



Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας
Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ (INTERFERENCE) ΚΑΙ
ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (CAPACITY) ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
OFDMA ΚΑΙ ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ
JAVA**

ΧΡΗΣΤΟΣ Η. ΑΝΔΡΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

A.M. 0017

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΖΑΦΕΙΡΗΣ

A.M. 0133

ΝΑΥΠΑΚΤΟΣ 2014

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ (INTERFERENCE) ΚΑΙ
ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (CAPACITY) ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
OFDMA ΚΑΙ ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ
JAVA**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ**

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ GSM ΚΑΙ OFDMA	7
1.1 Εισαγωγή στο GSM σύστημα	7
1.1.1 Στόχοι ενός GSM δικτύου	10
1.1.2 Οι υπηρεσίες του GSM	13
1.1.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος	14
1.2 Συστήματα ασύρματης πρόσβασης που χρησιμοποιούν OFDMA	17
1.2.1 Εισαγωγή	17
1.2.2 Wi-Fi Συστήματα	18
1.2.3 Τεχνολογία 3G	21
1.2.4 Τεχνολογία WiMAX / 4G	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΤΕΧΝΙΚΗ OFDM - OFDMA	26
2.1 Εισαγωγή	26
2.2 Θεμελιώδεις αρχές – OFDM	28
2.3 Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της τεχνικής OFDM	29
2.4 Στρατηγικές πολλαπλής πρόσβασης για OFDM	30
2.4.1 Random Access έναντι Multiple Access	31
2.4.2 Frequency Division Multiple Access	33
2.4.3 Time Division Multiple Access – “Round Robin”	34
2.4.4 Code Division Multiple Access	35
2.5 Πολυπλεξία OFDMA	38
2.5.1 Οι θεμελιώδεις αρχές του OFDMA	38
2.5.2 Πλεονεκτήματα του OFDMA	41
2.6 Τεχνικές κατανομής ραδιοπόρων για OFDMA	43
2.6.1 Αλγόριθμος Μεγιστοποίησης του Συνολικού Ρυθμού Μετάδοσης	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	
ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ	46
3.1 Η Τεχνολογία Long Term Evolution (LTE)	47
3.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία	47
3.1.2 Στόχοι της τεχνολογίας LTE	48
3.1.3 Υπηρεσίες στην τεχνολογία LTE	49
3.2 Αρχιτεκτονική Συστήματος	50
3.2.1 Δίκτυο Κορμού	51

3.2.2	Δίκτυο Πρόσβασης	54
3.2.3	Εξοπλισμός Χρήστη	55
3.3	Αρχιτεκτονική Ράδιο - Πρωτοκόλλων	56
3.3.1	User Plane	58
3.3.2	Control Plane	58
3.4	Κανάλια	60
3.4.1	Λογικά κανάλια	60
3.4.2	Κανάλια μεταφοράς	61
3.4.3	Φυσικά κανάλια	61
3.5	Βασικές Τεχνικές Μετάδοσης Πληροφορίας Στο LTE	62
3.5.1	Multicarrier τεχνολογία	62
3.5.2	Τεχνολογία πολλαπλών κεραιών	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		69

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε μια χώρα όπως η Ελλάδα, που η μορφολογία του εδάφους της πολλές φορές δεν επιτρέπει τη χρήση εναλλακτικών μέσων μετάδοσης, όπως για παράδειγμα τη χρήση οπτικών ινών, η ασύρματη επικοινωνία μπορεί να διαδραματίσει ένα πολύ σημαντικό ρόλο. Ειδικότερα, ο τομέας της κινητής τηλεφωνίας είναι ένας ταχύτατα εξελισσόμενος τομέας ο οποίος στις μέρες μας βρίσκεται σε ένα στάδιο μετεξέλιξης καθώς το πέρασμα από την τρίτη στην τέταρτη γενιά είναι πλέον γεγονός. Στη μεγάλη εξέλιξη του τομέα αυτού συμβάλλουν τα μέγιστα και οι απαιτήσεις των σύγχρονων καιρών για ένα ενοποιημένο και λειτουργικό σύστημα κινητής τηλεφωνίας το οποίο θα είναι σε θέση να παρέχει πληθώρα υπηρεσιών στους χρήστες του.

Είναι αναμενόμενο η βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας να εξελίσσεται προς ένα μοντέλο προσανατολισμένο στα πολυμέσα που θα έχει τη δυνατότητα να παρέχει απαιτητικές υπηρεσίες, όπως mobile TV και mobile streaming. Τα δίκτυα High Speed Packet Access (HSPA) και Long Term Evolution (LTE) ανταποκρίνονται καλύτερα στην αναδυόμενη αυτή τάση σε σχέση με τους προγόνους τους, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα του φάσματος και αυξάνοντας τη χωρητικότητα των σταθμών βάσης. Αυτές οι βελτιώσεις συγκριτικά με τα δίκτυα τρίτης γενιάς, δίνουν στα HSPA και LTE δίκτυα την ευκαιρία να προσφέρουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, χαμηλότερες καθυστερήσεις και βελτιωμένη εμπειρία για τους τελικούς χρήστες, διατηρώντας παράλληλα σε χαμηλά επίπεδα τα λειτουργικά έξοδα.

Ωστόσο, η επίτευξη υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης προϋποθέτει την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του παρεχόμενου φάσματος συχνοτήτων. Δεδομένου ότι η χρήση του ίδιου φάσματος συχνοτήτων για πάνω από ένα χρήστες δημιουργεί παρεμβολές (interference), αναζητούνται μέθοδοι που θα οδηγήσουν στη μείωση του φαινομένου αυτού. Πάνω σε αυτό τον άξονα κινείται η παρούσα πτυχιακή εργασία, στόχος της οποίας είναι η μελέτη του τρόπου με τον οποίο μπορούμε σε ένα κυψελωτό δίκτυο να έχουμε καλύτερη αξιοποίηση του παρεχόμενου φάσματος συχνοτήτων αποφεύγοντας παράλληλα τις παρεμβολές από τις γειτονικές κυψέλες. Η διεξαχθείσα έρευνα εστιάζει στη μέθοδο της επαναχρησιμοποίησης συχνότητας και την εφαρμογή της σε κινητά δίκτυα LTE μελετώντας παράλληλα τα αποτελέσματά της προς τον τελικό χρήστη.

Η παρούσα πτυχιακή δομείται σε κεφάλαια ως εξής:

Το Κεφάλαιο 1 κάνει μια εισαγωγική αναφορά στις τεχνολογίες GSM και OFDMA αναφέροντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τη χρησιμότητα τους.

Στο Κεφάλαιο 2 εισάγεται η τεχνική OFDM όπου αναλύονται οι στρατηγικές πολλαπλής πρόσβασης OFDM (Frequency Division Multiple Access, Time Division Multiple Access, κλπ.). Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η πολυπλεξία OFDMA.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η τεχνολογία LTE. Γίνεται αναφορά στους στόχους και στις υπηρεσίες της τεχνολογίας αρχικά και στη συνέχεια παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του συστήματος (δίκτυο κορμού, δίκτυο πρόσβασης κλπ.).

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία.

Τέλος, το κεφάλαιο 5 περιέχει τις αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία.

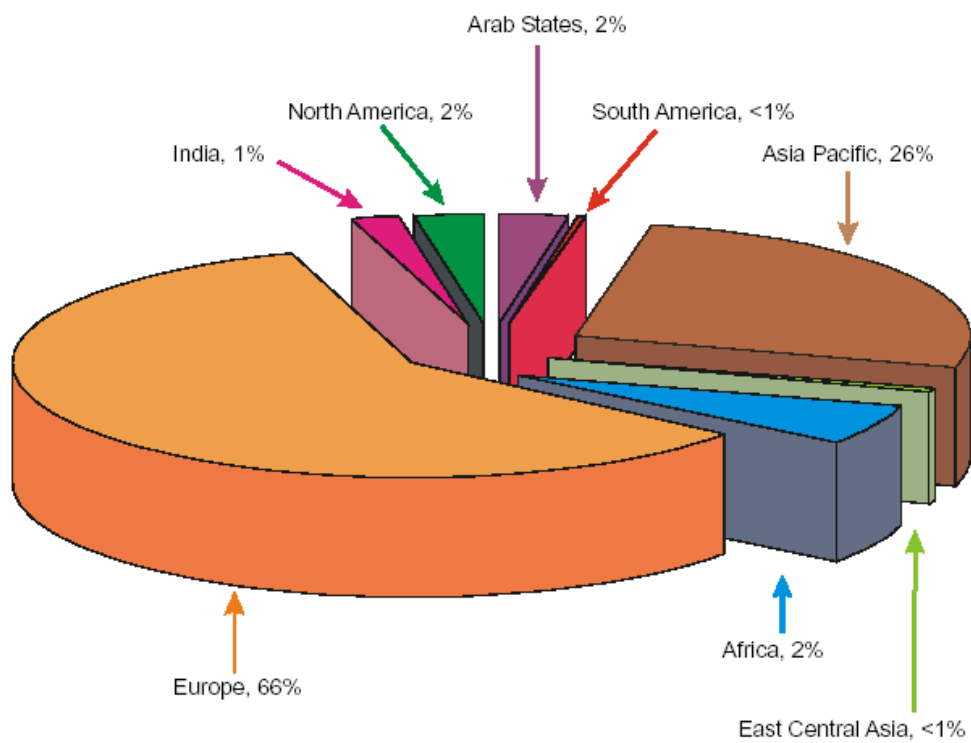
1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ GSM ΚΑΙ OFDMA

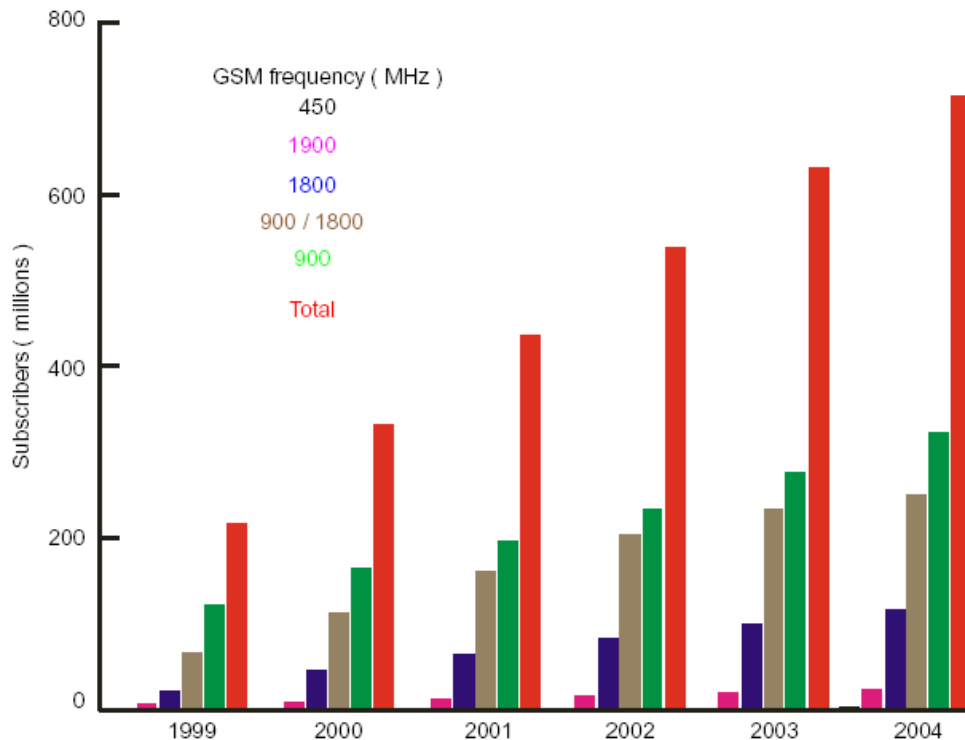
Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τα βασικά χαρακτηριστικά του πιο ευρέως διαδεδομένου κυψελωτού συστήματος κινητών επικοινωνιών, του GSM (Global System for Mobile communications). Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος, στη δομή του και στις προσφερόμενες υπηρεσίες αυτού. Στη συνέχεια αναλύεται η τεχνική OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex - Ορθογωνική Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας) με τα πλεονεκτηματά και τα μειονεκτήματά της, που είναι η αρχή για την πολυπλεξία OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) και θα δούμε στο παρακάτω κεφάλαιο.

1.1 Εισαγωγή στο GSM σύστημα

Το σύστημα GSM (Global System for Mobile communications) είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο κυψελωτό σύστημα κινητών επικοινωνιών με πάνω από ένα δισεκατομμύριο συνδρομητές σε όλο τον κόσμο, οι περισσότεροι εκ των οποίων βρίσκονται στην Ευρώπη, όπως φαίνεται άλλωστε και από το εικόνα 1.1, ενώ σημαντική ήταν και η αύξηση των συνδρομητών που σημειώθηκε από το 1999 έως το 2004 όπως παρουσιάζει το εικόνα 1.2.



Εικόνα 1.1 : Γεωγραφική κατανομή των συνδρομητών του GSM συστήματος



Εικόνα 1.2 : Προβλεπόμενη ανάπτυξη των συνδρομητών του GSM συστήματος. Οι διαφορετικές συχνότητες GSM χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά συστήματα στον κόσμο

Οι αρχικές προδιαγραφές για το σύστημα GSM τέθηκαν από την κοινοπραξία GSM (Groupe Special Mobile). Η κοινοπραξία αυτή ιδρύθηκε το 1982 και είναι υπεύθυνη για την λειτουργία του συστήματος GSM. Καθοριστικό ρόλο στην επικράτηση του συστήματος έπαιξαν οι αποφάσεις που πάρθηκαν την περίοδο 1982 με 1987 και προέβλεπαν τα εξής :

- Το 1982 δύο ζώνες συχνοτήτων, 890MHz-915MHz και 935MHz-960MHz καθιερώθηκαν για χρήση από τα κυψελωτά συστήματα.
- Το 1985 αποφασίστηκε να τεθεί σε εφαρμογή ένα ψηφιακό σύστημα. Το επόμενο βήμα ήταν η επιλογή μεταξύ στενού και ευρέως φάσματος λύσης.
- Το 1987 το GSM σύστημα έκανε χρήση της πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου (TDMA), γεγονός που οδήγησε σε μια πιο αισιόδοξη άποψη για τη μελλοντική χρήση του συστήματος. Η επιλογή αυτή έγινε αφού λήφθηκαν υπόψη τα πλεονεκτήματα που παρείχε η τεχνική αυτή και τα οποία συντόμως αναφέρονται παρακάτω.

Έτσι λοιπόν ένα σύστημα που κάνει χρήση της τεχνικής αυτής παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Προσφέρει πολύ μεγαλύτερη ποικιλία υπηρεσιών από ότι τα αναλογικά συστήματα
- Ευνοείται ιδιαίτερα από τη σύνθετη μοντέρνα ανάπτυξη που οδηγεί σε χαμηλό κόστος συστήματος.
- Επιδέχεται αξιοσημείωτες βελτιώσεις χωρίς να πλήττει το σύστημα ασφάλειας των πληροφοριών του συστήματος.
- Προσφέρει τη δυνατότητα διαχωρισμού των καναλιών και οδηγεί σε καλύτερη χρησιμοποίηση του φάσματος.

Η ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος θα επέτρεπε στο συνδρομητή να χρησιμοποιεί το κινητό του τηλέφωνο παντού στην Ευρώπη. Από την πλευρά του χρήστη το πανευρωπαϊκό αυτό σύστημα θα εμφανίζονταν σαν ένα σύστημα ενώ στην πραγματικότητα θα αποτελείτο από πολλά συστήματα εκτελεσμένα από ανεξάρτητους διαχειριστές. Από το 1982 έως σήμερα οι προδιαγραφές αυτές έχουν υποστεί πολλές αναθεωρήσεις καθώς η όλο και μεγαλύτερη διάδοσή των κινητών επικοινωνιών έθετε νέα δεδομένα. Η ασφάλεια που θα προσέφερε το σύστημα ήταν από την αρχή ένα πεδίο ανησυχίας, αφού ήταν γνωστή η αδυναμία των ασύρματων επικοινωνιών να προσφέρουν υψηλά επίπεδα ασφάλειας των δεδομένων.

1.1.1 Στόχοι ενός GSM Δικτύου

Ένα GSM δίκτυο δεν μπορεί να εγκαταστήσει τις κλήσεις αυτόνομα εκτός από τις τοπικές κλήσεις μεταξύ των συνδρομητών του. Δηλαδή κλήσεις που τόσο ο καλών όσο και ο καλούμενος είναι συνδρομητές του οικείου PLMN δικτύου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το GSM εξαρτάται από τις λειτουργίες των υπαρχόντων ενσύρματων ή σταθερών δικτύων για να δρομολογήσει τις κλήσεις. Τις περισσότερες φορές δηλαδή, η παρεχόμενη υπηρεσία σε έναν συνδρομητή είναι ένας συνδυασμός της πρόσβασης στις υπηρεσίες του οικείου GSM δικτύου και της πρόσβασης στις υπηρεσίες κάποιου ενσύρματου ή σταθερού δικτύου. Κατά συνέπεια, οι γενικοί στόχοι ενός GSM δικτύου, όσον αφορά τις προσφερόμενες υπηρεσίες σε έναν συνδρομητή είναι:

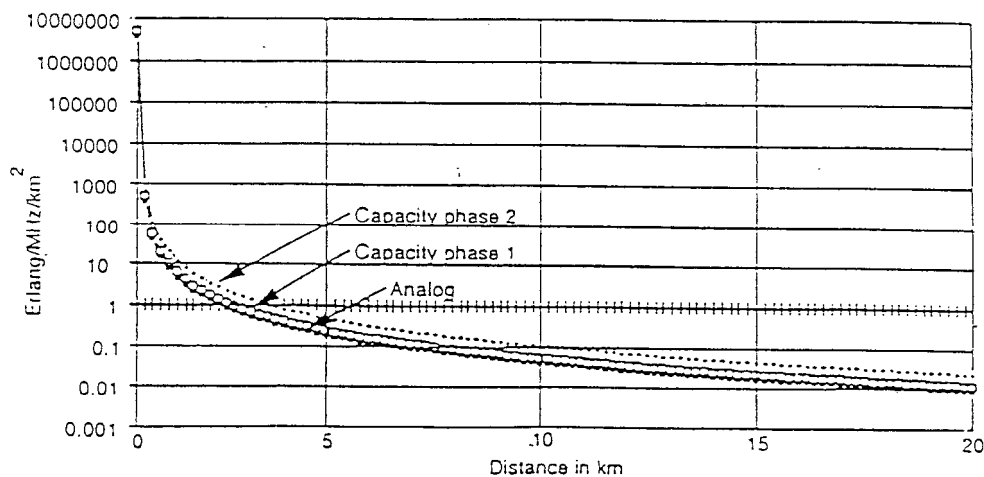
- Να παρέχει στο συνδρομητή ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών και λειτουργιών, τόσο φωνητικών όσο και μη φωνητικών, το οποίο να είναι συμβατό με εκείνες που προσφέρονται από τα υπόλοιπα δίκτυα (παραδείγματος χάριν PSTN και ISDN δίκτυα).
- Να εισαγάγει ένα ραδιοσύστημα κινητών επικοινωνιών, συμβατό με το ISDN.
- Να παρέχει ορισμένες υπηρεσίες και λειτουργίες αποκλειστικές στις κινητές επικοινωνίες.
- Να δώσει πρόσβαση στο αντίστοιχο δίκτυο GSM για έναν κινητό συνδρομητή που βρίσκεται σε μια άλλη χώρα από αυτή του οικείου δικτύου του.
- Να παρέχει τις λειτουργίες για την αυτόματη περιαγωγή, διαπομπή, τον εντοπισμό και την ενημέρωση της θέσης των κινητών συνδρομητών.
- Να παρέχει υπηρεσίες σε ένα ευρύ φάσμα κινητών σταθμών, συμπεριλαμβανομένων vehicle-mounted σταθμών, φορητών τερματικών και άλλων.
- Να επιτρέψει την αποδοτική χρήση του φάσματος συχνοτήτων.
- Να επιτρέψει την ύπαρξη χαμηλού κόστους τερματικών και να κρατήσει το κόστος των παρεχόμενων υπηρεσιών χαμηλό.

