μετάβαση, είναι η αδειοδότηση και η διαθεσιμότητα του φάσματος. Παρά τις προσπάθειες που γίνονται, το τοπίο δεν είναι ξεκάθαρο, καθώς για να εκπληρωθούν οι απαιτήσεις του 4G σε συχνότητες, πρέπει να γίνουν αλλαγές στο φασματικό τοπίο, και επιπλέον η χρήση περισσότερων συχνοτήτων συνεπάγεται σε μεγαλύτερο κόστος από άδειες.

⁷ <http://www.yme.gr/?aid=3212&tid=552>



Εικόνα 17 Τάσεις ξένων εταιριών προς αναβάθμιση σε 4G δίκτυα

2.5 LTE και WiMAX

2.5.1 LTE

Το **LTE** (Long Term Evolution) παρουσιάστηκε αρχικά στην Release 8 της ομάδας 3GPP, ως το επόμενο σημαντικό βήμα στην εξέλιξη μετά το UMTS. Σχεδιάστηκε να παρέχει βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσιών σε ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα. Το LTE υποστηρίζει μεταβλητό εύρος ζώνης από 1.25 έως 20 MHz, όπως επίσης FDD και TDD. Στο downlink η ταχύτητα θεωρητικά φτάνει τα 100 Mbps και στο uplink τα 50 Mbps σε κανάλι των 20 MHz. Επίσης έχει βελτιωθεί σημαντικά η φασματική απόδοση και οι καθυστερήσεις. Το LTE είναι ευέλικτο και μπορεί να διασυνδεθεί με προηγούμενους τύπους δικτύων, όπως το GSM, CDMA και HSPA. Για multimedia υπηρεσίες, το LTE παρέχει ένα ALL-IP δίκτυο, με έμφαση στην ποιότητα (QoS). Το LTE δουλεύει με τα ακόλουθα air interface :

- **OFDMA στο Downlink.** Η μετάδοση στο downlink γίνεται με FDD και TDD, πάνω από την τεχνική OFDM με την οποία το διαθέσιμο φάσμα υποδιαιρείται σε κομμάτια, όπου το κάθε κομμάτι διαμορφώνεται διαφορετικά. Σε σχέση με την OFDM, η OFDMA επιτρέπει την πολλαπλή πρόσβαση στο κανάλι αναθέτοντας ξεχωριστά σήματα σε διαφορετικούς χρήστες. Η OFDMA είναι περισσότερο πολύπλοκη, όσον αφορά την ανάθεση πόρων, αλλά επιτυγχάνει υψηλή φασματική απόδοση και μικρές καθυστερήσεις.
- **SC-FDMA στο Uplink.** Η SC-FDMA (Single Carrier Frequency Domain Multiple Access), επιλέχθηκε έναντι της OFDMA στο uplink, λόγω καλύτερης απόδοσης όσον αφορά την ασύμμετρη κίνηση που παρατηρείται συνήθως μεταξύ downlink και uplink και χαμηλότερων επιπέδων Peak to Average Power Ratio – PAPR που βελτιώνει την κατανάλωση ενέργειας.

Για να επιτύχει μεγαλύτερες ταχύτητες, κάλυψη και αξιοπιστία το LTE χρησιμοποιεί το σύστημα κεραιών MIMO. Μέχρι στιγμής το LTE επεκτείνεται αργά και σταθερά, καθώς οι περισσότεροι πάροχοι που διαθέτουν δίκτυα της οικογένειας GSM-UMTS, ξεκινάνε την αναβάθμιση στο LTE. Παράδειγμα αποτελούν οι μεγάλες εταιρίες κινητής τηλεφωνίας της Αμερικής, όπως οι AT&T, T-Mobile και Vodafone, όπως επίσης και οι εταιρίες Verizon, China Telecom/Unicom και NTT-DoCoMo, που είχαν δίκτυα διαφορετικών τεχνολογιών, από αυτά βασισμένα στο GSM.

2.5.2 Mobile WiMAX

Το **Mobile WiMAX** της IEEE είναι μια ασύρματη τεχνολογία, που έχει ως στόχο την σύγκλιση των σταθερών και κινητών δικτύων σε μία κοινή ευρυζωνική ασύρματη λύση βασισμένη σε μία ευέλικτη αρχιτεκτονική. Το Mobile WiMAX, υποστηρίζει κανάλι με ευέλικτο εύρος ζώνης, από 1.25 έως 20 MHz βασισμένο στην ραδιοδιεπαφή OFDMA. Η ταχύτητα στο downlink πλησιάζει τα 63 Mbps και στο uplink τα 10 Mbps, σε κανάλι εύρους ζώνης 10 MHz με την χρήση κεραιών MIMO. Επίσης έχει γίνει βελτιστοποίηση στους χρόνους, ανάμεσα στα handovers με τιμές που δεν ξεπερνούν τα 50 ms.

Στο φυσικό επίπεδο, η ραδιοδιεπαφή OFDMA χρησιμοποιείται και προς τις δυο κατευθύνσεις με την χρήση TDD. Χρήση του FDD δεν αποκλείεται και μπορεί να ενσωματωθεί σε περιοχές όπου το TDD δεν επιτρέπεται από αρμόδιες αρχές, που ορίζουν συγκεκριμένη χρήση του ραδιοφάσματος ή όταν τεχνικοί λόγοι το απαιτούν. Για να αυξήσει την εμβέλεια και την χωρητικότητα το Mobile WiMAX, χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνικές, όπως η **AMC** (Adaptive Modulation and Coding), **HARQ** (Hybrid Automatic Repeat Request) και **CQICH** (Fast Channel Feedback). Το QoS εφαρμόζεται με μηχανισμούς, που ρυθμίζουν αυτόματα την ασυμμετρία μεταξύ downlink και uplink και διαθέτουν συστήματα για έξυπνη ανάθεση πόρων του δικτύου.

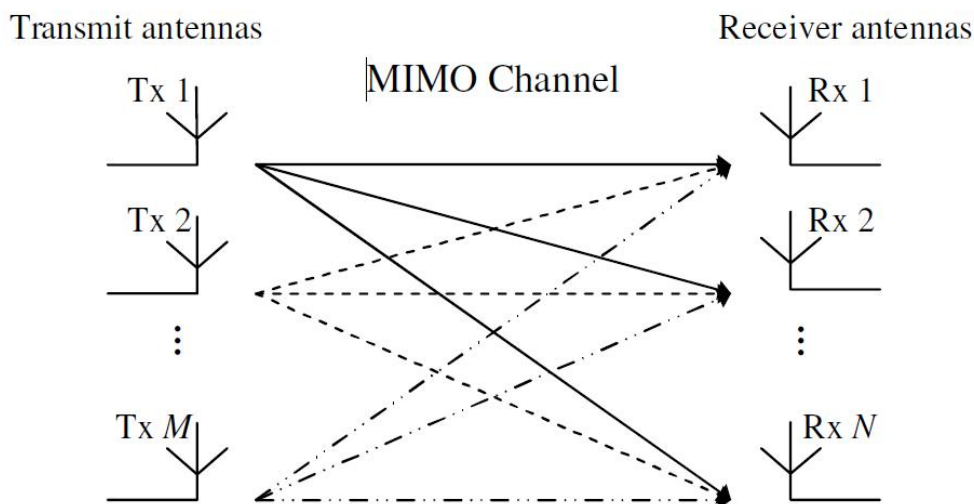
Γνωστές εταιρίες στον χώρο της κινητής τηλεφωνίας, όπως η Nokia, Motorola και Samsung έχουν κατασκευάσει τερματικές και κινητές συσκευές για δίκτυα WiMAX, αλλά παρόλα αυτά δεν έχει γνωρίσει την ίδια επιτυχία με το LTE. Το WiMAX έχει υλοποιηθεί σε αναπτυσσόμενες χώρες, όπως η Ινδία, το Πακιστάν, η Μαλαισία καθώς και άλλες χώρες, από την Μέση Ανατολή και την Αφρική.

Κεφάλαιο 3^ο Τεχνολογίες OFDM και MIMO

3.1 Χρήση των OFDM και MIMO τεχνολογιών στα δίκτυα 4G

Οι τεχνολογίες OFDM και MIMO, αποτελούν τους δύο βασικούς δομικούς λίθους, στο φυσικό επίπεδο των δικτύων 4^{ης} γενιάς. Το LTE και το WiMAX, οι δύο αντιπροσωπευτικές τεχνολογίες της 4^{ης} γενιάς μέχρι στιγμής, βασίζονται στην τεχνική OFDM και στις κεραιές MIMO καθώς ο συνδυασμός αυτός είναι κατάλληλος για υλοποίηση δικτύων 4G, που χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες και ποιότητα. Το OFDM είναι η προτιμώμενη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, καθώς παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παλαιότερες τεχνικές (FDMA, TDMA, CDMA). Βασικό προτέρημα της OFDM, είναι ότι το κανάλι υποδιαιρείται σε πολλά υπο-φέροντα σήματα (subcarriers), όπου το καθένα μπορεί να έχει διαφορετική κωδικοποίηση και να μεταφέρει διαφορετική πληροφορία. Έτσι επιτυγχάνεται παράλληλη μετάδοση πολλαπλών σημάτων στο ίδιο κανάλι και αυξάνεται η φασματική απόδοση. Η πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται με την αντιστοίχιση του κάθε υποφέροντος σε διαφορετικό χρήστη και η τεχνική τότε ονομάζεται OFDMA. Αυτό επιτρέπει να αποστέλλονται στο ίδιο κανάλι δεδομένα όπως φωνή, βίντεο, γραφικά και κείμενο.

Οι σημερινές κινητές συσκευές και οι σταθμοί βάσης, συνήθως χρησιμοποιούν συστήματα κεραιών SISO (Single Input Single Output). Δηλαδή χρησιμοποιείται μία κεραία για αποστολή και λήψη με χρήση της τεχνικής αμφίδρομης μετάδοσης TDD. Οι κεραιές MIMO (Multiple Input Multiple Output), ουσιαστικά είναι συστήματα κεραιών, όπου υπάρχουν πολλαπλές κεραιές σε πομπό και δέκτη, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη απόδοση. Ως βασικό συστατικό των δικτύων νέας γενιάς, οι κεραιές MIMO είναι ικανές να υποστηρίξουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης σε σχέση με δίκτυα 3G όπως το UMTS και το HSPA. Με την ύπαρξη πολλαπλών κεραιών σε πομπό και δέκτη, δημιουργούνται πολλαπλές ροές δεδομένων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18 Σύστημα MIMO

Καθώς η πληροφορία μεταδίδεται από διαφορετικά μονοπάτια (paths), τα συστήματα MIMO είναι ευέλικτα και προσφέρουν αξιόπιστη επικοινωνία. Δύο βασικά πλεονεκτήματα σε αντίθεση με τα συστήματα SISO είναι τα εξής :

- Σημαντική αύξηση σε χωρητικότητα και φασματική απόδοση. Η χωρητικότητα του καναλιού αυξάνεται γραμμικά με τον ελάχιστο αριθμό κεραιών που χρησιμοποιούνται. Ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται χωρίς να σπαταλιέται το διαθέσιμο φάσμα.
- Μείωση εξασθένησης σήματος λόγω ύπαρξης πολλαπλών κεραιών που προσφέρουν ευελιξία.

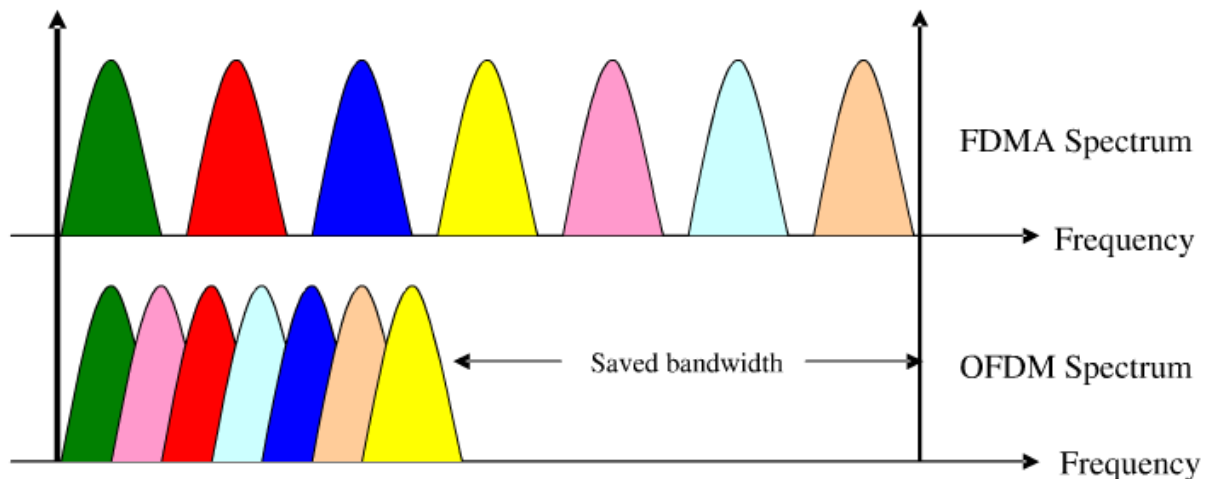
Η ποιότητα ενός ασύρματου μέσου μετάδοσης μπορεί να περιγραφεί από τρεις συνιστώσες, οι οποίες είναι ο ρυθμός μετάδοσης, η εμβέλεια και η αξιοπιστία. Συνήθως αν προσπαθήσουμε να αυξήσουμε ένα χαρακτηριστικό θα είναι εις βάρος των άλλων δύο. Για παράδειγμα όταν αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης, μειώνεται η εμβέλεια και η αξιοπιστία. Ομοίως όταν αυξάνεται η εμβέλεια, μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης και όταν αυξάνεται η αξιοπιστία μειώνονται η ταχύτητα και η εμβέλεια. Η χρήση κεραιών MIMO σε συνδυασμό με την τεχνική OFDM, δίνει την δυνατότητα να αυξάνονται παράλληλα και τα τρία παραπάνω χαρακτηριστικά.

3.2 Η τεχνολογία OFDM

Η OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) είναι μια τεχνική διαμόρφωσης σήματος, που σήμερα βρίσκει πολλές χρήσεις στις ασύρματες επικοινωνίες. Η OFDM χρησιμοποιείται από τα δίκτυα Wi-Fi 802.11a και 802.11g στην μπάντα των 5 και 2.4 GHz αντίστοιχα. Επίσης είναι η βασική ραδιοδιεπαφή για τα δίκτυα νέας γενιάς και ενσωματώνεται στις τεχνολογίες WiMAX και LTE, όπως επίσης και στις επόμενες εκδόσεις τους που αναμένονται στο μέλλον.

Βασική ιδέα της OFDM

Στην OFDM το σήμα αποτελείται από πολλά φέροντα τα οποία είναι ειδικά διαμορφωμένα σε μικρή απόσταση. Στις συμβατικές τεχνικές διαμόρφωσης, για να ξεχωρίζουν τα σήματα και να αποκωδικοποιούνται πιο εύκολα στον παραλήπτη, υπάρχει πάντα μία απόσταση ασφαλείας (guard band). Αντιθέτως στην OFDM οι άκρες των υπο-φερόντων σημάτων επικαλύπτονται, αλλά δεν δημιουργούν παρεμβολές γιατί οι συχνότητες στις οποίες διαμορφώνονται, είναι ορθογωνικές μεταξύ τους (orthogonal). Εξαιτίας της επικάλυψης των σημάτων γίνεται σημαντική οικονομία στη χρήση φάσματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19. Κάθε υπο-φέρων σήμα, δημιουργεί μια ροή δεδομένων με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης από την αρχική. Λόγω των χαμηλών ρυθμών μετάδοσης και τις διαίρεσης του σήματος αποφεύγονται οι παρεμβολές και γίνεται αποδοτική χρήση του ραδιοφάσματος. Επειδή το σήμα διαιρείται σε τμήματα, τυχόν παρεμβολές επηρεάζουν μόνο μεμονωμένα κομμάτια της μετάδοσης και το σήμα μπορεί να ανακατασκευαστεί στον παραλήπτη με εξειδικευμένες τεχνικές ελέγχου και διόρθωσης λαθών. Η τεχνική διόρθωσης σφαλμάτων προϋποθέτει την μετάδοση επιπλέον πληροφορίας, η οποία μεταφέρεται σε ξεχωριστά σήματα από τα κυρίως δεδομένα.



Εικόνα 19 Αποδοτικότερη χρήση φάσματος με OFDM

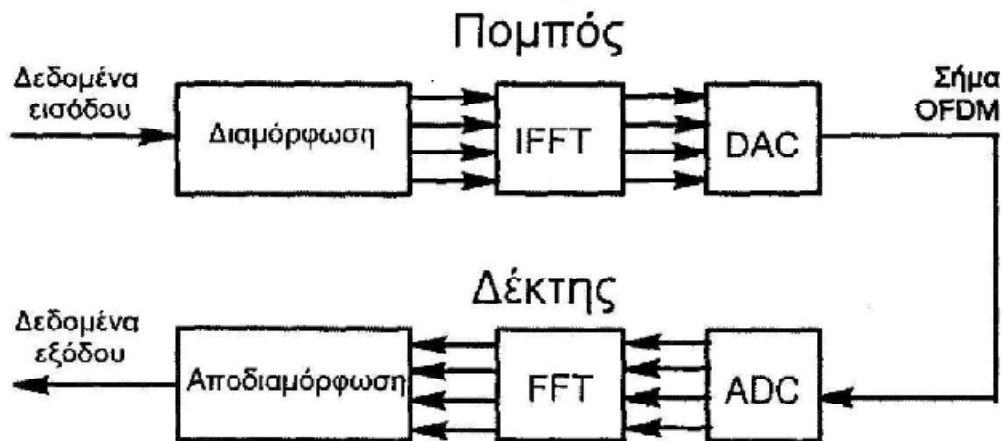
Παραλλαγές της OFDM

Υπάρχουν κάποιες παραλλαγές της OFDM, οι οποίες αλλάζουν τη βασική λειτουργία ή προσθέτουν επιπλέον στοιχεία :

- **COFDM (Coded OFDM)** – Μια μορφή OFDM, όπου η κωδικοποίηση ελέγχου και διόρθωσης σφαλμάτων ενσωματώνεται στο ίδιο το σήμα.
- **WOFDM (Wideband OFDM)** – Το διάστημα μεταξύ των υπο-φερόντων είναι λίγο μεγαλύτερο, αλλά τα σήματα πάλι επικαλύπτονται σε μικρότερο βαθμό. Έτσι μειώνεται η πιθανότητα λάθους κατά την μετάδοση και δεν επηρεάζεται η απόδοση. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στο Wi-Fi.
- **VOFDM (Vector OFDM)** – Αυτή η μορφή OFDM υλοποιείται σε συνδυασμό με την τεχνολογία κεραιών MIMO. Με τις κεραιές MIMO αξιοποιείται το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών του σήματος (multipath propagation) και χρησιμοποιείται προς όφελος της μετάδοσης.
- **OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)** – Είναι η παραλλαγή της OFDM που δίνει δυνατότητες πολλαπλής πρόσβασης και χρησιμοποιείται στις κινητές επικοινωνίες.

Κάθε μια από τις παραπάνω παραλλαγές στηρίζεται στη βασική αρχή της διαίρεσης του σήματος σε μικρότερα υπο-φέροντα σήματα χαμηλότερης ταχύτητας και ορθογωνικά μεταξύ τους. Στον δέκτη γίνεται η σύνθεση και ξανασηματίζεται το αρχικό σήμα. Η OFDM έχει γνωρίσει μεγάλη επιτυχία στα ασύρματα δίκτυα, εξαιτίας της ταχύτητας, φασματικής απόδοσης και αντοχής στις παρεμβολές.

Λειτουργία Συστήματος OFDM



Εικόνα 20 Ενδεικτική λειτουργία συστήματος OFDM

Πομπός:

Μετατροπή από σειριακό σε παράλληλο. Τα δεδομένα προς μετάδοση ομαδοποιούνται σε λέξεις, το μέγεθος των οποίων καθορίζεται από την διαμόρφωση, που χρησιμοποιείται (PSK, QAM). Μετά τον χωρισμό κάθε λέξη αντιστοιχίζεται σε διαφορετικό υπό-φέρων σήμα.

Διαμόρφωση κάθε καναλιού. Κάθε κανάλι διαμορφώνεται με βάση τη λέξη που του αντιστοιχεί.

Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier (Inverse Fourier Transform – IFT). Το περιεχόμενο κάθε καναλιού γίνεται είσοδος σε ένα κύκλωμα IFT.

Μετατροπή ψηφιακού σε αναλογικό σήμα (Digital to Analog – DAC). Η έξοδος του IFT μετατρέπεται σε αναλογική μορφή κατάλληλη για μετάδοση.

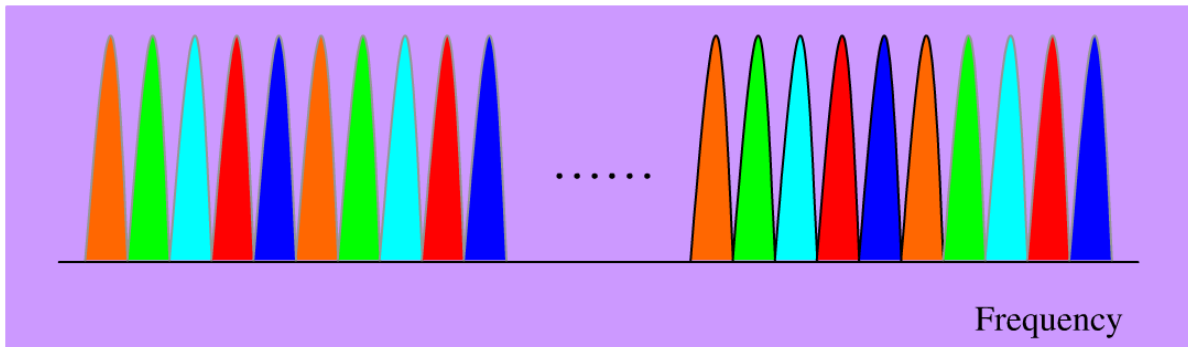
Δέκτης:

Ο δέκτης εκτελεί την αντίστροφη λειτουργία για να παράγει το αρχικό σήμα.

OFDMA

Η OFDM θεωρείται τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης και όχι μέθοδος πρόσβασης στο κανάλι για πολλαπλούς χρήστες. Η OFDM όμως μπορεί να συνδυαστεί με τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης χρησιμοποιώντας χρόνο, συχνότητα ή κωδικοποίηση, για να ξεχωρίζει τους χρήστες. Η OFDMA είναι μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, που αξιοποιεί τα υπο-φέροντα σήματα της OFDM. Τα υπο-φέροντα σήματα, διαιρούνται σε ομάδες και κάθε ομάδα

ονομάζεται υπο-kanάλι (sub-channel). Τα υπο-φέροντα σήματα που αποτελούν ένα κανάλι δεν χρειάζεται να είναι γειτονικά (Εικόνα 21).

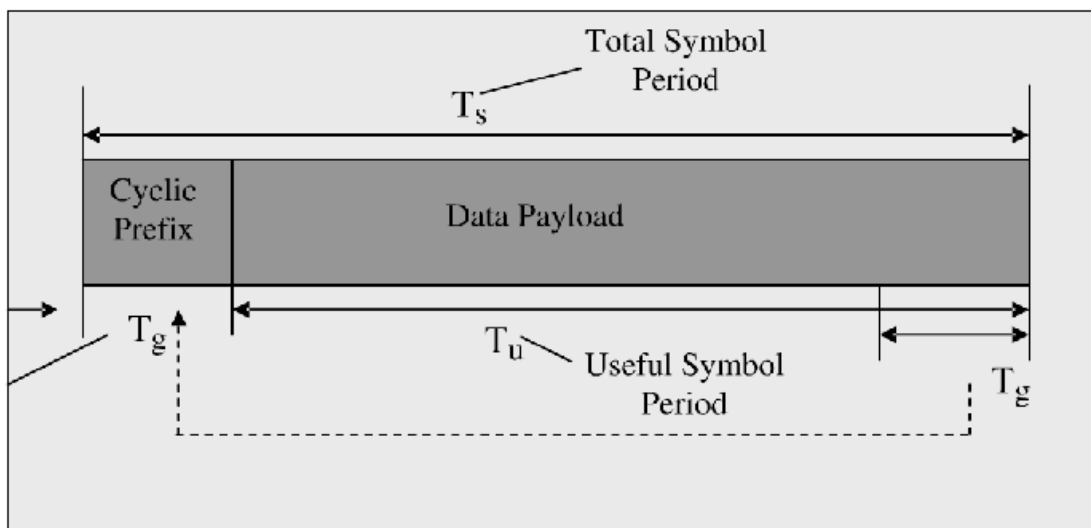


Εικόνα 21 OFDMA - Υπο-φέροντα με το ίδιο χρώμα αποτελούν ένα υπο-kanάλι

Η OFDMA παρέχει πολύπλεξη ροών δεδομένων, από πολλούς χρήστες σε υποkanάλια του downlink και του uplink. Η πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται με την ανάθεση διαφορετικών υπο-kanαλιών σε διαφορετικούς χρήστες. Στο downlink ένα υπο-kanάλι μπορεί να αναλογεί σε πολλούς δέκτες και στο uplink ένα υπο-kanάλι μπορεί να αναλογεί σε πολλούς μεταδότες.

Cyclic Prefix

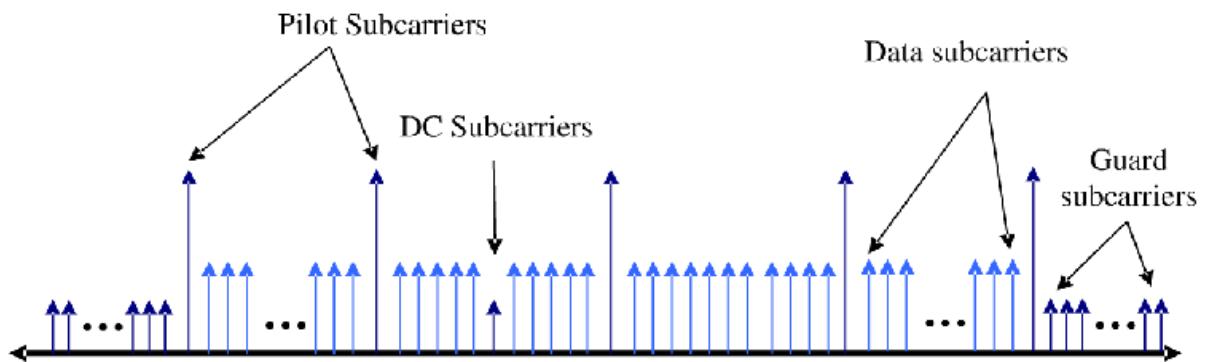
Στην OFDMA, η διασυμβολική παρεμβολή (InterSymbol Interference – ISI), εξαλείφεται τελείως με την χρήση του Cyclic Prefix (CP). Το CP είναι στην ουσία ένα διάστημα φρουράς και αποτελείται από ένα κομμάτι δεδομένων από το τέλος του μεταδιδόμενου συμβόλου, τα οποία τοποθετούνται και στην αρχή του (Εικόνα 22). Το CP καταπολεμά τις καθυστερήσεις κατά την μετάδοση και έχει αποτέλεσμα όταν η καθυστέρηση είναι ίση ή μικρότερη από το μήκος του. Μειονέκτημα του CP είναι ότι «σπαταλά» διαθέσιμο bandwidth.