Ωστόσο οι στόχοι αυτοί δεν προσδιορίστηκαν καθαρά αρχικά από τις ανώτερες επιτροπές της CEPT. Αντιθέτως δόθηκε μεγάλη ελευθερία στο GSM σύστημα με απώτερο σκοπό να βρεθεί ένας τρόπος να συμβιβαστούν οι αντικρουόμενες απαιτήσεις, όπως για παράδειγμα η υψηλή αποδοτικότητα του φάσματος με το χαμηλό κόστος και την καλή ποιότητα του ήχου. Ένας λόγος για αυτήν την ελαστικότητα ήταν το γεγονός ότι εκείνη την εποχή υπήρχε μεγάλη αβεβαιότητα ως προς το ποια θα ήταν η κύρια χρήση του συστήματος. Φαινόταν λογικό τότε, στις αρχές της δεκαετία το 90 να υποθέσει κανείς ότι η κύρια χρήση του συστήματος θα ήταν στη μεταφορά του λόγου και συνεπώς θα έπρεπε να είναι σε θέση να προσφέρει προχωρημένες υπηρεσίες δεδομένων. Αρχικά το σύστημα θα έπρεπε να είναι ισάξιο των συστημάτων της πρώτης γενιάς με σεβασμό στην αποδοτικότητα του φάσματος, την ποιότητα της μεταφοράς του λόγου, το κόστος των κινητών μονάδων και την υποδομή του δικτύου. Ήταν επίσης αντιληπτό ότι προκειμένου το GSM σύστημα να είναι σε θέση να ανταγωνιστεί τα συστήματα της πρώτης γενιάς θα έπρεπε να είναι

ανώτερο από αυτά σε κάποιον από τους παραπάνω τομείς. Βαθμιαία βέβαια το σύστημα επέφερε βελτιώσεις σε όλους τους παραπάνω τομείς.

Ένα σημαντικό ερώτημα ήταν μέχρι ποιο βαθμό θα έπρεπε το σύστημα να προσδιοριστεί ώστε να είναι πανομοιότυπο σε όλες τις χώρες. Προφανώς χωρίς πανομοιότυπα μέσα μετάδοσης (air interfaces) σε όλα τα δίκτυα οι συνδρομητές δεν είναι σε θέση να περιπλανιούνται ελεύθερα μεταξύ των διαφορετικών δικτύων και αυτή ήταν η πρώτη απαίτηση που έπρεπε να ικανοποιηθεί. Κάποιοι άνθρωποι το είδαν αυτό σαν μια ευκαιρία να προσδιοριστεί οτιδήποτε στο σύστημα, ακόμα και το υλικό κομμάτι των κινητών σταθμών (mobile stations) και άλλων μονάδων μέσα στο σύστημα. Είχε όμως συμφωνηθεί ότι δε θα γινόταν προσπάθεια να προσδιοριστεί το σύστημα σε τέτοιο βαθμό. Βασικά, θα προσδιορίζονταν μόνο οι λειτουργικές διεπαφές μεταξύ των βασικών μονάδων. Αυτή η προσέγγιση είχε αρκετά πλεονεκτήματα, το πιο βασικό από τα οποία ήταν το γεγονός ότι έτσι δίνονταν η δυνατότητα στον διαχειριστή και συνεπώς στον πελάτη να αγοράσει οποιοδήποτε κομμάτι του εξοπλισμού του χρειάζονταν, θέτοντας με αυτόν τον τρόπο τις βάσεις για μεγάλο ανταγωνισμό μεταξύ των κατασκευαστών.

Το GSM σύστημα έλυσε επίσης περιορισμούς των αναλογικών συστημάτων. Έτσι η χωρητικότητα αυξήθηκε δύο με τρεις φορές λόγω της καλύτερης χρησιμοποίησης συχνοτήτων και της χρήσης τεχνικών που αξιοποίησαν μικρότερες κυψέλες, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο τον αριθμό των συνδρομητών που μπορούσαν να εξυπηρετηθούν. Η αυξανόμενη χωρητικότητα του GSM συστήματος σε σχέση με τα προηγούμενα αναλογικά συστήματα φαίνεται στο εικόνα 1.3. Όπως βλέπουμε από το σχήμα έχουμε αύξηση της χωρητικότητας δύο με τρεις φορές σε σχέση με τα αναλογικά.



Εικόνα 1.3 : Χωρητικότητα του GSM συστήματος

Με το νέο αυτό πανευρωπαϊκό ψηφιακό σύστημα κινητής τηλεφωνίας κάποιος μπορεί να πάρει το κινητό του τηλέφωνο και να το χρησιμοποιήσει σε άλλη χώρα. Το σύστημα αυτόματα θα ενημερωθεί για την καινούργια τοποθεσία και ο χρήστης θα είναι σε θέση να κάνει και να δέχεται κλήσεις. Υψηλός βαθμός ευελιξίας επιτυγχάνεται με το να υπάρχουν διαφορετικοί ελεγκτές σταθμών βάσης και σταθμών μετάδοσης.

1.1.2 Οι Υπηρεσίες του GSM – GSM Services

Ως τηλεπικοινωνιακή υπηρεσία που υποστηρίζεται από σύστημα GSM ορίζεται ως ένα σύνολο από δυνατότητες επικοινωνίας, τις οποίες ο φορέας παροχής υπηρεσιών προσφέρει στους συνδρομητές. Οι βασικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες που παρέχονται από το σύστημα GSM διαιρούνται σε τρεις κύριες ομάδες:

- **Υπηρεσίες φορέων. (Bearer services)**

Αυτές οι υπηρεσίες προσφέρουν στο συνδρομητή την απαιτούμενη χωρητικότητα και το υλικό για να μεταδώσει κατάλληλα σήματα μεταξύ συγκεκριμένων σημείων πρόσβασης (όπως οι διεπαφές μεταξύ χρήστη-δικτύου).

- **Τηλεξυπηρετήσεις. (Teleservices)**

Αυτές οι υπηρεσίες παρέχουν στο συνδρομητή τις απαραίτητες λειτουργίες συμπεριλαμβανομένου και του εξοπλισμού του τερματικού, ώστε να είναι ικανή η επικοινωνία με άλλους συνδρομητές.

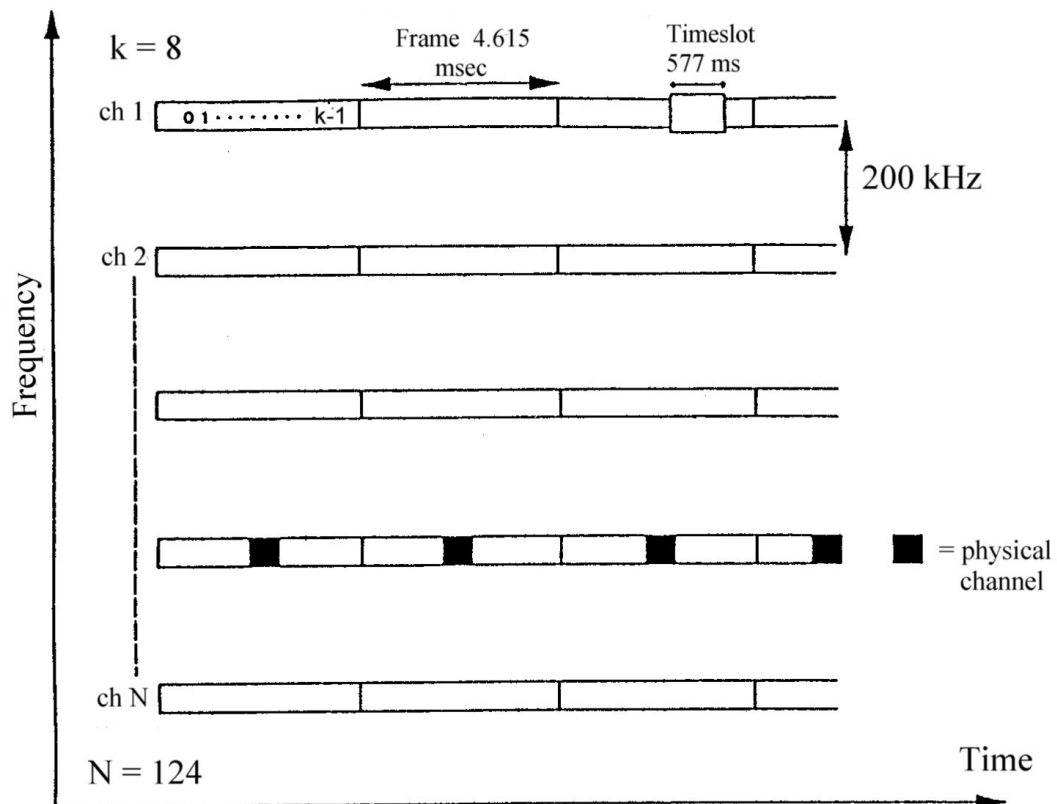
- **Συμπληρωματικές υπηρεσίες. (Supplementary services)**

Αυτές οι υπηρεσίες τροποποιούν ή συμπληρώνουν βασικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και προσφέρονται μαζί ή σε συνδυασμό με τις βασικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες.

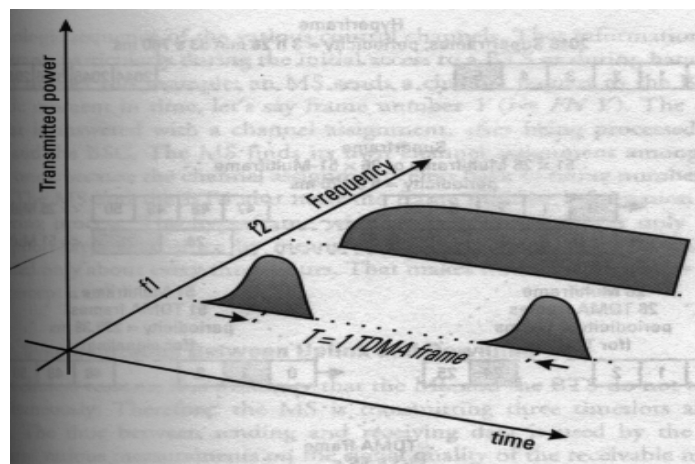
Το σύστημα GSM προσφέρει την ευκαιρία για έναν συνδρομητή να περιπλανηθεί ελεύθερα ανάμεσα σε χώρες, οπουδήποτε ένα GSM δίκτυο λειτουργεί. Απαιτούνται συμφωνίες μεταξύ των διάφορων τηλεπικοινωνιακών φορέων για να είναι εγγυημένη η πρόσβαση στις υπηρεσίες των προαναφερθέντων συνδρομητών.

1.1.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος

Το GSM χρησιμοποιεί Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Χρόνου (TDMA) και Διαίρεση Συχνότητας (FDMA) . Έτσι , μπορούν να λαμβάνουν χώρα την ίδια χρονική στιγμή και στην ίδια συχνότητα πολλές συνδιαλλαγές χρησιμοποιώντας διαφορετικές χρονικές σχισμές (timeslots), όπως φαίνεται στις εικόνες 1.4 και 1.5. Οι τεχνικές αυτές πολλαπλής πρόσβασης αναφέρονται λεπτομερώς παρακάτω. Ένα πλαίσιο (frame) έχει διάρκεια 4.615ms και αποτελείται από οκτώ τέτοιες χρονοσχισμές (577ms διάρκεια η καθεμία) . Οι συχνότητες εκπομπής και λήψης είναι διαφορετικές με αποτέλεσμα οι μεταδόσεις της άνω ζεύξης (κινητό προς σταθμό βάσης) και της κάτω ζεύξης (σταθμό βάσης προς κινητό) να είναι ταυτόχρονες .



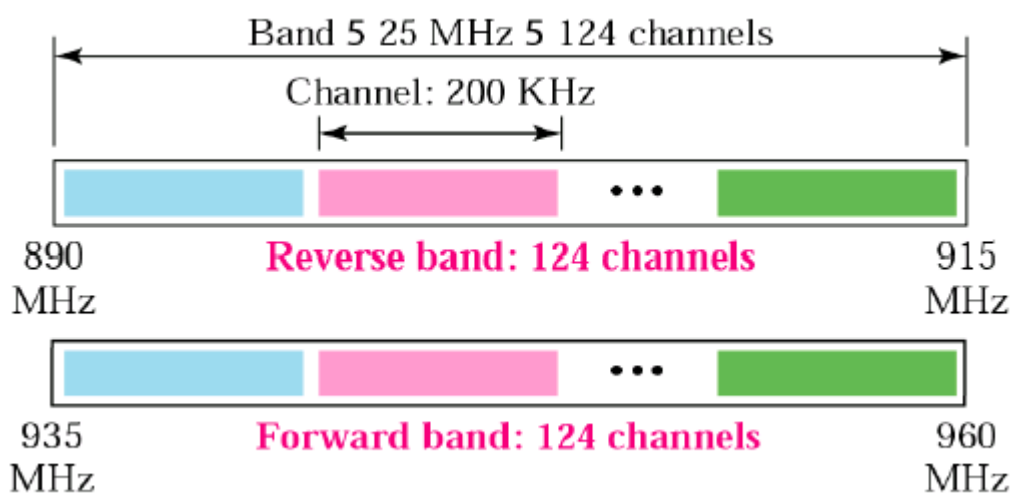
Εικόνα 1.4 Σύστημα TDMA / FDMA



Εικόνα 1.5 Σύστημα TDMA / FDMA

Το εύρος ζώνης του GSM είναι 25 MHz και παρέχει 125 φέρουσες, που καθεμία έχει εύρος ζώνης 200 kHz. Βέβαια λόγω φαινομένων παρεμβολής από άλλα συστήματα, η πρώτη φέρουσα συνήθως δε χρησιμοποιείται οπότε ο αριθμός των καναλιών

μειώνεται σε 124 . Με δεδομένο ότι αντιστοιχούν 8 χρήστες ανά κανάλι , μπορούν να υπάρξουν περίπου 1000 πραγματικά κανάλια για ομιλία ή δεδομένα . Η χωρητικότητα αυτή μπορεί να διπλασιαστεί αν πέσει στο μισό ο ρυθμός κωδικοποίησης φωνής . Η περιοχή συχνοτήτων για την άνω ζεύξη είναι 890 MHz έως 915 MHz (με τις φέρουσες να βρίσκονται σε συχνότητες 890.2 , 890.4 ...) , ενώ για την κάτω ζεύξη είναι 935 MHz έως 960 MHz (με φέρουσες αντίστοιχα τις συχνότητες 935.2 , 935.4 ...) . Δηλαδή το εύρος διαχωρισμού εκπομπής και λήψης είναι 45 MHz .



Εικόνα 1.6 : Ζώνη συχνοτήτων του GSM

Η διαμόρφωση , τώρα , που χρησιμοποιεί το GSM είναι η GMSK . Ο τύπος αυτός διαμόρφωσης θεωρείται ανθεκτικός σε παρεμβολές “ συγγενούς καναλιού ” , ενώ παράλληλα εξασφαλίζει ότι το μέγιστο ποσοστό της ακτινοβολούμενης ισχύος συγκεντρώνεται πλησίον της κεντρικής συχνότητας χωρίς να διασπείρεται σε μεγάλο εύρος . Ο ρυθμός εκπομπής είναι 270.833 Kbps (ισομοιράζεται ανάμεσα στους 8 χρήστες , οπότε αντιστοιχεί στον καθένα ρυθμός 33.85 Kbps) , ενώ για τη διόρθωση σφαλμάτων χρησιμοποιείται συνελκτική κωδικοποίηση με ρυθμό κωδικοποίησης 13 Kbps ή 6.5 Kbps .

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 1.1.

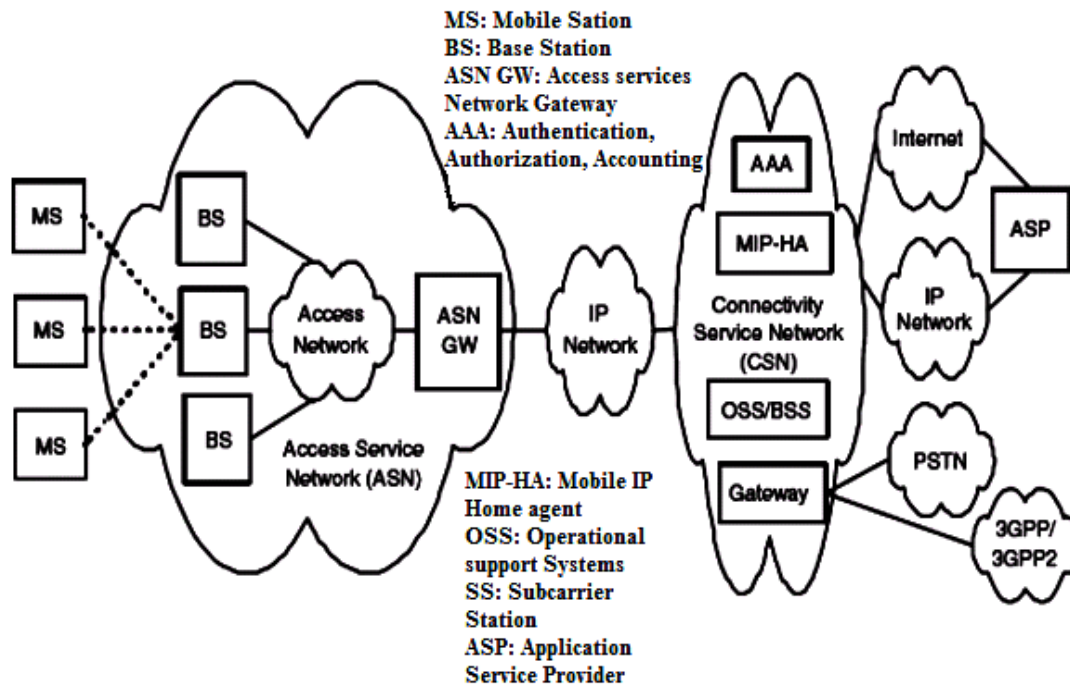
Multiple Access Method	TDMA / FDMA
Uplink frequencies (MHz)	933-960 (basic GSM)
Downlink frequencies (MHz)	890-915 (basic GSM)
Duplexing	FDD
Channel spacing, kHz	200
Modulation	GMSK
Portable TX power, maximum / average (mW)	1000 / 125
Power control, handset and BSS	Yes
Speech coding and rate (kbps)	RPE-LTP / 13
Speech Channels per RF channel:	8
Channel rate (kbps)	270.833
Channel coding	Rate 1/2 convolutional
Frame duration (ms)	4.615

Πίνακας 1.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά GSM συστήματος

1.2 Συστήματα ασύρματης πρόσβασης που χρησιμοποιούν OFDMA

1.2.1 Εισαγωγή

Τα ευρυζωνικά ασύρματα συστήματα διακρίνονται σε 2 βασικές κατηγορίες: Στα σταθερά ευρυζωνικά συστήματα και στα κινητά συστήματα επικοινωνιών. Η πρώτη κατηγορία αποτελεί εναλλακτική λύση στο ενσύρματο DSL καθώς προσφέρει παρόμοιες υπηρεσίες χωρίς τη χρήση καλωδιακών modems. Η δεύτερη κατηγορία προσφέρει μεγάλη ευχέρεια υπηρεσιών προς τους χρήστες καθώς χρησιμοποιείται για τη σύνδεση στο εκάστοτε δίκτυο μέσω τοπικών σταθμών βάσης (βλ. κεραιές) και στη διατήρηση αυτής της σύνδεσης ενώ αλλάζει η θέση του χρήστη και κινείται εντός της εμβέλειας ενός άλλου σταθμού. Σύγχρονες τεχνολογίες όπως το WiMAX (worldwide interoperability for microwave access), το 3G και το Wi-Fi θέλουν να επιτύχουν να συνδέσουν τα καλύτερα από την τεχνολογία και των 2 κατηγοριών και είναι σχεδιασμένα τόσο για κινητές όσο και για ευρυζωνικές εφαρμογές.



Εικόνα 1.7: Αρχιτεκτονική IP-Based του δικτύου WiMAX, όπου φαίνεται και η προσπάθεια της ένωσης όλων των διαθέσιμων σύγχρονων τεχνολογιών δικτύωσης.

1.2.2 Wi-Fi Συστήματα

Το Wi-Fi είναι ένα εμπορικό σήμα του Wi-Fi Alliance. Το Wi-Fi δεν αποτελεί τεχνικό όρο. Ωστόσο, η Wi-Fi Alliance έχει επιβάλει η χρήση του να περιγράφει μόνο ένα περιορισμένο φάσμα των τεχνολογιών συνδεσιμότητας, συμπεριλαμβανομένων, του ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN), βάσει του IEEE 802.11 πρότυπο, τη συσκευή σύνδεσης με άλλη συσκευή (όπως Wi-Fi Peer to Peer γνωστό και ως Wi-Fi Direct), καθώς και μια σειρά από τεχνολογίες που υποστηρίζουν PAN, LAN και ακόμη και WAN συνδέσεις. Παράγωγος όρος, όπως το Super Wi-Fi, που επινοήθηκε από την αμερικανική Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) για να περιγράψει τη δικτύωση της πρώην ζώνης UHF τηλεόρασης στις ΗΠΑ, μπορεί ή δεν μπορεί να επικυρωθεί από τη συμμαχία. Ανήκει στην οικογένεια προτύπων IEEE 802.11 και αποτελεί μια τεχνολογία τοπικού δικτύου LAN η οποία είναι σχεδιασμένη να παρέχει ευρυζωνική ενδοκτιριακή κάλυψη.



Εικόνα 1.8: Το εμπορικό σήμα του Wi-Fi Alliance

Ο τεχνικός όρος «IEEE 802.11» έχει χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά του Wi-Fi, αλλά τα τελευταία χρόνια το Wi-Fi έχει γίνει ένα υπερσύνολο του IEEE 802.11. Το Wi-Fi χρησιμοποιείται από περισσότερους από 700 εκατομμύρια άνθρωπους, υπάρχουν πάνω από 750.000 hotspots (σημεία με Wi-Fi με σύνδεση στο Διαδίκτυο) σε όλο τον κόσμο, και περίπου 800 εκατομμύρια νέες συσκευές Wi-Fi κάθε χρόνο. Προϊόντα που περνούν τις δοκιμές συμβατότητας, του Wi-Fi Alliance, με επιτυχία μπορούν να χρησιμοποιούν το Wi-Fi CERTIFIED όνομα και τα εμπορικά σήματα.

Οι αναθέσεις συχνοτήτων και κάποιιοι λειτουργικοί περιορισμοί δεν είναι συνεπείς σε όλον τον κόσμο: το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης επιτρέπει δύο επιπλέον κανάλια, πέρα από αυτά που επιτρέπονται στις ΗΠΑ για τη ζώνη των 2,4 GHz (1-13 έναντι 1-11), ενώ η Ιαπωνία έχει ένα ακόμη συν τοις άλλοις (1-14). Η Ευρώπη, από το 2007, ήταν ουσιαστικά ομοιογενής από την άποψη αυτή. Ένα Wi-Fi σήμα καταλαμβάνει πέντε κανάλια στην ζώνη των 2,4 GHz. Οποιαδήποτε δύο κανάλια, των οποίων οι αριθμοί καναλιών διαφέρουν από πέντε ή περισσότερα, όπως 2 και 7, δεν επικαλύπτονται. Η το συχνά επαναλαμβανόμενο ρητό ότι τα κανάλια 1, 6, και 11 είναι τα μόνα μη επικαλυπτόμενα κανάλια, επομένως, δεν είναι ακριβές. Τα κανάλια 1, 6, και 11, ωστόσο, αποτελούν τη μόνη ομάδα από τα τρία μη επικαλυπτόμενα κανάλια στις ΗΠΑ.

Η Ισοδύναμη Ισότροπα Ακτινοβολούμενη Ισχύς (Equivalent isotropically radiated power EIRP) στην ΕΕ περιορίζεται σε 20 dBm (100 mW).

Τα τελευταία χρόνια, σε πόλλα αστικά κέντρα έχουν εγκατασταθεί Wi-Fi συστήματα με σκοπό την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών. Η κάλυψη αυτών των συστημάτων

φτάνει τα 1000 ft από το σημείο πρόσβασης. Συνεπώς, οι μητροπολιτικές εγκαταστάσεις των Wi-Fi συστημάτων απαιτούν πυκνή τοποθέτηση σημείων πρόσβασης γεγονός το οποίο αποτελεί και ένα από τα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

Τα Wi-Fi δίκτυα έχουν περιορισμένη εμβέλεια. Ένας τυπικός ασύρματος δρομολογητής χρησιμοποιώντας 802.11b ή 802.11g με κεραία εμπορίου μπορεί να έχει ένα εύρος από 32 m (120 ft) σε εσωτερικούς χώρους και 95 m (300 ft) σε εξωτερικούς χώρους. Το 802.11n IEEE όμως, μπορεί να υπερβαίνει το εύρος περισσότερο από δύο φορές. Το εύρος διαφέρει επίσης ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μπάνα συχνοτήτων. Το Wi-Fi στα 2,4 GHz έχει ελαφρώς καλύτερο εύρος από το Wi-Fi στο μπλοκ συχνοτήτων των 5 GHz. Το εύρος σε εξωτερικούς χώρους με τη χρήση της κατευθυντικών κεραιών - μπορεί να βελτιωθεί και να είναι αρκετό για κεραιές που βρίσκονται αρκετά χιλιόμετρα ή περισσότερο από τη βάση τους. Σε γενικές γραμμές, το ανώτατο ποσό της ενέργειας που η Wi-Fi συσκευή μπορεί να μεταδώσει περιορίζεται από τις τοπικές ρυθμίσεις, όπως η FCC Part 15 στις ΗΠΑ.

Για να φτάσει τις απαιτήσεις για ασύρματες εφαρμογές LAN, το Wi-Fi διαθέτει αρκετά υψηλή κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με κάποια άλλα πρότυπα. Τεχνολογίες όπως το Bluetooth (για την υποστήριξη ασύρματων PAN εφαρμογών) παρέχουν ένα πολύ μικρότερο φάσμα <10m και έτσι σε γενικές γραμμές έχουν μικρότερη κατανάλωση ρεύματος. Άλλες τεχνολογίες με χαμηλή κατανάλωση ισχύος όπως το ZigBee έχουν αρκετά μεγάλο εύρος, αλλά πολύ χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Η υψηλή κατανάλωση ισχύος του Wi-Fi προκαλεί ανησυχία για τη ζωή της μπαταρίας στις φορητές συσκευές.

Λόγω του πολύπλοκου χαρακτήρα της μετάδοσης σε τυπικές Wi-Fi συχνότητες και ιδιαίτερα λόγω των επιπτώσεων της ανάκλασης του σήματος από τα δέντρα και τα κτίρια, οι υπάρχοντες αλγόριθμοι μπορούν μόνο να προβλέψουν στο περίπου το εύρος κάλυψης για κάθε περιοχή, για δεδομένη εκπεμπόμενη ισχύ από τη συσκευή αποστολής μηνυμάτων. Αυτό δεν ισχύει εξίσου για τα Wi-Fi μεγάλων αποστάσεων, αφού πλέον οι σύνδεσμοι συνήθως λειτουργούν από πύργους που εκπέμπουν πάνω από τα γύρω φύλλα.

Γενικά, το Wi-Fi παρέχει μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης από το 3G εξαιτίας του μεγαλύτερου εύρους ζώνης που χρησιμοποιεί (20 MHz). Βέβαια, το λιγότερο αποδοτικό πρωτόκολλο, CSMA (carrier sense multiple access), που χρησιμοποιεί το

Wi-Fi καθώς και οι τυχόν παρεμβολές λόγω του περιβάλλοντος μειώνουν την απόδοση της Wi-Fi τεχνολογίας. Επιπλέον, δεν είναι σχεδιασμένα να παρέχουν υπηρεσίες σε χρήστες που βρίσκονται εν κινήσει. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των Wi-Fi συστημάτων έναντι των 3G είναι η ταυτόχρονη παροχή υπηρεσιών σε ένα μεγάλο αριθμό τερματικών. Σήμερα, η τεράστια πλειοψηφία των φορητών υπολογιστών υποστηρίζει Wi-Fi εφαρμογές όπως και κινητά τηλέφωνα, κάμερες κλπ. Όπως και με το 3G, η έκδοση της IEEE 802.11n τυποποίησης επιχείρησε τη βελτίωση της γενικότερης απόδοσης του Wi-Fi και συγκεκριμένα στόχευσε τόσο στην αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης όσο και στην βελτίωση της κάλυψης των σημείων πρόσβασης.

1.2.3 Τεχνολογία 3G

Η τεχνολογία «Τρίτης γενιάς» (3G) σχεδιάστηκε από την καθολική υπηρεσία MobileTelecommunications (UMTS) ως πρωτότυπο για δίκτυα υψηλών ταχυτήτων για τη χρησιμοποίηση εφαρμογών με μεγάλες απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Τα 3G συστήματα αποτελούνται από τα δύο κύρια πρότυπα, CDMA2000 και W-CDMA, καθώς και άλλες 3G παραλλαγές, όπως η NTT DoCoMo's, Freedom of Mobile Multimedia Access (FOMA) και Time Division Synchronous Code Division Multiple Access (TD-SCDMA), που χρησιμοποιούνται κυρίως στην Κίνα. Το UMTS, άρχικά προσφέρθηκε το 2001, έχει τυποποιηθεί από 3GPP, που χρησιμοποιούνται κυρίως στην Ευρώπη, την Ιαπωνία, την Κίνα και άλλες περιοχές κυριαρχούν από το GSM 2G υποδομή του συστήματος. Τα κινητά τηλέφωνα είναι συνήθως υβρίδια των UMTS και GSM. Οι διεπαφές που προσφέρονται μοιράζονται την ίδια υποδομή:

- Η πρωτότυπη και πιο διαδεδομένη ραδιοδιεπαφή ονομάζεται W-CDMA.
- Η TD-SCDMA ραδιοδιεπαφή, είναι στο εμπόριο από το 2009 και προσφέρεται μόνο στην Κίνα.
- Η τελευταία έκδοση του UMTS, HSPA+, μπορεί να προσφέρει μέγιστες ταχύτητες δεδομένων στη θεωρία έως και 56 Mbit/s στην κατερχόμενη ζεύξη, (28 Mbit/s σε υφιστάμενες υπηρεσίες) και 22 Mbit/s στο uplink.

Το σύστημα CDMA2000, που προσφέρθηκε αρχικά το 2002 και έχει τυποποιηθεί ως 3GPP2, χρησιμοποιείται κυρίως στη Βόρεια Αμερική και τη Νότια Κορέα, έχει κοινή υποδομή με το πρότυπο IS-952G. Τα κινητά τηλέφωνα είναι συνήθως υβρίδια των CDMA2000 και IS-95. Η τελευταία έκδοση EVDO Rev B προσφέρει έως 14,7 Mbit/s στην κατερχόμενη ζεύξη.

Τα ανωτέρω βασίζονται σε συγγενείς φασματικά ραδιοτεχνολογίες μετάδοσης. Ενώ το EDGE GSM πρότυπο («2.9G»), DECT για ασύρματα τηλέφωνα και το Mobile WiMAX πρότυπο, επισήμως πληρούν τις απαιτήσεις του IMT-2000 και έχουν εγκριθεί ως πρότυπα 3G από την ITU, τυπικά συνήθως δεν ονομάζονται 3G, και βασίζονται σε εντελώς διαφορετικές τεχνολογίες.

Η ταχύτητα δεδομένων 3G προσδιορίζεται βασίζεται σε ένα συνδυασμό παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων του chip rate, τη δομή καναλιών, ελέγχου της ισχύος, και το συγχρονισμό.

Ένα παράδειγμα υπολογισμού του θεωρητικής ταχύτητας δεδομένων σε 3G έχει ως εξής:

W-CDMA για ειδικό κωδικό 400-500 Kbs/κώδικα.

6 κωδικοί x 400 > 2Mbps (UMTS στόχος για 3G ταχύτητες δεδομένων σε σταθερή θέση)

Οι πραγματικές ταχύτητες δεδομένων θα διαφέρουν σύμφωνα με πολλούς παράγοντες όπως:

- Ο αριθμός των χρηστών στο κελί/τομέα
- Η απόσταση από το χρήστη από το κύτταρο
- Αν ο χρήστης βρίσκεται σε κίνηση ή είναι σε στάση
- Το δίκτυο ικανότητας χειριστή και τις απαιτήσεις για βελτιστοποίηση του δικτύου

1.2.4 Τεχνολογία WiMAX / 4G

Το WiMAX είναι μια ασύρματη τεχνολογία ευρυζωνικής πρόσβασης βασισμένη στο IP που παρέχει επιδόσεις παρόμοιες με 802.11/Wi-Fi δίκτυα με την κάλυψη και QOS (quality of service) των κυψελοειδών δικτύων. Το WiMAX είναι, επίσης, ένα

ακρωνύμιο που σημαίνει "Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX).

Το WiMAX είναι ένα ασύρματο ψηφιακό σύστημα επικοινωνιών, γνωστό και ως IEEE 802.16, το οποίο προορίζεται για ασύρματα "δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής». Μπορεί να προσφέρει ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση (BWA) έως 30 μίλια (50 χλμ.) για σταθερούς σταθμούς, και 3 - 10 μίλια (5 - 15 χλμ.) για κινητούς σταθμούς. Αντίθετα, το WiFi/802.11 ασύρματο τοπικό δίκτυο που αφορά τα τοπικά δίκτυα LAN, είναι περιορισμένο στις περισσότερες περιπτώσεις μόνο σε 100 με 300 πόδια (30 - 100 μέτρα).



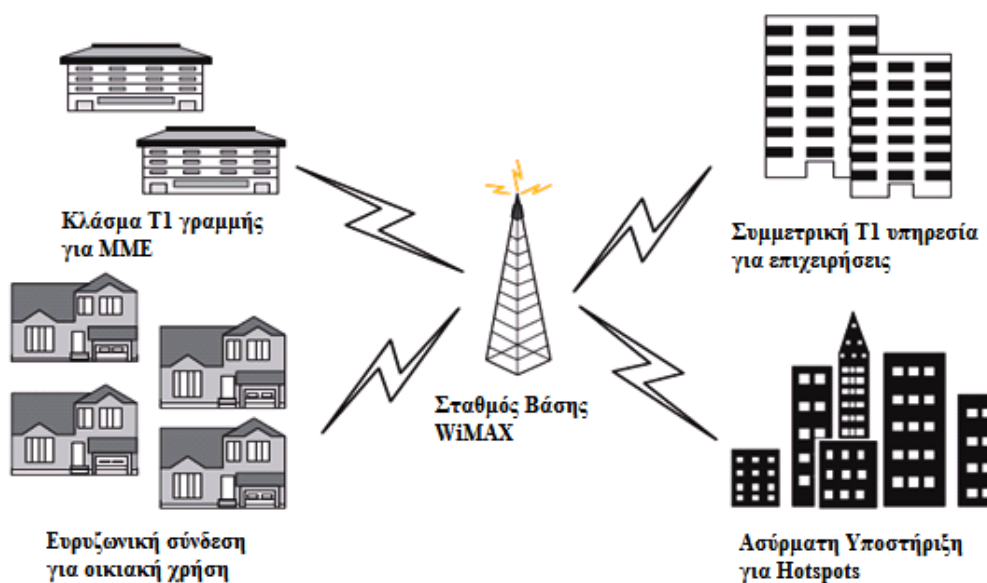
Εικόνα 1.9: Σχηματική απεικόνιση τις εμβέλειας του WiMAX σε σύγκριση με το Wi-Fi

Στο επίκεντρό της, ωστόσο, η τεχνολογία WiMAX είναι ένα πρότυπο. Σκοπός της είναι να εξασφαλιστεί ότι θα υπάρχει υποστήριξη από πωλητή σε πωλητή στα καταναλωτικά προϊόντα ασύρματης εκπομπής. Τα βασικά πλεονεκτήματα του προτύπου WiMAX είναι να καταστεί δυνατή η υιοθέτηση των προηγμένων χαρακτηριστικών ασύρματης μετάδοσης με ομοιόμορφο τρόπο και να μειωθεί το κόστος για όλα τα προϊόντα από τις εταιρείες, οι οποίες είναι μέλος του WiMAX

Forum TM - έναν οργανισμό προτύπων που έχει συσταθεί για την εξασφάλιση της διαλειτουργικότητας μέσω δοκιμών . Το πιο πρόσφατο Long Term Evolution (LTE) πρότυπο είναι ένας παρόμοιος όρος που περιγράφει μια παράλληλη τεχνολογία WiMAX που αναπτύσσεται από τους πωλητές και μεταφορείς σε αντίστιξη με το WiMAX.

Η WiMAX τεχνολογία έχει εξελιχθεί μέσα από 4 στάδια: (1) ασύρματα συστήματα στενής ζώνης τοπικού βρόγχου (2) πρώτης γενιάς ευρυζωνικά συστήματα οπτικής επαφής (LOS) (3) δεύτερης γενιάς ευρυζωνικά συστήματα χωρίς οπτική επαφή (NLOS) (4) standards-based ευρυζωνικά ασύρματα συστήματα.

Η κατηγορία (1) αναπτύχθηκε όταν παρουσιάστηκε η ανάγκη ανάπτυξης ενός εναλλακτικού ασύρματου συστήματος τηλεφωνίας φωνής. Αυτά τα συστήματα ονομάστηκαν ασύρματα τοπικού βρόγχου (wireless local-loop) και παρουσίασαν μεγάλη επιτυχία σε αναπτυσσόμενες χώρες όπως την Κίνα, την Ινδία, την Ινδονησία, την Βραζιλία και την Ρωσία όπου η υψηλή ζήτηση των χωρών αυτών σε βασικές τηλεφωνικές ανάγκες δεν μπορούσε να ικανοποιηθεί από την υπάρχουσα τεχνολογική υποδομή. Ύστερα από την εμπορευματοποίηση του Internet το 1993, αρκετές μικρές εταιρείες ασχολήθηκαν με την ασύρματη παροχή υπηρεσιών Internet. Τα συστήματα αυτά εκπέμπαν στις ζώνες των 900 MHz και των 2.4 GHz και προσέφεραν ταχύτητες της τάξης των μερικών Kbps.



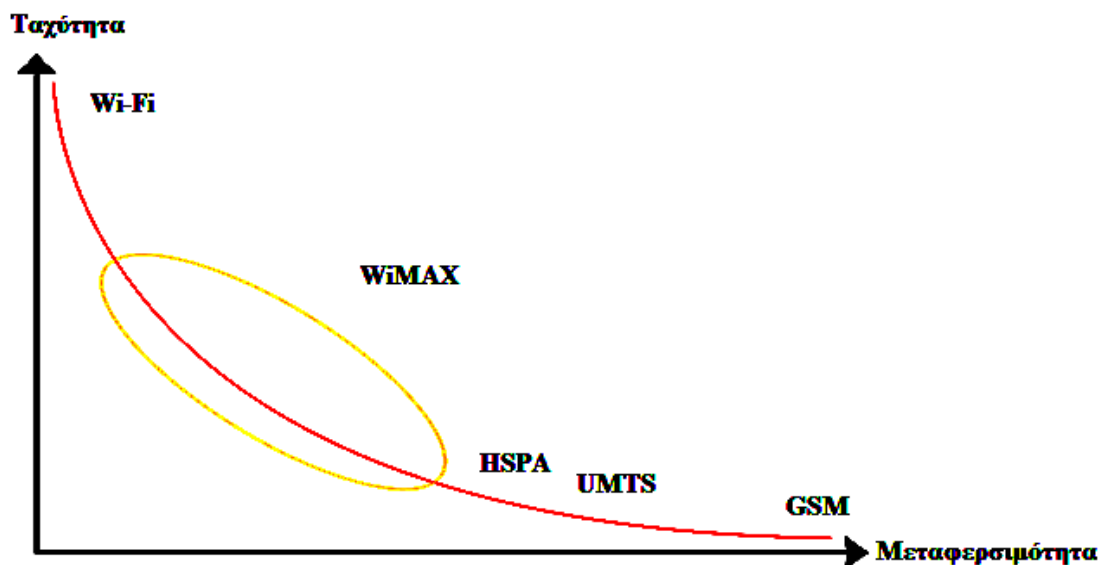
Εικόνα 1.10: Point to Point εφαρμογές του WiMAX

Η κατηγορία (2) αναπτύχθηκε όταν πια είχαν αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό οι απαιτήσεις για υψηλές ταχύτητες Internet. Συστήματα όπως τα LMDS (local multipoint distribution systems) και MMDS (multichannel multipoint distribution services), στα τέλη της δεκαετίας του '90, ήταν σε θέση να προσφέρουν ταχύτητες αρκετών

εκατοντάδων Mbps στη ζώνη των 24 GHz και 39 GHz τα μεν LMDS και στη ζώνη των 2.5 GHz τα αντίστοιχα MMDS. Πρόκειται ουσιαστικά για την πρώτη γενιά σταθερών ευρυζωνικών ασύρματων επικοινωνιών οι οποίες υποστήριζαν LOS (line of sight) κάλυψη 35 μιλίων. Συνεπώς, οι χρήστες αυτών των συστημάτων 24 έπρεπε να είχαν εγκαταστήσει τις κεραιές σε τέτοιο ύψος έτσι ώστε να υπάρχει οπτική επαφή με τον σταθμό εκπομπής.