Εικόνα 22 Cyclic Prefix

Δομή Συμβόλων

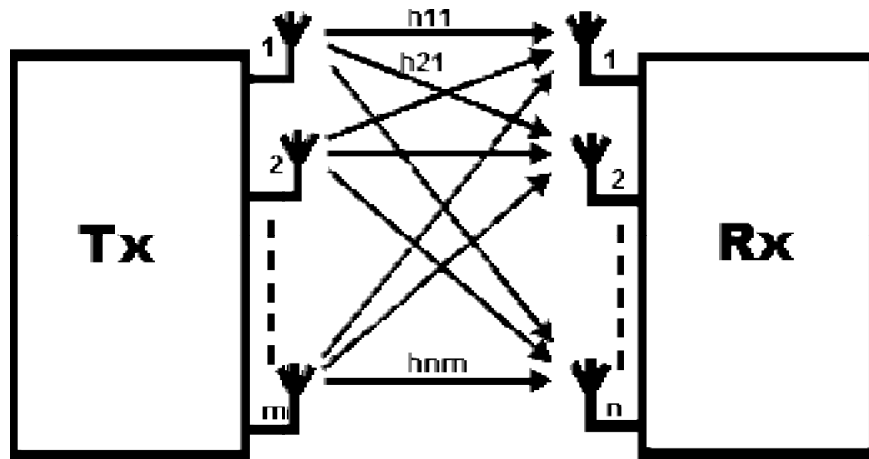
Οι OFDM και OFDMA έχουν τα σύμβολα τους δομημένα κατά τον ίδιο τρόπο. Στην OFDMA κάθε σύμβολο αποτελείται από υπο-каналία(sub-channels), τα οποία μεταφέρουν πολλαπλά υπο-φέροντα σήματα με πληροφορία (data subcarriers), pilot subcarriers ως συχνότητες αναφοράς για διάφορες εκτιμήσεις, DC subcarrier ως η κεντρική συχνότητα και guard subcarriers ως διαστήματα φρουράς μεταξύ διαφορετικών σημάτων. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23 Δομή υπο-φερόντων σημάτων OFDMA

3.3 Η τεχνολογία MIMO

Ένα από τα σημαντικότερα δομικά συστατικά των δικτύων νέας γενιάς, είναι τα συστήματα MIMO. Το MIMO είναι μια εξειδικευμένη τεχνολογία κεραιών, που μπορεί να μεταφέρει τέσσερις με πέντε φορές περισσότερα δεδομένα απ' ό,τι τα σημερινά δίκτυα. Ένα δίκτυο που υλοποιεί τεχνολογία MIMO, παρέχει την δυνατότητα επεκτασιμότητας που χρειάζεται, ώστε να εξυπηρετεί των όλο και αυξανόμενο αριθμό των χρηστών και την μεγάλη κίνηση που δημιουργούν. Με τις κεραιές MIMO, δημιουργούνται πολλές παράλληλες ροές δεδομένων μεταξύ πολλαπλών κεραιών σε πομπό και δέκτη (Εικόνα 24). Χαρακτηριστικό των κεραιών MIMO είναι ότι δεν χρειάζεται να σπαταληθούν περισσότερες συχνότητες, για να επιτευχθούν μεγαλύτερες ταχύτητες και να υποστηριχθούν περισσότεροι χρήστες. Σήμερα πολλές ασύρματες τεχνολογίες, όπως το Wi-Fi, LTE και WiMAX χρησιμοποιούν το σύστημα κεραιών MIMO για τα πλεονεκτήματά τους.



Εικόνα 24 Πολλαπλές κεραίες και ροές δεδομένων σε ένα σύστημα MIMO

Diversity - Ποικιλομορφία

Λέξη κλειδί στα συστήματα MIMO, είναι η λέξη **diversity** (ποικιλομορφία). Βασικός στόχος είναι η παροχή πολλαπλών ροών (streams) προς τον δέκτη, που περιέχουν την ίδια σήμα, δηλαδή την ίδια πληροφορία. Οι ροές αυτές ακολουθούν διαφορετικά μονοπάτια και η πιθανότητα, διαφορετικές ροές να περιέχουν λάθη στα ίδια σημεία είναι πολύ μικρές. Έτσι μια σύνδεση γίνεται αποδοτική με μεγάλη σταθερότητα και μικρό αριθμό λαθών. Υπάρχουν τρεις τύποι ποικιλομορφίας :

- **Time Diversity (Χρονική Ποικιλομορφία).** Ένα μήνυμα μπορεί να μεταδοθεί σε διαφορετικούς χρόνους, με χρήση χρονοθυρίδων.
- **Frequency Diversity (Ποικιλομορφία Συχνότητας).** Αυτός ο τύπος ποικιλομορφίας παρέχει αντίγραφο του αρχικού σήματος στο πεδίο της συχνότητας. Αυτό βεβαιώνει ότι τα διαφορετικά μέρη του σχετικού φάσματος, θα υποστούν ανεξάρτητες εξασθενίσεις.
- **Space Diversity (Χωρική Ποικιλομορφία).** Καθώς λόγω ανακλάσεων τα σήματα μπορεί να διασχίζουν διαφορετικές διαδρομές στο χώρο, οι πολλαπλές κεραίες εκμεταλλεύονται αυτό το φαινόμενο για καλύτερη απόδοση.

Στα συστήματα MIMO υπάρχουν πολλαπλές κεραίες σε πομπό και δέκτη ώστε να δημιουργούνται πολλαπλές διαδρομές τις οποίες μπορεί να ακολουθήσει το σήμα με κάθε κεραία να ορίζει διαφορετική διαδρομή. Αν οι κεραίες αλλάξουν θέση έστω και λίγο, οι διαδρομές αυτές αλλάζουν επίσης. Οι πολλαπλές διαδρομές που ακολουθεί το σήμα οφείλονται στην ύπαρξη αντικειμένων στο χώρο που προκαλούν ανακλάσεις ή σκέδαση του σήματος. Σε προηγούμενες τεχνολογίες, αυτό το φαινόμενο εισήγαγε μόνο θόρυβο στη μετάδοση. Με την χρήση MIMO, οι διαφορετικές διαδρομές μπορούν να χρησιμοποιηθούν προς όφελος της μετάδοσης, μειώνοντας τον λόγω σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) ή αυξάνοντας την χωρητικότητα του καναλιού. Οι δύο βασικές μορφές MIMO είναι οι παρακάτω :

- **Spatial Diversity (Χωρική Ποικιλομορφία).** Σαν μια στενότερη έννοια αυτή η μορφή MIMO ασχολείται με την μείωση του Signal to Noise Ratio και την βελτιστοποίηση της αξιοπιστίας του συστήματος, όσον αφορά τις εξασθενίσεις που μπορεί να δεχτεί.
- **Spatial Multiplexing (Χωρική Πολυπλεξία).** Αυτή η μορφή MIMO παρέχει αύξηση στο ρυθμό μετάδοσης (ή στην χωρητικότητα) για το ίδιο εύρος ζώνης και χωρίς πρόσθετες δαπάνες ισχύος.

Τύποι MIMO

Οι διαφορετικοί τύποι MIMO αφορούν τον αριθμό εισόδων και εξόδων ως προς το ασύρματο κανάλι επικοινωνίας (radio link). Είσοδος θεωρείται ο αποστολέας που εκπέμπει στο κανάλι και έξοδος είναι η άλλη άκρη του καναλιού, δηλαδή ο δέκτης. Υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά είδη :

- **SISO** – Single Input Single Output (Μονής εισόδου Μονής εξόδου)
- **SIMO** – Single Input Multiple Output (Μονής εισόδου Πολλαπλής εξόδου)
- **MISO** – Multiple Input Single Output (Πολλαπλής εισόδου Μονής εξόδου)
- **MIMO** – Multiple Input Multiple Output (Πολλαπλής εισόδου Πολλαπλής εξόδου)

SISO

Η πιο απλή μορφή ραδιοσύνδεσης είναι η SISO. Αποτελείται από ένα απλό κανάλι με πομπό και δέκτη να έχουν από μία κεραία. Δεν υποστηρίζεται ποικιλομορφία και δεν χρειάζεται καμία επιπλέον επεξεργασία του σήματος κατά τη μετάδοση.



Εικόνα 25 SISO

Το πλεονέκτημα των SISO συστημάτων είναι η απλότητα λόγω έλλειψης ποικιλομορφίας και περιορισμένου αριθμού κεραιών. Το τίμημα της απλότητας όμως είναι η περιορισμένη απόδοση. Παρεμβολές και εξασθένηση σήματος επηρεάζουν τη μετάδοση και η χωρητικότητα του καναλιού είναι περιορισμένη.

SIMO

Στα συστήματα SIMO ο πομπός έχει μία κεραία και ο δέκτης δύο ή περισσότερες. Ονομάζεται αλλιώς και ποικιλομορφία λήψης. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται συνήθως σε δέκτες που λαμβάνουν σήματα από πολλές ανεξάρτητες πηγές για καταπολέμηση της εξασθένησης. Τα συστήματα SIMO είναι εύκολα υλοποιήσιμα, αλλά μειονεκτούν στο ότι απαιτούν αυξημένη επεξεργαστική δυνατότητα στον δέκτη, λόγω ύπαρξης πολλαπλών

κεραιών. Όταν ο δέκτης είναι κινητό τηλέφωνο, αρχίζουν να υπάρχουν περιορισμοί στην επεξεργαστική δυνατότητα λόγω μεγέθους, κόστους και εξάντλησης της μπαταρίας.



Εικόνα 26 SIMO

Υπάρχουν δύο μορφές SIMO :

- **Switched diversity SIMO.** Σε αυτή τη μορφή, ο δέκτης ελέγχει ποια από τις κεραίες δέχεται το ισχυρότερο σήμα και εναλλάσσει τη λειτουργία του σε αυτήν.
- **Maximum ratio combining SIMO.** Εδώ τα σήματα από τις πολλαπλές κεραίες συνδυάζονται για να ενισχύσουν τη λήψη.

MISO

Το MISO που λέγεται και ποικιλομορφία αποστολής (Transmit Diversity – Tx-Diversity), αφορά την ύπαρξη πολλαπλών κεραιών στον πομπό και μίας κεραίας στον δέκτη. Κάθε κεραία εκπέμπει την ίδια πληροφορία δημιουργώντας πλεονασμό. Ο δέκτης από την μεριά του μαζεύει τα βέλτιστα κομμάτια από τις πολλαπλές ροές που δέχεται και σχηματίζει ένα ισχυρό σήμα το οποίο αποκωδικοποιεί για να διαβάσει πληροφορία.



Εικόνα 27 MISO

Το πλεονέκτημα του MISO είναι ότι το βάρος του αυξημένου επεξεργαστικού φόρτου και οι πολλαπλές κεραίες μεταφέρονται στον πομπό. Στην κινητή τηλεφωνία αυτό είναι μεγάλο πλεονέκτημα καθώς οδηγεί σε μικρότερες συσκευές με χαμηλότερη επεξεργαστική δυνατότητα και ενεργειακή κατανάλωση.

MIMO

Στα συστήματα MIMO υπάρχουν πάνω από μια κεραίες και στον πομπό και στον δέκτη. Το MIMO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσει την ευστάθεια και την ταχύτητα μετάδοσης του καναλιού.



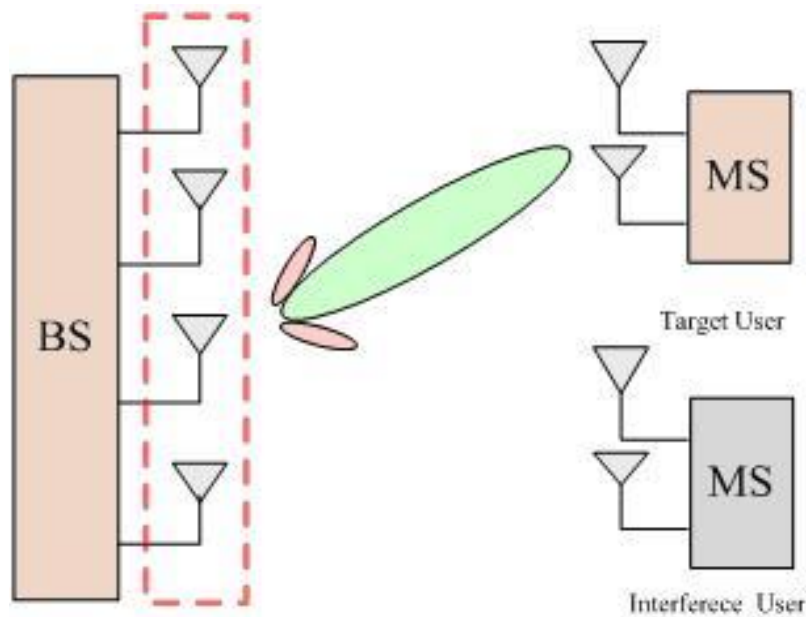
Εικόνα 28 MIMO

Για να αξιοποιούνται πλήρως τα συστήματα MIMO, πρέπει να γίνεται η ανάλογη κωδικοποίηση σε κάθε κανάλι, ώστε να μπορεί να γίνει διαχωρισμός των δεδομένων από τα διαφορετικά κανάλια που δημιουργούνται. Για να γίνει αυτό χρειάζεται πομπός και δέκτης να έχουν αυξημένες επεξεργαστικές δυνατότητες με αντάλλαγμα όμως σταθερότητα και μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης.

Beamforming – Smart Antennas

Το Beamforming (διαμόρφωση δέσμης), είναι μια κατευθυντική τεχνολογία που μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα συστήματα κεραιών. Υπάρχουν συγκεκριμένα κατευθυντικά μοτίβα εκπομπής και χρησιμοποιούνται έξυπνες κεραίες, ώστε να επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος λειτουργίας ανάλογα με τις συνθήκες. Οι έξυπνες κεραίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

- **Phased Array systems.** Τα phased array συστήματα έχουν συγκεκριμένο αριθμό από προκαθορισμένα μοτίβα εκπομπής, τα οποία αλλάζουν αυτόματα ανάλογα με τις συνθήκες.
- **Adaptive Array systems (AAS).** Αυτός ο τύπος κεραιών χρησιμοποιεί προσαρμοστικές τεχνικές και υποστηρίζει απεριόριστο αριθμό μοτίβων που αλλάζουν σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 29 Beamforming – Η κεραία στρέφει το σήμα προς την κατεύθυνση του χρήστη

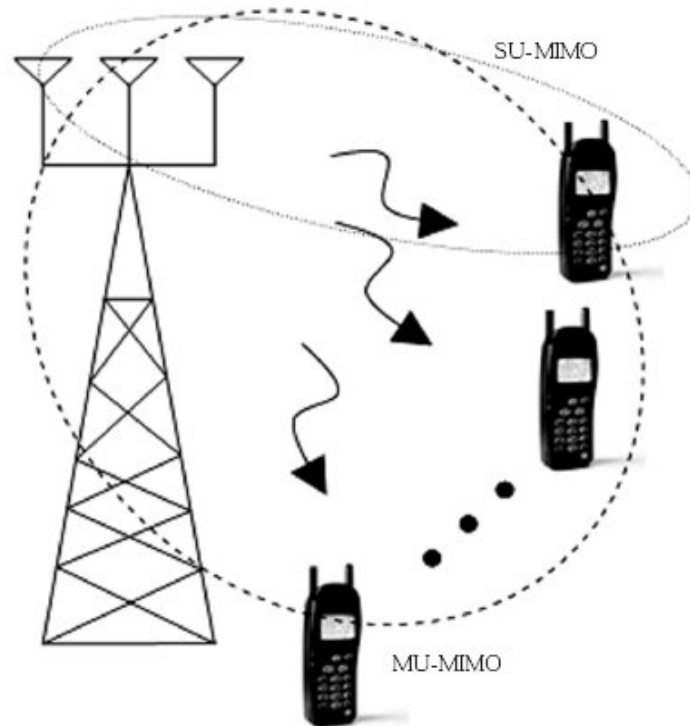
Στα MIMO συστήματα τύπου phased array, ο πομπός προσδιορίζει την κατεύθυνση του εισερχόμενου σήματος από την κινητή συσκευή και αλλάζει αυτόματα σε ένα από τα προκαθορισμένα μοτίβα, ώστε να προσαρμοστεί ανάλογα η δέσμη εκπομπής. Το μειονέκτημα σε αυτή την τεχνική είναι ότι η προκαθορισμένες θέσεις εκπομπής δεν έχουν πάντα την επιθυμητή κατεύθυνση. Αυτό το πρόβλημα λύνουν τα adaptive array MIMO συστήματα, τα οποία μπορούν να κατευθύνουν την εκπομπή ακριβώς στην κατεύθυνση που χρειάζεται και μάλιστα σε πραγματικό χρόνο. Τα adaptive array συστήματα είναι κατάλληλα για κινητές επικοινωνίες καθώς προσαρμόζονται αμέσως στην κινητικότητα που υπάρχει στο δίκτυο. Λόγω τις εξειδικευμένης λειτουργίας τους τα adaptive array συστήματα παρουσιάζουν αυξημένη πολυπλοκότητα.

MU-MIMO

Το MU-MIMO (Multi-User MIMO) προσφέρει μια μεθοδολογία σύμφωνα με την οποία είναι δυνατός ο χωρικός διαχωρισμός των καναλιών επικοινωνίας για πολλαπλούς χρήστες. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με επιπλέον εξοπλισμό και κεραίες, αλλά δεν φέρει επιβαρύνσεις όσον αφορά την μεγαλύτερη κατανάλωση εύρους ζώνης όπως στις FDMA, TDMA και CDMA, όπου η αύξηση του αριθμού των χρηστών συνεπάγεται με την χρήση περισσότερων συχνοτήτων. Όταν χρησιμοποιείται χωρική πολύπλεξη (spatial multiplexing) με MU-MIMO, οι παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών χρηστών στο ίδιο κανάλι αντιμετωπίζονται με την χρήση επιπλέον κεραιών και επεξεργαστικής ισχύος, ώστε να μπορεί να γίνει χωρικός διαχωρισμός των διαφορετικών σημάτων. Το MU-MIMO χωρίζεται σε δυο περιπτώσεις :

- **Uplink – Multiple Access Channel (MAC).** Στο MAC οι κινητοί σταθμοί εκπέμπουν προς των σταθμό βάσης. Το MAC βασίζεται στις ίδιες έννοιες που ισχύουν και για το απλό single user MIMO, και απλά επεκτείνεται για λογαριασμό πολλαπλών χρηστών.

- **Downlink – Broadcast Channel (BC).** Στο BC εκπέμπει προς τις κινητές συσκευές. Το BC είναι περισσότερο πολύπλοκο και απαιτεί μεθόδους για ακύρωση παρεμβολών (interference cancelation), για να μπορεί να γίνει ο διαχωρισμός των δεδομένων σε κάθε χρήστη.



Εικόνα 30 MU-MIMO

Κεφάλαιο 4^ο LTE



Εικόνα 31 LTE

4.1 Εισαγωγή

Το **LTE – Long Term Evolution**, αποτελεί ένα πρότυπο του οργανισμού 3GPP και σχεδιάστηκε για να αποτελέσει την επόμενη μεγάλη τεχνολογική εξέλιξη, μετά το 3G. Αρχικά το LTE μαζί με άλλα πρότυπα, όπως το WiMAX και το HSPA+ ονομάστηκε 3.9G αλλά παρόλα αυτά αργότερα προωθήθηκε ως 4G. Σήμερα, οι LTE συσκευές κάνουν την εμφάνιση τους στην αγορά ως 4G μέχρι να εμφανιστεί το “real 4G” που είναι το LTE-Advanced. Τα πρώτα βήματα για την ανάπτυξη του 3GPP Long Term Evolution (LTE), ξεκίνησαν από το 2004 με τον πρώτο ορισμό των στόχων, που έπρεπε να επιτευχθούν από το νέο πρότυπο. Αν και εκείνη την περίοδο το προγενέστερο HSDPA δεν είχε αναπτυχθεί πλήρως, είχε ήδη ξεκινήσει ο σχεδιασμός για μια καινούργια τεχνολογία. Για να βγει ένα καινούργιο πρότυπο κινητών δικτύων στην αγορά, χρειάζονται κατά προσέγγιση πάνω από πέντε χρόνια από τον σχεδιασμό μέχρι την πλήρη εμπορική ανάπτυξη και διάθεση στο κοινό. Γι’ αυτό οι τυποποιήσεις ξεκινάνε αρκετά νωρίς, ώστε η νέα τεχνολογία να είναι διαθέσιμη όταν θα υπάρχει ανάγκη για αναβάθμιση.

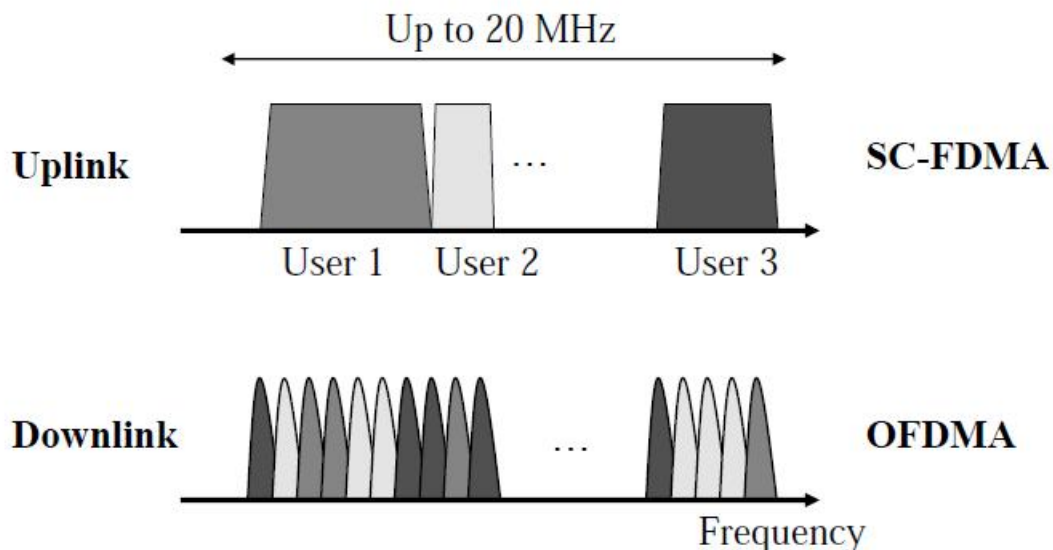
Όσο τα ενσύρματα μέσα επικοινωνίας βελτιώνονται, πρέπει να υπάρχει ανάλογη εξέλιξη και στις ασύρματες επικοινωνίες, ώστε οι εφαρμογές να δουλεύουν το ίδιο αποδοτικά και μέσω ασύρματων συνδέσεων. Επίσης υπάρχουν ανταγωνιστικές τεχνολογίες, όπως κατά κύριο λόγο, το πρότυπο 802.16 της IEEE, και ο 3GPP είχε ως στόχο να αναπτύξει μια τεχνολογία με ίδιες και ακόμα καλύτερες επιδόσεις. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες στις νέες ασύρματες τεχνολογίες είναι λογικό επακόλουθο της καλύτερης φασματικής απόδοσης.

Το LTE είχε ως στόχο να ξεπεράσει σε απόδοση τα ήδη υπάρχοντα εκείνη την εποχή πρότυπα της 3GPP, όπως το HSPA. Στις προδιαγραφές η ταχύτητα έπρεπε να φτάνει τουλάχιστον τα 100 Mbps στο downlink και τα 50 Mbps στο uplink. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες είναι η μείωση των καθυστερήσεων του δικτύου και η μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από τις φορητές συσκευές για αποδοτικότερη χρήση multimedia υπηρεσιών, χωρίς ανάγκη για επαναφόρτιση. Συνοπτικά οι βασικοί λειτουργικοί στόχοι του LTE είναι :

- Φασματική απόδοση 4 φορές μεγαλύτερη από του HSPA.
- Ταχύτητα 100 Mbps στο downlink και 50 Mbps στο uplink.
- Latency < 10 ms.
- Βελτιστοποιημένο δίκτυο μεταγωγής πακέτων (Packet Switched).
- Υψηλά επίπεδα υποστήριξης κινητικότητας και ασφάλειας.
- Μικρή κατανάλωση ενέργειας στις φορητές συσκευές.
- Ευέλικτο εύρος ζώνης καναλιού από 1.5 έως 20 MHz.
- Χρήση TDD και FDD στην ίδια αρχιτεκτονική.

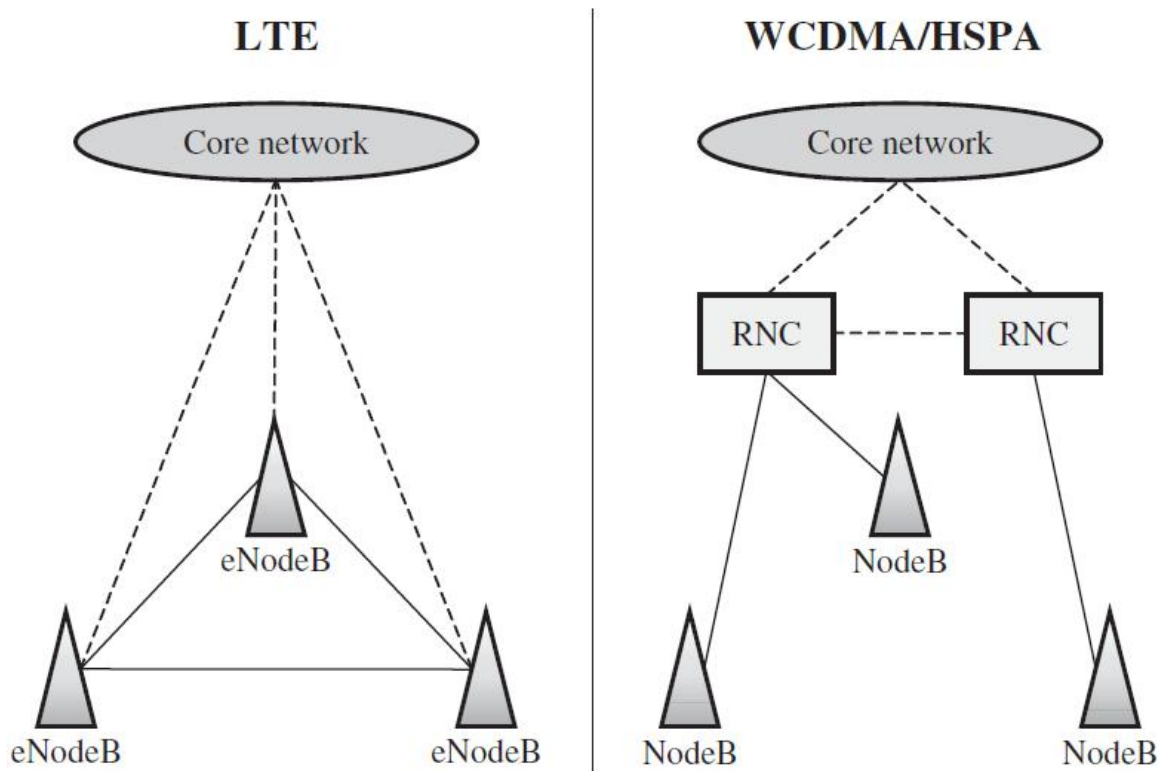
4.1.1 Προεπισκόπηση

Βασικά κριτήρια για να πετύχει το LTE τους στόχους του, είναι η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιεί και η νέα απλοποιημένη αρχιτεκτονική του. Στο κομμάτι της πολλαπλής πρόσβασης στο downlink χρησιμοποιείται η τεχνική OFDMA και στο uplink η SC-FDMA. Αυτές οι τεχνικές μέσω της ορθογωνικότητας, προσφέρουν μετάδοση με μειωμένες παρεμβολές και αυξημένη χωρητικότητα. Στο uplink η ανάθεση συχνοτήτων ανά χρήστη είναι συνεχόμενη για ενιαία μετάδοση, με χρήση ενός φέροντος σήματος και στο downlink η επιλογή υπο-φερόντων για την μετάδοση μπορεί να γίνει από διαφορετικά μέρη του φάσματος. Η χρήση ενός φέροντος σήματος για μετάδοση στο uplink σχεδιάστηκε επίσης για βελτιστοποιημένη χρήση ισχύος κατά τη μετάδοση, για οικονομία μπαταρίας στη συσκευή. Το LTE είναι ευέλικτο φασματικά και υποστηρίζει μεταβλητό εύρος ζώνης από 1.4 έως 20 MHz ανάλογα με την διαθεσιμότητα του φάσματος. Στην Εικόνα 32, παρουσιάζεται η διαφορά των δύο τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιεί το LTE.