Η κατηγορία (3) ξεπερνά το πρόβλημα της οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και χρηστών. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στη χρήση κυψελωτών συστημάτων καθώς και την ανάπτυξη τεχνικών επεξεργασίας σήματος με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη αξιοπιστία και απόδοση των ζεύξεων σε συνθήκες πολυδιαδρομικού περιβάλλοντος. Οι 2 βασικότερες τεχνικές επίλυσης του NLOS προβλήματος που προτάθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς ήταν η OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) και η CDMA (code division multiple access).

Όσον αφορά την κατηγορία (4), το 1998 το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) δημιούργησε την ομάδα 802.16 με σκοπό την ανάπτυξη ενός προτύπου για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (wireless-MAN). Το IEEE 802.16 εγκρίθηκε το Δεκέμβρη του 2001 και το εγκεκριμένο πρότυπο, wireless-SC, όριζε μονοφέρουσες τεχνικές διαμόρφωσης για το φυσικό στρώμα μετάδοσης και TDM πολυπλεξία στο MAC επίπεδο. Τα επόμενα χρόνια ακολούθησαν και άλλα πρότυπα όπως τα wireless-SCa, wireless-OFDM, wireless-OFDMA και wireless-HUMAN. Έτσι, το IEEE 802.16 αποτέλεσε μια οικογένεια προτύπων, που συχνά αναφέρεται και ως WiMAX, που ορίζει τα MAC και PHY επίπεδα για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα. Γενικά, τα πρότυπα 802.16 περιγράφουν ποικίλες περιπτώσεις λειτουργίας συστημάτων συγκαταλέγοντας ειδικές παρατηρήσεις για NLOS και LOS περιβάλλοντα.



Εικόνα 1.11: Το διάγραμμα απεικονίζει ποιοτικά το λόγο «ευελιξία μετακίνησης» / «ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων» για διάφορες τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης.

2

Η ΤΕΧΝΙΚΗ OFDM - OFDMA

2.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία WiMAX παρουσιάζει ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα επικοινωνίας πολλών χρηστών: Πολλοί χρήστες στην ίδια γεωγραφική περιοχή απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μεταγωγής δεδομένων σε ένα πεπερασμένο εύρος ζώνης με χαμηλό αριθμό λαθών μετάδοσης. Διάφορες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης επιτρέπουν στους χρήστες να μοιράζονται το διαθέσιμο εύρος ζώνης με ελάχιστη παρουσία κάθε χρήστη σε κάποιο κλάσμα των συνολικών πόρων του συστήματος. Η πείρα έχει δείξει ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν δραματικές διαφορές στις επιδόσεις μεταξύ των διαφόρων στρατηγικών πολλαπλής πρόσβασης. Για παράδειγμα, η επιλογή CDMA

έναντι TDMA για κυψελοειδή συστήματα φωνής τη δεκαετία του 1990. Η διαφορετική φύση της αναμενόμενης κίνησης στο WiMAX δίκτυο όπως με το VoIP, τη μεταφοράς δεδομένων, το video-streaming, η πρόκληση της εξάπλωσης του συστήματος, η κινητικότητα μεταξύ γειτονικών κύτταρων και η υψηλών απαιτήσεων αποτελεσματικότητας του εύρους ζώνης κάνει το πρόβλημα πολλαπλής πρόσβασης αρκετά περίπλοκο στην WiMAX τεχνολογία. Η εφαρμογή μιας αποτελεσματικής και ευέλικτης στρατηγικής πολλαπλής πρόσβασης είναι κρίσιμη για την απόδοση του WiMAX συστήματος.

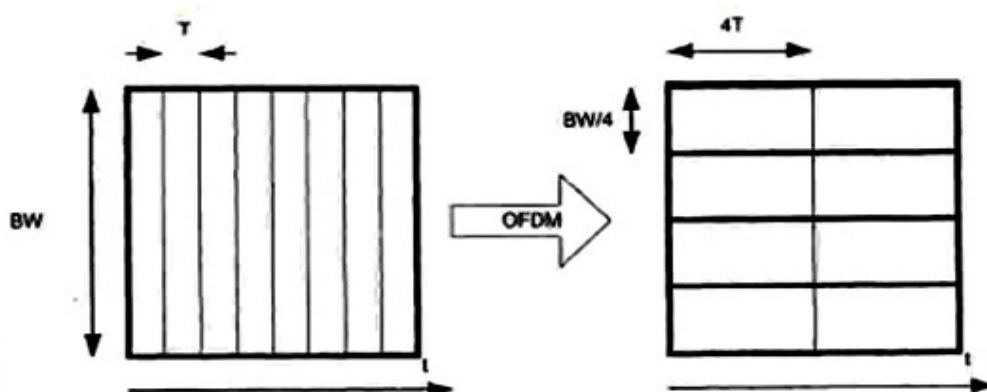
Το φυσικό στρώμα μετάδοσης λοιπόν του WiMAX στηρίζεται στην τεχνική OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex - Ορθογωνική Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας). Πρόκειται για ένα πλάνο μετάδοσης με επιλογή υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, βίντεο και multimedia εφαρμογών το οποίο χρησιμοποιείται σε πληθώρα σύγχρονων εμπορικών ευρυζωνικών συστημάτων (DSL, Wi-Fi, DVB-H, MediaFLO). Γενικά, το OFDM είναι μια κομψή και αποτελεσματική τεχνική, ιδανική για μετάδοση υψηλών ταχυτήτων σε NLOS (non-line of sight) ζεύξεις και πολυδιαδρομικό περιβάλλον.

Το OFDM δεν είναι όμως απλά μια στρατηγική πολλαπλής πρόσβασης, αλλά μάλλον μια τεχνική διαμόρφωσης που δημιουργεί πολλές ανεξάρτητες ροές δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από διάφορους χρήστες. Προηγούμενα OFDM συστήματα, όπως όπως το 802.11a DSL/g, καθώς και τις προηγούμενες εκδόσεις του 802.16/WiMAX, έκαναν χρήση ενός χρήστη OFDM: όλα τα υποφέροντα χρησιμοποιούνται από έναν μόνο χρήστη κάθε φορά. Για παράδειγμα, στο 802.11 a/g, συνδυασμένα οι χρήστες μοιράζονται το εύρος ζώνης των 20MHz με τη διαβίβαση σε διαφορετικές χρονικές στιγμές αφού συναγωνιστούν για το κανάλι. Επαναλαμβάνοντας λοιπόν, το WiMAX (802.16e-2005) υιοθετεί μια διαφορετική προσέγγιση, γνωστή ως Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης (OFDMA), όπου οι χρήστες μοιράζονται και τους υποφορείς και τις χρονοθυρίδες. Το OFDMA έρχεται με μικρό κόστος, με το κόστος μοιρασμένο και στις δύο κατευθύνσεις: Ο πομπός χρειάζεται πληροφορίες από το κανάλι για τους χρήστες του, και ο δέκτης πρέπει να γνωρίζει ποιοι υποφορείς του έχουν εκχωρηθεί.

2.2 Θεμελιώδεις αρχές – OFDM

Το OFDM ανηκεί στην οικογένεια τεχνικών μετάδοσης της πολυφέρουσας διαμόρφωσης (multicarrier modulation) η οποία βασίζεται στην ιδέα διαμελισμού ενός υψηλού ρυθμού μετάδοσης σε πολλούς παράλληλους, χαμηλότερης ταχύτητας καθένας από τους οποίους μεταφέρεται σε ξεχωριστό φέρον (υποφέρον). Γενικά, η μελέτη των πολυφέροντων συστημάτων άρχισε την δεκαετία του '60 με σκοπό τη λειτουργία τους σε στρατιωτικές εφαρμογές. Η πολυφέρουσα διαμόρφωση εξαλείφει ή ελαχιστοποιεί τις διασυμβολικές παρεμβολές αυξάνοντας την διάρκεια συμβόλου κάθε παράλληλου ρυθμού μετάδοσης με αποτέλεσμα τη μείωση της επίδρασης του πολυδιαδρομικού περιβάλλοντος. Πρακτικά, ένας υψηλός ρυθμός bit R χωρίζεται σε N παράλληλους ρυθμούς ταχύτητας R/N ο καθένας. Αν και τα N υποφέροντα επικαλύπτονται, προσφέρουν υψηλή φασματική αποτελεσματικότητα λόγω της ορθογωνιότητας που τα χαρακτηρίζει.

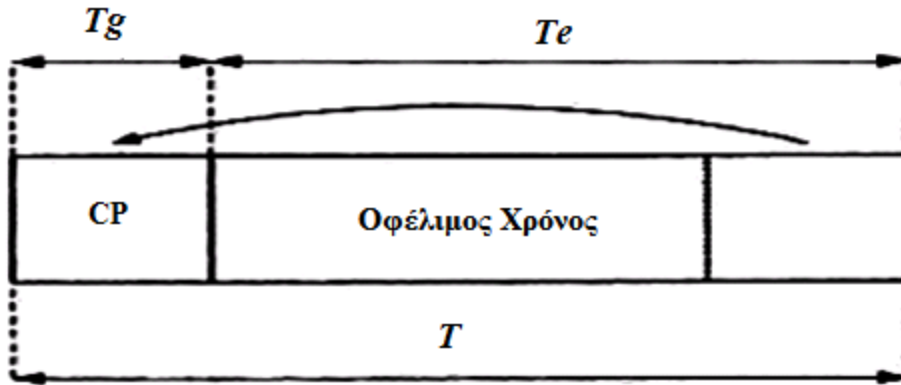
Σχηματικά έχουμε:



Εικόνα 2.1: Σχηματική παρουσίαση παράλληλης μετάδοσης χρησιμοποιώντας $N = 4$ υποφέροντα για εύρος ζώνης BW

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και στην εικόνα 2.1, η παράλληλη διάδοση δεδομένων αυξάνει τη διάρκεια συμβόλου με αποτέλεσμα τη μείωση της επίδρασης του πολυδιαδρομικού περιβάλλοντος.

Η απόσταση μεταξύ 2 γειτονικών υποφώντων, Δf , δίνεται από την σχέση $\Delta f = 1/T_e$, όπου $T_e = T - T_g$ ο ωφέλιμος χρόνος της διάρκειας συμβόλου του υποφώντος. Προφανώς, με N υποφέροντα το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος εκφράζεται ως $BW = N\Delta f$.



Εικόνα 2.2: Αναπαράσταση διάρκειας OFDM συμβόλου

Η τεχνική της OFDM διαμόρφωσης συχνά πραγματοποιείται με την χρήση του αντίστροφου διακριτού μετασχηματισμού Fourier (IDFT). Αυτό κάνει εξαιρετικά εύκολη την υλοποίηση OFDM πομπών και δεκτών μέσω του ταχύ αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (IFFT). Αντίστοιχα, η OFDM αποδιαμόρφωση πραγματοποιείται με την χρήση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) και η υλοποίηση μέσω του ταχύ μετασχηματισμού Fourier (FFT). Η τάξη του ταχύ μετασχηματισμού Fourier που θα χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό του OFDM συστήματος θα πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά εστί ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία μεταξύ της προστασίας από το πολυδιαδρομικό περιβάλλον, διαλείψεις Doppler και την πολυπλοκότητα/κόστος του συστήματος. Για δεδομένο εύρος ζώνης, η επιλογή μεγάλης τάξης FFT έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απόστασης Δf μεταξύ των υποφέροντων καθώς και την αύξηση της διάρκειας συμβόλου. Συνεπώς, με αυτή την τεχνική παρέχεται στο σύστημα μεγαλύτερη προστασία από τις επιδράσεις των πολυδιαδρομικών διαλείψεων αν και ταυτόχρονα η μείωση του Δf κάνει το σύστημα ευαίσθητο στις παρεμβολές μεταξύ των υποφέροντων εξαιτίας των διαλείψεων Doppler που εμφανίζονται στις κινητές εφαρμογές.

2.3 Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της τεχνικής OFDM

Το OFDM, ως τεχνολογία μετάδοσης, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Παρακάτω παρατείθονται μερικά από τα πιο σημαντικά:

- Το OFDM είναι ανθεκτικό στην πολυδιαδρομική μετάδοση λόγω της αυξημένης διάρκειας των OFDM συμβόλων κάθε υποφέροντος.
- Η υλοποίησή του στο ψηφιακό πεδίο είναι εύκολη μέσω της χρήσης IFFT ολοκληρωμένων.
- Ο διαμελισμός του εύρους ζώνης σε υποφέροντα προσφέρει νέες δυνατότητες για το επίπεδο υπηρεσιών και τη διαχείριση ραδιοπόρων μιας και είναι εφικτή η ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό πόρων.
- Λόγω της ορθογωνιότητας των υποφερόντων, δεν υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ τους παρά το γεγονός ότι επικαλύπτονται.
 - Ένα σημαντικό μειονέκτημα της OFDM τεχνολογίας είναι το πρόβλημα του λόγου της μέγιστης ισχύος προς την μέση (peak-to-average-power ratio). Το OFDM σήμα αποτελείται από N ανεξάρτητα διαμορφωμένα σήματα τα οποία, όταν προστίθενται με την ίδια φάση, έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία ισχύος εξόδου N φορές μεγαλύτερη από τη μέση. Αυτές οι διακυμάνσεις του σήματος ισχύος αποτελούν σημαντικό πρόβλημα στον σχεδιασμό τόσο των RF ενισχυτών όσο και των AD/DA μετατροπών.

2.4 Στρατηγικές πολλαπλής πρόσβασης για OFDM

Οι πολλαπλής πρόσβασης στρατηγικές συνήθως προσπαθούν να δώσουν *ορθογώνια*, ή μη παρεμβολήσιμα, κανάλια επικοινωνίας για κάθε ενεργό σύνδεσμο. Οι πιο κοινοί τρόποι για κατανομή των διαθέσιμων διαστάσεων μεταξύ των πολλών χρηστών είναι μέσω της χρήσης πολύπλεξης χρόνου, συχνότητας ή διάσπασης κώδικα. Στη διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (Frequency Division Multiple Access FDMA), κάθε χρήστης λαμβάνει μια μοναδική φέρουσα συχνότητα και εύρος ζώνης. Στα Time Division Multiple Access (TDMA), σε κάθε χρήστη δίνεται μια μοναδική χρονοθυρίδα, είτε η πρώτη που θα ζητηθεί ή με μια σταθερή εναλλαγή. Τα ασύρματα συστήματα TDMA σχεδόν πάντα χρησιμοποιούν επίσης FDMA σε κάποια μορφή, δεδομένου ότι δε γίνεται να χρησιμοποιηθεί όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Τα ορθογώνια Code Division Multiple Access (CDMA), συστήματα επιτρέπουν σε κάθε χρήστη να μοιράζεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης και τις χρονοθυρίδες με πολλούς

άλλους χρήστες και βασίζονται σε ορθογώνια δυαδικούς κώδικες για να γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των χρηστών. Γενικότερα, όλα τα συστήματα CDMA, συμπεριλαμβανομένου των δημοφιλών nonorthogonal, μοιράζονται το κοινό χαρακτηριστικό ότι πολλοί χρήστες μοιράζονται το χρόνο και τη συχνότητα.

Μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι στα TDMA, FDMA, και ορθογώνια CDMA όλοι έχουν την ίδια χωρητικότητα σε ένα πρόσθετο κανάλι θορύβου, δεδομένου ότι όλοι μπορούν να σχεδιαστούν για να έχουν τον ίδιο αριθμό των ορθογώνιων διαστάσεων σε συγκεκριμένο εύρος ζώνης και χρόνο. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι παίρνει μια μονάδα του εύρους ζώνης για να στείλει μήνυμα του χρήστη και ότι οκτώ μονάδες του εύρους ζώνης είναι διαθέσιμες. Οκτώ χρήστες μπορούν να φιλοξενηθούν με κάθε τεχνική. Στην FDMA, οκτώ ορθογώνιες θυρίδες συχνότητας θα δημιουργούνται, μία για κάθε χρήστη. Στην TDMA, κάθε χρήστης θα χρησιμοποιήσει και τις οκτώ θυρίδες συχνότητας αλλά θα μεταδίδει μόνο στο ένα όγδοο του χρόνου. Στο CDMA, κάθε χρήστης θα διαβιβάζει όλη την ώρα πάνω από το σύνολο των συχνοτήτων, αλλά θα χρησιμοποιήσει έναν από τους οκτώ διαθέσιμους ορθογώνιους κώδικες για να εξασφαλιστεί ότι δεν υπάρχει καμμία παρεμβολή με τους άλλους επτά χρήστες.

Επομένως, γιατί όλες αυτές οι συζητήσεις σε πολλαπλές πρόσβασης; Ένας λόγος είναι ότι ορθογωνιότητα δεν είναι δυνατή στο πυκνά ασύρματα συστήματα. Οι τεχνικές εγγυώνται ορθογωνιότητα μόνο μεταξύ των χρηστών στο ίδιο κελί, ενώ οι χρήστες σε διαφορετικά, ενδεχομένως γειτονικά κύτταρα θα μπορεί να τους έχει δοθεί η ίδια θυρίδα χρόνου ή συχνότητας. Περαιτέρω, η ορθογωνιότητα θυσιάζεται λόγω ατελούς bandpass φιλτραρίσματος (FDMA), πολυδιαδρομικών καναλιών και ατελούς συγχρονισμού (στο TDMA και ιδιαίτερα στο CDMA). Στην πράξη, κάθε τεχνική πολλαπλής πρόσβασης (FDMA, TDMA, CDMA) περιλαμβάνει έναν κατάλογο από πλεονεκτήματα και των μειονεκτημάτων. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του FDMA είναι ότι πολλά από τα καλύτερα χαρακτηριστικά της κάθε τεχνικής μπορούν να επιτευχθούν.

2.4.1 Random Access έναντι Multiple Access

Πριν περιγράψει με περισσότερες λεπτομέρειες το πώς τα TDMA, FDMA και CDMA μπορούν να εφαρμοστούν στο OFDM, είναι χρήσιμο να εξετάσει μια εναλλακτική

τεχνική της τυχαίας προσπέλασης: Η Carrier Sense Multiple Access (CSMA), που χρησιμοποιείται συνήθως σε packet-based συστήματα επικοινωνίας, ιδίως Ethernet και ασύρματα τοπικά δίκτυα, όπως το 802.11. Σε τυχαία πρόσβαση, οι χρήστες ανταγωνίζονται για το κανάλι και όχι να τους χορηγηθεί αποκλειστικά χρόνος, τη συχνότητα, ή πόρος κώδικα. Γνωστές τεχνικές τυχαίας προσπέλασης περιλαμβάνουν την ALOHA και την slotted ALOHA, καθώς και CSMA. Στην ALOHA, οι χρήστες απλά μεταδίδουν πακέτα κατά βούληση, χωρίς να ενδιαφέρονται για τους άλλους χρήστες. Ένα πακέτο που δεν αναγνωρίζεται από το δέκτη μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, θεωρείται ότι χάνεται και αναμεταδίδεται. Φυσικά, αυτό το καθεστώς είναι πολύ αναποτελεσματικό και επιρρεπές στην καθυστέρηση όσο αυξάνεται η ένταση της κυκλοφορίας, καθώς οι περισσότερες μεταδόσεις οδηγούν σε συγκρούσεις. Το Slotted Aloha το βελτιώνει αυτό κατά ένα παράγοντα 2, δεδομένου ότι οι χρήστες μεταδίδουν σε καθορισμένα χρονικά περιθώρια, και ως εκ τούτου συγκρούσεις έχουν περίπου τις μισές πιθανότητες.

Η CSMA βελτιώνει ALOHA και slotted ALOHA μέσω του συστήματος ανίχνευσης: Οι χρήστες "ακούνε" το κανάλι πριν την εκπομπή, ώστε να μην προκαλέσουν συγκρούσεις που μπορούν να αποφευχθούν. Πολλοί αλγόριθμοι ανταγωνισμού (contention) έχουν αναπτυχθεί για CSMA συστήματα: ένας από τους πιο γνωστούς είναι η Κατανεμημένη Λειτουργία Συντονισμού (Distributed Coordination function DCF) του 802.11, σύμφωνα με την οποία οι χρήστες περιμένουν ένα τυχαίο χρονικό διάστημα μέχρι το κανάλι να είναι «καθαρό» πριν από την εκπομπή, προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα από δύο σταθμούς να μεταδώσουν αμέσως αφού το κανάλι είναι διαθέσιμο. Αν και η θεωρητική απόδοση του CSMA είναι συχνά περίπου 60 τοις εκατό με 70 τοις εκατό, σε ασύρματα τοπικά δίκτυα, η απόδοση έχει συχνά παρατηρηθεί εμπειρικά να είναι λιγότερο από 50 τοις εκατό, ακόμα και όταν υπάρχει ένας μόνο χρήστης.

Παρά το γεγονός ότι τυχαία η πρόσβαση είναι σχεδόν πάντα επιδιωκόμενη στη διάσταση του χρόνου, δεν υπάρχει κανένας λόγος ώστε στις θυρίδες συχνότητας και κώδικα δεν θα μπορούσε να υποστηριχθεί για τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Ωστόσο, επειδή η τυχαία πρόσβαση τείνει να είναι αναποτελεσματική, τα συστήματα εξελίχθηκαν αρκετά ώστε να έχουν ειδικές θυρίδες συχνότητας και κώδικα βελτιστοποιημένες για πολλαπλή πρόσβαση και όχι για τυχαία προσπέλαση. Ως εκ τούτου, τα CSMA συστήματα μπορούν γενικά να θεωρηθούν ως ένα είδος TDMA, όπου ορισμένη αναποτελεσματικότητα λόγω του ανταγωνισμού και των

συγκρούσεων είναι αποδεκτή ώστε να έχουν μια πολύ απλή κατανομημένη διαδικασία εκχώρησης καναλιού στην οποία οι χρήστες αποκτούν πόρους, μόνο όταν έχουν πακέτα για αποστολή. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν και η FDMA και η TDMA είναι σίγουρα πιο αποτελεσματικές από ότι η CSMA, όταν όλοι οι χρήστες έχουν πακέτα για αποστολή, οι σπαταλημένες (αχρησιμοποίητες) υποδοχές συχνότητας και χρόνου στην FDMA και TDMA μπορούν επίσης να μειώσουν σημαντικά την αποδοτικότητα. Στην πραγματικότητα, περίπου το ήμισυ του εύρους ζώνης συνήθως σπαταλάται στα TDMA και FDMA συστήματα φωνής, που είναι ένας σημαντικός λόγος που το CDMA έχει αποδειχθεί τόσο επιτυχημένο για φωνή. Υποθέτοντας πλήρης ουρές, η αποτελεσματικότητα του προσανατολισμένου στη σύνδεση MAC μπορεί να πλησιάσει το 90 τοις εκατό, σε σύγκριση με την καλύτερη περίπτωση του 50 τοις εκατό ή λιγότερο στις περισσότερες περιπτώσεις CSMA ασύρματων συστημάτων, όπως το 802.11. Η ανάγκη για την εξαιρετικά υψηλή φασματική απόδοση στο WiMAX εξαλείφει ως εκ τούτου τη χρήση του CSMA, και το βάρος της κατανομής πόρων ανατίθεται στους σταθμούς βάσης.

2.4.2 Frequency Division Multiple Access

Η FDMA μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί στα συστήματα OFDM, αντιστοιχίζοντας κάθε χρήστη ένα σύνολο υποφορέων. Η κατανομή αυτή μπορεί να πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους. Η απλούστερη μέθοδος είναι μια στατική απόδοση των υποφορέων σε κάθε χρήστη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3α. Για παράδειγμα, σε ένα 64-υποφορέων OFDM σύστημα, ο χρήστης 1 θα μπορούσε να λαβεί τους υποφορείς 1-16, με τους χρήστες 2, 3 και 4 να χρησιμοποιούν τους υποφορείς 17-32, 33-48, και 49-64, αντίστοιχα. Οι πιστώσεις εκτελούνται με ένα πολυπλέκτη για τους διάφορους χρήστες πριν από τον IFFT. Φυσικά, θα μπορούσε επίσης να υπάρχει άνιση κατανομή: με ανάθεση περισσότερων υποφορέων στους highdata-rate χρήστες, από τους lowdata-rate χρήστες.

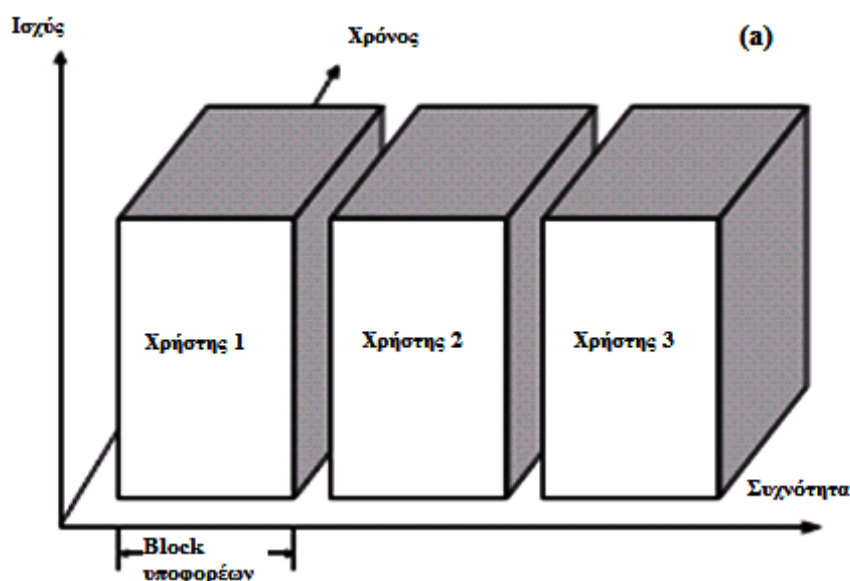
Η εξέλιξη της στατικής κατανομής είναι η δυναμική κατανομή υποφορέων, με βάση τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι. Για παράδειγμα, λόγω της παραμόρφωσης επιλεκτικής ως προς τη συχνότητα, ο χρήστης 1 μπορεί να έχει σχετικά καλά κανάλια στους υποφορείς 33-48, ενώ ο χρήστης 3 θα μπορούσε να έχει καλούς διαύλους για

υπομορφείς 1-16. Προφανώς, θα είναι αμοιβαία επωφελής για αυτούς τους χρήστες να ανταλλάξουν τα στατικά δικαιώματα που διανεμήθηκαν προηγουμένως.

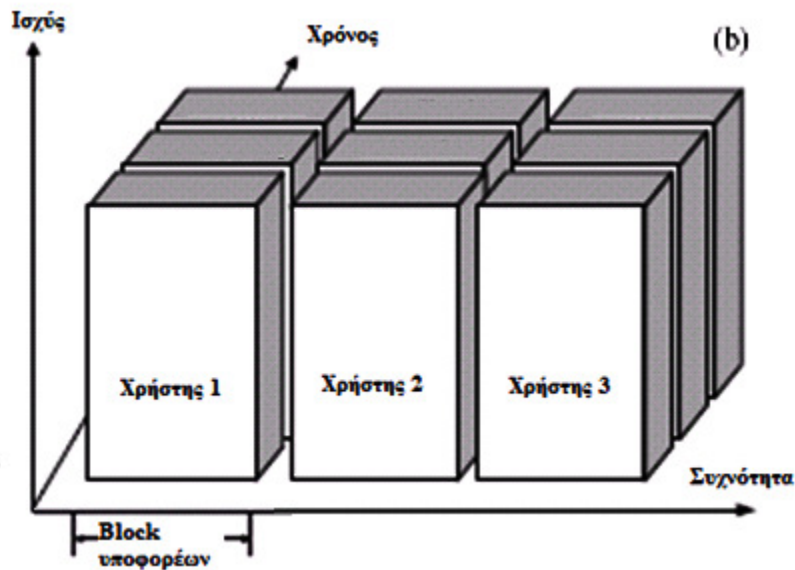
2.4.3 Time Division Multiple Access – “Round Robin”

Εκτός από ή αντί της FDMA, η TDMA τεχνολογία μπορεί να φιλοξενήσει πολλούς χρήστες. Στην πραγματικότητα τα WiMAX συστήματα χρησιμοποιούν τόσο FDMA και TDMA, αφού θα υπάρχουν γενικά περισσότεροι χρήστες στο σύστημα από ό,τι μπορεί να μεταφερθεί ταυτόχρονα σε ένα μόνο OFDM συμβόλο. Επιπλέον, οι χρήστες συχνά δεν έχουν δεδομένα για την αποστολή, γι' αυτό είναι ζωτικής σημασίας για χάρη της αποτελεσματικότητας οι υπομορφείς να κατανέμονται δυναμικά προκειμένου να αποφευχθούν οι απώλειες.

Η Στατική TDMA φαίνεται στην εικόνα 2.3α. Αυτή η στατική μέθοδος TDMA είναι κατάλληλη για εφαρμογές με δεδομένα σταθερού ρυθμού κυκλωματομεταγωγής όπως η φωνή και η το video streaming. Αλλά γενικά, ένα σύστημα βασισμένο στο πακέτο, όπως το WiMAX, μπορεί να χρησιμοποιήσει πιο εξελιγμένους αλγόριθμους προγραμματισμού με βάση το μήκος της ουράς, τις συνθήκες στο κανάλι και να περιοριστούν οι περιορισμοί για την επίτευξη πολύ καλύτερης απόδοσης από ότι συμβαίνει στη στατική TDMA. Στο αυτό η στατική TDMA καλείται συχνά προγραμματισμός round-robin: Κάθε χρήστης περιμένει απλά τη σειρά του κυκλικά για να μεταδώσει.



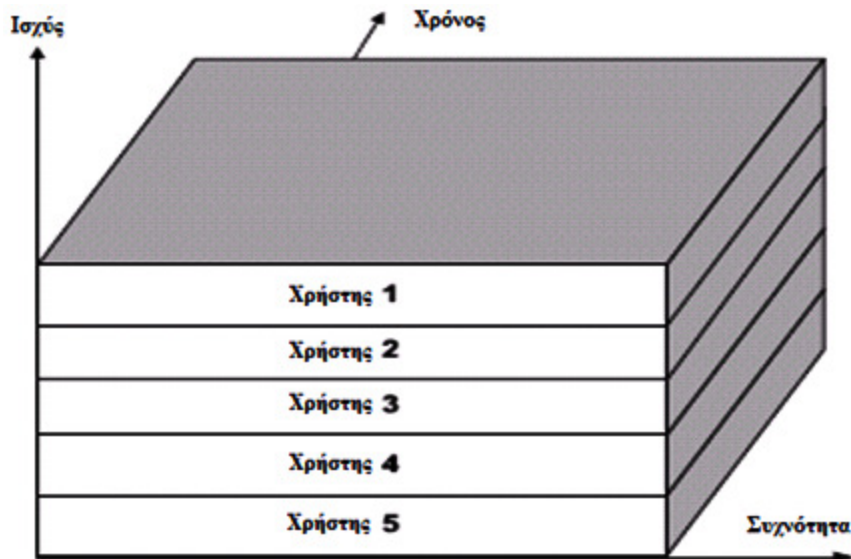
Εικόνα 2.3α: TDMA



Εικόνα 2.3β: Συνδυασμός FDMA - TDMA

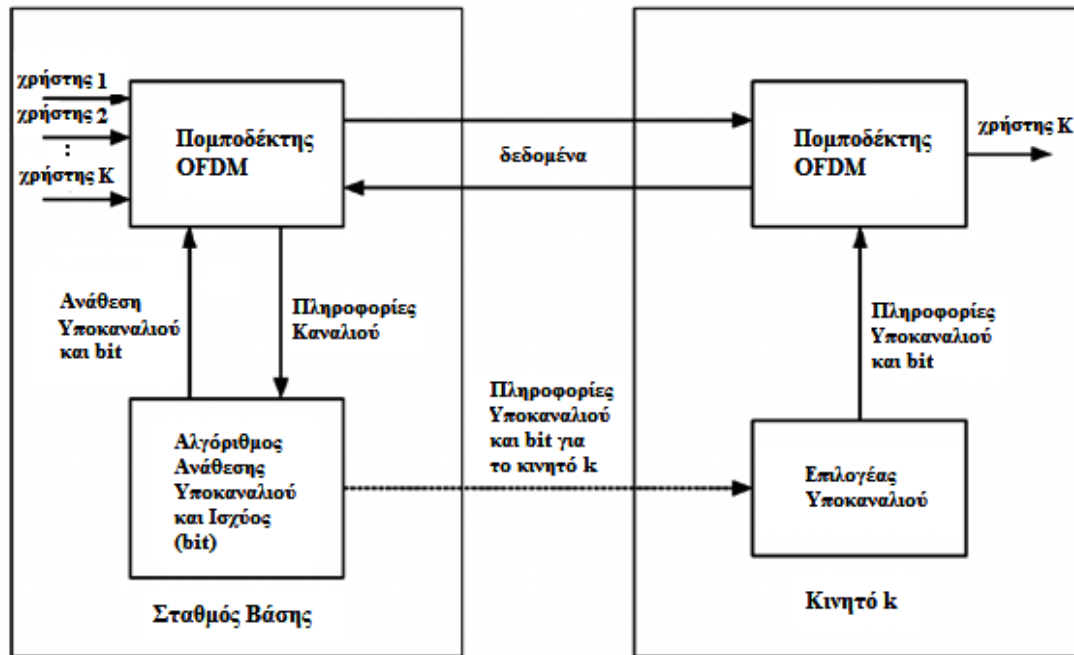
2.4.4 Code Division Multiple Access

Η CDMA είναι η κυρίαρχη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης για τα σημερινά κυψελωτά συστήματα, αλλά δεν είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για μετάδοση υψηλής ταχύτητας δεδομένων, αφού όλο το σκεπτικό της CDMA είναι ότι χρησιμοποιείται εύρος ζώνης κατά πολύ μεγαλύτερο από το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για να κατασταλεί η παρέμβαση, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4. Σε ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα, οι ρυθμοί μετάδοσης των δεδομένων ήδη είναι πολύ μεγάλοι, οπότε η περαιτέρω επέκταση του φάσματος δεν είναι βιώσιμη. Ακόμη και τα ονομαστά CDMA πρότυπα ευρείας ζώνης, όπως το HSDPA και 1xEV-DO, έχουν πολύ μικρή διασπορά και είναι δυναμικά συστήματα TDMA, αφού η μετάβαση από τον ένα χρήστη στον άλλο βασίζεται σε αντικείμενα προγραμματισμού, όπως η κατάσταση του καναλιού και η καθυστέρηση.



Εικόνα 2.4: Οι χρήστες CDMA μοιράζονται κοινές θορίδες χρόνου και συχνότητας αλλά χρησιμοποιούν κατάλληλη κωδικοποίηση για να διαχωρίζονται μεταξύ τους.

Η OFDM και η CDMA δεν είναι κατά βάση ασυμβίβαστες καθώς μπορούν να συνδυαστούν για να δημιουργηθεί μια πολυκαναλική κυματομορφή CDMA (MC-CDMA). Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί απλωμένου φάσματος σηματοδότηση και να διαχωριστούν οι χρήστες με κώδικα στο OFDM, με την επέκταση είτε του πεδίου του χρόνου είτε της συχνότητας. Η επέκταση του πεδίου του χρόνου συνεπάγεται ότι κάθε υποφορέας μεταφέρει το ίδιο σύμβολο δεδομένων πάνω σε διάφορα διαδοχικά OFDM σύμβολα. Δηλαδή, το σύμβολο των δεδομένων πολλαπλασιάζεται με το μήκος N ακολουθίας κώδικα και στη συνέχεια αποστέλλεται σε ένα συγκεκριμένο υποφορέα για τα επόμενα N σύμβολα OFDM. Η επέκταση του πεδίου της συχνότητας, η οποία έχει κατά κανόνα ελαφρώς καλύτερη απόδοση από ότι η επέκταση του πεδίου του χρόνου, συνεπάγεται κάθε σύμβολο δεδομένων αποστέλλεται ταυτόχρονα σε N διαφορετικούς υπομεταφορείς. Η τεχνολογία MC-CDMA δεν αποτελεί μέρος των προτύπων WiMAX αλλά θα μπορούσε να θεωρηθεί στο μέλλον, ειδικά για το uplink.



Εικόνα 2.5 : Σχηματικό διάγραμμα του Multiuser OFDM

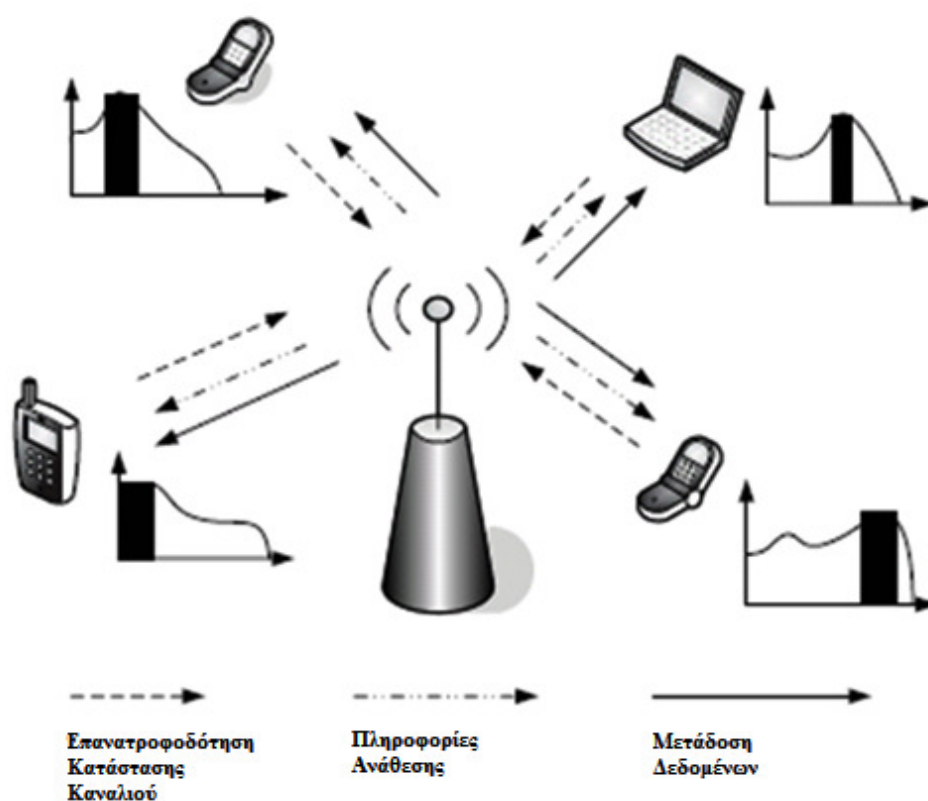
Σύμβολο	Περιγραφή	Σχέση	Ενδεικτική Τιμή στο WiMAX
B^*	Ονομαστικό Εύρος Ζώνης	$B = 1/T_s$	10MHz
L^*	Αριθμός Υποφορέων	Size of IFFT/FFT	1024
G^*	Κλάσμα Επιτήρησης	% of L for CP	1/8
L_d^*	Υποφορείς Δεδομένων	L -pilot/null subcarriers	768
T_s	Χρόνος Δειγματοληψίας	$T_s = 1/B$	1 μ sec
N_g	Σύμβολο Επιτήρησης	$N_g = GL$	128
T_g	Διάρκεια Συμβόλου	$T_g = T_s N_g$	12.8 μ sec
T	Διάρκεια OFDM συμβόλου	$T = T_g(L + N_g)$	115.2 μ sec
B_{sc}	Εύρος Ζώνης Υποφορέα	$B_{sc} = B/L$	9.76 KHz

Πίνακας 2.1: Περίληψη χαρακτηριστικών παραμέτρων του OFDM

2.5 Πολυπλεξία OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

2.5.1 Οι θεμελιώδεις αρχές του OFDMA

Το OFDMA είναι ουσιαστικά ένα υβρίδιο του FDMA και του TDMA: Στους χρήστες εκχωρούνται δυναμικά υπομεταφορείς (FDMA), σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (TDMA), όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6.