Εικόνα 32 OFDMA και SC-FDMA στο LTE.

Ένα δίκτυο υψηλών ταχυτήτων, όπως του LTE πρέπει να βασίζεται σε μια αποδοτική αρχιτεκτονική με εξελιγμένες τεχνικές μετάδοσης. Η νέα αρχιτεκτονική του LTE ονομάζεται **Evolved Packet System (EPS)** και αποτελείται από το **Evolved UTRAN (E-UTRAN)**, που είναι το κομμάτι της ασύρματης πρόσβασης και από το **Evolved Packet Core (EPC)** που αποτελεί τον πυρήνα του δικτύου. Το EPC είναι επίσης γνωστό και ως **System Architecture Evolution (SAE)**. Στόχος κατά την σχεδίαση του δικτύου από τον 3GPP ήταν ένα δίκτυο με μεγάλες προοπτικές επεκτασιμότητας για υποστήριξη της ολοένα και μεγαλύτερης κίνησης και ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων μέσω της μείωσης των λογικών μερών του δικτύου. Για αυτόν τον λόγω τα πρωτόκολλα ασύρματης μετάδοσης, η διαχείριση κινητικότητας, η συμπίεση δεδομένων και οι αναμεταδώσεις πακέτων, μεταφέρθηκαν από το Radio Network Controller (RNC) που ήταν σε προηγούμενες αρχιτεκτονικές, στον σταθμό βάσης του LTE, τον **eNodeB**. Επίσης το κεντρικό δίκτυο χωρίζεται σε δύο βασικά λογικά επίπεδα, το επίπεδο χρήστη (**User Plane**) και το επίπεδο ελέγχου (**Control Plane**). Το user plane είναι κυρίως δεδομένα του χρήστη και το control plane είναι τα μηνύματα ελέγχου που ανταλλάσσει το δίκτυο. Λόγω της ανάθεσης περισσότερων λειτουργιών στους σταθμούς βάσης, σε σχέση με το HSPA, το δίκτυο απλοποιείται και το user plane αποκτά απευθείας πρόσβαση στο κεντρικό δίκτυο (Εικόνα 33).



Εικόνα 33 Σύγκριση αρχιτεκτονικής LTE - HSPA.

4.2 Από το UMTS στο LTE

Στόχος της προσπάθειας του 3GPP που ξεκίνησε το 2004, ήταν να αποφασιστούν τα μελλοντικά μακροπρόθεσμα σχέδια εξέλιξης του UMTS, το οποίο αποτέλεσε τον βασικό αντιπρόσωπο της 3^{ης} γενιάς. Το UMTS επίσης δημιουργήθηκε από μια αντίστοιχη οργανωμένη προσπάθεια τυποποίησης του 3GPP, όπου εξετάστηκαν πολλές τεχνολογίες και τελικά επιλέχθηκε το W-CDMA. Σήμερα πλέον οι έννοιες UMTS και W-CDMA χρησιμοποιούνται αλληλένδετα όταν γίνεται αναφορά σε ένα δίκτυο UMTS, ενώ πριν γίνει η επιλογή δεν ίσχυε το ίδιο. Κατά παρόμοιο τρόπο το LTE σήμερα χαρακτηρίζεται από τις τεχνολογίες του, οι οποίες θεωρούνται εξέλιξη του UMTS, αλλά παρόλα αυτά δεν έχουν πολλά κοινά σημεία.

Το RAN (Radio Access Network) του UMTS αποτελείται από δύο βασικά μέρη :

- 1) **UMTS Terrestrial Radio Access (UTRA)** που περιλαμβάνει το air interface και το UE.
- 2) **UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)** που περιλαμβάνει το Radio Network Controller (RNC) και τον σταθμό βάσης γνωστό και ως NodeB.

Επειδή το LTE αποτελεί εξέλιξη (Evolution) του UMTS, τα αντίστοιχα μέρη του ονομάζονται **Evolved UTRA (E-UTRA)** και **Evolved UTRAN (E-UTRAN)**. Πέρα από το RAN όμως το LTE αποτελείται και από το νέο All-IP πυρήνα, που ονομάζεται System Architecture Evolution (SAE) ή Evolved Packet Core (EPC). Ο συνδυασμός EPC και E-UTRAN αποτελούν το Evolved Packet System (EPS). Στην βιβλιογραφία, ανάλογα με το πλαίσιο που χρησιμοποιούνται, οι όροι LTE, E-UTRA, E-UTRAN, SAE, EPC, EPS μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν όλο το δίκτυο ή ένα μέρος του.

Τα χαρακτηριστικά των διαφόρων τεχνολογιών του 3GPP ορίζονται σε έγγραφα που οργανώνονται σε εκδόσεις (Releases). Μέχρι το 2000 η ονοματολογία ακολουθούσε την χρονιά της έκδοσης του κάθε release, με το τελευταίο να ονομάζεται Release '99. Μετά το 2000 αυτός ο τρόπος εγκαταλείφτηκε και η επόμενη έκδοση ονομάστηκε Release 4. Για κάθε release ορίζεται μια ημερομηνία πέρα από την οποία δεν μπορούν να γίνουν αλλαγές στα περιεχόμενα της. Η εμπορική εφαρμογή του κάθε release εξαρτάται από τον χρόνο που θα περάσει, από την στιγμή που θα σταματήσουν οι αλλαγές και προσθήκες, μέχρι την στιγμή που το release θα θεωρηθεί σταθερό και θα ξεκινήσει να εφαρμόζεται εμπορικά. Για την πρώτη έκδοση του UMTS η χρονική περίοδος μέχρι την υλοποίηση του κράτησε αρκετά χρόνια, αλλά οι επόμενες αναβαθμίσεις ήταν πιο γρήγορες. Αυτή η περίοδος περιλαμβάνει τον χρόνο που χρειάζεται για την ανάπτυξη, υλοποίηση και δοκιμή αυτών που ορίζει το release και αυτή η φάση δεν μπορεί να ξεκινήσει μέχρι το release να θεωρηθεί σταθερό.

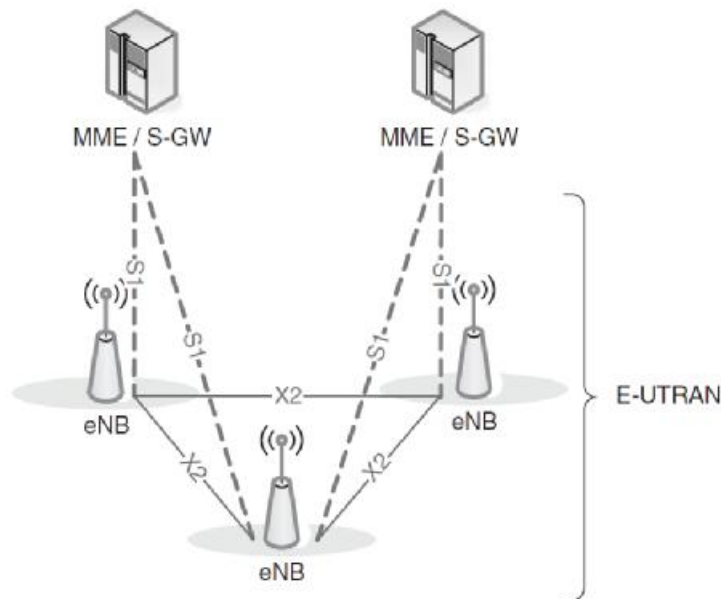
Ξεκινώντας με την καινούργια ονοματολογία, στο Release 4 ορίστηκε η στενής ζώνης (narrow band) έκδοση του W-CDMA γνωστή και ως TD-SCDMA. Το Release 5 ακολούθησε με την παρουσίαση του HSDPA που εισήγαγε την προηγμένη υποστήριξη για υπηρεσίες πακέτων στο UMTS, όπως ακριβώς και το GPRS για το GSM στην Release 97 (1998). Η ολοκλήρωση ήρθε στο Release 6 με την προσθήκη του HSUPA που μαζί με το HSDPA αποτελούν σήμερα το HSPA. Στο Release 7 ορίστηκαν οι πρώτοι στόχοι για την τεχνολογία LTE και έγιναν βελτιστοποιήσεις στο HSPA με την προσθήκη λειτουργίας MIMO με κωδικοποίηση 64 QAM στο downlink και 16 QAM στο uplink. Το LTE έλαβε πρωταγωνιστικό ρόλο στο Release 8, όπου ορίστηκαν χαρακτηριστικά του, όπως οι τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης (OFDMA, SC-FDMA) και οι προδιαγραφές για το SAE.

4.3 Αρχιτεκτονική και πρωτόκολλα

Ύστερα από τις εξελίξεις στις τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης με την τεχνική OFDMA, ακολούθησαν σκέψεις ότι η αρχιτεκτονική του συστήματος LTE πρέπει επίσης να εξελιχτεί. Η κύρια ώθηση προς την αναβάθμιση του συστήματος ήταν η βελτιστοποίηση του δικτύου αποκλειστικά για μεταγωγή πακέτων, με τις νέες ραδιοδιεπαφές να ανοίγουν επίσης νέους ορίζοντες. Επίσης από τα δίκτυα HSPA είχε γίνει αντιληπτό ότι πολλές λειτουργίες ραδιοεπικοινωνίας του δικτύου μπορούν να μεταφερθούν στον σταθμό βάσης και να δημιουργηθεί μια πιο «επίπεδη» αρχιτεκτονική. Ο ορισμός των βασικότερων σημείων της νέας αρχιτεκτονικής, έγινε στην Release 8 και οι κύριοι στόχοι που οδήγησαν εκεί παρουσιάζονται παρακάτω :

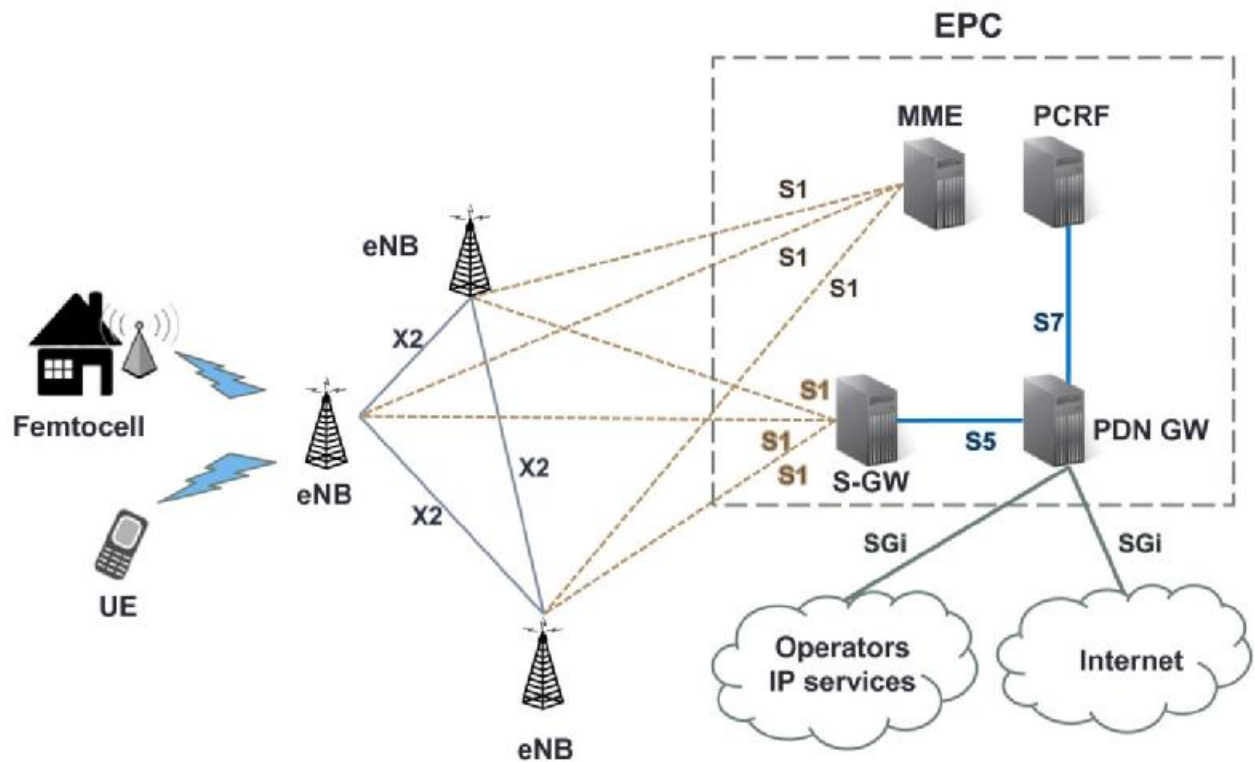
- Κατεύθυνση προς ένα καθολικό δίκτυο μεταγωγής πακέτων, χωρίς ανάγκη για υποστήριξη συστημάτων μεταγωγής κυκλώματος.
- Βελτιστοποίηση υποστήριξης υψηλότερων ταχυτήτων.
- Μείωση καθυστερήσεων παράδοσης πακέτων.
- Ολική απλοποίηση του συστήματος σε σχέση με τα προηγούμενα 3GPP συστήματα και άλλα παρόμοια ασύρματα δίκτυα.
- Βελτιστοποίηση διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων ίδιου ή διαφορετικού τύπου.

Η επίπεδη αρχιτεκτονική του LTE φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 34. Ο RNC (Radio Network Controller), που υπήρχε στο UMTS καταργήθηκε και αυτό ελαχιστοποιεί τις καθυστερήσεις στο δίκτυο. Αυτό επίσης μεταφέρει περισσότερη πολυπλοκότητα στον σταθμό βάσης eNodeB που τώρα έχει περισσότερες αρμοδιότητες. Το air interface που αποτελείται από τα OFDMA και SC-FDMA σχηματίζουν το E-UTRAN. Τα air interface υποστηρίζουν συστήματα κεραιών MIMO με έως και τέσσερις κεραιές ανά σταθμό βάσης. Τα eNodeB ενώνονται μεταξύ τους με την διεπαφή X2 και με το EPC μέσω της διεπαφής S1.



Εικόνα 34 Βασική Αρχιτεκτονική LTE.

Η νέα αρχιτεκτονική ονομάζεται Evolved Packet System (EPS). Αποτελείται από το E-UTRAN που χειρίζεται τις ασύρματες συνδέσεις του δικτύου και από το Evolved Packet Core (EPC) ή System Architecture Evolution (SAE) που είναι ο πυρήνας. Το E-UTRAN περιλαμβάνει τα air interface τους σταθμούς βάσης και τα UE. Ο πυρήνας αποτελείται από τις οντότητες MME, S-GW και P-GW. Σύμφωνα με την Release 8 του 3GPP το SAE είναι ένα πλαίσιο για μετάβαση σε ένα σύστημα με μικρότερες καθυστερήσεις και μεγαλύτερες ταχύτητες. Είναι ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτων, σχεδιασμένο για μεταφορά δεδομένων και φωνής. Η πλήρης αρχιτεκτονική φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 35 Πλήρης αρχιτεκτονική LTE

4.3.1 Βασικά μέρη δικτύου

Παρακάτω αναλύονται τα μέρη του δικτύου που φαίνονται στην Εικόνα 35.

User Equipment (UE)

Το UE, είναι η κινητή ασύρματη συσκευή που χρησιμοποιεί ο χρήστης για την επικοινωνία του. Συνήθως είναι μια μικρή συσκευή, όπως ένα κινητό τηλέφωνο, Smartphone, κάποιου είδους ασύρματη USB κάρτα ή σε μορφή ενσωματωμένου δέκτη, σε ένα laptop. Το UE αποτελείται από το Terminal Equipment που είναι το υλικό και από την USIM. Η USIM περιέχει στοιχεία του χρήστη και χρησιμοποιείται για την αναγνώριση και την αυθεντικοποίηση του από το δίκτυο. Λειτουργικά το UE αποτελεί την πλατφόρμα επικοινωνίας του χρήστη, η οποία επικοινωνεί με το δίκτυο για λειτουργίες που σχετίζονται με την εγκαθίδρυση, διατήρηση και τερματισμό της επικοινωνίας. Αυτές οι λειτουργίες περιλαμβάνουν τη διαχείριση κινητικότητας, όπως λειτουργίες handover, αναφορά τοποθεσίας και εκτέλεση εντολών ελέγχου από το δίκτυο. Πέρα από τις τεχνικές προδιαγραφές, βασικότερη λειτουργία του UE είναι η παροχή διεπαφής στον χρήστη, για δημιουργία κλήσεων και αξιοποίηση άλλων υπηρεσιών του δικτύου.

eNodeB (eNB)

Ο eNodeB (Evolved NodeB ή E-UTRAN Node B), είναι η ονομασία του σταθμού βάσης της αρχιτεκτονικής SAE. Ο eNodeB είναι υπεύθυνος για όλες της λειτουργίες ραδιοεπικοινωνίας που λαμβάνουν μέρος στο σταθερό κομμάτι του δικτύου. Λειτουργικά ο eNodeB αποτελεί μια γέφυρα 2^{ου} επιπέδου μεταξύ του UE και του EPC, καθώς είναι το σημείο τερματισμού όλων

των πρωτοκόλλων προς το UE και μεταφέρει δεδομένα μεταξύ της ασύρματης σύνδεσης και του κεντρικού δικτύου IP.

Σε αυτόν το ρόλο ο eNodeB εκτελεί κρυπτογράφηση-αποκρυπτογράφηση IP δεδομένων, συμπίεση-αποσυμπίεση κεφαλίδων πρωτοκόλλου IP που σημαίνει ότι αποφεύγεται η επαναλαμβανόμενη αποστολή ίδιας πληροφορίας στις κεφαλίδες IP. Καθήκον του eNodeB αποτελούν λειτουργίες διαχείρισης πόρων δικτύου (Radio Resource Management), όπως για παράδειγμα ο έλεγχος της ραδιοδιεπαφής που απαιτεί την ανάθεση πόρων βάση προτεραιοτήτων και προγραμματισμού της κίνησης, σύμφωνα με την ζήτηση και τις ανάγκες QoS για κάθε τύπο δεδομένων. Ο eNodeB ελέγχει και αναλύει μετρήσεις ισχύος του σήματος που πραγματοποιούνται από τον σταθμό βάσης ή από την κινητή συσκευή. Βάση αυτών των μετρήσεων παίρνονται αποφάσεις σχετικά με την πραγματοποίηση handovers που περιλαμβάνουν ανταλλαγή σημάτων ελέγχου μεταξύ άλλων eNodeB και των MME. Όταν ένα UE ενεργοποιηθεί εντός εμβέλειας ενός eNodeB και ζητάει σύνδεση στο δίκτυο, ο eNodeB επικοινωνεί με την MME που εξυπηρετούσε παλαιότερα την συσκευή ή με μια άλλη MME αν η πρώτη δεν είναι διαθέσιμη. Ένας eNodeB μπορεί να εξυπηρετεί πολλά UE που βρίσκονται στην περιοχή που καλύπτει αλλά κάθε UE μπορεί να είναι συνδεδεμένο μόνο σε έναν eNodeB. Ο eNodeB επίσης πρέπει να είναι συνδεδεμένος με τα γειτονικά eNodeB, με τα οποία υπάρχει πιθανότητα να συμβεί handover.

Mobility Management Entity (MME)

Η MME αποτελεί την κύρια μονάδα ελέγχου στο EPC και συνήθως είναι ένας εξυπηρετητής που βρίσκεται σε μια ασφαλή τοποθεσία στις εγκαταστάσεις του παρόχου. Οι λειτουργίες της αφορούν το control plane και δεν εμπλέκονται με δεδομένα του χρήστη στο user plane. Στο control plane η MME έχει ένα απευθείας λογικό κανάλι επικοινωνίας με το UE, όπου αυτό το κανάλι χρησιμοποιείται για μηνύματα ελέγχου μεταξύ του UE και του δικτύου. Παρακάτω αναλύονται οι βασικές MME λειτουργίες στην SAE αρχιτεκτονική :

- **Αυθεντικοποίηση και ασφάλεια** – Όταν ένα UE εγγράφεται στο δίκτυο για πρώτη φορά, η MME αναλαμβάνει την αυθεντικοποίηση του. Με βάση το μοναδικό αναγνωριστικό (**International Mobile Subscriber Identity - IMSI**) που διαθέτει κάθε UE, η MME πιστοποιεί ότι το UE είναι αυτό που δηλώνει. Η αυθεντικοποίηση μπορεί να γίνεται περιοδικά ή όποτε υπάρχει ανάγκη. Τα δεδομένα που ανταλλάσσονται κρυπτογραφούνται και προστατεύονται από υποκλοπές και αλλοιώσεις. Για την προστασία της ιδιωτικότητας, η MME αποδίδει σε κάθε UE μια προσωρινή ταυτότητα που ονομάζεται **Globally Unique Temporary Identity (GUTI)**, ώστε η αποστολή του πραγματικού IMSI μέσω του ασύρματου καναλιού να μειωθεί στο ελάχιστο. Το GUTI αλλάζει περιοδικά, ώστε να μην είναι δυνατή η μη εξουσιοδοτημένη παρακολούθηση του UE.
- **Διαχείριση κινητικότητας (Mobility Management)** – Η MME ακολουθεί τις κινήσεις όλων των UE που εξυπηρετεί. Όταν ένα UE κάνει την εμφάνιση του για πρώτη φορά στο δίκτυο, η MME προσθέτει καινούργια εγγραφή για το συγκεκριμένο UE και ειδοποιεί τον HSS (Home Subscription Server) στο δίκτυο του UE. Η MME κάνει αίτηση να αποδοθούν οι κατάλληλοι πόροι από το eNodeB και το S-GW (Serving Gateway) που διαλέγει η ίδια. Από εκεί και πέρα η MME παρακολουθεί την κινητικότητα του UE είτε σε επίπεδο eNodeB είτε σε επίπεδο Tracking Area (TA) που αποτελεί μια μεγαλύτερη περιοχή που καλύπτει μια ομάδα από eNodeB. Η MME

επίσης συμμετέχει στην διαδικασία handover μέσω μηνυμάτων ελέγχου μεταξύ eNodeB, S-GW και άλλων MME.

- **Διαχείριση συνδρομών και υπηρεσιών χρήστη** – Όταν το UE γραφτεί στο δίκτυο, η MME είναι υπεύθυνη να βρει και να κρατήσει τις πληροφορίες σχετικά με την συνδρομή του χρήστη στο δίκτυο. Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν στοιχεία σχετικά με χρεώσεις, πακέτα δεδομένων και διαθέσιμες υπηρεσίες που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο χρήστης. Επίσης γίνονται οι ρυθμίσεις για να έχει το UE βασική IP συνδεσιμότητα.

Θεωρητικά η MME μπορεί να συνδεθεί σε οποιαδήποτε άλλη MME στο δίκτυο, αλλά συνήθως η συνδεσιμότητα περιορίζεται στο δίκτυο ενός παρόχου. Η διασύνδεση μεταξύ MME διαφορετικών δικτύων χρησιμεύει, όταν μια συσκευή συνδέεται σε MME από διαφορετικό δίκτυο και πρέπει να επαληθευτεί η ταυτότητα της συσκευής και του χρήστη. Τότε η ξένη MME επικοινωνεί με την MME από το δίκτυο του χρήστη, για να ανακτήσει τα απαραίτητα στοιχεία, όπως το IMSI. Η επικοινωνία μεταξύ γειτονικών MME βοηθάει στην διαδικασία του handover.

Για υποστήριξη κινητικότητας επίσης πρέπει να διατηρούνται συνδέσεις προς πολλαπλά HSS. Το HSS βρίσκεται στο δίκτυο που ανήκει ο χρήστης και μπορεί να βρεθεί από το IMSI. Κάθε MME ρυθμίζεται για να ελέγχει μια συλλογή από S-GW και eNodeB, όπου το κάθε ένα μπορεί να συνδέεται και σε άλλα MME. Μια MME μπορεί να εξυπηρετεί πολλούς χρήστες ταυτόχρονα άλλα κάθε χρήστης εξυπηρετείται από μια MME.

Serving Gateway (S-GW)

Το S-GW ασχολείται με την μεταγωγή δεδομένων του user plane. Είναι μέρος της υποδομής που είναι εγκατεστημένη εσωτερικά στις εγκαταστάσεις του παρόχου. Συνήθως έχει μικρό ρόλο σε ζητήματα ελέγχου και είναι υπεύθυνο μόνο για δικούς του πόρους, τους οποίους κατανέμει ανάλογα με τις αιτήσεις που δέχεται από MME, P-GW ή PCRF. Κατά την μετακίνηση του UE το S-GW λαμβάνει σήμα από την MME για αλλαγή καναλιού επικοινωνίας από το παλιό στο καινούργιο eNodeB. Επίσης κατά το handover κατά την τελική αλλαγή του ασύρματου καναλιού το S-GW αναλαμβάνει την δρομολόγηση δεδομένων στο νέο eNodeB που εξυπηρετεί το UE. Ένα άλλο σενάριο είναι η αλλαγή από ένα S-GW σε άλλο, όπου η MME αναλαμβάνει τη μεταφορά των καναλιών επικοινωνίας στο καινούργιο S-GW.