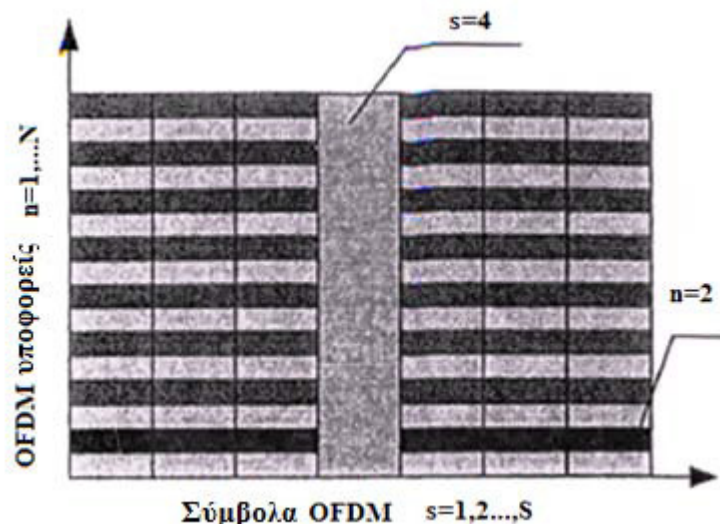
Εικόνα 2.6: Στο OFDMA ο σταθμός βάσης αναθέτει σε κάθε χρήστη ένα κλάσμα από τους υποφορείς, προτιμότερα σε μια έκταση που έχουν δυνατό κανάλι.

Στην OFDMA τεχνική, η πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται με αρχική διαίρεση του διαθέσιμου φάσματος σε έναν αριθμό υποφορέων και μετέπειτα με ανάθεση υποσυνόλων αυτών στους χρήστες του συστήματος.

Το βασικό χαρακτηριστικό του OFDMA είναι ότι εκμεταλλεύεται το διαφορισμό πολλών χρηστών σε κανάλια επιλεκτικά στις συχνότητες, αφού είναι πολύ πιθανό μερικοί υποφορείς που είναι «κακοί» για ένα χρήστη, να είναι «καλοί» για

τουλάχιστον έναν από τους άλλους χρήστες. Για να αποφευχθούν οι επιλεκτικές διαλείψεις ως προς την συχνότητα, το εύρος ζώνης κάθε υποφέροντος επιλέγεται να είναι αρκετά μικρότερο από το εύρος ζώνης συνοχής του καναλιού. Με αυτό τον τρόπο η μετάδοση γίνεται ανθεκτική απέναντι στο πολυδιαδρομικό περιβάλλον ενώ αυξάνει και η φασματική απόδοση.

Σχηματικά φαίνεται παρακάτω:



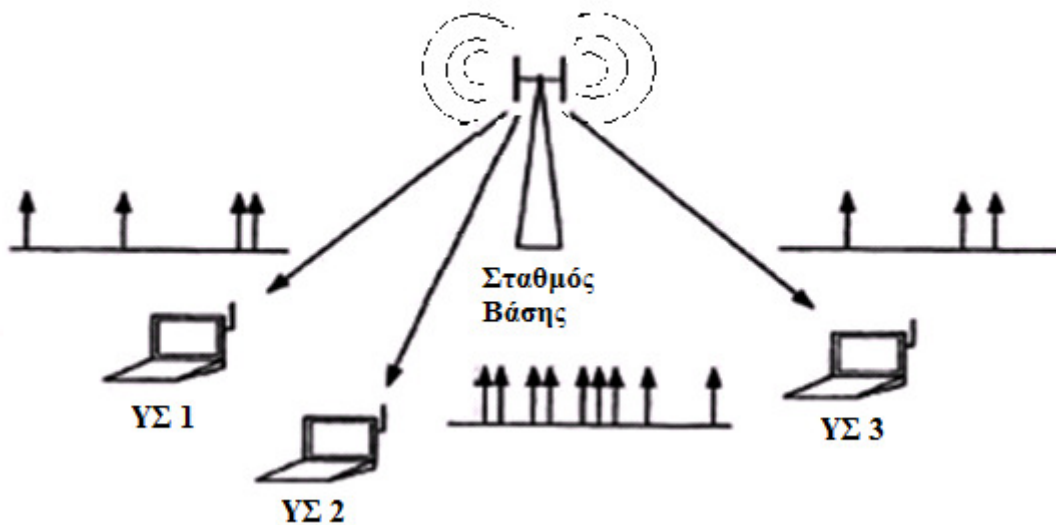
Εικόνα 2.7: OFDM ραδιοπόροι: OFDM σύμβολα $s = 1, \dots, S$ και υποφέροντα $n = 1, \dots, N$

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για την κατανομή υποφορέων: Η μία είναι η σταθερή και η άλλη η προσαρμοστική κατανομή. Στη σταθερή κατανομή το σύστημα αμελεί την ποικιλομορφία του καναλιού ενώ στην προσαρμοστική κατανομή, η κατανομή των πόρων στους χρήστες λαμβάνει υπόψη το κέρδος καναλιού κάθε χρήστη.

Άλλο ένα βασικό χαρακτηριστικό της OFDMA τεχνικής είναι το γεγονός ότι σε ένα χρήστη μπορούν να ανατεθούν περισσότεροι από ένας υποφορείς. Επιπλέον, έχει αποδειχτεί σε παλαιότερες εργασίες ότι κάθε υποφορέας ανατίθεται αποκλειστικά σε ένα μόνο χρήστη, εξαλείφοντας την ενδοκυτταρική παρεμβολή.

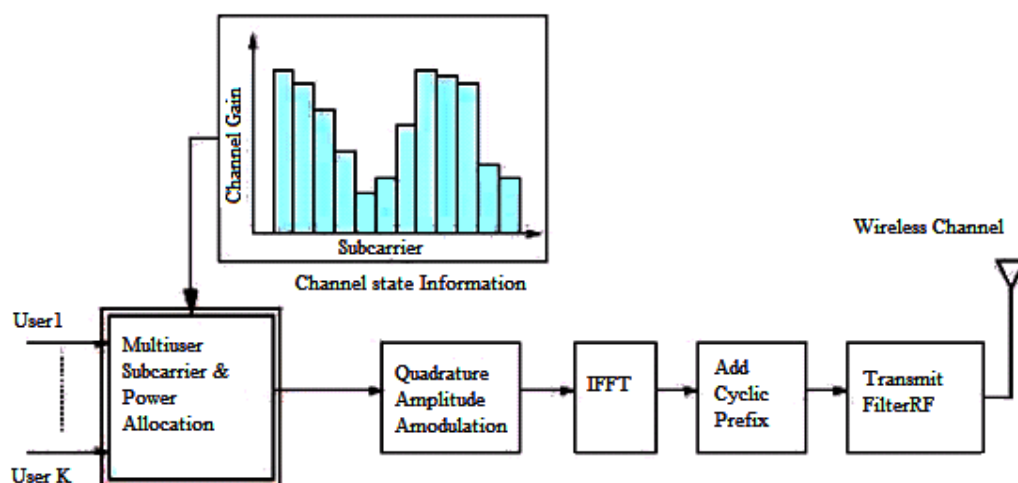
Το καθένα από τα OFDM σύμβολα ή υποφέροντα μπορεί να ανατεθεί σε διαφορετικούς χρήστες. Επιπλέον, διαφορετικός αριθμός συμβόλων και υποφόντων μπορεί να ανατεθεί στους χρήστες με αποτέλεσμα και διαφορετικά επίπεδα διαμόρφωσης (αριθμός bit ανά σύμβολο διαμόρφωσης). Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να επιτευχθούν ποικίλα επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ανάθεση των υποφώντων στους χρήστες σε ασύρματο σύστημα κατερχόμενης ζεύξης:



Εικόνα 2.8: OFDMA μετάδοση κάτω ζεύξης αναθέτοντας σε διαφορετικούς χρήστες διαφορετικά υποφώντα

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, σε κάθε χρήστη έχει ανατεθεί ένας αριθμός υποφώντων ανάλογα με τις συνθήκες και την κίνηση του ραδιοδιαύλου. Ποιό υποφώνον ανατείνεται σε ποίο χρήστη καθορίζεται από την σωστή διαχείριση των ραδιοπόρων.

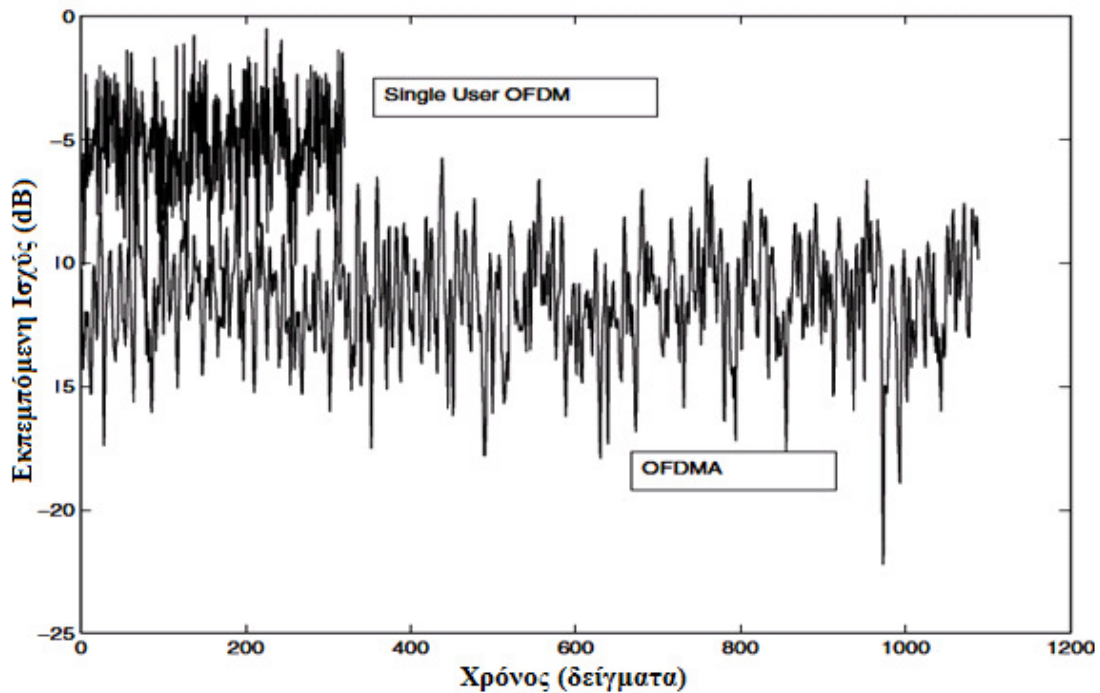


Εικόνα 2.9: Block Διάγραμμα OFDM εκπομπού πολλών χρηστών

2.5.2 Πλεονεκτήματα του OFDMA

Τα πλεονεκτήματα του OFDMA ξεκινούν με τα πλεονεκτήματα της OFDM ενός χρήστη από την άποψη ενός ισχυρού περιορισμού της πολυδιαδρομικότητας και της συχνοτικής ποικιλομορφίας. Επιπλέον, η OFDMA είναι μια ευέλικτη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που μπορούν να φιλοξενήσει πολλούς χρήστες με πολύ διαφορετικές εφαρμογές, ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, καθώς και απαιτήσεις QoS. Επειδή η πολλαπλή πρόσβαση γίνεται στον ψηφιακό τομέα, πριν από την IFFT λειτουργία, είναι εφικτή αποτελεσματική δυναμική κατανομή εύρους ζώνης. Αυτό επιτρέπει την ενσωμάτωση εξελιγμένων αλγόριθμων προγραμματισμού του τομέα του χρόνου και συχνότητας, προκειμένου να εξυπηρετήσει καλύτερα τον πληθυσμό των χρηστών.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της OFDMA σε σχέση με την OFDM είναι η δυνατότητά της να μειώσει την ισχύ εκπομπής και να χαλαρώσει το peak-to-average-power ratio (PAPR) πρόβλημα. Το πρόβλημα PAPR είναι ιδιαίτερα έντονο στο uplink, όπου ενεργειακή απόδοση και το κόστος του τελικού ενισχυτή είναι εξαιρετικά ευαίσθητες ποσότητες. Με το διαχωρισμό ολόκληρου του εύρους ζώνης μεταξύ πολλών ΣΒ σε κάθε κελί, ο κάθε ΣΒ χρησιμοποιεί μόνο ένα μικρό υποσύνολο των υποφορέων. Ως εκ τούτου, κάθε ΣΒ διαβιβάζει με χαμηλότερο PAPR (υπενθυμίζεται ότι ο PAPR αυξάνεται με τον αριθμό των υπομεταφορέων) και με πολύ χαμηλότερη συνολική ισχύ από το να είχε να μεταδώσει σε όλο το εύρος ζώνης.



Εικόνα 2.10: Διαμόρφωση OFDM με 256 υποφορείς και διαμόρφωση OFDMA με μόλις 64 από τους 256 υποφορείς σε χρήση. Η συνολική ισχύ είναι ίδια αλλά στο OFDMA έχει μικρότερο συντελεστή PAPR.

Η εικόνα 2.10 το απεικονίζει. Χαμηλότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και bursty δεδομένα μεταχειρίζονται πολύ πιο αποτελεσματικά στο OFDMA από το ενός χρήστη OFDM ή με TDMA ή CSMA, αφού αντί να χρειάζεται να εκπέμπει σε υψηλή ένταση σε ολόκληρο το εύρος ζώνης, η OFDMA επιτρέπει τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων να αποστέλλεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα χρησιμοποιώντας την ίδια ισχύ.

Συνοψίζοντας το OFDMA κληρονομεί όλα τα υπέρ και τα κατά του OFDM όπως αυτά αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Επιπλέον, τα νέα πλεονεκτήματα του OFDMA είναι:

- ✓ Προσφέρει πολυχρηστική ποικιλία (multiuser diversity): Ένα υποφέρον χαμηλής ποιότητας για ένα χρήστη μπορεί να μην είναι για τους άλλους χρήστες και επομένως θα πρέπει να διαχειρισθεί κατάλληλα.
- ✓ Προσφέρει ευελιξία: Τα υποφέροντα μοιράζονται στους χρήστες με βάση την ισχύ και μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικά επίπεδα διαμόρφωσης ανά υποφέρον.
- ✓ Μειώνει τον λόγο της μέγιστης ισχύος προς την μέση PAPR (peak-to-average-power-ratio), φαινόμενο που αποτελεί συχνό πρόβλημα στο OFDM. Αυτό

οφείλεται στο γεγονός ότι για την εκπομπή του σήματος απαιτείται ένα μέρος (μερικά υποφέροντα) και όχι ολόκληρο το εύρος ζώνης της ζεύξης.

Το βασικό μειονέκτημα του OFDMA είναι:

- ✓ Οι διακαναλικές παρεμβολές, οι οποίες είναι αναπόφευκτες στο πολυχρηστικό περιβάλλον. Συνεπώς απαιτείται η αναζήτηση τεχνικών για την κατάλληλη διαχείριση των ραδιοπόρων με σκοπό την ελαχιστοποίηση της επίδρασης μεταξύ των χρηστών. Στα πλαίσια του OFDMA, η διαχείριση ραδιοπόρων απαιτεί την σωστή ανάθεση υποφερόντων στους χρήστες, κατάλληλο bit loading στα υποφέροντα και έλεγχο της ισχύος ανά υποφέρον.

2.6 Τεχνικές κατανομής ραδιοπόρων για OFDMA

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να επωφεληθεί κάποιος από τη διασπορά των πολλών χρηστών και την προσαρμοστική διαμόρφωση στα συστήματα OFDMA. Οι αλγόριθμοι που εκμεταλλεύονται αυτά τα κέρδη δεν καθορίζονται από το πρότυπο WiMAX, καθώς και όλοι οι προγραμματιστές που ασχολούνται με το WiMAX είναι ελεύθεροι να αναπτύξουν τις δικές τους καινοτόμες διαδικασίες. Η ιδέα είναι η ανάπτυξη αλγορίθμων για τον προσδιορισμό των χρηστών που θα μπουν στο πρόγραμμα, πώς θα γίνει η ανάθεση των υποφορέων σε αυτούς, και πώς θα καθοριστούν τα κατάλληλα επίπεδα ισχύος, για κάθε χρήστη σε κάθε υποφορέα. Στην ενότητα αυτή θα εξεταστούν μερικές από τις πιθανές προσεγγίσεις για την κατανομή των ραδιοπόρων. Επικεντρώνονται οι παρακάτω παράγραφοι στην κατηγορία των τεχνικών που προσπαθούν να εξισορροπήσουν την επιθυμία για υψηλή απόδοση με δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών στο σύστημα. Γίνεται η υπόθεση ότι οι εξερχόμενες ουρές για κάθε χρήστη είναι πλήρεις.

Αναφερόμενοι στην κατερχόμενη ζεύξη OFDMA φαίνεται στο Σχήμα 3.5, εκτιμούν οι χρήστες και ανατροφοδοτούν την κατάσταση του καναλιού (Chanel State information - CSI) σε ένα κεντρικό σταθμό βάσης, όπου οι υποφορείς και η κατανομή ισχύος προσδιορίζονται σύμφωνα με την κατάσταση του καναλιού των χρηστών και τη διαδικασία κατανομής των πόρων. Μόλις οι υποφορείς για κάθε χρήστη έχουν καθοριστεί, ο σταθμός βάσης πρέπει να ενημερώνει τον κάθε χρήστη ποιοι υποφορείς του έχουν χορηγηθεί. Αυτή η χαρτογράφηση των υποφορέων πρέπει να μεταδίδεται

σε όλους τους χρήστες κάθε φορά που αλλάζει την κατανομή των πόρων. Συνήθως, η κατανομή των πόρων πρέπει να γίνεται σύμφωνα με το χρόνο συνοχής του καναλιού, αν και μπορεί να γίνεται πιο συχνά, αν πολλοί χρήστες ανταγωνίζονται για πόρους.

Η κατανομή των πόρων συνήθως διατυπώνεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, είτε (1) ελαχιστοποίηση της συνολική εκπεμπόμενη ισχύς, με περιορισμό του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων του χρήστη ή (2) μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης, με περιορισμό στην συνολική εκπεμπόμενη ισχύ. Ο πρώτος στόχος είναι κατάλληλος για εφαρμογές, όπως η φωνή που απαιτούν σταθερό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ενώ ο δεύτερος στόχος είναι καταλληλότερος για bursty εφαρμογές, όπως μετάδοση δεδομένων και άλλες εφαρμογές IP. Αυτή η ενότητα, θα επικεντρωθεί στην κατηγορία 2, οι οποία έχει μεγαλύτερη σημασία για συστήματα WiMAX. Εάν δεν ορίζεται διαφορετικά, γίνεται η υπόθεση σε αυτήν την ενότητα ότι ο σταθμός βάσης έχει αποκτήσει τέλεια εικόνα για την στιγμιαία κατάσταση όλων των χρηστών. Ο πίνακας 2.2 συνοψίζει τους συμβολισμούς που θα χρησιμοποιηθούν.

Σύμβολο	Έννοια
K	Αριθμός Χρηστών
L	Αριθμός Υποφορέων
$h_{k,l}$	Κέρδος καναλιού του χρήστη k στον υποφορέα l
$P_{k,l}$	Εκπεμπόμενη ισχύ που έχει ανατεθεί για τον χρήστη k στον υποφορέα l
σ^2	Πυκνότητα φασματικής ισχύος AWGN
P_{tot}	Συνολική διαθέσιμη ισχύ από τον Σταθμό Βάσης
B	Συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης

Πίνακας 2.2 : Σύμβολα που χρησιμοποιούνται

2.6.1 Αλγόριθμος Μεγιστοποίησης του Συνολικού Ρυθμού Μετάδοσης

Όπως αναφέρει το όνομα: Maximum Sum Rate (MSR), σκοπός του αλγόριθμου, είναι να μεγιστοποιήσει το συνολικό ρυθμό μετάδοσης όλων των χρηστών, λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό της συνολικής εκπεμπομένης ισχύος. Αυτός ο αλγόριθμος είναι βέλτιστος, αν ο στόχος είναι να παρθούν όσο το δυνατόν περισσότερα δεδομένα μέσω του συστήματος. Το μειονέκτημα του αλγορίθμου MSR είναι, ότι είναι πιθανό, μόνο λίγοι χρήστες που είναι κοντά στο σταθμό βάσης, έχοντας άριστα κανάλια, να πάρουν το σύνολο των πόρων του συστήματος. Θα περιγραφούν περιληπτικά το SINR, ο ρυθμός μετάδοσης και η ανάθεση ισχύος και υποφορέων που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος MSR.