Packet Data Network Gateway (P-GW)

Ο P-GW ή PDN-GW είναι ο δρομολογητής που βρίσκεται στην άκρη του δικτύου μεταξύ του EPS και των εξωτερικών δικτύων δεδομένων. Εκτελεί λειτουργίες μεταγωγής και φιλτραρίσματος δεδομένων ανάλογα με τις υπηρεσίες που εξυπηρετεί. Παρόμοια με το S-GW, ο P-GW βρίσκεται συνήθως κεντρικά στις εγκαταστάσεις του παρόχου. Τυπικά ο P-GW είναι αυτός που αποδίδει την IP διεύθυνση στο UE, που την χρησιμοποιεί για να επικοινωνεί με άλλους IP σταθμούς σε εξωτερικά δίκτυα, όπως το ίντερνετ. Είναι επίσης δυνατό ο P-GW να ενημερώνεται για IP διευθύνσεις που παίρνει το UE όταν συνδέεται σε άλλα εξωτερικά δίκτυα και να δρομολογεί την κίνηση εκεί. Για απόδοση διευθύνσεων ο P-GW λειτουργεί και ως DHCP server ή σε διαφορετική περίπτωση στέλνει ερώτηση σε εξωτερικό DHCP server σχετικά με το ποια IP να αποδώσει στο UE. Σε ένα UE μπορεί να αποδοθεί διεύθυνση IPv4, IPv6 ή και οι δύο τύποι διευθύνσεων ταυτόχρονα.

Policy and Charging Resource Function (PCRF)

Το PCRF είναι το στοιχείο του δικτύου που είναι υπεύθυνο για το Policy and Charging Control (PCC), δηλαδή πολιτικές και χρεώσεις που εφαρμόζονται στο δίκτυο. Παίρνει αποφάσεις σχετικά με το πώς να διαχειριστεί τις υπηρεσίες βάση QoS και επικοινωνεί με P-GW και S-GW για να γίνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις.

Home Subscription Server (HSS)

Ο HSS είναι ο εξυπηρετητής στον οποίο αποθηκεύονται τα δεδομένα και οι βασικές πληροφορίες των μόνιμων χρηστών του δικτύου. Ουσιαστικά ο HSS είναι μια βάση δεδομένων που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του παρόχου. Στον HSS αποθηκεύεται το βασικό προφίλ του συνδρομητή, το οποίο περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τις υπηρεσίες που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο χρήστης, ποιες συνδέσεις επιτρέπονται προς το PDN (Packet Data Network) και αν είναι επιτρεπτή η περιαγωγή σε άλλα δίκτυα. Το κύριο κλειδί που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του διανύσματος αυθεντικοποίησης (Authentication Vector), το οποίο στέλνεται σε άλλα δίκτυα που θέλουν να ταυτοποιήσουν τον χρήστη, φυλάσσεται στο Authentication Center (AuC), που είναι μέρος του HSS. Όταν πραγματοποιούνται αυτές οι λειτουργίες, ο HSS επικοινωνεί κυρίως μόνο με την MME. Ο HSS πρέπει να μπορεί να συνδεθεί σε όλες τις MME του δικτύου στις οποίες μπορεί να συνδεθεί το UE. Για κάθε UE, ο HSS καταγράφει από ποια MME εξυπηρετείται κάθε φορά. Όταν μια νέα MME αναφέρει ότι εξυπηρετεί πλέον το UE, ο HSS ακυρώνει την τοποθεσία από την προηγούμενη MME και καταγράφει την καινούργια.

Διεπαφές

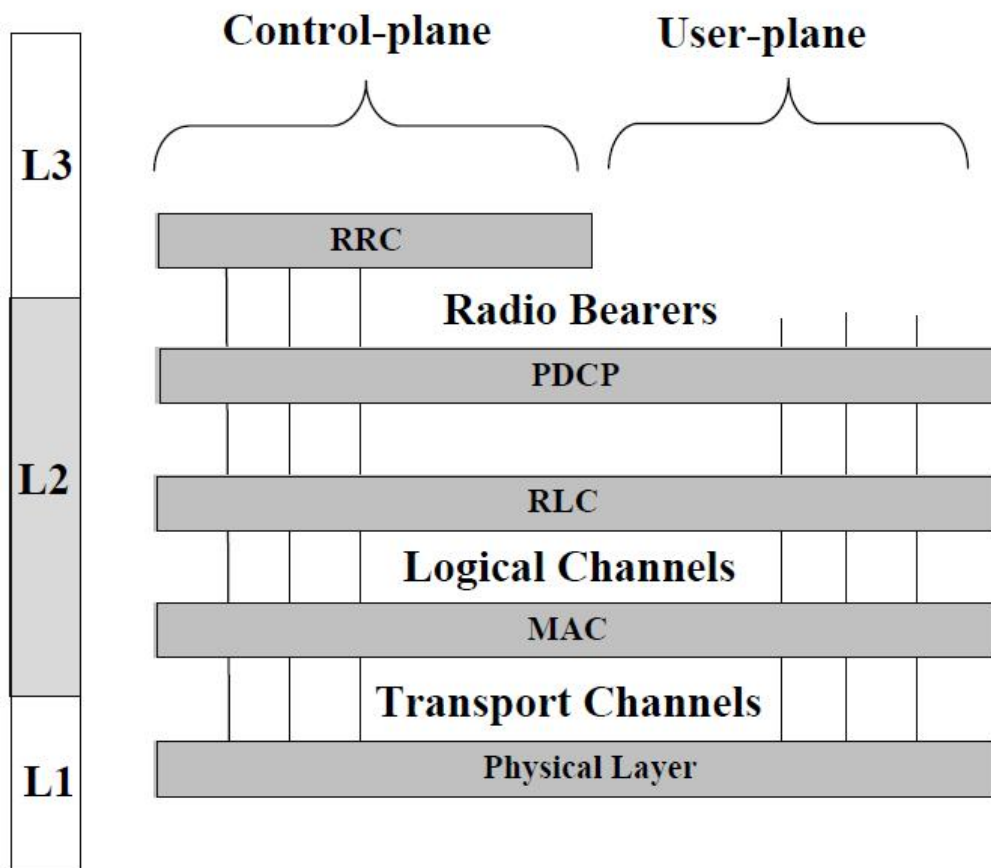
Η διεπαφή **S1** ορίζεται μεταξύ του eNodeB και του EPC. Σε επίπεδο χρήστη ο eNodeB συνδέεται με το S-GW όπου χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο **GTP** (GPRS Tunneling Protocol) το οποίο με την σειρά του στηρίζεται στο μη αξιόπιστο πρωτόκολλο **UDP** (User Datagram Protocol). Στο επίπεδο ελέγχου ο eNodeB συνδέεται με την MME και βασίζεται στο περισσότερο αξιόπιστο πρωτόκολλο **SCTP** (Stream Control Transmission Protocol) για μεταφορά μηνυμάτων ελέγχου. Μέσω του S1 το EPC εκτελεί τις βασικές λειτουργίες διαχείρισης του δικτύου, όπως διαχείριση κινητικότητας, handovers, έλεγχος χρηστών και διαμοιρασμός φόρτου μεταξύ MME.

Η διεπαφή **X2** διασύνδεει σταθμούς βάσης μεταξύ τους και μπορεί επίσης να χωριστεί σε επίπεδο χρήστη και επίπεδο ελέγχου. Όπως και στο επίπεδο χρήστη του S1, η μεταφορά δεδομένων χρήστη γίνεται μη αξιόπιστα με τα πρωτόκολλα GTP/UDP, ενώ στο επίπεδο χρήστη χρησιμοποιείται ομοίως, το αξιόπιστο SCTP. Οι λειτουργίες ελέγχου της διεπαφής X2 περιλαμβάνουν την διαχείριση handovers, τον διαμοιρασμό φόρτου μεταξύ eNodeB και γενική διαχείριση σφαλμάτων.

4.3.2 Πρωτόκολλα

Με βάση την αρχιτεκτονική του δικτύου, στο LTE τα πρωτόκολλα χωρίζονται σε δύο επίπεδα, το επίπεδο χρήστη (User plane) και το επίπεδο ελέγχου (Control Plane). Το user plane μεταφέρει πληροφορίες χρήστη, όπως φωνή και δεδομένα, και το control plane μεταφέρει

μηνύματα ελέγχου. Η διαστρωμάτωση για τα δύο επίπεδα φαίνεται στην Εικόνα 36. Το φυσικό επίπεδο μεταφέρει τα κανάλια μεταφοράς (transport channels), που παρέχονται από το επίπεδο MAC. Τα κανάλια μεταφορά περιγράφουν πώς και με ποια χαρακτηριστικά μεταφέρονται τα δεδομένα μέσω της ραδιοδιεπαφής στα φυσικά κανάλια. Το MAC επίπεδο προσφέρει επίσης τα λογικά κανάλια (logical channels) στο επίπεδο RLC. Πάνω από το RLC, είναι το επίπεδο PDCP που τώρα ανήκει και στο user και στο control plane, σε αντίθεση με το UMTS, όπου χρησιμοποιούνταν μόνο από το user plane. Το επίπεδο RRC ανήκει στο control plane. Όλα τα παρακάτω πρωτόκολλα βρίσκονται στο eNodeB.



Εικόνα 36 Διαστρωμάτωση πρωτοκόλλων του LTE.

Επίπεδο MAC

Το επίπεδο **MAC (Medium Access Control)** αντιστοιχεί τα λογικά κανάλια στα κανάλια μεταφοράς. Άλλες λειτουργίες του MAC επιπέδου είναι :

- Πολύπλεξη και αποπολύπλεξη πλαισίων (Payload Data Units – PDU) του επιπέδου RLC και συμπλήρωση (Padding) των πλαισίων που δεν είναι τελείως γεμάτα με δεδομένα.
- Μέτρηση της κίνησης και αναφορά στο επίπεδο RRC.

- Διόρθωση λαθών με την τεχνική HARQ και έλεγχος αναμεταδόσεων στο downlink και στο uplink που γίνονται από το eNodeB.
- Ρύθμιση προτεραιοτήτων μεταξύ των λογικών καναλιών του UE.

Επίπεδο RLC

Το επίπεδο **Radio Link Control** ασχολείται με την μεταφορά PDUs από τα υψηλότερα επίπεδα (RRC, PDCP), την διόρθωση λαθών με την τεχνική ARQ και των διαχωρισμό, την συνένωση και την αναγνώριση διπλότυπων πλαισίων. Η υλοποίηση αυτού του επιπέδου σε σχέση με το UMTS διαφέρει στο ότι δεν εκτελεί λειτουργίες κρυπτογράφησης. Αυτό το επίπεδο μπορεί να λειτουργεί σε τρεις καταστάσεις :

Transparent Mode (TM) – Σε αυτήν την κατάσταση, δέχεται και παραδίδει μόνο PDUs στο λογικό κανάλι και δεν προσθέτει επιπλέον κεφαλίδες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην καταγράφεται η εισερχόμενη και η εξερχόμενη κίνηση. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας είναι μόνο για συγκεκριμένες υπηρεσίες που δεν χρειάζονται αναμεταδώσεις και δεν υπάρχει ανάγκη τα πακέτα δεδομένων να στέλνονται σε σωστή σειρά.

Unacknowledged Mode (UM) – Εδώ παρέχονται περισσότερες λειτουργίες, όπως η παράδοση σε σειρά πακέτων, που μπορεί να έχουν ληφθεί εκτός σειράς, λόγω της τεχνικής HARQ, που εκτελούν τα κάτω επίπεδα. Τα δεδομένα χωρίζονται σε κομμάτια (UM Data – UMD) και μετά προστίθεται η κεφαλίδα. Η UM κεφαλίδα περιέχει τον αριθμό ακολουθίας (sequence number), που χρειάζεται για την ταξινόμηση δεδομένων και την αναγνώριση διπλότυπων πλαισίων.

Acknowledged Mode (AM) – Αυτή η κατάσταση λειτουργίας σε σχέση με την UM, παρέχει επιπλέον λειτουργίες, όπως η αναμετάδοση πακέτων σε περίπτωση που χαθούν. Τα δεδομένα χωρίζονται σε AM Data (AMD) και προστίθεται η κεφαλίδα που εδώ περιέχει επιπλέον πληροφορία σχετικά με το πιο πακέτο λήφθηκε τελευταίο.

Επίπεδο PDCP

Το επίπεδο **Packet Data Control Protocol** βρίσκεται πάνω από το RLC επίπεδο του user plane και χρησιμοποιείται κυρίως για μεταφορά μηνυμάτων του RRC επιπέδου. Η βασική διαφορά με το UMTS είναι ότι τώρα όλα τα δεδομένα χρήστη περνάνε από το PDCP γιατί εκεί συμβαίνει η κρυπτογράφηση. Στις αρχικές εκδόσεις της αρχιτεκτονικής το PDCP βρισκόταν στον κεντρικό κορμό του δικτύου, αλλά αργότερα μεταφέρθηκε μαζί με τα άλλα πρωτόκολλα στο eNodeB. Οι βασικές λειτουργίες του επιπέδου είναι :

- Συμπίεση και αποσυμπίεση κεφαλίδων των IP πακέτων βάση του πρωτοκόλλου ROHC (Robust Header Compression) που ορίζεται από τον IETF. Η συμπίεση κεφαλίδων είναι περισσότερο σημαντική σε μικρά IP πακέτα, όπως για παράδειγμα σε υπηρεσίες VoIP.
- Κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση δεδομένων του user plane και των περισσότερων δεδομένων από το control plane.

- Προστασία της ακεραιότητας και επαλήθευση μηνυμάτων ελέγχου, ώστε να επιβεβαιώνεται η πηγή που τα στέλνει.

Επίπεδο RRC

Το επίπεδο Radio Resource Control καλύπτει το βασικότερο κομμάτι της αποστολής μηνυμάτων ελέγχου μεταξύ του UE και του E-UTRAN. Είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο και τη ρύθμιση των πρωτοκόλλων που βρίσκονται από κάτω (PHY, MAC, RLC, PDCP). Στο LTE το RRC έχει απλοποιηθεί σημαντικά όσον αφορά τον αριθμό μηνυμάτων και τον πλεονασμό των πληροφοριών που μεταφέρουν. Βασικές λειτουργίες του RRC είναι :

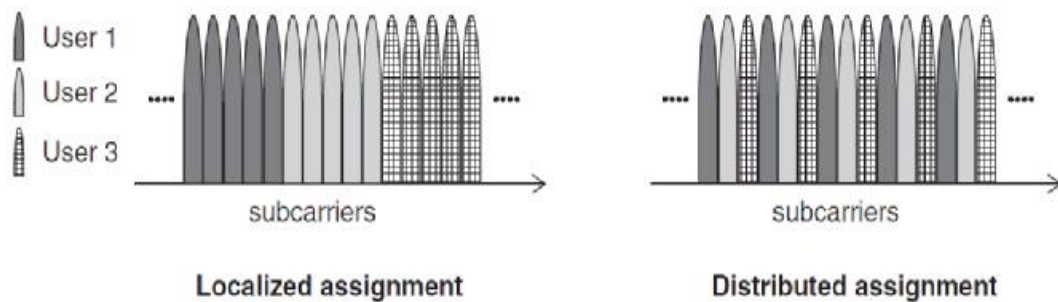
- Μετάδοση πληροφοριών συστήματος.
- Τηλεειδοποίηση (Paging).
- Αρχικοποίηση, διατήρηση και τερματισμός μιας RRC σύνδεσης μεταξύ UE και E-UTRAN.
- Διαχείριση κλειδιών ασφαλείας.
- Έλεγχος μετρήσεων από το UE.
- Handovers
- Επιλογή κυψελών από το UE.
- Απευθείας μεταφορά μηνυμάτων μεταξύ UE και κεντρικού δικτύου.

4.3.3 Φυσικό επίπεδο

Στο φυσικό επίπεδο, η τεχνική OFDM υπερίσχυσε της CDMA και έτσι τον Δεκέμβριο του 2005, η ομάδα TSG RAN του 3GPP αποφάσισε να χρησιμοποιήσει την OFDMA στο downlink και την SC-FDMA στο uplink για το LTE. Η επιλογή της OFDMA μειώνει το Peak to Average Power Ratio (PAPR) στη μεριά του χρήστη με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερες λιγότερο πολύπλοκες συσκευές με χαμηλότερο κόστος.

Στο downlink, η τεχνική OFDM πληροί τις προδιαγραφές του LTE σε ταχύτητα και φασματική απόδοση, φτάνοντας τα 100 Mbps. Πέρα από το LTE, η OFDM είναι μια τεχνολογία που υπάρχει από την δεκαετία του 1950 και με την εισαγωγή της ψηφιακής τεχνολογίας στις τηλεπικοινωνίες έγινε περισσότερο προσιτή και ήταν πλέον εφικτή η ευρεία χρήση σε εμπορικές συσκευές. Σήμερα η OFDM χρησιμοποιείται σε πολλά ακόμα πρωτόκολλα, όπως τα IEEE 802.11 a/b/g, 802.16, HIPERLAN-2 και DVB. Στην OFDM το καταναμημένο φάσμα διαιρείται σε χιλιάδες φέροντα σήματα (carriers), όπου το κάθε ένα έχει διαφορετική συχνότητα και μεταφέρει μέρος της πληροφορίας. Ρυθμίζοντας τον αριθμό των subcarriers η OFDM υποστηρίζει μεταβλητό bandwidth που κυμαίνεται από 1.25 έως 20 MHz και πιο συγκεκριμένα τα εύρη ζώνης που χρησιμοποιούνται είναι 1.4, 3, 5, 10, 15 και 20 MHz. Αν και ο αριθμός των υπο-φερόντων σημάτων εξαρτάται από το εύρος ζώνης, ο μέγιστος αριθμός τους μπορεί να φτάσει τα 1200. Οι τύποι διαμόρφωσης που

υποστηρίζονται στο downlink είναι οι QPSK, 16QAM και 64QAM. Σε λειτουργία MIMO γίνεται διαχωρισμός μεταξύ λειτουργίας single και multi-user. Σε λειτουργία single user MIMO ενισχύεται η απόδοση της μετάδοσης ενός χρήστη ατομικά και σε λειτουργία multi user ενισχύεται η συνολική απόδοση της κυψέλης. Συνήθως χρησιμοποιείται συστοιχία κεραιών 2×2 με δύο κεραιές στο eNodeB και δυο κεραιές στο UE. Για μεγαλύτερες ταχύτητες επίσης υπάρχει η επιλογή χρήσης τεσσάρων κεραιών στο eNodeB. Στην OFDM όλα τα υπο-φέροντα σήματα αφιερώνονται σε έναν χρήστη, γι' αυτό με την τεχνική OFDMA τα υπο-φέροντα σήματα διαιρούνται σε ομάδες, ώστε να εξυπηρετηθούν πολλοί χρήστες. Πιο συγκεκριμένα το εύρος ζώνης διαιρείται σε M σύνολα, όπου το κάθε σύνολο περιέχει L subcarriers. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να εξυπηρετηθούν παράλληλα M χρήστες. Τα υπο-φέροντα σήματα που αντιστοιχούν σε έναν χρήστη μπορούν να είναι κατανεμημένα σε όλο το εύρος ζώνης (Distributed assignment) ή σε σειρά το ένα δίπλα στο άλλο (Localized assignment), όπως φαίνεται στην Εικόνα 37.



Εικόνα 37 Κατανομή subcarriers στην τεχνική OFDMA.

Στο uplink για να καταπολεμηθεί το υψηλό PAPR της OFDMA, χρησιμοποιείται η τεχνική SC-FDMA. Το υψηλό PAPR απαιτεί ακριβούς και μη αποδοτικούς ενισχυτές που οδηγούν σε συσκευές με αυξημένο κόστος και μπαταρίες που εξαντλούνται γρήγορα. Το χαμηλότερο PAPR, επίσης βελτιώνει την κάλυψη και την απόδοση του σήματος στις άκρες της κυψέλης. Για κάθε χρήστη ο eNodeB κατανέμει ένα κανάλι συχνοτήτων για να εκπέμψει δεδομένα. Δεδομένα από διαφορετικούς χρήστες διαχωρίζονται με την χρήση χρονοθυρίδων ή κενών διαστημάτων ανάμεσα στις συχνότητες, ανάλογα με την τεχνική πολύπλεξης που χρησιμοποιείται (FDD, TDD). Το SC-FDMA βασίζεται στην ορθογωνικότητα των φερόντων σημάτων του uplink για την καταπολέμηση των παρεμβολών. Υποστηριζόμενες διαμορφώσεις είναι οι QPSK, 16QAM και 64QAM. Η ταχύτητα στο uplink μπορεί να βελτιωθεί με την χρήση περισσότερων κεραιών στους σταθμούς βάσης. Με την τεχνολογία MIMO πάνω από μια κινητή συσκευή μπορεί να κάνει χρήση των ίδιων πόρων του δικτύου για να εκπέμψει. Όπως και στο downlink η λειτουργία MIMO γίνεται σε 2×2 ή 2×4 με δύο κεραιές στο UE και δύο ή τέσσερις κεραιές στο eNodeB.

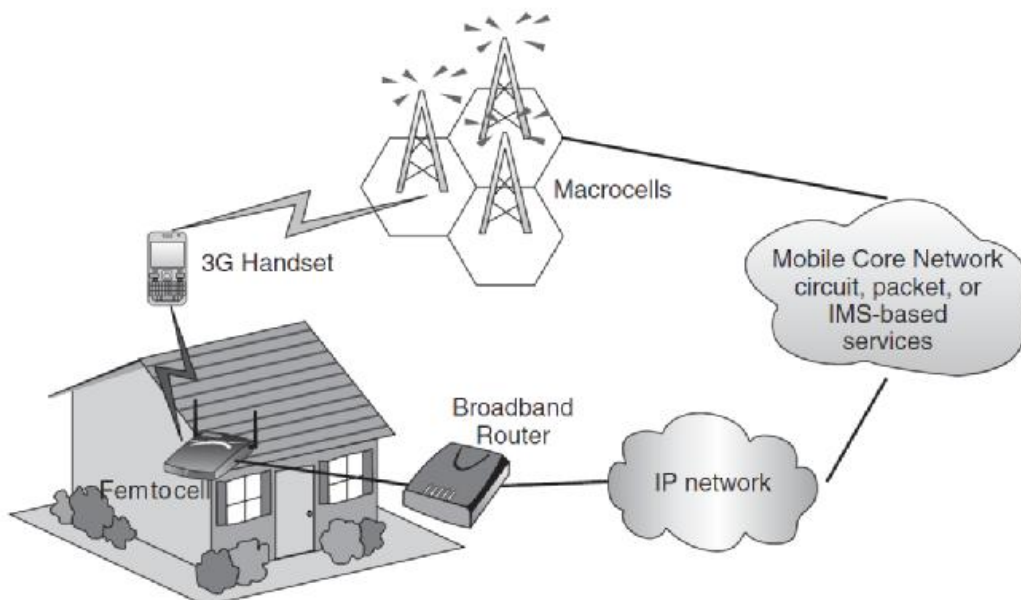
4.3.4 Femtocells

Στις τηλεπικοινωνίες το **femtocell** είναι ένας μικρός σταθμός βάσης χαμηλής κατανάλωσης, που καλύπτει μια μικρή περιοχή, όπως ένα σπίτι ή έναν εργασιακό χώρο με λίγα γραφεία. Γενικότερα με βάση το μέγεθος της κυψέλης έχουμε τις παρακάτω κατηγορίες :

- **Macrocell** που καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις σε αραιοκατοικημένες περιοχές.
- **Microcell** που χρησιμοποιούνται σε αστικές πυκνοκατοικημένες περιοχές και καλύπτουν περιοχές κάτω των δύο χλμ.
- **Picocell** που μπορούν να καλύψουν μερικές εκατοντάδες μέτρα και χρησιμοποιούνται σε μεγάλα γραφεία ή εμπορικά κέντρα.
- **Femtocell** που καλύπτουν μικρές περιοχές λίγων μέτρων σε ένα σπίτι ή γραφείο.

Τα femtocells έχουν χαμηλό κόστος για τους παρόχους και παράλληλα υψηλή χωρητικότητα καθώς βασίζονται στις ήδη υπάρχουσα ευρυζωνική υποδομή που διαθέτουν οι περισσότεροι χρήστες στα σπίτια και τα γραφεία τους. Έρευνες έχουν δείξει ότι περίπου το 70 % της κίνησης στην κινητή τηλεφωνία προέρχεται από εσωτερικά περιβάλλοντα, όπως σπίτια και γραφεία. Τέτοιου είδους κίνηση προϋποθέτει υψηλό Signal to Noise Ratio (SNR), ώστε να μην υπάρχουν εύκολα παρεμβολές καθώς το σήμα που είναι ύψους μερικών GHz είναι ευαίσθητο σε εξασθενήσεις λόγω εμποδίων σε εσωτερικούς χώρους. Επομένως με τα femtocells βελτιώνεται η ποιότητα του σήματος, χωρίς να γίνουν μεγάλες και πολυδάπανες αλλαγές στην υποδομή του δικτύου.

Ένα femtocell μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα μικρό BS που λειτουργεί στις ίδιες συχνότητες με το υπόλοιπο δίκτυο αλλά έχει μικρή εμβέλεια, χαμηλό κόστος και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 38, το femtocell επικοινωνεί με το υπόλοιπο κινητό δίκτυο μέσω ευρυζωνικής γραμμής (cable / DSL) που ήδη υπάρχει στις εγκαταστάσεις του χρήστη.



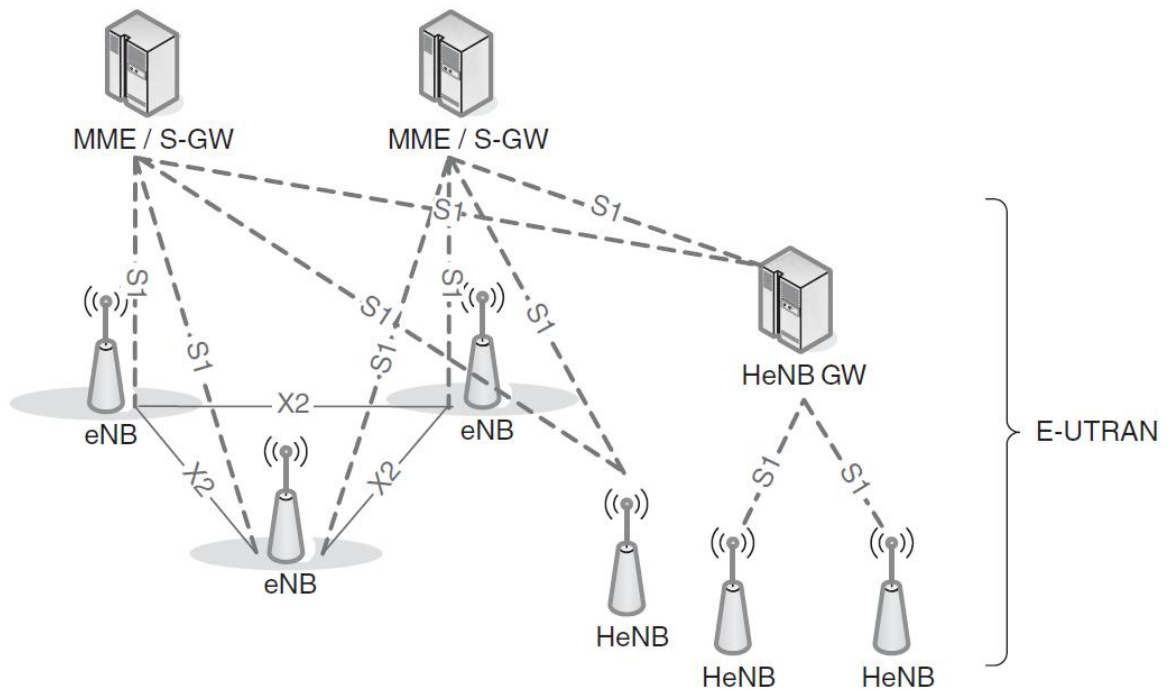
Εικόνα 38 Femtocell

Η πρόσβαση σε ένα femtocell μπορεί να είναι ελεύθερη ή περιορισμένη. Ένα femtocell με Open Subscriber Group (OSG) επιτρέπει την πρόσβαση σε οποιοδήποτε MS (Mobile Station) ανήκει στο ίδιο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Ένα femtocell με Closed Subscriber Group (CSG) επιτρέπει την πρόσβαση μόνο σε συγκεκριμένα εκ των προτέρων γνωστά MS. Ένα MS πρέπει επίσης να γνωρίζει σε ποια femtocells είναι εγγεγραμμένο και μπορούν να το εξυπηρετήσουν. Ανεξαρτήτως του τύπου πρόσβασης, κάθε femtocell πρέπει να επιτρέπει την πραγματοποίηση κλήσεων έκτακτης ανάγκης από οποιοδήποτε MS.