Έστω $P_{k,l}$ ορίζει την εκπεμπόμενη ισχύ του χρήστη k στον l υποφορέα. Το SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio) για τον χρήστη k στον l υποφορέα ορίζεται σαν $SINR_{k,l}$ μπορεί να εκφραστεί ως:

$$SINR_{k,l} = \frac{P_{k,l} h_{k,l}^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K P_{j,l} h_{k,l}^2 + \sigma^2 \frac{B}{L}},$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο χωρητικότητας καναλιού του Shannon ο αλγόριθμος MSR μεγιστοποιεί την ακόλουθη ποσότητα:

$$\max_{P_{k,l}} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \frac{B}{L} \log(1 + SINR_{k,l}),$$

με τον περιορισμό της ισχύος:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L P_{k,l} \leq P_{tot}$$

Η μεγιστοποίηση της χωρητικότητας επιτυγχάνεται αν η συνολική απόδοση κάθε υποφορέα μεγιστοποιείται. Οπότε το πρόβλημα της μεγιστοποίησης του συνολικού

ρυθμού μετάδοσης μπορεί να αναχθεί σε L απλούστερα προβλήματα, ένα για κάθε υποφορέα. Ακόμα αν η χωρητικότητα του καναλιού του υποφορέα l , ορισμένη σαν C_l μπορεί να γραφτεί:

$$C_l = \sum_{k=1}^K \log \left(1 + \frac{P_{k,l}}{P_{tot,l} - P_{k,l} + \frac{\sigma^2 B}{h_{k,l}^2 L}} \right)$$

όπου $P_{tot} - P_{k,l}$ ορίζει την παρεμβολή των άλλων χρηστών στον χρήστη k στον υποφορέα l . Είναι εύκολο ναδειχθεί ότι το C_l μεγιστοποιείται όταν όλη η διαθέσιμη ισχύς $P_{tot,l}$ έχει εκχωρηθεί στον ένα χρήστη με το περισσότερο κέρδος στον υποφορέα l . Το αποτέλεσμα συμφωνεί με την διαίσθηση: Να δοθεί κάθε κανάλι στον χρήστη με το περισσότερο κέρδος σε εκείνο το κανάλι.. Αυτό συνήθως αναφέρεται ως greedy βελτιστοποίηση. Η βέλτιστη κατανομή ισχύος υλοποιείται με waterfilling αλγόριθμο και η μεγιστοποίηση της συνολικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων ορίζεται με το άθροισμα των ρυθμών των υποφορέων.

3

ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Το κεφάλαιο αυτό κάνει μία εισαγωγική αναφορά στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας και ειδικότερα στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών επόμενης γενιάς. Παρουσιάζεται μια λεπτομερή περιγραφή των κινητών δικτύων LTE. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αρχιτεκτονική του δικτύου και των πρωτοκόλλων, αλλά και στις χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες, ενώ υπάρχει και μία σύντομη αναφορά στα υπάρχοντα ραδιο-κανάλια (radio-channels).

3.1 Η Τεχνολογία Long Term Evolution (LTE)

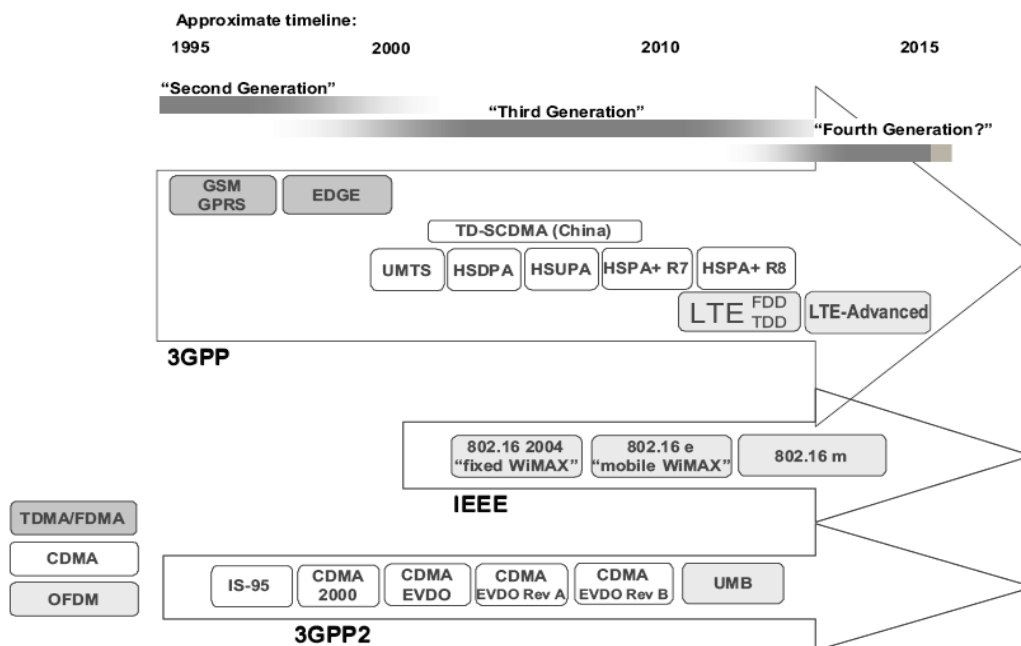
3.1.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Το σύστημα LTE, το οποίο είναι ευρέως διαδεδομένο και ως 4G ή δίκτυα B3G (Beyond 3G) ή τέλος ως All-IP ασύρματα δίκτυα, σχεδιάστηκε εξ αρχής με στόχο την εξέλιξη της τεχνολογίας ραδιοπρόσβασης (radio access) έτσι ώστε όλες οι υπηρεσίες να στηρίζονται στη μεταγωγή πακέτων (packet switched) και όχι στη μεταγωγή κυκλώματος (circuit switched), όπως τα προυπάρχοντα κινητά δίκτυα. Όσο αφορά στην αρχιτεκτονική του δικτύου, ο όρος LTE αντιπροσωπεύει την εξέλιξη της ραδιοπρόσβασης και καλείται Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), ενώ η εξέλιξη των συστατικών στοιχείων του δικτύου που δεν αποτελούν τη ραδιο-διεπαφή (non-radio aspects) καλύπτονται από τον όρο System Architecture Evolution (SAE) ο οποίος περιλαμβάνει και το Evolved Packet Core (EPC) δίκτυο. Οι δύο αυτοί όροι (LTE και SAE) συνθέτουν το Evolved Packet System (EPS).

Χαρακτηριστικά του δικτύου όπως η επίπεδη αρχιτεκτονική (flat architecture) καθώς και η χρήση της μεταγωγής πακέτων και του IP πρωτοκόλλου (Internet Protocol) για την επικοινωνία, συμβάλλουν καθοριστικά στην επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί. Οι πιο χαρακτηριστικοί από τους οποίους είναι η βελτίωση της ρυθμιστικής και η μείωση της καθυστέρησης σε επίπεδο χρήστη, η καλύτερη αντιμετώπιση της κινητικότητας και η υποστήριξη handover ακόμα και σε άλλες σταθερής γραμμής ή ασύρματες τεχνολογίες πρόσβασης.

Επίσης, εξέχουσα σημασία στην εκπλήρωση των απαιτήσεων του δικτύου κατέχουν οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε φυσικό επίπεδο. Η Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) και η Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση της πολυπλοκότητας του συστήματος και του εξοπλισμού των χρηστών (User Equipment), επιτρέπουν ευέλικτη ανάπτυξη του ραδιοφάσματος σε υπάρχοντα ή νέα φάσματα συχνοτήτων και τέλος καθιστούν δυνατή τη συνύπαρξη του με άλλες 3GPP Radio Access Technologies (RATs).

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι τα «αντίπαλα» πρότυπα για το LTE είναι το Mobile WiMAX και το Ultra-Mobile Broadband (UMB). Το ερευνητικό πεδίο που σχετίζεται με το πρότυπο LTE ήδη γνωρίζει έντονη δραστηριότητα και αναμένεται να επηρεάσει την αγορά σταδιακά. Γραφικά, η χρονική εξέλιξη των τριών ανταγωνιστικών προτύπων (3GPP, 802.16 και 3GPP2) συνοψίζεται στην Εικόνα



Εικόνα 3.1 Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης των κινητών προτύπων

3.1.2 Στόχοι της τεχνολογίας LTE

Η τεχνολογία LTE εστιάζει αποκλειστικά στη βελτιστοποίηση της μετάδοσης δεδομένων με μεταγωγή πακέτων, όπως είναι οι πολυμεσικές εφαρμογές. Επίσης, θέτει πολύ υψηλούς και φιλόδοξους στόχους προκειμένου να ξεπεράσει τα όρια των 14.4 Mbps και 5.8 Mbps που επιτυγχάνονται στο HSDPA και HSUPA αντίστοιχα. Οι βασικότερες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί το πρότυπο LTE αναφέρονται στη συνέχεια:

- **Εύρος Ζώνης:** Κλιμακωτή χρήση φάσματος εύρους ζώνης της τάξης των 5, 10, 15 και 20 MHz. Επίσης, μπορεί να γίνει και χρήση εύρους ζώνης μικρότερου των 5 MHz (1.5 MHz και 2.5 MHz) για επιπλέον ευελιξία.
- **Ρυθμοί Μετάδοσης:** Επίτευξη μέγιστων ρυθμών μετάδοσης της τάξης των 100 Mbps στον κατερχόμενο και 50 Mbps στον ανερχόμενο σύνδεσμο για εύρος ζώνης ίσο με 20 MHz.
- **Mode Λειτουργίας:** Λειτουργία της τεχνολογίας LTE τόσο σε FDD όσο και TDD mode.

- Ρυθμαπόδοση: Επίτευξη 3-4 φορές μεγαλύτερης μέσης ρυθμαπόδοσης χρήστη ανά MHz στον κατερχόμενο σύνδεσμο και αντίστοιχα 2-3 φορές μεγαλύτερης για τον ανερχόμενο σύνδεσμο συγκριτικά με τις εκδόσεις 6 και 7 του προτύπου 3GPP (HSDPA και HSUPA).
- Αποδοτικότητα φάσματος: Επίτευξη 2-3 φορές μεγαλύτερης αποδοτικότητας φάσματος σε σχέση με την έκδοση 6 του προτύπου 3GPP (HSDPA).
- Καθυστέρηση: Σημαντική μείωση του χρόνου Round-Trip Time (RTT) από το χρήστη έως το σταθμό βάσης στα 5 ms - 10 ms.
- Κινητικότητα: Δυνατότητα βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος για χαμηλές ταχύτητες κίνησης των χρηστών (0-15 χμ/ώρα) καθώς και δυνατότητα υποστήριξης χρηστών που κινούνται σε πολύ υψηλές ταχύτητες.
- Διαλειτουργικότητα: Δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας με μη-3GPP πρότυπα επικοινωνιών καθώς και με τα υπάρχοντα UTRAN/GSM/EDGE Radio Access Network (GERAN) συστήματα κινητών επικοινωνιών. Επίσης, υποστήριξη δυνατότητας handover από και προς τα συστήματα αυτά.
- Ποιότητα Υπηρεσίας: Υποστήριξη από άκρο σε άκρο ποιότητας υπηρεσίας QoS, για την υποστήριξη απαιτητικών υπηρεσιών σε Quality of Service (QoS) όπως είναι οι VoIP εφαρμογές.

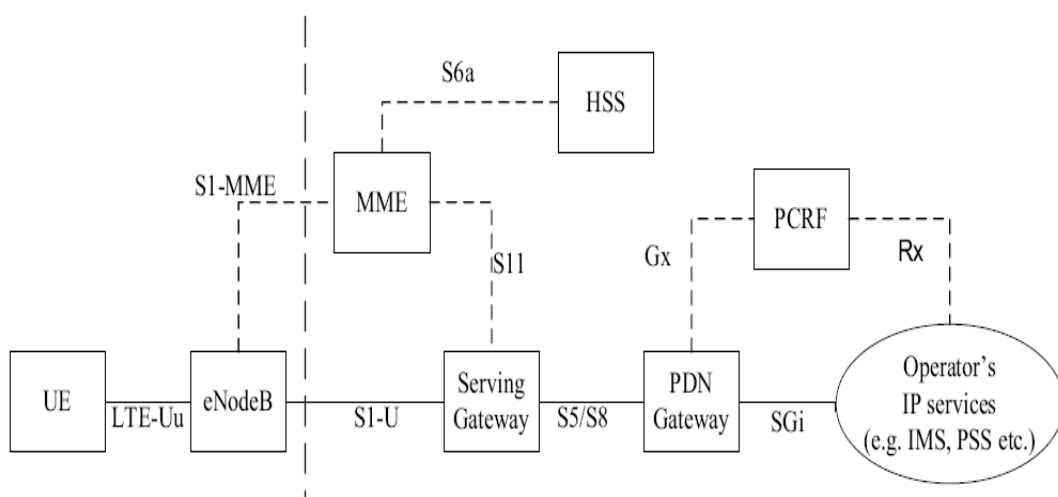
3.1.3 Υπηρεσίες στην τεχνολογία LTE

Η τεχνολογία LTE επιτρέπει τη βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών διαδικτύου και μεταφοράς δεδομένων καθώς και την αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων στους κινητούς χρήστες. Μέσω της εξέλιξης της τεχνολογίας MBMS σε evolved MBMS επιτρέπει και την παροχή multicast υπηρεσιών ψηφιακού περιεχομένου, ταυτόχρονα με τις υπηρεσίες δεδομένων, πιο αποδοτικά και με περισσότερες δυνατότητες όσο αφορά στη χωρητικότητα και στον αριθμό των προσφερόμενων καναλιών. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία LTE ουσιαστικά παρέχει βελτιωμένη ποιότητα, υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και μικρότερη καθυστέρηση για τις υπηρεσίες που υποστηρίζονται από την τεχνολογία HSPA+ ενώ επιπρόσθετα δύναται να υποστηρίξει μέσω της τεχνολογίας evolved MBMS:

- Μετάδοση υψηλής ποιότητας περιεχομένου σε πραγματικό χρόνο – Streaming υπηρεσίες ήχου και εικόνας: τηλεόραση, ραδιόφωνο. Το μεταδιδόμενο περιεχόμενο μπορεί να μεταφέρεται σε πραγματικό χρόνο ή να είναι αποθηκευμένο και να αναμεταδίδεται.
- Υπηρεσίες παρεχόμενες/διαφοροποιούμενες ανά εντοπισμένη περιοχή εξυπηρέτησης - δυνατότητα συνδυασμού εθνικών και τοπικών προγραμμάτων τηλεόρασης ή άλλου περιεχομένου ανά γεωγραφική περιοχή, multicast μετάδοση τουριστικού περιεχομένου (video-clips, διαφημίσεις) με πληροφορίες για φεστιβάλ, εστιατόρια, ξενοδοχεία, μουσεία κοκ.

3.2 Αρχιτεκτονική Συστήματος

Όπως προαναφέρθηκε το EPS δίκτυο αποτελείται από το δίκτυο κορμού (EPC) και το δίκτυο πρόσβασης (E-UTRAN). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.2, όσο αφορά στο δίκτυο κορμού αυτό αποτελείται από πολλές λογικές οντότητες, ενώ αντίθετα το δίκτυο πρόσβασης συντελείται από ένα και μοναδικό στοιχείο, τον evolved NodeB (eNodeB), ο οποίος συνδέεται με τους UEs. Επίσης απεικονίζονται οι διεπαφές που συνδέουν τις οντότητες αυτές μεταξύ τους.



Εικόνα 1.2 Στοιχεία του EPS δικτύου

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των οντοτήτων του EPS δικτύου.

3.2.1 Δίκτυο Κορμού

Οι βασικές οντότητες του δικτύου κορμού (Core Network) είναι οι εξής :

Serving Gateway

Η Serving Gateway (S-GW) δρομολογεί και προωθεί τα πακέτα δεδομένων του χρήστη, ενώ επίσης ενεργεί ως σημείο αναφοράς όταν ο χρήστης κινείται μεταξύ των eNodeBs ή μεταξύ του LTE και άλλων 3GPP τεχνολογιών (handover). Η Mobility Management Entity (MME) δίνει εντολή στη S-GW να αλλάξει τη σύνδεση από τον ένα eNodeB στον άλλο. Επίσης, μπορεί να ζητήσει από τη S-GW να παρέχει πόρους σύνδεσης για τη διαβίβαση δεδομένων, αν υπάρχει ανάγκη, από τον αρχικό eNodeB στον επόμενο. Άλλο ένα σενάριο είναι η αλλαγή από μια S-GW σε άλλη, με την MME να ελέγχει τη μετακίνηση αυτή αναλόγως με την κατάργηση συνδέσεων στην παλιά S-GW και την εγκατάστασή τους στην νέα S-GW.

Για όλες τις ροές δεδομένων που ανήκουν σε ένα UE ο οποίος βρίσκεται σε λειτουργία, η S-GW μεταβιβάζει τα δεδομένα μεταξύ του eNodeB και της Packet Data Network Gateway (P-GW). Ωστόσο, όταν ένας UE είναι σε κατάσταση αδράνειας οι πόροι στον eNodeB απελευθερώνονται και η πορεία των δεδομένων τερματίζει στην S-GW. Εάν η S-GW λάβει πακέτα δεδομένων από την P-GW, τότε θα αποθηκεύσει τα πακέτα και θα ζητήσει από την MME να αρχικοποιήσει τη διαδικασία τηλεειδοποίησης του UE. Αυτό θα παρακινεί τον UE να ξανασυνδεθεί και όταν οι συνδέσεις ξαναπραγματοποιηθούν, τα αποθηκευμένα πακέτα θα σταλούν.

Η S-GW παρακολουθεί τα δεδομένα στις συνδέσεις και μπορεί επίσης να συλλέγει δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό της χρέωσης των χρηστών. Επιπρόσθετα περιλαμβάνει τη λειτουργία νόμιμης παρακολούθησης, η οποία δίνει τη δυνατότητα να παρέχονται τα δεδομένα, του χρήστη που παρακολουθείται, στις αρχές για περαιτέρω έλεγχο.

Μια S-GW μπορεί να εξυπηρετεί μόνο μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή με ένα περιορισμένο σύνολο eNodeBs και επίσης μπορεί να υπάρχει ένα περιορισμένο σύνολο MMEs που ελέγχουν αυτή την περιοχή. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι θα πρέπει να είναι σε θέση να συνδέεται με οποιαδήποτε P-GW σε όλο το δίκτυο, αφού η P-GW δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της μετακίνησης, αντιθέτως το S-GW μπορεί να μεταφερθεί.

Packet Data Network Gateway

Η P-GW παρέχει δυνατότητα σύνδεσης του UE με εξωτερικά δίκτυα πακέτων δεδομένων με το να δρα ως σημείο εξόδου και εισόδου της κυκλοφορίας για τον UE. Ένας UE μπορεί να έχει ταυτόχρονη σύνδεση με περισσότερες από μια P-GW για πρόσβαση σε πολλαπλά Packet Data Networks (PDNs).

Επίσης, είναι το σημείο όπου δίνεται η IP σε κάθε UE. Συνήθως διανέμει μια IP διεύθυνση στον UE, και αυτός τη χρησιμοποιεί για να επικοινωνεί με άλλους IP hosts σε εξωτερικά δίκτυα, π.χ. στο Διαδίκτυο.

Ένας άλλος βασικός ρόλος της P-GW είναι να ενεργεί ως σημείο αναφοράς για την κινητικότητα μεταξύ 3GPP και μη τεχνολογίες (όπως το WiMAX και 3GPP2). Όταν ένας UE μετακινείται από μια S-GW σε άλλη, οι φορείς/κανάλια πρέπει να αλλάξουν στο P-GW. Η P-GW θα λάβει ένδειξη για να αλλάξει τις ροές δεδομένων από το νέο S-GW. Τέλος, περιλαμβάνει το PCEF (Policy Control Enforcement Function), πράγμα που σημαίνει ότι εκτελεί gating και filtering λειτουργίες όπως απαιτείται από τις πολιτικές που καθορίζονται για τον UE και την εν λόγω υπηρεσία, ενώ συλλέγει και αναφέρει και τις σχετικές πληροφορίες χρήσης.