Όταν ένα εξουσιοδοτημένο MS μπαίνει στην περιοχή κάλυψης ενός femtocell, αλλάζει αυτόματα τη σύνδεση από τον σταθμό βάσης που το εξυπηρετούσε πριν, δηλαδή το macrocell, στο τοπικό femtocell. Μετά την αλλαγή, όλη η κίνηση που προέρχεται από το MS είτε είναι κλήσεις ή δεδομένα, περνάνε μέσα από το femtocell. Τα δεδομένα κρυπτογραφούνται με το IPSec πρωτόκολλο και στέλνονται μέσω του IP δικτύου ώστε να φτάσουν στο κινητό δίκτυο του παρόχου. Επειδή η κινητή συσκευή επικοινωνεί μέσω του femtocell που βρίσκεται κοντά, η εκπομπή γίνεται με χαμηλότερη ισχύ και εξοικονομείται ενέργεια και μπαταρία. Επίσης όταν μέρος της κίνησης του δικτύου διοχετεύεται από τα femtocells, βελτιώνεται και η λειτουργία των macrocells καθώς διαχειρίζονται λιγότερη κίνηση.

Πέρα από τα πλεονεκτήματα, η χρήση femtocells εισάγει και μερικούς περιορισμούς. Μεγάλη βαρύτητα δίνεται στις παρεμβολές που μπορεί να προκληθούν από τα femtocells καθώς η εγκατάστασή τους γίνεται από τους τελικούς χρήστες και ο πάροχος δεν έχει τον πλήρη έλεγχο πάνω στις συνθήκες λειτουργίας. Επομένως μπορεί να μην υπάρχει πλήρης συντονισμός ανάμεσα στις συχνότητες, μεταξύ macrocell και femtocell. Η αδυναμία άμεσου ελέγχου του femtocell από τον πάροχο προκαλεί επίσης θέματα συγχρονισμού μεταξύ εκπομπών femtocell και macrocell με αποτέλεσμα να γίνονται πιο δύσκολα τα handovers. Χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης ενός macrocell BS, εκπέμπουν σε πλήρη ισχύ και μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες παρεμβολές σε κοντινά femtocells. Σε femtocells με ελεύθερη πρόσβαση τα handover μπορούν να αποτελέσουν μεγάλη πρόκληση, και ειδικότερα τα handovers από macrocell σε femtocell. Ένας χρήστης μπορεί χωρίς την συναίνεσή του να περάσει από διαδοχικά handovers λόγω διακυμάνσεων στο σήμα από κοντινά femtocells με ελεύθερη πρόσβαση και με αυτόν τον τρόπο να μειωθεί αισθητά η ποιότητα της επικοινωνίας. Ένα άλλο QoS ζήτημα είναι η μεταφορά δεδομένων ευαίσθητων σε καθυστερήσεις, μέσω του IP cable/DSL δικτύου. Το πρόβλημα γίνεται περισσότερο αισθητό όταν το femtocell μοιράζεται τη σύνδεση με το τοπικό WLAN και μπορεί η κίνηση από το τοπικό δίκτυο να καθυστερεί την μετάδοση ευαίσθητων δεδομένων, όπως είναι η φωνή. Τέλος, κάποιοι χρήστες μπορεί να μεταφέρουν το femtocell σε μη ελεγχόμενη περιοχή εκτός σπιτιού και έτσι να προκληθούν φασματικές συγκρούσεις με δίκτυα άλλων παρόχων.

Σύμφωνα με την ορολογία του 3GPP στο 3G τα femtocells ονομάζονται **Home NodeB (HNB)** και στο **LTE Home eNodeB (HeNB)**. Ένα HeNB συνδέεται στο EPC μέσω του S1-MME και S1-U interface. Η σύνδεση μπορεί να γίνεται άμεσα ή μέσω ενός HeNB Gateway, ώστε να συνδέονται πολλαπλά HeNB μέσω της S1 διεπαφής. Το HeNB Gateway φαίνεται σε ένα HeNB ως μια MME οντότητα, ενώ για την MME το gateway φαίνεται ως ένα HeNB. Ασχέτως από τον τρόπο σύνδεσης στο EPC το S1 interface δεν αλλάζει. Το E-UTRAN που περιέχει HeNBs φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 39 Femtocells στο E-UTRAN.

Στα HeNB υλοποιείται η ίδια διαστρωμάτωση πρωτοκόλλων με τα κανονικά eNB. Πέρα από λειτουργία CSG ή OSG ένα HeNB μπορεί να υποστηρίξει υβριδική λειτουργία (hybrid mode). Ένα hybrid HeNB λειτουργεί αρχικά ως CSG αλλά μπορεί να εξυπηρετεί και μη εγγεγραμμένες κινητές συσκευές όταν υπάρχουν αρκετοί διαθέσιμη πόροι, ώστε οι ξένοι σταθμοί να μην επηρεάζουν την επικοινωνία των εγγεγραμμένων χρηστών. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, όλα τα είδη HeNB επιτρέπουν ελεύθερα κλήσεις εκτάκτου ανάγκης.

4.4 Φάσμα

Υπάρχουν αρκετές ζώνες συχνοτήτων που είναι υποψήφιες για χρήση με το LTE, κάποιες χρησιμοποιούνται ήδη από άλλα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και κάποιες άλλες ανήκουν σε άλλες τεχνολογίες και αναμένεται να μείνουν ελεύθερες στο άμεσο μέλλον. Καθώς το LTE υποστηρίζει και τα δύο είδη πολύπλεξης FDD και TDD, η ανάθεση συχνοτήτων πρέπει να γίνει διαφορετικά για κάθε είδος λειτουργίας. Για το FDD οι συχνότητες ανατίθενται σε ζεύγη, με μια συχνότητα για το downlink και μια για το uplink, ενώ στο TDD δίνεται μια συχνότητα γιατί uplink και downlink λειτουργούν στην ίδια συχνότητα με διαχωρισμό χρόνου. Λόγο αυτής της διαφοράς οι ζώνες συχνοτήτων για το FDD λέγονται **Paired bands** και για το TDD λέγονται **Unpaired bands**. Σε μερικές περιπτώσεις κάποιες από τις συχνότητες επικαλύπτονται και θεωρητικά υπάρχει δυνατότητα TDD και FDD να λειτουργήσουν στην ίδια συχνότητα, αλλά στην πράξη κάτι τέτοιο είναι πολύ δύσκολο να συμβεί. Με την εισαγωγή νέων τεχνολογιών στις ασύρματες επικοινωνίες και τον αυξανόμενο αριθμό των χρηστών, ένας τρόπος για να καλυφθούν οι ανάγκες σε φάσμα είναι το “**refarming**”. Έτσι ονομάζεται η

ανακατανομή φάσματος από μια παλιά τεχνολογία σε μια καινούργια, που θεωρείται ότι θα έχει περισσότερα οικονομικά και κοινωνικά οφέλη.

Οι ζώνες συχνοτήτων για το LTE φαίνονται στις εικόνες Εικόνα 40 και Εικόνα 41. Υπάρχουν 17 paired bands και 8 unpaired bands και αναμένεται να προστεθούν επιπλέον ζώνες όσο συνεχίζεται η τυποποίηση. Κάποιες συχνότητες χρησιμοποιούνται από παλαιότερες τεχνολογίες και το LTE μπορεί να συνυπάρξει αρχικά με αυτές. Το LTE θα ξεκινήσει να χρησιμοποιεί τη νέα μπάντα των 2600 MHz και αναμένεται να γίνει refarming στις περιοχές των 1800 και 900 MHz. Στην περιοχή της Ευρώπης, το συνολικό διαθέσιμο φάσμα για τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας ανέρχεται στα 565 MHz, αν συναθροιστούν οι ζώνες των 900, 1800, 2100 MHz σε FDD και TDD καθώς και η νέα ζώνη των 2600 MHz. Στις Η.Π.Α. έγινε refarming για το UMTS στις περιοχές των 850 και 1900 MHz, ενώ για 3G χρησιμοποιούνται επίσης συχνότητες 1700/2100 MHz, με το LTE να δουλεύει στις μπάντες 700 και 1700/2100 MHz. Στην Ιαπωνία το LTE ξεκίνησε να λειτουργεί στα 2100 και αργότερα ακολούθησαν οι ζώνες των 800, 1500 και 1700 MHz.

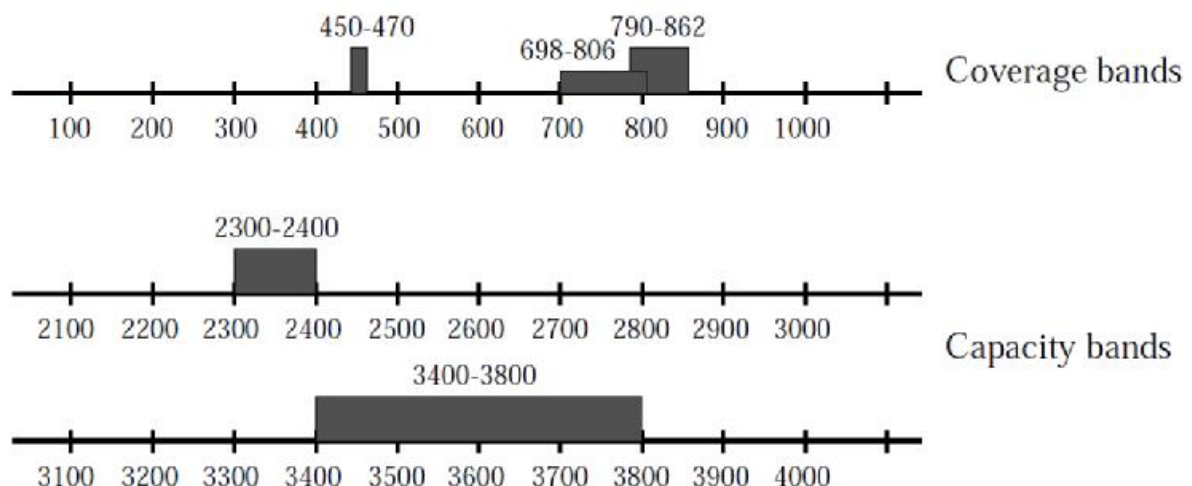
Operating band	3GPP name	Total spectrum	Uplink [MHz]	Downlink [MHz]
Band 1	2100	2x60 MHz	1920-1980	2110-2170
Band 2	1900	2x60 MHz	1850-1910	1930-1990
Band 3	1800	2x75 MHz	1710-1785	1805-1880
Band 4	1700/2100	2x45 MHz	1710-1755	2110-2155
Band 5	850	2x25 MHz	824-849	869-894
Band 6	800	2x10 MHz	830-840	875-885
Band 7	2600	2x70 MHz	2500-2570	2620-2690
Band 8	900	2x35 MHz	880-915	925-960
Band 9	1700	2x35 MHz	1750-1785	1845-1880
Band 10	1700/2100	2x60 MHz	1710-1770	2110-2170
Band 11	1500	2x25 MHz	1427.9-1452.9	1475.9-1500.9
Band 12	US700	2x18 MHz	698-716	728-746
Band 13	US700	2x10 MHz	777-787	746-756
Band 14	US700	2x10 MHz	788-798	758-768
Band 17	US700	2x10 MHz	704-716	734-746
Band 18	Japan800	2x30 MHz	815-830	860-875
Band 19	Japan800	2x30 MHz	830-845	875-890

Εικόνα 40 LTE Paired bands (FDD).

Operating band	3GPP name	Total spectrum	Uplink and downlink [MHz]
Band 33	UMTS TDD1	1x20 MHz	1900-1920
Band 34	UMTS TDD2	1x15 MHz	2010-2025
Band 35	US1900 UL	1x60 MHz	1850-1910
Band 36	US1900 DL	1x60 MHz	1930-1990
Band 37	US1900	1x20 MHz	1910-1930
Band 38	2600	1x50 MHz	2570-2620
Band 39	UMTS TDD	1x40 MHz	1880-1920
Band 40	2300	1x50 MHz	2300-2400

Εικόνα 41 LTE Unpaired bands (TDD).

Τον Νοέμβριο του 2007, στο συνέδριο ITU-R WRC-07 προστέθηκαν νέες περιοχές συχνοτήτων για χρήση από την IMT. Οι συχνότητες αυτές φαίνονται στην Εικόνα 42 και περιλαμβάνουν χαμηλές συχνότητες για σήμα με μεγαλύτερη κάλυψη (coverage bands) και υψηλές συχνότητες για σήμα με μεγαλύτερη χωρητικότητα (capacity bands). Βασική προσθήκη είναι οι συχνότητες 470-806/862 MHz που χρησιμοποιούνται τώρα για εκπομπές επίγειας αναλογικής τηλεόρασης. Πιο συγκεκριμένα η μπάντα 790-862 MHz που αντιστοιχεί στις περιοχές Ευρώπης-Ασίας, θα ελευθερωθεί το αργότερο έως το 2015 με την πλήρη μετάβαση στην ψηφιακή τηλεόραση. Η μπάντα 698-806 αντιστοιχεί στην Αμερική και μέρος της ήδη χρησιμοποιείται. Από τις υπόλοιπες μπάντες που θα χρησιμοποιηθούν για κανάλια με μεγάλη χωρητικότητα η περιοχή 3.2-3.8 GHz ανήκει σε Ευρώπη-Ασία και η περιοχή 2.3-2.4 GHz είναι διαθέσιμη στην Κίνα.



Εικόνα 42 IMT WRC-07 bands

4.5 LTE Advanced



Εικόνα 43 LTE Advanced

Οι λόγοι για περαιτέρω ανάπτυξη και εξέλιξη του LTE προς το LTE-Advanced (3GPP Release 10) είναι η επίτευξη και προσφορά υψηλότερων ταχυτήτων με χαμηλότερο κόστος και η πλήρης ικανοποίηση των κριτηρίων που ορίζει η τυποποίηση IMT-Advanced για την 4^η γενιά. Βασικοί στόχοι στο LTE-Advanced είναι :

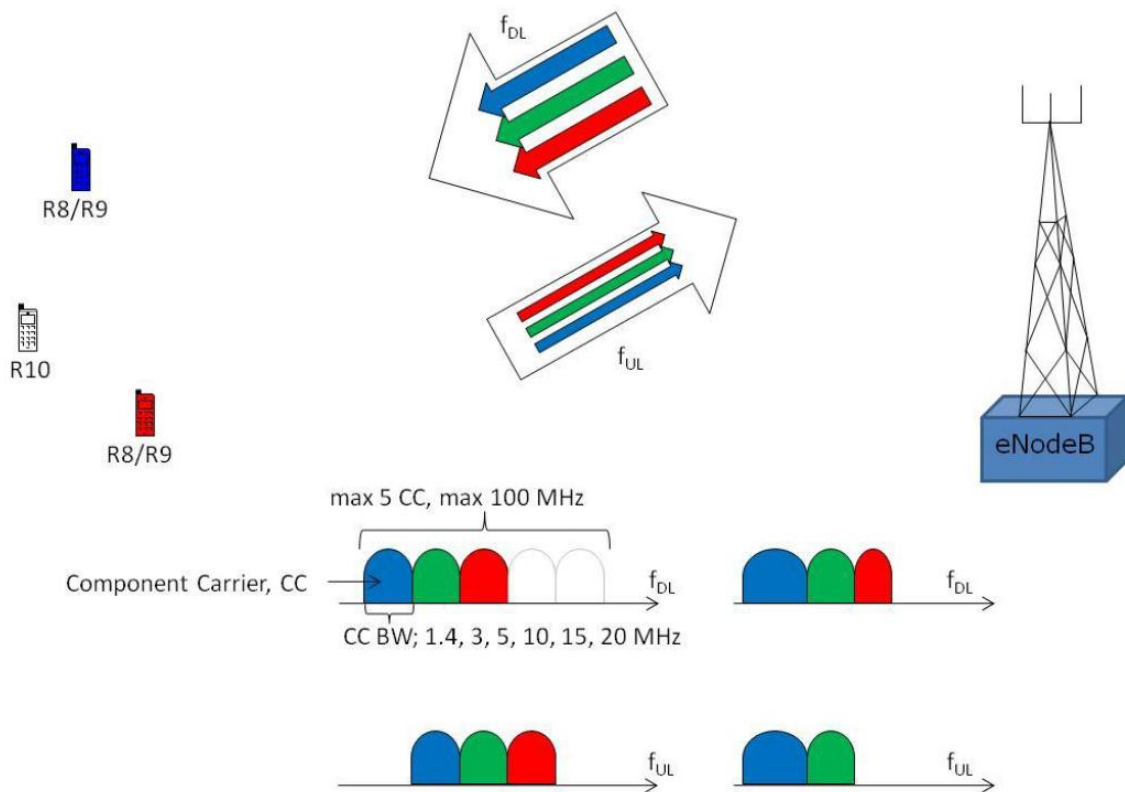
- Αύξηση μέγιστης ταχύτητας.
- Υψηλότερη φασματική απόδοση από 16 bps/Hz (Release 8) σε 30 bps/Hz (Release 10).
- Αύξηση αριθμού χρηστών που εξυπηρετούνται παράλληλα.
- Βελτιωμένη απόδοση στα όρια των κυψελών (cell edges).

Οι κυριότερες νέες λειτουργίες που εισάγει το LTE-Advanced είναι :

- Carrier Aggregation (CA)
- Βελτιωμένη χρήση MIMO
- Relay Nodes (RN)

4.5.1 Carrier Aggregation

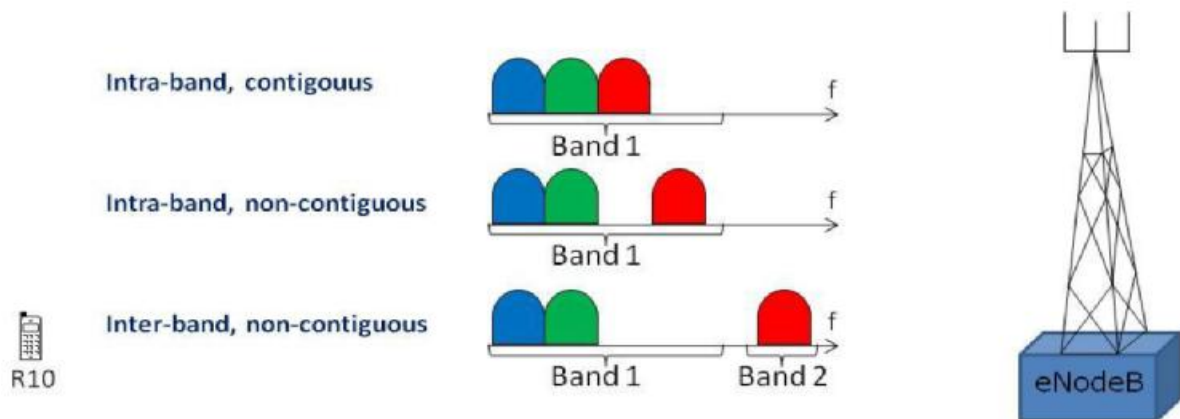
Ο καλύτερος τρόπος για να υποστηριχθούν μεγαλύτερες ταχύτητες είναι η αύξηση του εύρους ζώνης. Καθώς είναι σημαντικό να υπάρχει προς τα πίσω συμβατότητα με τις Release 8 και 9 του LTE, η αύξηση του εύρους ζώνης για το LTE-Advanced γίνεται με την συνένωση (aggregation) μπλοκ συχνοτήτων από κανάλια του LTE. Στο LTE το εύρος ζώνης ενός καναλιού μπορεί να κυμανθεί από 1.4 έως 20 MHz και πολλά LTE κανάλια μπορούν να συνδυαστούν για να σχηματίσουν ένα LTE-Advanced κανάλι. Κάθε ξεχωριστό κανάλι ονομάζεται **Component Carrier (CC)**, μπορεί να έχει εύρος ζώνης 1.4, 3, 5, 10, 15 ή 20 MHz και έως το πολύ πέντε κανάλια μπορούν να συνενωθούν. Αν και τα πέντε κανάλια είναι 20 MHz, προκύπτει ότι το μέγιστο εύρος ζώνης καναλιού LTE-Advanced είναι 100 MHz. Ο αριθμός των CC μπορεί να είναι διαφορετικός σε downlink και uplink αλλά ο αριθμός των CC στο uplink ποτέ δεν ξεπερνά αυτόν στο downlink. Κάθε ξεχωριστό CC μπορεί να έχει διαφορετικό εύρος ζώνης από τα υπόλοιπα. Τα παραπάνω φαίνονται στην Εικόνα 44.



Εικόνα 44 Carrier Aggregation

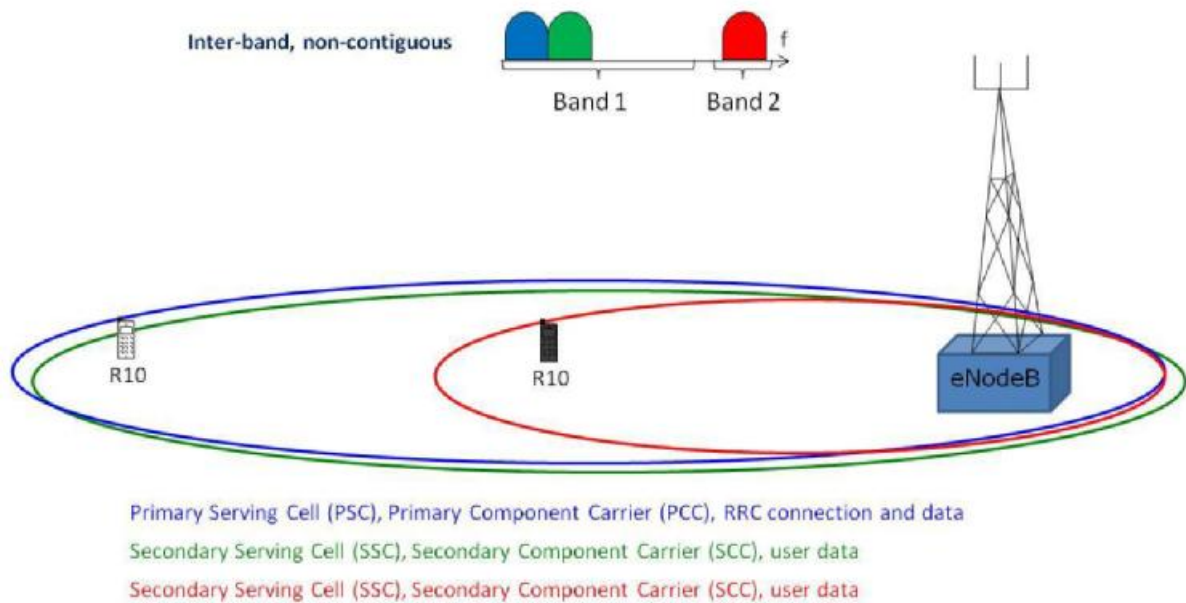
Ο πιο απλός τρόπος επιλογής των CC που θα αποτελούν το κανάλι είναι ο συνεχόμενος (contiguous), ώστε τα CC να βρίσκονται και στην ίδια μπάντα συχνοτήτων, ο τρόπος αυτός λέγεται **Intra-band contiguous**. Η συνεχόμενη επιλογή CC όμως δεν είναι πάντα εφικτή σε κάποια σενάρια λειτουργίας όταν οι πόροι ανατίθενται δυναμικά. Η μη συνεχόμενη επιλογή CC μπορεί να γίνει μέσα στην ίδια μπάντα συχνοτήτων και ονομάζεται **Intra-band non-contiguous**, ή τα CC μπορεί να είναι από διαφορετικές μπάντες συχνοτήτων, οπότε αυτός ο

τρόπος ονομάζεται **Inter-band non-contiguous**. Η επιλογή CC παρουσιάζεται στην Εικόνα 45.



Εικόνα 45 Carrier Aggregation, επιλογή CC.

Κατά το CA, κάθε CC αντιστοιχεί σε διαφορετική κυψέλη, που ονομάζεται serving cell. Η κάλυψη της κάθε κυψέλης μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την συχνότητα του CC και την ισχύ της εκπομπής. Τη σύνδεση σε επίπεδο RRC διαχειρίζεται μια κυψέλη που ονομάζεται Primary serving cell, από την οποία προέρχεται το Primary CC (PCC). Τα υπόλοιπα CC ονομάζονται Secondary CC (SCC) και προέρχονται από τα Secondary serving cells. Υπάρχει δυνατότητα μερικά CC να ρυθμίζονται ώστε να παρέχουν διαφορετική κάλυψη, δηλαδή η κυψέλη από το σήμα τους να είναι μικρότερη. Στην περίπτωση των Inter-band CC, δηλαδή CC που βρίσκονται σε διαφορετική μπάντα συχνοτήτων, μπορεί να παρουσιάσουν διαφορετικές εξασθενήσεις στο σήμα. Στο παράδειγμα στην Εικόνα 46, CA και με τα τρία CC μπορεί να υλοποιηθεί μόνο για την μαύρη συσκευή, γιατί η άλλη είναι εκτός κάλυψης του κόκκινου CC. Η τεχνική CA λειτουργικά επηρεάζει κυρίως το φυσικό και το MAC επίπεδο, όπως επίσης το RRC όπου εισάγονται μερικά νέα μηνύματα.

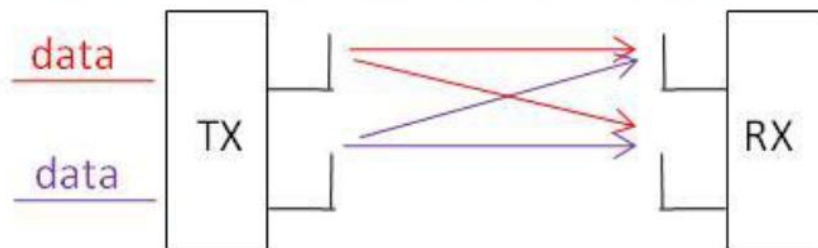


Εικόνα 46 Carrier Aggregation, Serving Cells

4.5.2 MIMO

Η κεραίες MIMO, όπως είναι γνωστό χρησιμοποιούνται για την αύξηση του bit rate με την εκπομπή μέσω δύο ή περισσότερων ροών δεδομένων, σε δύο ή περισσότερες κεραίες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 47.

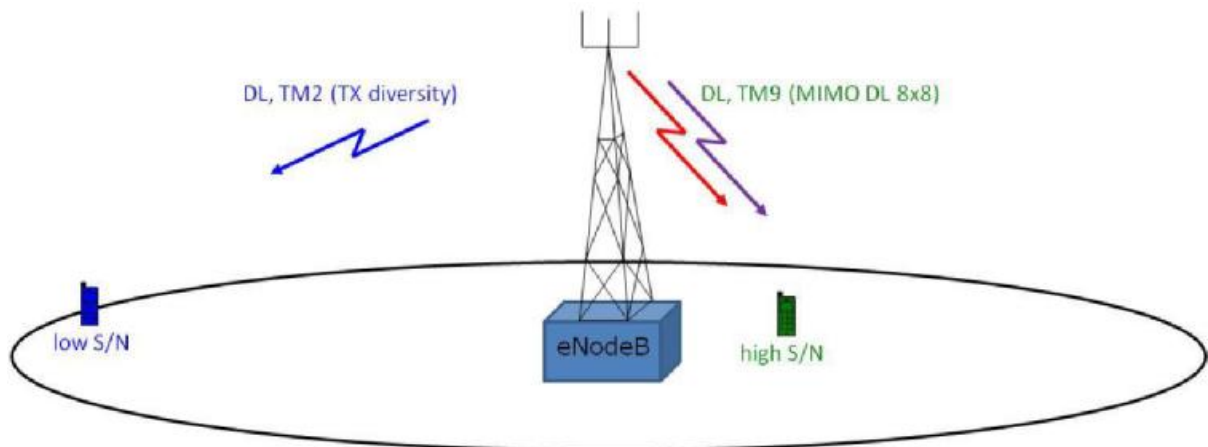
MIMO – Spatial Multiplexing (2x2)



Εικόνα 47 MIMO

Η μεγάλη αλλαγή στο LTE-Advanced είναι η νέα δυνατότητα χρήσης συστήματος κεραιών 8 x 8 στο downlink και 4 x 4 στο uplink. Το 8x8 MIMO προορίζεται για χρήση σε κανάλια υψηλής ποιότητας με μεγάλο SNR (Signal to Noise Ratio), ενώ για περιπτώσεις με χαμηλό SNR θα χρησιμοποιούνται τεχνικές που βελτιώνουν το SNR, όπως η TX-diversity (ποικιλομορφία αποστολής) που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.3 Η τεχνολογία MIMO. Για να μπορεί να αποφασιστεί ποιος τύπος MIMO θα χρησιμοποιηθεί ανάλογα με την περίπτωση, έχουν οριστεί διαφορετικές καταστάσεις μετάδοσης που ονομάζονται Transmission Modes (TM). Το UE μέσω του RRC καναλιού θα ενημερώνεται για το TM που θα χρησιμοποιηθεί. Για το downlink υπάρχουν εννιά διαφορετικά TM, όπου τα TM 1-7 παρουσιάστηκαν στη Release 8, το TM 8 στην Release 9 και το TM 9 στη Release 10. Στο uplink έχουμε τα TM 1

και 2, με το TM 1 να είναι από την Release 8 και το TM2 από την Release 10. Η λειτουργία 8x8 MIMO περιγράφεται στο TM 9 του downlink και η λειτουργία 4x4 στο TM 2 του downlink.



Εικόνα 48 MIMO modes.

4.5.3 Relay Nodes

Ένας από τους στόχους του LTE-Advanced είναι ο εύκολος σχεδιασμός ετερογενών δικτύων όσων αφορά την κάλυψη και πιο συγκεκριμένα τον συνδυασμό μικρών και μεγάλων κυψελών. Μια νέα έννοια που παρουσιάζεται στο LTE-Advanced είναι τα **Relay Nodes (RN)**. Τα Relay Nodes είναι ουσιαστικά μικροί σταθμοί βάσης χαμηλής ισχύς που παρέχουν καλύτερη κάλυψη στα όρια των κυψελών (cell edges) και σε σχετικά δυσπρόσιτες περιοχές που δεν μπορούν να συνδεθούν ενσύρματα. Τα RN επικοινωνούν ασύρματα μέσω της ραδιοδιεπαφής U_n με έναν σταθμό βάσης, που ονομάζεται **Donor eNB (DeNB)** και είναι ένα συνηθισμένο eNB που απλά εξυπηρετεί το RN. Το U_n είναι παραλλαγή του U_i interface του E-UTRAN. Οι πόροι του DeNB μοιράζονται μεταξύ των UE που συνδέονται απευθείας με το DeNB και των RN που αυτό εξυπηρετεί. Όταν τα U_i και U_n λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες, το RN ονομάζεται Type 1a RN, ενώ αν λειτουργούν στις ίδιες συχνότητες το RN ονομάζεται Type 1 RN. Στην δεύτερη περίπτωση υπάρχει πιθανότητα το RN να προκαλεί παρεμβολές μεταξύ των διεπαφών του, όταν οι U_n και U_i εκπέμπουν ταυτόχρονα. Τέτοιου είδους παρεμβολές μπορούν να αποφευχθούν με τεχνικές συγχρονισμού ή μεγαλώνοντας την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Το RN υποστηρίζει τις ίδιες λειτουργίες με το eNB εκτός από την επιλογή MME που θα γίνεται από το DeNB.

Κεφάλαιο 5^ο WiMAX

Ο οργανισμός **WiMAX forum** (World-Wide Interoperability for Microwave Access) ξεκίνησε αποτελούμενος από μικρό αριθμός εταιριών το 2001, με στόχο την προώθηση του προτύπου **WiMAX 802.16** της IEEE. Αρχικά το πρότυπο κάλυπτε λειτουργία σε συχνότητες μεταξύ 10 και 66 GHz για LOS (Line of Sight) εφαρμογές. Το 2003 ο στόχος άλλαξε για υποστήριξη συχνοτήτων κάτω από τα 11 GHz και NLOS (Non Line of Sight) λειτουργία σε συνδυασμό με την τεχνολογία OFDM. Από τότε το WiMAX forum γνώρισε μεγάλη ανάπτυξη και εξελίχθηκε σε μεγάλο μη κερδοσκοπικό οργανισμό με πάνω από 350 μέλη.



Εικόνα 50 WiMAX Forum

5.1 Εισαγωγή

Το WiMAX βασίζεται στην οικογένεια προτύπων 802.16 της IEEE. Τα χαρακτηριστικά των βασικών εκδόσεων του WiMAX παρουσιάζονται στην Εικόνα 51. Στη βασική του έκδοση το WiMAX, κυρίως σχεδιάστηκε ως μια ασύρματη λύση υψηλής ταχύτητας για το “last mile”⁸. Άλλες τεχνολογίες όπως το Wi-Fi στο δίκτυο κορμού στηρίζονται κυρίως σε τεχνολογίες xDSL και σε ενσύρματα μέσα γενικότερα. Η ασύρματη φύση του WiMAX το κάνει κατάλληλο για χρήση σε περιοχές, όπου η σύνδεση μέσω καλωδίου ή οπτικής ίνας δεν είναι δυνατή. Το WiMAX είναι μια MAN (Metropolitan Area Network) τεχνολογία, που τυπικά χρησιμοποιεί ένα ή περισσότερα BS (base stations) όπου το καθένα μπορεί να καλύψει μια περιοχή έως και 50 χιλιομέτρων υπό καλές συνθήκες. Το WiMAX προσφέρει μια πλούσια γκάμα χαρακτηριστικών και υποστηρίζει πολλά σενάρια υλοποίησης, παρέχοντας μεγάλη ευελιξία. Οι δύο τύποι ασύρματης κάλυψης που προσφέρονται είναι :

- **NLOS** – Αυτή η λειτουργία είναι παρόμοια με το Wi-Fi. Η συσκευή διαθέτει μια μικρή κεραία με την οποία συνδέεται στον σταθμό βάσης WiMAX. Το εύρος συχνοτήτων είναι 2 με 11 GHz.
- **LOS** – Εδώ μια σταθερή κεραία έχει απευθείας οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης. Αυτού του είδους επικοινωνία είναι πιο σταθερή και επιτυγχάνονται υψηλότερες ταχύτητες, με λιγότερα σφάλματα. Η LOS επικοινωνία, χρησιμοποιεί υψηλότερες συχνότητες που φτάνουν τα 66 GHz.

	802.16	802.16a	802.16e
Spectrum	10–66 GHz	2–11 GHz	< 6 GHz
Modulation	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM
Mobility	Fixed	Fixed	Mobile (≤ 75 Mph)
Bit Rate	32–134 Mbps	70–100 Mbps	15 Mbps
Call Radius	1–3 miles	3–5 miles	1–3 miles
Bandwidth	20, 25, 28 MHz	1.25–20 MHz	5 MHz

Εικόνα 51 Εκδόσεις του WiMAX

5.1.1 Wi-Fi και WiMAX

Με την πρώτη ματιά το WiMAX μπορεί να μοιάζει με το Wi-Fi αλλά πρακτικά οι δυο τεχνολογίες έχουν διαφορές :

- **Πρότυπα της IEEE** – Και οι δυο τεχνολογίες αναπτύχθηκαν από την IEEE με την διαφορά ότι το WiMAX ακολουθεί το πρότυπο 802.16 και το Wi-Fi ακολουθεί το πρότυπο 802.11.

⁸ Κομμάτι του δικτύου μεταξύ των εγκαταστάσεων του παρόχου Ίντερνετ και της οικίας του χρήστη.

- **Εμβέλεια** – Το Wi-Fi χρησιμοποιείται σε τοπικά δίκτυα και προσφέρει κάλυψη μερικών δεκάδων μέτρων, με ταχύτητες έως 54 Mbps. Το WiMAX υπο καλές συνθήκες μπορεί να καλύψει έως και μερικές δεκάδες χιλιόμετρα και μπορεί να συνδέσει τα οικιακά Wi-Fi δίκτυα με το ίντερνετ.
- **Επεκτασιμότητα** – Το Wi-Fi προορίζεται για λειτουργία LAN με υποστήριξη μερικών δεκάδων χρηστών και ενός συνδρομητή για κάθε CPE (Customer Premises Equipment) ⁹. Το WiMAX σχεδιάστηκε να υποστηρίζει από ένα έως εκατοντάδες CPEs με πολλούς χρήστες πίσω από κάθε CPE.
- **Ταχύτητα** – Το Wi-Fi δουλεύει στα 2.7bps/Hz, με μέγιστη ταχύτητα 54 Mbps σε κανάλι εύρους 20 MHz. Το WiMAX αποδίδει 5 bps/Hz, με μέγιστη ταχύτητα έως και 100 Mbps σε κανάλι 20 MHz.
- **QoS** – Το Wi-Fi δεν εγγυάται κάποιου είδους QoS σε αντίθεση με το WiMAX που προσφέρει πολλαπλά επίπεδα QoS. Γι' αυτό το WiMAX, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο δίκτυο κορμού για να συνδέσει το Wi-Fi στο ίντερνετ.

5.1.2 Εφαρμογές του WiMAX

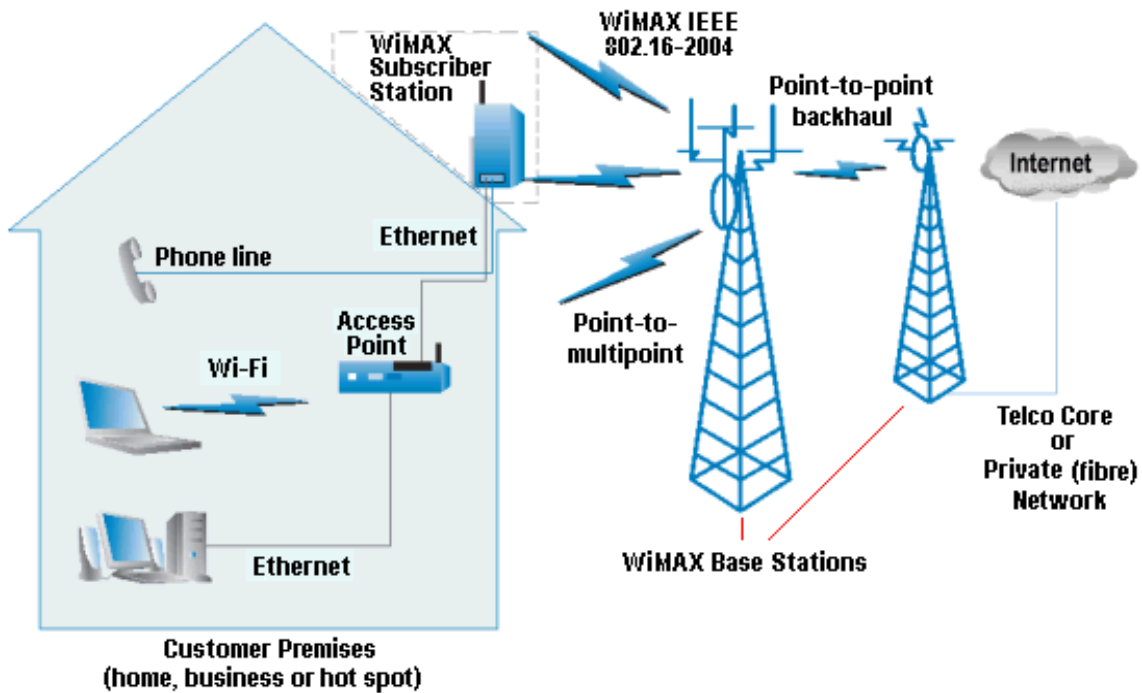
Στις πρώτες μέρες του το WiMAX χαρακτηρίστηκε ως η τεχνολογία του μέλλοντος, ανήκει στην οικογένεια 802.16 της IEEE και υποστηρίζει ταχύτητες έως 70 Mbps με το σήμα να φτάνει τα 10 χιλιόμετρα. Οι υποστηρικτές αυτής της τεχνολογίας την προωθούν για τις πολυδιάστατες εφαρμογές που μπορεί να έχει :

- Κάλυψη σε περιβάλλοντα με ανάγκη για σταθερή ή κινητή επικοινωνία
- Δίκτυο κορμού για το Wi-Fi.
- WiMAX hot-spots με μεγάλη εμβέλεια
- Ευρυζωνική πρόσβαση για σταθερούς και εν κινήσει χρήστες
- “Last Mile” κάλυψη

Το WiMAX λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με το Wi-Fi αλλά σε μεγαλύτερη κάλυψη, με υψηλότερες ταχύτητες και για μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Ανάλογα με την μπάντα συχνοτήτων και την υλοποίηση, ένα σύστημα WiMAX μπορεί να υποστηρίξει μεγάλο εύρος εφαρμογών από επιχειρηματικές λύσεις έως και κάλυψη αστικών και αγροτικών περιοχών. Με τις υπάρχουσες προδιαγραφές, εύκολα μπορούν να υποστηριχθούν από κοινές εφαρμογές ίντερνετ, όπως το web browsing έως και εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως η μετάδοση ήχου και εικόνας. Το WiMAX έχει σχεδιαστεί κυρίως για χρήση σε εξωτερικούς χώρους και λειτουργία point-to-multipoint, όπου ένας σταθμός βάσης εξυπηρετεί πολλούς συνδρομητές σε κυψέλη έκτασης έως και μερικών δεκάδων χιλιομέτρων. Η ραδιοδιεπαφή έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να υποστηρίζονται επίσημες και ανεπίσημες μπάντες συχνοτήτων ανά τον κόσμο και να υπάρχει ευελιξία. Σε υψηλές συχνότητες άνω των 10 GHz, η ταχύτητα

⁹ Οικιακός εξοπλισμός του χρήστη με τον οποίον συνδέεται στο ίντερνετ. Συνήθως το κλασικό ασύρματο router.

φτάνει τα 100 Mbps σε κανάλι εύρους ζώνης 25 MHz. Σε χαμηλότερες συχνότητες, η ταχύτητα κυμαίνεται κοντά στα 70 Mbps, με κανάλι 20 MHz. Το WiMAX μπορεί να καλύψει μεγάλη πληθώρα αναγκών, όπως το να φέρει πιο κοντά τις ευρυζωνικές συνδέσεις στον καταναλωτή. Μπορεί να καλύψει κενά σε τεχνολογίες, όπως cable, xDSL, T1/E1, να χρησιμοποιηθεί ως κορμός για το WiFi και να αποτελέσει το τελευταίο κομμάτι πρόσβασης των χρηστών στην τεχνολογία “fiber to the curb”.



Εικόνα 52 Το WiMAX ως backbone για το Wi-Fi.

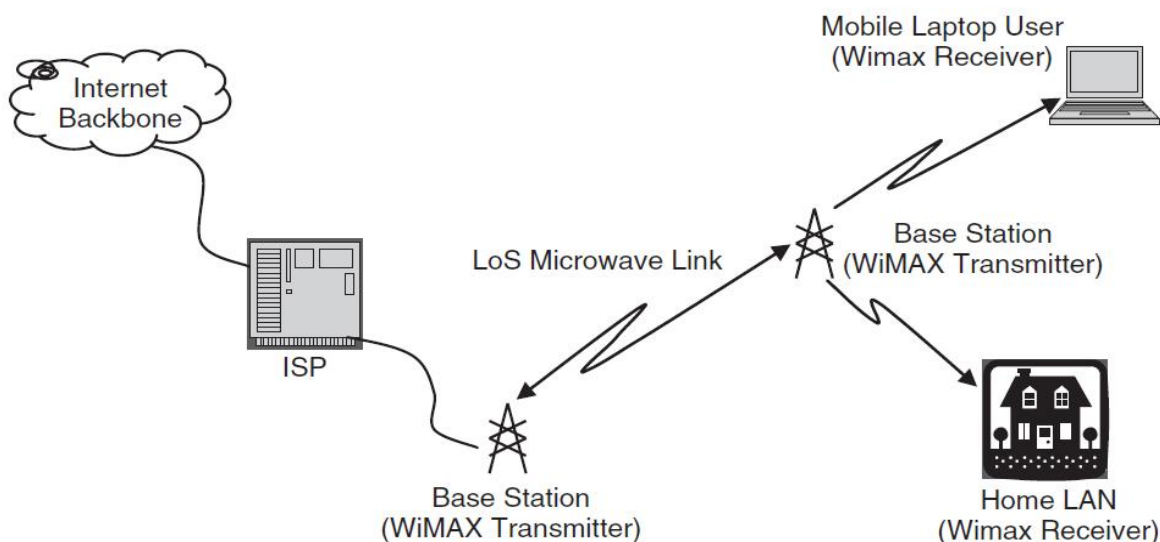
Επίσης μπορεί να αποτελέσει λύση σε περιπτώσεις, όπου υπάρχει ανάγκη για κανάλι μεγάλου εύρους ζώνης (> 10 MHz) με την χρήση ήδη υπάρχουσας υποδομής ώστε με μικρό κόστος να προσφέρονται υψηλής ποιότητας multimedia υπηρεσίες. Η αξιοποίηση της υπάρχουσας υποδομής είναι δελεαστική για τους παρόχους υπηρεσιών, που αναζητούν μια τεχνολογία για να καλύψουν τον αυξανόμενο αριθμό των χρηστών και των αναγκών τους. Το WiMAX, υποστηρίζει διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών τύπων δικτύων και δεν αποτελεί ακριβή αναβάθμιση για ένα υπάρχον δίκτυο. Επίσης η μεγάλη κάλυψη σε συνδυασμό με την παροχή QoS δυνατοτήτων το κάνουν ιδανικό για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, ευαίσθητες σε καθυστερήσεις, όπως είναι το VoIP, το video streaming καθώς και οποιοδήποτε άλλου είδους κατέβασμα δεδομένων. Καθώς το WiMAX είναι βασισμένο στο IP, μπορεί να ενσωματωθεί σε ήδη υπάρχοντα 3G δίκτυα, καθώς και άλλα ασύρματα ή ενσύρματα δίκτυα, ώστε να μπορεί να γίνει μέρος ενός ευρυζωνικού δικτύου πλήρους κάλυψης.

5.2 Βασικά χαρακτηριστικά τεχνολογίας WiMAX

5.2.1 Λειτουργία συστήματος WiMAX

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 53 ένα βασικό σύστημα WiMAX αποτελείται από δύο μέρη :

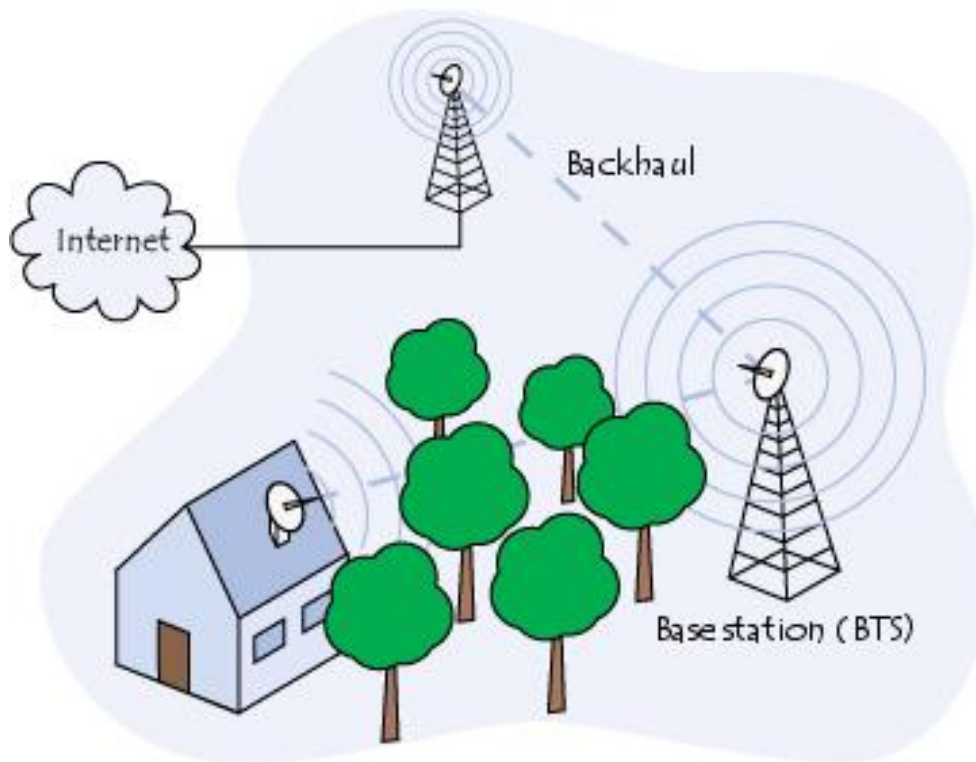
- **WiMAX Base Station (BS)** – Σύμφωνα με το πρότυπο IEE 802.16, η εμβέλεια του σταθμού βάσης είναι περίπου 50 χιλιόμετρα.
- **WiMAX receiver** – Ο δέκτης μπορεί να είναι μια σταθερή κεραία σε ένα σπίτι ή ενσωματωμένη σε μια συσκευή, όπως ένα laptop ή ένα κινητό τηλέφωνο.



Εικόνα 53 Βασικό Σύστημα WiMAX

Ο σταθμός βάσης WiMAX έχει παρόμοια κατασκευή και λειτουργία με έναν σταθμό βάσης δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Η κάλυψη φτάνει έως και τα 10 χιλιόμετρα (εμβέλεια, όπου το σήμα διατηρείται βέλτιστο) και οι ασύρματες WiMAX συσκευές εντός εμβέλειας έχουν πρόσβαση στο ίντερνετ. Το MAC επίπεδο του σταθμού βάσης, όπως ορίζεται από το πρότυπο 802.16, είναι υπεύθυνο για την διαλειτουργικότητα του δικτύου και ρυθμίζει τις ανάγκες του δικτύου σε bandwidth στο downlink και στο uplink σε πραγματικό χρόνο, για να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των χρηστών. Η περιοχή που καλύπτει κάθε σταθμός βάσης όπως και στην κινητή τηλεφωνία, ονομάζεται κυψέλη. Θεωρητικά μια κυψέλη μπορεί να καλύψει μια περιοχή 50 χιλιομέτρων, αλλά πρακτικά η λειτουργική εμβέλεια είναι περίπου 10 χιλιόμετρα. Ο σταθμός βάσης μπορεί να συνδέεται στο ίντερνετ ενσύρματα μέσω μιας σύνδεσης υψηλής ταχύτητας ή με έναν άλλον σταθμό βάσης WiMAX μέσω ασύρματης LOS ζεύξης (Backhaul) (Εικόνα 54). Μέσω τέτοιων ασύρματων LOS καναλιών, μπορεί να συνδεθεί μεγάλος αριθμός σταθμών βάσης. Η δυνατότητα σύνδεσης πολλών σταθμών βάσης μεταξύ τους σε συνδυασμό με την μεγάλη περιοχή που καλύπτει κάθε ένας τους, κάνουν το WiMAX ιδανικό για κάλυψη μεγάλων σε έκταση αγροτικών και δυσπρόσιτων περιοχών, όπου οι ενσύρματη σύνδεση δεν είναι δυνατή. Όπως και με τα κινητά τηλέφωνα, υπάρχει η δυνατότητα μετακίνησης του χρήστη από την κάλυψη ενός σταθμού βάσης, σε έναν άλλον χωρίς να διακόπτεται η επικοινωνία, δηλαδή το

λεγόμενο roaming. Ένας δέκτης WiMAX μπορεί να είναι μια συσκευή, στην οποία συνδέεται ξεχωριστή WiMAX κεραία σε μορφή USB και κάρτας ή η κεραία μπορεί να υπάρχει ήδη ενσωματωμένη σε "WiMAX ready" συσκευές, όπως laptops και κινητά τηλέφωνα.



Εικόνα 54 WiMAX Backhaul

Ένα τυπικό σενάριο χρήσης του WiMAX περιλαμβάνει την χρήση ενός σταθμού βάσης για την πλήρη κάλυψη μιας μητροπολιτικής (Metropolitan) περιοχής. Ο σταθμός βάσης μπορεί να συνδέεται στο κυρίως δίκτυο ίντερνετ μέσω ασύρματης point-to-point ζεύξης ή μέσω οπτικής ίνας, όπου αυτό είναι δυνατό. Με την βοήθεια ενός ασύρματου WiMAX router μπορεί το σήμα να διοχετευθεί εύκολα σε έναν εργασιακό χώρο ή σε ένα σπίτι, όπως ακριβώς με το Wi-Fi LAN. Λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου φάσματος στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων, οι υλοποιήσεις του WiMAX, συνήθως έχουν περιορισμένη χωρητικότητα και απαιτούν οι σταθμοί βάσης να έχουν απόσταση 2 ή 3 χιλιομέτρων μεταξύ τους. Σε μη αστικές περιοχές με μικρότερη πυκνότητα χρηστών και παρεμβολών το WiMAX επιτυγχάνει μεγαλύτερη κάλυψη, παρέχοντας NLOS κάλυψη που φτάνει τα 75 τετραγωνικά χιλιόμετρα, στην μπάντα των 3.5 GHz. Μια συνήθης εσφαλμένη αντίληψη με το WiMAX, όπως και με άλλες ασύρματες τεχνολογίες είναι δυνατότητα παροχής της μέγιστης υποσχόμενης ταχύτητας σε όλη την περιοχή κάλυψης. Για παράδειγμα το WiMAX δεν μπορεί να αποδώσει ταχύτητες 70-100 Mbps σε ακτίνα 50 χλμ. Σε λειτουργία μέγιστης κάλυψης, αυξάνεται ο αριθμός των σφαλμάτων μετάδοσης και πέφτει η ταχύτητα, αντίθετα όταν μειώνεται η περιοχή κάλυψης είναι δυνατόν να επιτευχθούν μεγαλύτερες ταχύτητες.

Πρώτες υλοποιήσεις του WiMAX προσέφεραν αρχικά χωρητικότητα ύψους 40 Mbps ανά κανάλι επικοινωνίας, για σταθερές και φορητές εφαρμογές ανάλογα πάντα από την υλοποίηση. Αυτή η απόδοση, είναι ικανή να υποστηρίξει εκατοντάδες εταιρικές T1/E1 γραμμές και ακόμα περισσότερες xDSL οικιακές συνδέσεις. Είναι δυνατή η παροχή ευρυζωνικής κάλυψης σε κτήρια,, παράλληλα με ήδη υπάρχουσες ενσύρματες λύσεις ή ατομικά σε αραιοκατοικημένες περιοχές. Οι υλοποιήσεις με κινητές συσκευές είναι πιο αργές και καταγράφουν ταχύτητες της τάξης των 15 Mbps σε κυψέλη 3

χιλιομέτρων. Ουσιαστικά με το WiMAX οι χρήστες μπορούν να απελευθερωθούν από την περιορισμένη κάλυψη των κλασικών δικτύων ίντερνετ και να απολαμβάνουν ευρυζωνικές ταχύτητες πρόσβασης μέσα σε μια μητροπολιτική περιοχή.

5.2.2 Φάσμα

Αν και δεν υπάρχει κάποιο παγκόσμια αδειοδοτημένο φάσμα, το WiMAX forum έχει εκδώσει τρία φασματικά προφίλ : 2.3 , 2.5 και 3.5 GHz σε μια προσπάθεια να υπάρξει ομοιογένεια και να μειωθεί το κόστος παραγωγής εξοπλισμού WiMAX. Γενικότερα ισχύει ότι όσο περισσότερες συσκευές παραχθούν, τόσο μικρότερο θα είναι το τελικό κόστος της μονάδας. Παρόμοια λογική κατασκευής και κόστους ισχύει και για τους σταθμούς βάσης. Στην μη αδειοδοτημένη περιοχή, χρησιμοποιείται η μπάντα των 5.x GHz. Οι εταιρίες τηλεπικοινωνιών δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτήν την περιοχή για δημόσια ευρεία χρήση από τους καταναλωτές, επειδή δεν τους ανήκει και δεν την ελέγχουν, μπορούν όμως να την χρησιμοποιήσουν για συνδέσεις backhaul, μεταξύ των σταθμών βάσης. Στην Αμερική το μεγαλύτερο κομμάτι διαθέσιμων συχνοτήτων είναι κοντά στα 2.5 GHz και έχει ήδη ανατεθεί στις εταιρίες Sprint Nextel και Clearwire. Οι τελευταίες εκδώσεις του WiMAX, καλύπτουν περιοχές του φάσματος από 2 έως 66 GHz. Το φάσμα των 3.5 GHz ήταν το πρώτο που χρησιμοποιήθηκε εμπορικά, με το ελεύθερο μη αδειοδοτημένο φάσμα των 5.8 GHz να έχει επίσης προϊόντα που προορίζονται για αυτό. Σε ΗΠΑ και Κορέα έχουν αρχίσει να βγαίνουν προϊόντα που δουλεύουν σε 2.3 GHz, με αυτήν να είναι η προτιμώμενη συχνότητα στην Ασία. Κάποιες άλλες χώρες, όπως Ινδία και Ινδονησία χρησιμοποιούν συνδυασμό 2.5 και 3.3 GHz. Άλλη υποψήφια φασματική περιοχή για το WiMAX, είναι αυτή των 700 MHz που χρησιμοποιείται από την αναλογική τηλεόραση. Για να γίνει όμως διαθέσιμη πρέπει πρώτα να ολοκληρωθεί η μετάβαση στην ψηφιακή τηλεόραση και πέρα από αυτό το WiMAX θα έχει να ανταγωνιστεί και άλλες τεχνολογίες όπως το LTE που είναι υποψήφιος για αυτήν την περιοχή συχνοτήτων. Για παράδειγμα στις ΗΠΑ ήδη από το 2008, ο εθνικός οργανισμός FCC (Federal Communications Commission) ξεκίνησε δημοπρασία για αυτές τις συχνότητες με το μεγαλύτερο μέρος του φάσματος να καταλήγει στις εταιρίες Verizon Wireless και AT&T. Και οι δυο αυτές εταιρίες σήμερα έχουν υλοποιήσει δίκτυα LTE.

Τα προφίλ που βγάζει το WiMAX forum ορίζουν χαρακτηριστικά, όπως μέγεθος καναλιού, λειτουργία TDD/FDD και άλλες απαραίτητες λεπτομέρειες, ώστε τα προϊόντα που θα προκύψουν να έχουν συμβατότητα. Υλοποιήσεις για σταθερή επικοινωνία υποστηρίζουν TDD και FDD, ενώ για κινητή επικοινωνία υποστηρίζεται μόνο TDD προς το παρόν. Για σταθερές συνδέσεις το κανάλι μπορεί να είναι 3.5, 5, 7 και 10 MHz, ενώ για κινητές συνδέσεις 5, 8.75 και 10 MHz. Το WiMAX μπορεί να υποστηρίξει κανάλια με ακόμα μεγαλύτερο εύρος ζώνης, απλά χρησιμοποιούνται οι παραπάνω τιμές γιατί έχουν οριστεί στα ανάλογα προφίλ χρήσης από το WiMAX forum.

5.3 WiMAX Mobile

5.3.1 Εισαγωγή

Το Mobile WiMAX βασίζεται στα πρότυπα IEEE 802.16-2004 και 802.16e-2005, τα οποία υποστηρίζουν κινητικότητα με ταχύτητες πάνω από 120 χλμ την ώρα. Το πρότυπο 802.16-2004 του WiMAX, υποστηρίζει λειτουργία σε point-to-multipoint (PMP) και mesh mode. Σε

PMP πολλαπλοί συνδρομητές – SS (subscriber station) συνδέονται σε έναν σταθμό βάσης, όπου το κανάλι από το SS προς τον σταθμό βάσης ονομάζεται uplink – UL και το αντίστροφο, από τον σταθμό βάσης στο SS ονομάζεται downlink – DL. Στο mobile WiMAX δίνεται μεγαλύτερη βάση στην μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, στις συσκευές για συντήρηση μπαταρίας και στα handovers μεταξύ του ίδιου ή διαφορετικού τύπου δικτύου. Αυτή η έκδοση ουσιαστικά έχει ως στόχο, οι χρήστες να μπορούν να παραμένουν συνδεδεμένοι σε ένα MAN δίκτυο ενώ κινούνται. Υποστηρίζονται κινητές συσκευές που αποτελούνται από κινητά Smartphones και PDAs έως φορητά notebook και laptop. Το 802.16e λειτουργεί στο εύρος συχνοτήτων 2.3 και 2.5 GHz. Τα βασικά πλεονεκτήματα του mobile WiMAX έναντι άλλων συστημάτων είναι :

- Καλύτερη απόδοση συστήματος λόγω εξειδικευμένων μηχανισμών QoS.
- Υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης λόγω προσαρμοστικών τεχνικών και καλής φασματικής απόδοσης.
- Ιδανικό για κάλυψη κενών σε ενσύρματα δίκτυα cable/xdsl, όπου δεν είναι δυνατή η καλωδίωση.
- Διαλειτουργικότητα δικτύων λόγω ύπαρξης προτύπου.
- Υποστήριξη NLOS επικοινωνίας.

Η καλή απόδοση του WiMAX, οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην χρήση των τεχνικών OFDM – OFDMA, σε συνδυασμό με την TDD, με την FDD να χρησιμοποιείται επίσης σε μερικές περιπτώσεις. Λόγω αυτών των τεχνικών επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης και καλή χρήση του φάσματος. Στον παρακάτω Πίνακας 1 παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι διαφορές της απλής με την mobile έκδοσης του WiMAX.

Πίνακας 2 Διαφορές WiMAX και Mobile WiMAX.

	WiMAX	Mobile WiMAX
Τύπος Σύνδεσης	Σταθερή	Σταθερή, Κινητή
Ραδιοδιεπαφή	OFDM	OFDMA
Αμφίδρομη μετάδοση (Duplex)	TDD, FDD	TDD, FDD
Handover	Όχι	Ναι
Εξοπλισμός	CPE	CPE, φορητές συσκευές
Συχνότητες	2.5, 3.4-3.6, 5.8 GHz	2.3-2.4, 2.5-2.7, 3.3-3.4, 3.4-3.8 GHz

5.3.2 Αρχιτεκτονική

Η έκδοση 802.16e-2005 του WiMAX ορίζει κυρίως το air interface και δεν δίνει λεπτομέρειες για την απ' άκρη σ' άκρη αρχιτεκτονική του δικτύου. Λεπτομέρειες, όπως απαιτήσεις δικτύου, αρχιτεκτονική και πρωτόκολλα, ορίζονται από την ομάδα **Network Working Group** (NWG)

του WiMAX forum. Η NWG δημιούργησε ένα μοντέλο αναφοράς με τις απαιτήσεις ενός WiMAX δικτύου, ώστε να υπάρχει διαλειτουργικότητα μεταξύ δικτύων διαφορετικών κατασκευαστών. Η αρχιτεκτονική του δικτύου έχει σχεδιαστεί για εκτεταμένη υποστήριξη κινητικότητας και handovers. Πιο συγκεκριμένα οι δυνατότητες που παρέχει είναι :

- Vertical και Inter-system handovers. Δυνατότητα handover μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών, όπως το Wi-Fi και τεχνολογίες οικογενειών 3GPP, 3GPP2.
- Υποστήριξη IPv4 και IPv6. Δυνατότητα κινητικότητας βασισμένη στο πρωτόκολλο IP. Παροχή πολλαπλών IP διευθύνσεων στο MS και παράλληλη λειτουργία IPv4 και IPv6.
- Υποστήριξη περιαγωγής μεταξύ δικτύων διαφορετικών παρόχων.
- Μηχανισμοί για υποστήριξη handover ακόμα και σε μεγάλες ταχύτητες (π.χ. μετακίνηση με αυτοκίνητο).

Το μοντέλο αναφοράς του δικτύου WiMAX ορίζει ένα ενοποιημένο δίκτυο με υποστήριξη για σταθερές και κινητές συσκευές, με έναν πυρήνα βασισμένο στο πρωτόκολλο IP (Εικόνα 55). Ο λογικός διαχωρισμός του δικτύου μπορεί να γίνει σε τρία μέρη :

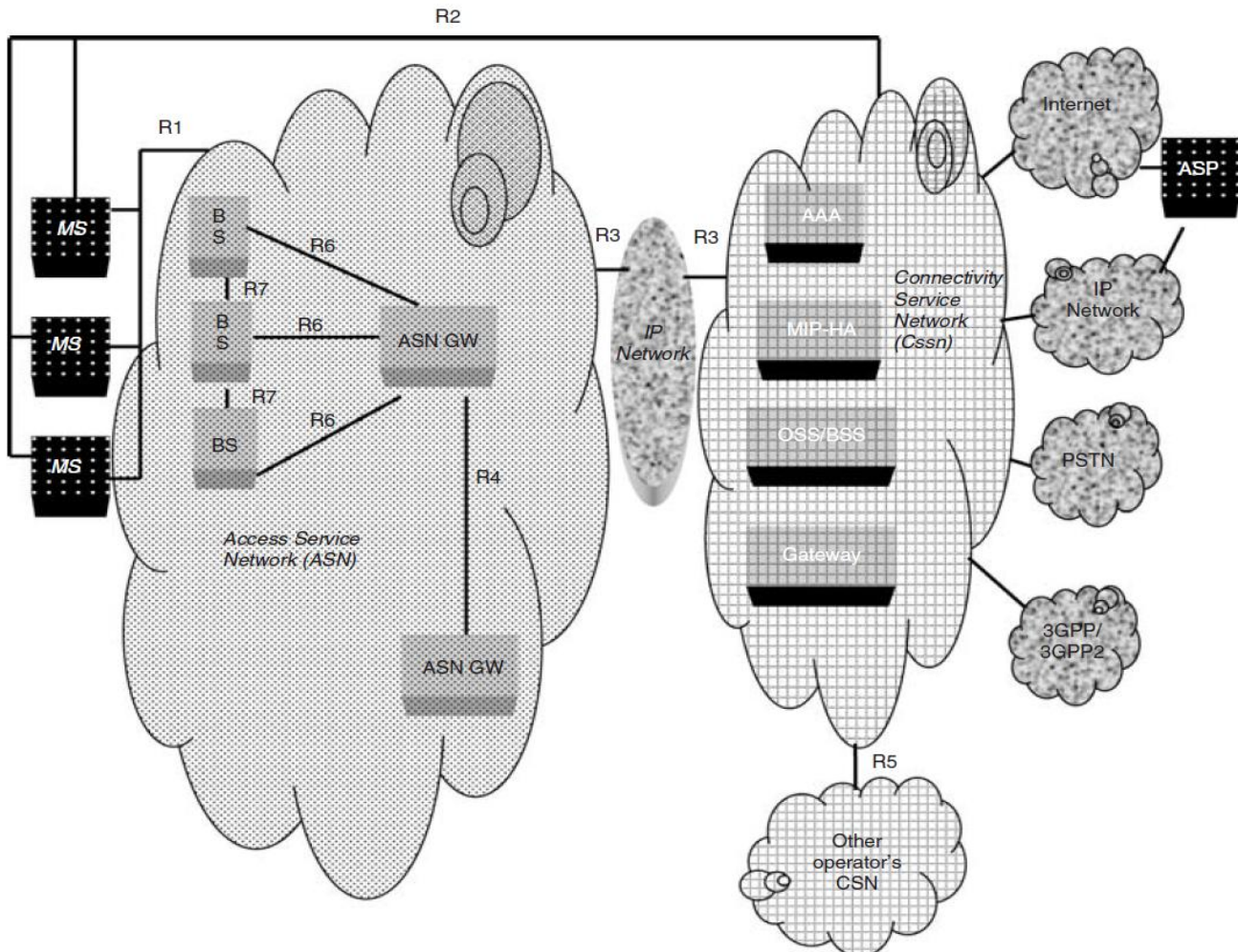
1. **MS** που χρησιμοποιείται από τον τελικό χρήστη για πρόσβαση στο δίκτυο.
2. **Access Service Network (ASN)**, το οποίο αποτελείται από έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης και ένα ή περισσότερα ASN-Gateways (ASN-G), τα οποία σχηματίζουν το RAN (Radio Access Network) του WiMAX.
3. **Connectivity Service Network (CSN)**, το οποίο παρέχει συνδεσιμότητα μέσω IP καθώς και όλες της βασικές IP λειτουργίες του δικτύου.

Παρακάτω αναλύονται οι βασικές οντότητες της Εικόνα 55 και οι διεπαφές που τις συνδέουν :

Base Station (BS) – Ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για την παροχή καναλιού επικοινωνίας στον MS μέσω της ραδιοδιεπαφής που χρησιμοποιεί το δίκτυο. Άλλες λειτουργίες του σταθμού βάσης είναι η συμμετοχή στα handovers, διαχείριση πόρων δικτύου, εφαρμογή πολιτικών QoS, ταξινόμηση κίνησης, λειτουργία DHCP (Dynamic Host Control Protocol) proxy, διαχείριση συνεδρίας (session) και ομάδων πολυδιανομής (multicast groups).

Access Service Network Gateway (ASN-GW) – Το ASN-GW λειτουργεί ως ένα δεύτερου επιπέδου σημείο διακίνησης της κυκλοφορίας του δικτύου μέσα στο ASN. Λειτουργίες του περιλαμβάνουν την διαχείριση και προσωρινή αποθήκευση προφίλ χρηστών και κλειδιών ασφαλείας, διαχείριση πόρων δικτύου, λειτουργίες AAA (Authentication, Authorization and Accounting), εγκαθίδρυση συνδέσεων με τους σταθμούς βάσης, λειτουργίες QoS, δρομολόγηση IP.

Connectivity Service Network (CSN) – Το CSN παρέχει πρόσβαση στο ίντερνετ καθώς και σε άλλα εξωτερικά δίκτυα. Ανήκει στον πάροχο του δικτύου και περιλαμβάνει εξυπηρετητές AAA για υποστήριξη αυθεντικοποίησης συσκευών, χρηστών και υπηρεσιών. Επίσης παρέχονται πολιτικές διαχείρισης QoS και ασφάλεια ανά χρήστη, γίνεται διαχείριση IP διευθύνσεων, υποστήριξη για περιαγωγή μεταξύ διαφορετικών παρόχων και μεταξύ ASNs.



Εικόνα 55 Αρχιτεκτονική WiMAX δικτύου

Η αρχιτεκτονική του WiMAX δικτύου είναι «χαλαρή» και ευέλικτη, ώστε κατά την σχεδίαση του να μπορούν να υποστηριχθούν πολλά σενάρια λειτουργίας. Συνήθως το ASN αποτελείται από πολλά BS και ένα ή περισσότερα ASN-GW. Το ASN διαχειρίζεται την ανάθεση του ραδιοφάσματος, σύνδεση MS, κινητικότητα, ασφάλεια και QoS. Λειτουργεί ως γέφυρα για την ανάθεση IP διευθύνσεων και AAA λειτουργιών του CSN. Στο ASN στεγάζεται ο Mobile IP Home Agent (HA).

Το CSN εκτελεί βασικές λειτουργίες δικτύου όπως πολιτική και έλεγχος εισόδου, διαχείριση IP διευθύνσεων και χρεώσεις. Στο CSN επίσης μπορεί να στεγάζεται ο Mobile IP Home Agent, οι AAA servers και οι πύλες (gateways) για το δημόσιο τηλεφωνικό (PSTN) και VoIP δίκτυο. Το CSN είναι υπεύθυνο για την σύνδεση με δίκτυα άλλων τεχνολογιών (3G,

xDSL) και για περιαγωγή μεταξύ άλλων CSNs. Στον παρακάτω Πίνακας 3 παρουσιάζονται οι διεπαφές (interfaces) του WiMAX δικτύου και η λειτουργία τους.

Πίνακας 3 Περιγραφή διεπαφών αρχιτεκτονικής δικτύου WiMAX.

Διεπαφή	Περιγραφή
R1	Διεπαφή μεταξύ του MS και του ASN. Ουσιαστικά είναι το air interface του δικτύου.
R2	Διεπαφή μεταξύ του MS και του CSN. Λειτουργίες AAA, διαχείριση IP διευθύνσεων και κινητικότητας χρηστών.
R3	Διεπαφή μεταξύ του ASN και του CSN. Λειτουργίες AAA, επιβολή πολιτικών δικτύου, κινητικότητα χρηστών.
R4	Διεπαφή μεταξύ των ASNs. Λειτουργίες κινητικότητας.
R5	Διεπαφή μεταξύ των CSNs. Λειτουργίες διαδικτύωσης και περιαγωγής.
R6	Διεπαφή μεταξύ BS και ASN-GW. Λειτουργίες IP για έναρξη και λήξη συνδέσεων με τα MS.
R7	Διεπαφή μεταξύ των BSs. Λειτουργία handover.

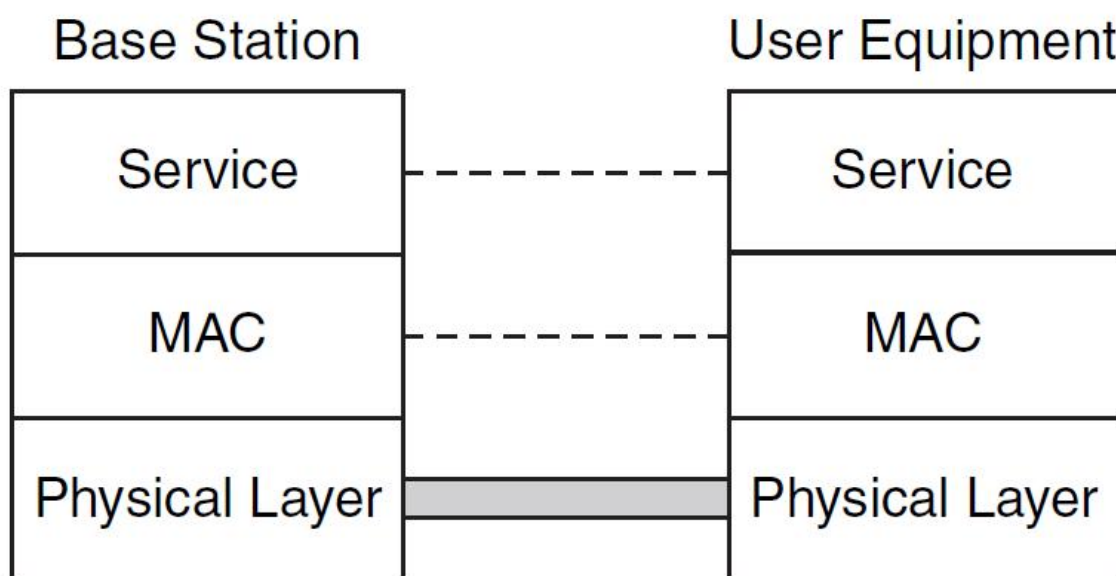
Η ανοιχτή IP αρχιτεκτονική που αποτελεί τον πυρήνα του WiMAX δικτύου, είναι μεγάλη καινοτομία σε σχέση με τις προηγούμενες ασύρματες τεχνολογίες μεγάλης εμβέλειας. Στόχος είναι να μειωθεί η πολυπλοκότητα και το κόστος διαχείρισης του δικτύου, ενώ παράλληλα να αυξάνεται η ευελιξία στη δημιουργία νέων υπηρεσιών και εφαρμογών για το δίκτυο. Εταιρίες που θέλουν να επωφεληθούν από το WiMAX μπορούν να διαλέξουν προσεκτικά τα απαραίτητα μέρη που θα αποτελούν τα ASN και CSN του δικτύου τους ώστε να καλύψουν τις ανάγκες τους με το μικρότερο δυνατό κόστος και πολυπλοκότητα. Εν συντομία δηλαδή το WiMAX είναι κατάλληλο για ταχέως αναπτυσσόμενα δίκτυα όπου η ανάγκη για επεκτασιμότητα είναι μεγάλη και συχνή. Πιο συγκεκριμένα το WiMAX μπορεί να προσφέρει :

- Δυνατότητα στον χρήστη να επιλέγει χειροκίνητα ή αυτόματα σημεία πρόσβασης στο δίκτυο (Network Access Points) και πάροχο (Network Service Provider).
- Σχεδίαση ASN και CSN που επιτρέπει την εύκολη αναβάθμιση όσον αφορά την κάλυψη, την εμβέλεια και την χωρητικότητα.
- ASN που μπορεί να υποστηρίξει πολλές τοπολογίες, όπως hub-and-spoke, hierarchical και multi-hop.
- Υποστήριξη ενσύρματων και ασύρματων backhaul συνδέσεων διαφορετικών χαρακτηριστικών και ταχυτήτων.

- Ποικιλία σταθμών βάσης με διαφορετικές δυνατότητες κάλυψης και χωρητικότητας (pico, micro, macro).

5.3.3 Διαστρωμάτωση πρωτοκόλλων

Η βασική διαστρωμάτωση των πρωτοκόλλων του WiMAX φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 56. Πρώτο είναι το φυσικό επίπεδο, που περιλαμβάνει κυρίως το υλικό, όπως κεραίες, τεχνικές κωδικοποίησης, τεχνικές διαμόρφωσης και την ραδιοδιεπαφή που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 56 Βασικά στρώματα πρωτοκόλλων του WiMAX

5.3.3.1 Physical Layer – Φυσικό επίπεδο

Το πρότυπο 802.16e, χρησιμοποιεί την τεχνική Scalable OFDMA, για μεταφορά δεδομένων σε κανάλια με εύρος ζώνης από 1.25 έως 20 MHz με την χρήση έως και 2048 υπο-φερόντων σημάτων. Υποστηρίζει τεχνικές προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Adaptive Modulation and Coding), ώστε υπό καλές συνθήκες με δυνατό σήμα να χρησιμοποιείται η τεχνική υψηλής απόδοσης 64 QAM, ενώ όταν το σήμα δεν είναι τόσο καλό να η λειτουργία να γίνεται με την πιο σταθερή τεχνική κωδικοποίησης BPSK. Σε ενδιάμεσες καταστάσεις οι τεχνικές 16 QAM και QPSK υποστηρίζονται επίσης. Άλλα χαρακτηριστικά του φυσικού επιπέδου είναι η τεχνική beam forming και η χρήση έξυπνων κεραιών MIMO μαζί με την τεχνική HARQ για διόρθωση λαθών κατά την μετάδοση.

Το OFDM ανήκει σε μια οικογένεια τεχνικών μετάδοσης, που στηρίζονται στην ιδέα της διαίρεσης του σήματος σε μικρότερα με μικρότερο εύρος ζώνης, που μεταδίδονται παράλληλα με την βοήθεια υπο-φερόντων σημάτων. Σε τέτοιο είδους μετάδοση οι παρεμβολές (Inter Symbol Interference) εξαλείφονται ή μειώνονται με την βοήθεια της τεχνικής CP (Cyclic Prefix) και επίσης, γιατί το κάθε σύμβολο που μεταδίδεται είναι αρκετά

μεγάλο ώστε η μέση καθυστέρηση που εισέρχεται κατά την μετάδοση να μην επηρεάζει αρνητικά την πληροφορία.

Το Beam Forming είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται από έξυπνες κεραιές, που επιτρέπει στην κεραία να επικεντρώνει το σήμα στην κατεύθυνση που βρίσκονται οι κινητές συσκευές ενώ αυτές κινούνται μέσα στην περιοχή που καλύπτει ο σταθμός βάσης. Η τεχνική αυτή προσφέρει ευκολότερη κάλυψη μιας περιοχής, κάνει εξοικονόμηση ενέργειας καθώς επικεντρώνει το σήμα στην κατεύθυνση που πρέπει και επιτυγχάνει μεγαλύτερη διείσδυση του σήματος σε εσωτερικούς χώρους.

Στην τεχνολογία κεραιών MIMO, το σήμα στέλνεται και λαμβάνεται με την χρήση πολλαπλών κεραιών. Η τεχνική εκμεταλλεύεται το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών που ακολουθεί το σήμα λόγω ανακλάσεων και το χρησιμοποιεί προς όφελος της μετάδοσης. Αυτός είναι περισσότερο χρήσιμο σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου το σήμα μπορεί να αντανακλάται σε κτήρια και άλλα φυσικά εμπόδια. Χρησιμοποιώντας MIMO κεραιές επιτυγχάνεται καλύτερη NLOS κάλυψη, όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή πομπού δέκτη και επίσης το σήμα γίνεται πιο σταθερό και αυξάνεται η χωρητικότητα σε αστικά περιβάλλοντα.

5.3.3.2 MAC – Media Access Control Layer

Το επίπεδο MAC είναι υπεύθυνο για την σύνδεση των πρωτοκόλλων υψηλότερων επιπέδων, όπως το IP, με το φυσικό επίπεδο και χωρίζεται επιπλέον σε τρία υποστρώματα : το Convergence Sublayer (CS), το Common Part Sublayer (CPS) και το Security Sublayer (SeS). Εδώ ορίζεται ένας αριθμός κανόνων, που δείχνουν τον τρόπο που ενσύρματες τεχνολογίες, όπως το Ethernet, το ATM και το IP ενθυλακώνονται στην ραδιοδιεπαφή για αποστολή μέσω αέρα.

Το CS διευκολύνει την επικοινωνία με τα πρωτόκολλα υψηλότερων επιπέδων που υπάρχουν πιο πάνω από το MAC. Το CS λαμβάνει πλαίσια δεδομένων (data frames) από τα πάνω επίπεδα και τα ταξινομεί. Κατά την διάρκεια της ταξινόμησης, μπορεί να γίνουν και άλλες λειτουργίες, όπως συμπίεση κεφαλίδων των πλαισίων (header compression), πριν τα πλαίσια περάσουν στο CPS. Καθώς τα δεδομένα κινούνται και στις δύο κατευθύνσεις, το ίδιο συμβαίνει και τα το στρώμα πρωτοκόλλων. Έτσι το CS εκτός από το να προωθεί δεδομένα προς τα κάτω στρώματα, παράλληλα μπορεί να δέχεται δεδομένα που θα προορίζονται για τα από πάνω στρώματα.

Το CPS είναι σημαντικό κομμάτι του MAC επιπέδου, καθώς ορίζει τη μέθοδο πρόσβασης στο φυσικό μέσον. Παρέχει λειτουργίες σχετικές με την πολύπλευρη, πρόσβαση στο κανάλι μετάδοσης, αρχικοποίηση τοποθέτησης πλαισίων στο φυσικό μέσον και λειτουργίες QoS.

Το SeS παρέχει μυστικότητα κατά την μετάδοση του σήματος στο ασύρματο δίκτυο. Ορίζει ισχυρή προστασία κατά της κλοπής υπηρεσιών που προσφέρονται και περιγράφει πόσο ασφαλής είναι η επικοινωνία με την χρήση ανταλλαγής κλειδιών ασφαλείας κατά την αυθεντικοποίηση. Κατά την μεταφορά δεδομένων, η κρυπτογράφηση γίνεται με τους αλγόριθμους AES και DES.

Επιπλέον λειτουργίες του MAC επιπέδου περιλαμβάνουν συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας (Sleep Mode και Idle Mode) και μηχανισμούς handover. Σημαντικό χαρακτηριστικό του 802.16 προτύπου είναι το ότι αποτελεί μια τεχνολογία προσανατολισμένη σε σύνδεση (Connection Oriented technology). Αυτό προϋποθέτει ότι μια κινητή συσκευή WiMAX δεν μπορεί να μεταδώσει δεδομένα, αν ο σταθμός βάσης δεν έχει ορίσει κάποιο κανάλι

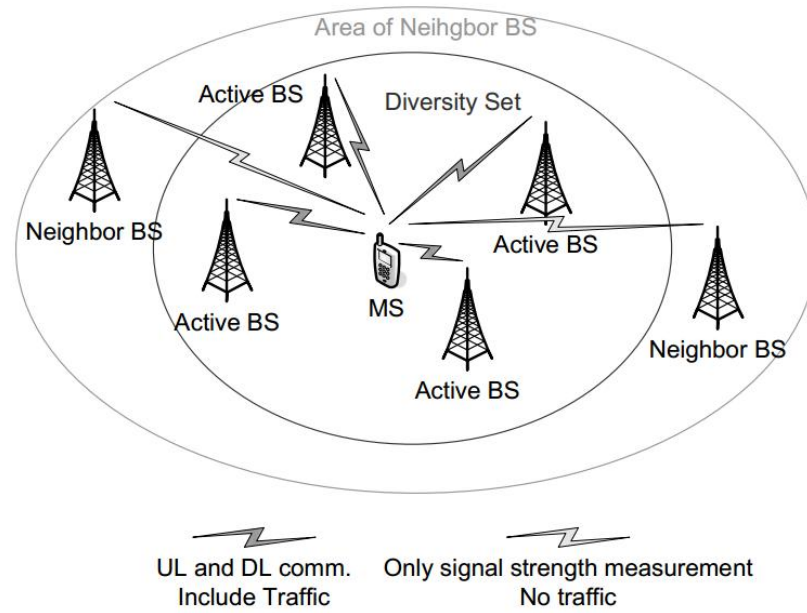
επικοινωνίας για την συγκεκριμένη μονάδα. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας εγγυάται καλή υποστήριξη QoS μεγάλης ποιότητας.

5.3.4 Handovers

Στην προηγούμενη έκδοση του WiMAX, την 802.16-2004 ορίζονταν μόνο η σταθερού τύπου σύνδεση χωρίς μετακινήσεις. Η συσκευή του χρήστη έπρεπε να βρίσκεται σταθερή σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή καθ' όλη την διάρκεια της σύνδεσης στο WiMAX δίκτυο. Η εισαγωγή υποστήριξης για handovers έγινε στην έκδοση 802.16e του WiMAX. Η λειτουργία handover είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του mobile WiMAX. Κατά την διάρκεια του handover υπάρχει πάντα κίνδυνος να μειωθεί η απόδοση της επικοινωνίας ή στην χειρότερη περίπτωση να κοπεί η σύνδεση. Για να αποφευχθούν τέτοιου είδους φαινόμενα, η διαδικασία του handover περνάει από πολλά επίπεδα βελτιστοποίησης, ώστε η μετάβαση από έναν σταθμό βάσης σε άλλον να είναι όσο πιο ομαλή γίνεται. Υπάρχουν τρεις τύποι handover :

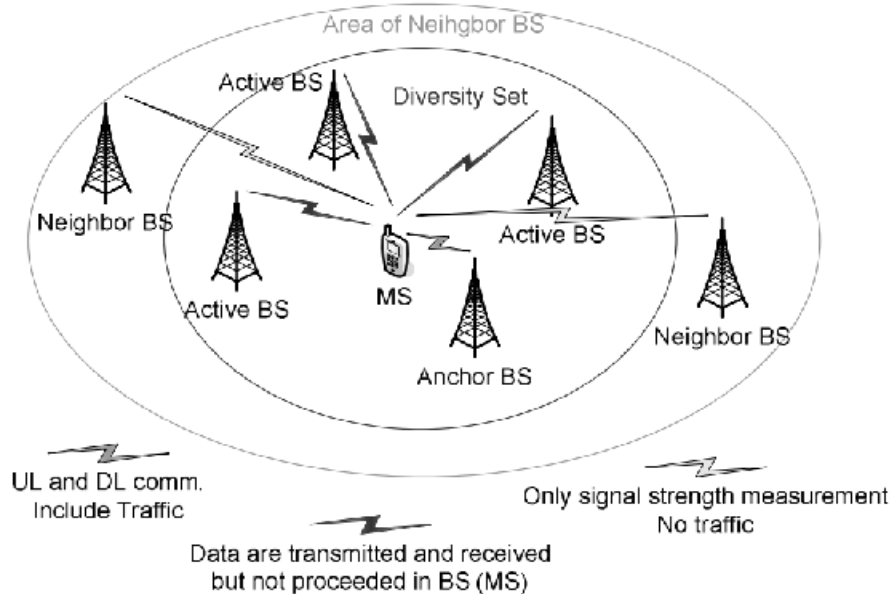
- **Hard Handover**
- **Macro Diversity Handover (MDHO)**
- **Fast Base Station Switching (FBSS)**

Η υποστήριξη hard handover είναι υποχρεωτική για όλες τις WiMAX συσκευές, ενώ οι άλλοι δύο τρόποι είναι προαιρετικοί. Στο hard handover, ο MS επικοινωνεί μόνο με έναν σταθμό βάσης και η σύνδεση με τον παλιό σταθμό βάσης διακόπτεται πριν ξεκινήσει η επικοινωνία με τον νέο. Το handover πραγματοποιείται όταν το σήμα της κυψέλης που μπαίνει ο MS είναι πιο δυνατό από το σήμα της κυψέλης από την οποία εξέρχεται. Στο MDHO (Εικόνα 57) MS και BS διατηρούν ένα "Diversity set" που είναι μια λίστα των σταθμών βάσης που παίρνουν μέρος στην διαδικασία του handover. Ο MS επικοινωνεί με όλους τους σταθμούς βάσης στο diversity set. Μέχρι να ολοκληρωθεί το handover στο downlink ο MS λαμβάνει δεδομένα από τουλάχιστον δύο BS και κάνει τη σύνθεση, ενώ στο uplink στέλνει δεδομένα σε πολλούς BS οι οποίοι τα διαχειρίζονται και τα προωθούν αν χρειάζεται. Σταθμοί βάσης που λαμβάνουν το σήμα από τον MS αλλά βρίσκονται μακριά για να συμμετάσχουν στην διαδικασία του handover ονομάζονται "Neighbor BS".



Εικόνα 57 WiMAX Macro Diversity Handover – MDHO

Στο FBSS, MS και BS διατηρούν ομοίως με το MDHO ένα diversity set. Ο MS συνεχόμενα ελέγχει τα BS από το diversity set και ορίζει ένα “Anchor BS”. Το anchor BS είναι ο μοναδικός σταθμός βάσης από το diversity set με τον οποίο επικοινωνεί ο MS (uplink, downlink). Ο anchor BS μπορεί να αλλάζει από μετάδοση σε μετάδοση ανάλογα με τον αλγόριθμο επιλογής του MS. Αυτό σημαίνει ότι κατά το handover κάθε πακέτο δεδομένων που φεύγει από τον MS, μπορεί να σταλεί από διαφορετικά BS ανάλογα με τις συνθήκες αλλαγής.



Εικόνα 58 WiMAX Fast Base Station Switching - FBSS

5.3.5 Ασφάλεια

Όπως σε κάθε άλλο σύστημα έτσι και στο WiMAX η ασφάλεια είναι σημαντικό κομμάτι της λειτουργίας του. Στόχος των μέτρων ασφαλείας είναι η προστασία από τις διάφορες απειλές και οποιασδήποτε μορφής μη εξουσιοδοτημένη πρόσβασης. Στο WiMAX η ασφάλεια έχει υλοποιηθεί στην «καρδιά» του συστήματος χωρίς να επηρεάζει την λειτουργία και την απόδοση του δικτύου. Καθώς το WiMAX χρησιμοποιεί το IP ως το βασικό πρωτόκολλο μεταφοράς, πέρα από τα βασικά μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την ασύρματη μετάδοση, πρέπει να ενσωματωθούν και οι μηχανισμοί ασφαλείας του IP πρωτοκόλλου. Οι ομάδες εργασίας της IEEE 802.16 ξεκίνησαν την προσθήκη μηχανισμών ασφαλείας από τα πρώτα στάδια σχεδίασης του WiMAX. Έτσι η ασφάλεια αποτελεί βασικό δομικό λίθο του WiMAX και όχι κάποιο χαρακτηριστικό που προστέθηκε αργότερα. Με αυτήν την προσέγγιση οι μηχανισμοί ασφαλείας είναι πιο αποτελεσματικοί και δεν επηρεάζουν την επικοινωνία.

Τα στοιχεία ασφαλείας του WiMAX χωρίζονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες :

- Αυθεντικοποίηση της συσκευής του χρήστη.
- Αυθεντικοποίηση του χρήστη.
- Κρυπτογράφηση ασύρματης επικοινωνίας
- Μέθοδοι για ασφαλή μετάδοση μηνυμάτων ελέγχου και δεδομένων μέσω IP.

Κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες καλύπτεται στις προδιαγραφές του προτύπου του WiMAX. Παρόλα αυτά όμως είναι βασικό να τηρούνται καλές πρακτικές ασφαλείας από τον κάτοχο του δικτύου, καθώς ακόμα και τα καλύτερα μέτρα ασφαλείας μπορούν να παρακαμφθούν αν δεν τηρούνται οι σωστές διαδικασίες λειτουργίας του δικτύου.

Κατά την δημιουργία ενός συστήματος ασφαλείας είναι σημαντικό να υπάρχει κατανόηση για όλους τους δυνατούς τρόπους, με τους οποίους το σύστημα μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο. Κάποιες από τις βασικές απειλές του WiMAX δικτύου περιγράφονται στον παρακάτω Πίνακα 4.

Πίνακας 4 Απειλές κατά δικτύων WiMAX

Τύπος απειλής	Περιγραφή
Man-in-the-middle attack	Είναι μια γνωστή επίθεση στον χώρο των δικτύων. Ανάμεσα σε δύο τερματικά A και B του δικτύου παρεμβαίνει μια ξένη συσκευή. Υποκλέπτει τη συνομιλία ανάμεσα τους, στο τερματικό A υποδύεται πως είναι το τερματικό B και το αντίστροφο. Στην περίπτωση του WiMAX η παρεμβολή γίνεται μεταξύ BS και MS.
Παραβίαση εμπιστευτικότητας	Σε αυτού του είδους την επίθεση, υποκλέπτονται μηνύματα του χρήστη ή μηνύματα ελέγχου που μεταφέρονται μέσω ασύρματων ή ενσύρματων καναλιών. Στη συνέχεια τα μηνύματα μπορούν να αναλυθούν, για να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες.
Κλοπή υπηρεσιών	Εδώ μη εξουσιοδοτημένοι χρήστες αποκτούν πρόσβαση στις υπηρεσίες του δικτύου και τις χρησιμοποιούν χωρίς πληρωμή.
Denial of Service (φυσικό επίπεδο)	Σε αυτήν την επίθεση κάποιος τρίτος επιτίθεται στα φυσικά μέρη του δικτύου και προσπαθεί να μειώσει την ποιότητα της επικοινωνίας ή να την διακόψει τελείως. Παράδειγμα είναι η δημιουργία παρεμβολών για αλλοίωση του σήματος.

Denial of Service (επίπεδο πρωτοκόλλου)	Σε αυτή την μορφή Denial of Service (DoS), οι πόροι του δικτύου απασχολούνται άσκοπα, δημιουργώντας καινούργια ψεύτικη κίνηση ή αλλάζοντας την υπάρχουσα κυκλοφορία του δικτύου. Παράδειγμα είναι τα πολλά μαζικά αιτήματα που γίνονται σε ιστοσελίδες με αποτέλεσμα να μπλοκάρει ο εξυπηρετητής.
Replay	Στην επίθεση αυτή προηγουμένως έγκυρα μηνύματα, μέσω παρεμβολής, εισέρχονται ξανά στο δίκτυο για να εξαντλήσουν πόρους και να εμποδίσουν έγκυρους χρήστες να αποκτήσουν πρόσβαση στις υπηρεσίες του δικτύου.

Γενικότερα από τις παραπάνω περιγραφές φαίνεται ότι οι βασικότερες απειλές κατά του δικτύου WiMAX είναι η κακόβουλη διαταραχή της κανονικής λειτουργίας του δικτύου, η υποκλοπή δεδομένων και η μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση.

Το πρότυπο του WiMAX λαμβάνει αρκετά μέτρα προστασίας για την αντιμετώπιση των διαφόρων απειλών που μπορεί να εμφανιστούν. Τα βασικά από αυτά είναι η αμοιβαία αυθεντικοποίηση του χρήστη και της συσκευής του, ευέλικτη διαχείριση κλειδιών ασφαλείας, κρυπτογράφηση κίνησης και διαχείριση της ασφάλειας των μηνυμάτων. Τα κύρια πρωτόκολλα ασφαλείας στο WiMAX είναι :

- **PKMv2 (Privacy Key Management version 2)** – Χρησιμοποιείται ως πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιών ασφαλείας για την κρυπτογραφημένη και εξουσιοδοτημένη ανταλλαγή κλειδιών για multicast και broadcast κίνηση.
- **EAP (Extensible Authentication Protocol)** – Πρωτόκολλο του IETF που αναλαμβάνει την αυθεντικοποίηση συσκευών και χρηστών.
- **AES (Advanced Encryption Standard)** – Είναι το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση των δεδομένων που μεταδίδονται μέσω αέρα.

Κατά τη λειτουργία του δικτύου τα παραπάνω μέτρα ασφαλείας του δικτύου συντονίζονται στα παρακάτω δύο στάδια :

Αυθεντικοποίηση WiMAX – Αυθεντικοποίηση είναι η ικανότητα του δικτύου να πιστοποιήσει ότι η ταυτότητα του συνδρομητή και η συσκευή του είναι έγκυρα και μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο. Η αυθεντικοποίηση γίνεται με το πρωτόκολλο EAP, γιατί είναι ευέλικτο και επεκτάσιμο και μπορεί να προσαρμοστεί για λειτουργία σε δίκτυο ανεξαρτήτως μεγέθους και όγκου χρηστών.

Κρυπτογράφηση WiMAX – Κρυπτογράφηση είναι η κωδικοποίηση των πακέτων που μεταδίδονται, ώστε να μην μπορούν να διαβαστούν τα περιεχόμενα τους από τρίτους χωρίς το κλειδί αποκωδικοποίησης. Αυτή την λειτουργία στο WiMAX αναλαμβάνει το AES. Με το AES για κάθε πακέτο δεδομένων υπολογίζεται μια μοναδική τιμή η οποία στέλνεται στον παραλήπτη και βοηθάει στην αποκρυπτογράφηση του μηνύματος. Αυτή η τεχνική βοηθάει στην πρόληψη επιθέσεων Man-in-the-middle. Ένα ακόμα μέτρο προστασίας είναι η

περιοδική ανανέωση των κλειδιών ασφαλείας, ώστε σε περίπτωση υποκλοπής τα παλιά κλειδιά να είναι άχρηστα.

5.4 Mobile WiMAX εναντίον LTE

Το mobile WiMAX είναι ένα ανοιχτό πρότυπο που σχεδιάστηκε από μια μεγάλη κοινότητα μηχανικών και πέρασε αρκετά στάδια πριν υλοποιηθεί. Όπως και με το Wi-Fi το ότι το πρότυπο είναι ανοιχτό σημαίνει ότι ο εξοπλισμός είναι στάνταρτ και κοστίζει λιγότερο. Η ανταγωνιστική τεχνολογία που άρχισε να τυποποιείται παράλληλα με το WiMAX είναι το LTE από τον οργανισμό 3GPP, που είναι υπεύθυνος για την συντήρηση και ανάπτυξη τεχνολογιών της οικογένειας GSM. Υπάρχουν αρκετές ομοιότητες ανάμεσα στις δυο τεχνολογίες:

- Και οι δύο είναι τεχνολογίες 4G που σχεδιάστηκαν με επίκεντρο την μεταφορά δεδομένων και όχι φωνής, όπως γινόταν με τις τεχνολογίες έως το 3G.
- Ως κορμό έχουν δίκτυα βασισμένα εξολοκλήρου στο IP πρωτόκολλο.
- Για ραδιοδιεπαφή χρησιμοποιούν την τεχνική OFDMA.

Οι δυο τεχνολογίες έχουν πολλές ομοιότητες στα βασικά δομικά τους στοιχεία και δεν διαφέρουν τόσο πολύ, όσο οι αντίπαλοι των προηγούμενων δύο γενεών (GSM και CDMA). Παρόλα δεν παύουν να είναι δυο διαφορετικές υλοποιήσεις, οι οποίες διαφέρουν σε σημεία όπως :

- Περιοχή υποστηριζόμενων συχνοτήτων
- Εύρος ζώνης καναλιών
- Εμβέλεια και χωρητικότητα κυψέλης

Στην Εικόνα 59 παρουσιάζεται αναλυτικότερα η σύγκριση των δυο τεχνολογιών.

Παράμετροι	Mobile WiMAX	LTE
Ραδιοδιεπαφή	OFDMA(Downlink) OFDMA(Uplink)	OFDMA(Downlink) SC-FDMA(Uplink)
Συχνότητες	2.3–2.4 GHz, 2.496–2.69 GHz, 3.3–3.8 GHz	Existing and New Frequency bands
Εύρος ζώνης καναλιού	5, 8.75, 10 MHz	1.25–20 MHz
Εμβέλεια Κυψέλης	2–7 KM	5 Km
Χωρητικότητα Κυψέλης	100–200 Users	More than 200 users at 5 MHz

Εικόνα 59 Mobile WiMAX εναντίον LTE

Κεφάλαιο 6^ο Συμπεράσματα

Τα πρώτα κινητά δίκτυα του μέλλοντος είναι εδώ, μπορεί όχι ακόμα στη χώρα μας, αλλά η εφαρμογή τους έχει ήδη ξεκινήσει. Θεωρητικά οι πρώτες τεχνολογίες, όπως το LTE και το WiMAX υπόσχονται πολλά, αλλά αν γίνει μια μικρή έρευνα στο διαδίκτυο, φαίνεται ότι οι αντιδράσεις είναι ακόμα ανάμεικτες. Το LTE που έχει κερδίσει έδαφος σε σχέση με το WiMAX και στηρίζεται από τις μεγαλύτερες εταιρίες κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως, δεν προσφέρει ακόμα τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Χαμηλότερες ταχύτητες από τις υποσχόμενες, σήμα 4G που σε πολλές περιοχές με υποσχόμενη κάλυψη υποβαθμίζεται σε 3G, και ένα φασματικό τοπίο που παρά τις τυποποιήσεις ακόμα δεν είναι τελείως ξεκάθαρο σε αρκετές χώρες. Σίγουρα το όραμα που προδιαγράφει η τυποποίηση IMT-Advanced για το 4G είναι ακόμα μακριά, αλλά έχει γίνει η αρχή. Η μετάβαση θα είναι αργή και θα υπάρξουν προβλήματα αλλά τα δίκτυα νέας γενιάς είναι προ των πυλών.

Τη μάχη προς το παρόν φαίνεται να κερδίζει το LTE και αυτό θα επηρεάσει τις εξελίξεις κατά των ερχομό του πραγματικού 4G που είναι οι τεχνολογίες LTE-Advanced και WiMAX 2. Οι εταιρίες που ήδη στηρίζουν το LTE λογικά θα προτιμήσουν το LTE-Advanced καθώς θα μπορούν να το υλοποιήσουν εύκολα στα ήδη υπάρχοντα LTE δίκτυα τους με σχετικά χαμηλό κόστος και έτσι αναμένεται να φανεί αν το WiMAX 2 θα είναι ικανό να καλύψει τη διαφορά.

Άσχετα όμως από το ποια από τις δύο τεχνολογίες θα υπερισχύσει, θα αποτελεί μόνο ένα μέρος του μελλοντικού 4G δικτύου. Στόχος του 4G είναι η συνένωση ασύρματων τεχνολογιών από το Bluetooth και το Wi-Fi μέχρι το LTE και το WiMAX, ώστε η συσκευή ενός χρήστη κατά τη μετάβαση του από το σπίτι στο γραφείο, να εναλλάσσεται ανάμεσα στα διάφορα δίκτυα με αποτέλεσμα να είναι πάντα συνδεδεμένος με τον καλύτερο δυνατό τρόπο και με τις καλύτερες υπηρεσίες φωνής και δεδομένων άμεσα διαθέσιμες. Από το παραπάνω σενάριο πρέπει να κρατήσουμε το ότι μια νέα τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας από μόνη της δεν έχει να προσφέρει κάτι πρωτοποριακό πέρα από υψηλότερες ταχύτητες και μερικές νέες υπηρεσίες. Αυτό που πρέπει να περιμένουμε περισσότερο είναι η παντού και πάντα βέλτιστη συνδεσιμότητα που θα γίνει δυνατή με την συνεργασία όλων αυτών των τεχνολογιών που μέχρι σήμερα αξιοποιούσαμε μόνο μεμονωμένα.

Βιβλιογραφία

(2012). *4G: The What, Why and When*. Tellabs.

About mobile technology and IMT-2000. (2011). Ανάκτηση από ITU:

[http://www.itu.int/osg/spu/imt-](http://www.itu.int/osg/spu/imt-2000/technology.html#Cellular%20Standards%20for%20the%20Third%20Generation)

[2000/technology.html#Cellular%20Standards%20for%20the%20Third%20Generation](http://www.itu.int/osg/spu/imt-2000/technology.html#Cellular%20Standards%20for%20the%20Third%20Generation)

Ananiadis, V. (2012, Μάρτιος 14). *Το νέο iPad, το δίκτυο LTE aka 4G και η Ελλάδα*.

Ανάκτηση από iPhoneHellas: <http://www.iphonellas.gr/34384/new-ipad-ellada-lte-4g/>

Elpidis, C. (2012, Φεβρουάριος 20). *Ασύρματα Ευρυζωνικά δίκτυα 4G για τις φορητές συσκευές από το 2013 σύμφωνα με απόφαση της ΕΕ*. Ανάκτηση από TechGear:

<http://www.techgear.gr/eu-opens-radio-spectrum-for-mobile-broadband-by-2013-39443/>

Etoh, M. (2005). *Next Generation Mobile Systems, 3G and Beyond*. Wiley.

Faisal, S. (2010). *Performance Analysis of 4G Networks*. Karlskrona, Sweeden: Blekinge Institute of Technology.

Hanzo, L., Akhtman, Y., Wang, L., & Jiang, M. (2011). *MIMO-OFDM for LTE, Wi-Fi and WiMAX*. Wiley.

Holma, H., & Toskala, A. (2009). *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. Wiley.

Islam, M. (2012, 19). *TechViral*. Ανάκτηση από <http://www.techviral.com/telecom/gsm-network-works/>

Kappler, C. (2009). *UMTS Networks and Beyond*. Wiley.

Mishra, A. R. (2007). *Advanced Cellular Network Planning and Optimization*. Wiley.

Mishra, A. R. (2010). *Cellular Technologies for Emerging Markets, 2G, 3G and Beyond*. Wiley.

Radio-Electronics. (n.d.). Ανάκτηση από www.radio-electronics.com

Seurre, E., Savelli, P., & Pietri, P.-J. (2003). *EDGE for Mobile Internet*. Artech House.

Study paper on Scalable OFDM Access (SOFDMA). (2010, Απρίλιος 5). Ανάκτηση από slideShare: <http://www.slideshare.net/deepakecrbs/ofdma-basics>

Taha, A.-E. M., Hassanein, H. S., & Ali, N. A. (2012). *LTE, LTE-ADVANCED AND WiMAX Towards IMT-Advanced Networks*. Wiley.

Tang, S.-Y., Muller, P., & Sharif, H. R. (2010). *WiMAX Security and Quality of Service*. Wiley.

Tapia, P., Liu, J., Karimli, Y., & Feuerstein, M. J. (2009). *HSPA Performance and Evolution*. Wiley.

Vidales, P. (2005). *Seamless Mobility in 4G Systems*. Cambridge, UK: University of Cambridge, Computer Laboratory.

Wang, H., Kondi, L. P., Luthra, A., & Ci, S. (2009). *4G Wireless Video Communications*. Wiley.

Wordman, P. (2012, January 27). *4G IMT Advanced, LTE, WiMAX vs 3G Speed*. Ανάκτηση από PartsPeople: <http://blog.parts-people.com/2012/01/27/4g-imt-advanced-lte-wimax-vs-3g-speed-executive-summary/>

Αλεξόπουλος, Α., & Λαγογιαννης, Γ. (2003). *Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών*.

Κουρτέλης, Α. (2009). Δίκτυα 4ης γενιάς (4G).

Μποχρίνη, Σ. (2009). Ανάλυση και Αξιολόγηση των Κινητών Δικτύων προς το Long Term Evolution.