Mobility Management Entity

Η οντότητα MME είναι ο κόμβος κλειδί για τον έλεγχο πρόσβασης στο LTE δίκτυο. Είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση των συσκευών που βρίσκονται σε αδράνεια και για τη διαδικασία τηλεειδοποίησης, συμπεριλαμβανομένων των αναμεταδόσεων. Συμμετέχει στη διαδικασία ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του φορέα/καναλιού και επίσης είναι υπεύθυνη για την επιλογή του S-GW για ένα UE κατά την αρχική σύνδεση και τη στιγμή του ενδο-LTE handover συμπεριλαμβάνοντας τη μετεγκατάσταση του CN.

Επίσης, είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο ταυτότητας των χρηστών (μέσω αλληλεπίδρασης με το HSS). Οι Non Access Stratum (NAS) διαδικασίες τερματίζουν στο MME και είναι υπεύθυνες για την παραγωγή και την κατανομή προσωρινών ταυτοτήτων για τους UEs. Ελέγχουν την άδεια του UE για το αν μπορεί να συμμετέχει στην υπηρεσία που προσφέρει ο πάροχος (Public Land Mobile Network) και επιβάλλει περιορισμούς περιαγωγής στον UE. Η MME είναι το τελικό σημείο του δικτύου για κρυπτογράφηση/προστασία ακεραιότητας για τις NAS διαδικασίες και αναλαμβάνει την διαχείριση του κλειδιού ασφαλείας. Επίσης παρέχει τη λειτουργία

control plane για κινητικότητα μεταξύ LTE και 2G/3G δικτύων μέσω της S3 διεπαφής. Τέλος τερματίζει την διεπαφή S6a προς το HSS για τις συσκευές χρηστών με περιαγωγή.

Policy and Charging Resource Function

Το Policy and Charging Resource Function (PCRF) είναι ένα στοιχείο του δικτύου που είναι υπεύθυνο για την Πολιτική και τον Έλεγχο Χρέωσης (Policy Control and Charging). Λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με το πώς να δρουν οι υπηρεσίες όσον αφορά στο QoS και παρέχει πληροφορίες στο PCEF, που βρίσκεται στο P-GW, έτσι ώστε κατάλληλοι φορείς και ανάλογη τακτική να μπορούν να οριστούν. Οι πληροφορίες που παρέχει το PCRF στην PCEF ονομάζονται κανόνες PCC. Το PCRF θα στείλει τους κανόνες PCC κάθε φορά που ένας νέος φορέας/κανάλι θα πρέπει να εγκατασταθεί. Για παράδειγμα, όταν ο UE συνδέεται για πρώτη φορά στο δίκτυο και ο αρχικός φορέας εγκατασταθεί και στην συνέχεια ένας ή περισσότεροι αφιερωμένοι φορείς εγκαθίστανται.

Home Subscription Server

Ο Home Subscription Server (HSS) είναι η “αποθήκη” δεδομένων με τις εγγραφές όλων των μόνιμων χρηστών. Είναι μια βάση δεδομένων αποθηκευμένη σε κάποιο εξυπηρετητή, ο οποίος βρίσκεται σε κεντρικό σημείο στις εγκαταστάσεις του παρόχου. Ο HSS κρατάει το κύριο αντίγραφο του προφίλ του συνδρομητή, το οποίο περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις υπηρεσίες που ισχύουν για το χρήστη, καθώς και σχετικά με τις επιτρεπόμενες PDN συνδέσεις και το αν επιτρέπεται ή όχι περιαγωγή σε ένα δίκτυο που έχει επισκεφθεί. Για την υποστήριξη handover μεταξύ των μη-3GPP δικτύων, ο HSS αποθηκεύει επίσης τις ταυτότητες των P-GWs που είναι διαθέσιμες προς χρήση.

Ακόμα μία οντότητα που μπορεί να είναι ενσωματωμένη στο HSS είναι το Κέντρο Ταυτοποίησης (Authentication Centre) το οποίο παράγει τα διανύσματα για την ταυτοποίηση και τα κλειδιά ασφαλείας. Σε όλες τις διαδικασίες που σχετίζονται με αυτές τις λειτουργίες ο HSS αλληλεπιδρά με την MME, επομένως θα πρέπει να είναι σε θέση να συνδέεται με κάθε MME σε όλο το δίκτυο, προκειμένου να παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα να μετακινείται. Για κάθε UE, οι εγγραφές του HSS θα δείχνουν σε ένα MME που του προσφέρει υπηρεσίες κάθε στιγμή, και μόλις ένα νέο

MME αναφέρει ότι προσφέρει υπηρεσίες στον UE, το HSS θα ακυρώσει την τοποθεσία της προηγούμενης MME.

3.2.2 Δίκτυο Πρόσβασης

Evolved NodeB

Ο μόνος κόμβος στο E-UTRAN είναι ο evolved NodeB (eNodeB). Με απλά λόγια, ο eNodeB είναι ένας σταθμός βάσης που ελέγχει όλες τις ραδιολειτουργίες που συνδέονται με το σταθερό μέρος του συστήματος. Οι σταθμοί βάσης, όπως ο eNodeB, κατανέμονται συνήθως σε όλη την περιοχή κάλυψης των δικτύων και κάθε eNodeB είναι τοποθετημένος κοντά στις ραδιοκεραίες (radio antennas).

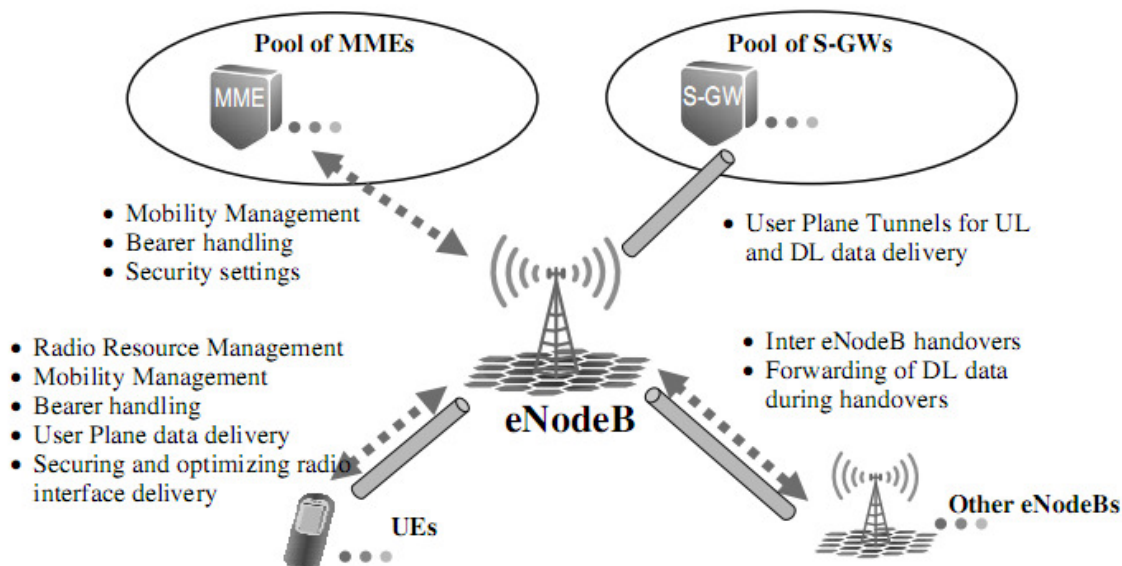
Λειτουργικά ο eNodeB ενεργεί ως μια γέφυρα επιπέδου 2 μεταξύ του UE και του EPC, αφού είναι το σημείο τερματισμού όλων των ραδιο-πρωτοκόλλων προς το UE ενώ ταυτόχρονα αναμεταδίδει τα δεδομένα προς το EPC, μεταξύ των ραδιο-συνδέσεων και της αντίστοιχης σύνδεσης που είναι βασισμένη σε IP. Σε αυτό το ρόλο ο eNodeB εκτελεί κρυπτογράφηση / αποκρυπτογράφηση των δεδομένων του UE, καθώς επίσης συμπίεση / αποσυμπίεση των IP κεφαλίδων, πράγμα που σημαίνει την αποφυγή επανειλημμένης αποστολής των ίδιων ή διαδοχικών δεδομένων στην κεφαλίδα IP.

Ο eNodeB είναι επίσης υπεύθυνος για πολλές λειτουργίες του Control Plane (CP). Είναι υπεύθυνος για το Radio Resource Management (RRM), δηλαδή τον έλεγχο της χρήσης της ραδιο-επαφής, το οποίο περιλαμβάνει, για παράδειγμα, την κατανομή των πόρων με βάση τις αιτήσεις, την ιεράρχηση και τον προγραμματισμό της κίνησης των δεδομένων με βάση το απαιτούμενο QoS και τη συνεχή παρακολούθηση της χρησιμοποίησης των πόρων.

Επιπλέον, ο eNodeB έχει σημαντικό ρόλο στη διαχείριση κινητικότητας. Ελέγχει και αναλύει τις μετρήσεις της έντασης του ραδιοσήματος (radio signal) που πραγματοποιούνται από τον UE, κάνει παρόμοιες μετρήσεις ο ίδιος, και με βάση αυτές λαμβάνεται η απόφαση για το handover των UEs μεταξύ των κελιών. Όταν ένας νέος UE ενεργοποιείται υπό κάποιον eNodeB και κάνει αίτηση σύνδεσης στο δίκτυο, ο eNodeB είναι υπεύθυνος για τη δρομολόγηση αυτού του αιτήματος στην MME η οποία προηγουμένως εξυπηρετούσε το συγκεκριμένο UE. Σε περίπτωση που

η δρομολόγηση προς την προηγούμενη MME δεν είναι διαθέσιμη ή λείπουν κάποιες πληροφορίες δρομολόγησης, επιλέγεται μία νέα MME.

Στην Εικόνα φαίνονται οι συνδέσεις που έχει ο eNodeB με τους περιβάλλοντες λογικούς κόμβους και συνοψίζονται οι βασικές λειτουργίες αυτών. Χρήζει αναφοράς το γεγονός ότι ανά πάσα στιγμή ένας eNodeB μπορεί να εξυπηρετεί πολλαπλούς UEs στην περιοχή κάλυψης του, ωστόσο κάθε UE μπορεί να είναι συνδεδεμένος με ένα μόνο eNodeB. Επίσης, γειτονικοί eNodeBs πρέπει να είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Τέλος, κάθε στιγμή σε ένα UE προσφέρονται υπηρεσίες από μία μόνο MME και S-GW, και ο eNodeB πρέπει να παρακολουθεί αυτή την συσχέτιση. Αυτό σημαίνει ότι ένας eNodeB είναι πιθανό να πρέπει να συνδεθεί με πολλές MMEs και S-GWs.



Εικόνα 3.3. Συνδέσεις του eNodeB με άλλους λογικούς κόμβους και κύριες λειτουργίες

3.2.3 Εξοπλισμός Χρήστη

Ο εξοπλισμός χρήστη (User Equipment) είναι η συσκευή την οποία ο τελικός χρήστης χρησιμοποιεί για επικοινωνία. Συνήθως πρόκειται για μια συσκευή χειρός όπως είναι ένα smart phone ή ακόμα και ένα laptop. Επίσης περιλαμβάνει την Universal Subscriber Identity Module (USIM), που είναι μια ξεχωριστή μονάδα από

τον υπόλοιπο UE, που συχνά αποκαλείται Τερματικός Εξοπλισμός (Terminal Equipment). Η USIM είναι μια εφαρμογή που τοποθετείται σε μια αφαιρούμενη έξυπνη κάρτα που λέγεται Universal Integrated Circuit Card (UICC) και χρησιμοποιείται για να προσδιορίζει και να ελέγχει την ταυτότητα του χρήστη καθώς και να παράγει κλειδιά ασφαλείας για την προστασία της μετάδοσης στη ραδιοεπεπαφή.

Ο UE είναι μια πλατφόρμα για εφαρμογές επικοινωνίας που επιτελεί λειτουργίες διαχείρισης κινητικότητας όπως handover και αναφορά της τοποθεσίας όπου βρίσκεται ο τερματικός σταθμός. Όλες αυτές οι λειτουργίες εκτελούνται όπως του επιβάλλει το δίκτυο. Ίσως το πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι ο UE παρέχει τη διεπαφή για τον τελικό χρήστη, έτσι ώστε εφαρμογές όπως VoIP να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση μιας φωνητικής κλήσης.

3.3 Αρχιτεκτονική Ράδιο - Πρωτοκόλλων

Όσο αφορά στα πρωτόκολλα, αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα User Plane (UP) και τα Control Plane (CP) τα οποία έχουν να κάνουν με μεταδόσεις δεδομένων του χρήστη (user data transmission) και μεταδόσεις σήματος (signalling transmission), αντίστοιχα. Στην Εικόνα παρουσιάζεται η δομή των πρωτοκόλλων από την πλευρά του eNodeB.

Ξεκινώντας από την κορυφή της εικόνας, το επίπεδο RRC (Radio Resource Control) υποστηρίζει όλες τις διαδικασίες σηματοδότησης μεταξύ του τερματικού και του eNodeB. Αυτό περιλαμβάνει διαδικασίες κινητικότητας, καθώς και τη διαχείριση της σύνδεσης του τερματικού. Η σηματοδότηση από το EPC Control Plane (π.χ. για καταχώρηση του τερματικού ή ταυτοποίηση) μεταφέρεται στο τερματικό μέσω του πρωτοκόλλου RRC, εξ ου και η σχέση μεταξύ του RRC και των ανώτερων επιπέδων.

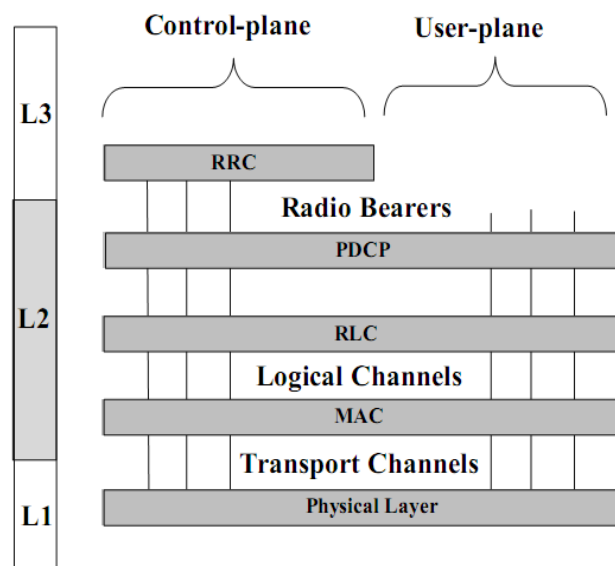
Το επίπεδο PDCP (κύριος ρόλος του οποίου είναι η συμπίεση κεφαλίδων και η εφαρμογή ασφαλείας, όπως η κρυπτογράφηση και η ακεραιότητα) προσφέρεται στους φορείς (Radio Bearers) από τα κατώτερα επίπεδα του E-UTRAN. Καθένας από αυτούς τους φορείς αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη ροή πληροφοριών, όπως δεδομένα User Plane (π.χ. πλαίσια φωνής, ροές δεδομένων, σηματοδότηση IMS) ή σηματοδότηση Control Plane (όπως RRC σηματοδότηση που προέρχεται από το EPC). Λόγω του συγκεκριμένου σκοπού και χειρισμού τους, οι ροές πληροφοριών

που δημιουργούνται από το 'System Information Broadcast' και οι λειτουργίες σεληδοποίησης (Paging) είναι διαφανείς στο επίπεδο PDCP.

Το επίπεδο RLC παρέχει σε αυτό του PDCP βασικές υπηρεσίες παρόμοιες με αυτές του επιπέδου 2 του OSI, όπως τμηματοποίηση των πακέτων δεδομένων και ARQ (Automatic Repeat Request) ως μηχανισμό διόρθωσης σφαλμάτων. Υπάρχει ένα-προς-ένα αντιστοίχιση μεταξύ κάθε RLC εισερχόμενης ροής και των λογικών καναλιών (Logical Channels) που παρέχονται από το επίπεδο RLC στο MAC.

Η κύρια λειτουργία του επιπέδου MAC είναι αφού λάβει υπόψη του τις προτεραιότητες στις ροές δεδομένων που παρέλαβε από το επίπεδο RLC, να χαρτογραφήσει και να πολυπλέξει τα λογικά καναλια στα κανάλια μεταφοράς (Transport Channels). Οι ροές που είναι πολυπλεγμένες σε ένα κανάλι μεταφοράς μπορεί να προέρχονται είτε από ένα μόνο χρήστη (π.χ. ένα ή περισσότερα στιγμιότυπα από τα DCCH και DTCH) είτε από πολλαπλούς (π.χ. πολλά DTCH από διαφορετικούς χρήστες). Το MAC υποστηρίζει επίσης HARQ (Hybrid ARQ), η οποία είναι μια γρήγορη διαδικασία επανάληψης.

Τέλος, το MAC παραδίδει τις ροές προς μεταφορά στο PHY επίπεδο, το οποίο θα εφαρμόσει κωδικοποίηση καναλιού και διαμόρφωση πριν κάνει τη μετάδοση μέσω των ραδιο-διεπαφών.

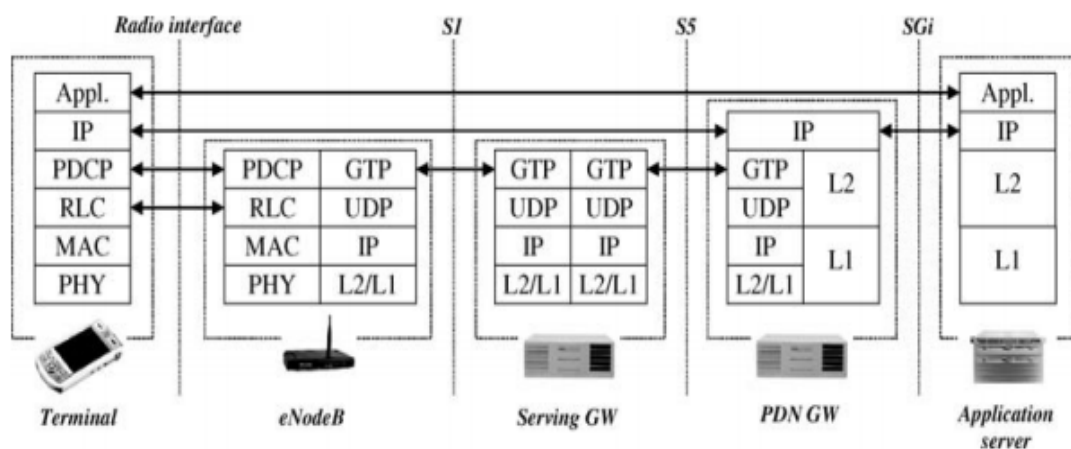


Εικόνα 3.4. Δομή Πρωτοκόλλων

3.3.1 User Plane

Από την οπτική γωνία του ασύρματου δικτύου το UP περιλαμβάνει όχι μόνο τα δεδομένα του χρήστη, όπως πακέτα φωνής ή Web περιεχόμενο, αλλά επίσης τη σηματοδότηση που σχετίζεται με τις υπηρεσίες εφαρμογών όπως τις SIP (Session Initiation Protocol) και RTCP (Real Time Control Protocol). Επίσης, η σηματοδότηση υψηλού επιπέδου (high-level signalling), παρά το γεγονός ότι θεωρείται πληροφορία ελέγχου από τα επίπεδα εφαρμογών, μεταδίδεται μέσω του User Plane.

Στην Εικόνα παρουσιάζεται η στοίβα πρωτοκόλλων User Plane, από το τερματικό μέχρι τον εξυπηρετητή εφαρμογών (application server). Καταρχάς, το επίπεδο εφαρμογών, που είναι παρόν μόνο στο τερματικό και στον εξυπηρετητή εφαρμογών, βασίζεται σε IP μετάδοση δεδομένων και τα πακέτα δρομολογούνται μέσω των Packet Core Gateways πριν φτάσουν στον προορισμό τους. Τέλος, τα L1 και L2 αναφέρονται αντίστοιχα στις φυσικές (physical) και ζεύξης δεδομένων (data link) διεπαφές των S1, S5 και SGi διεπαφών δικτύου.



Εικόνα 3.5. User Plane στοίβα πρωτοκόλλων

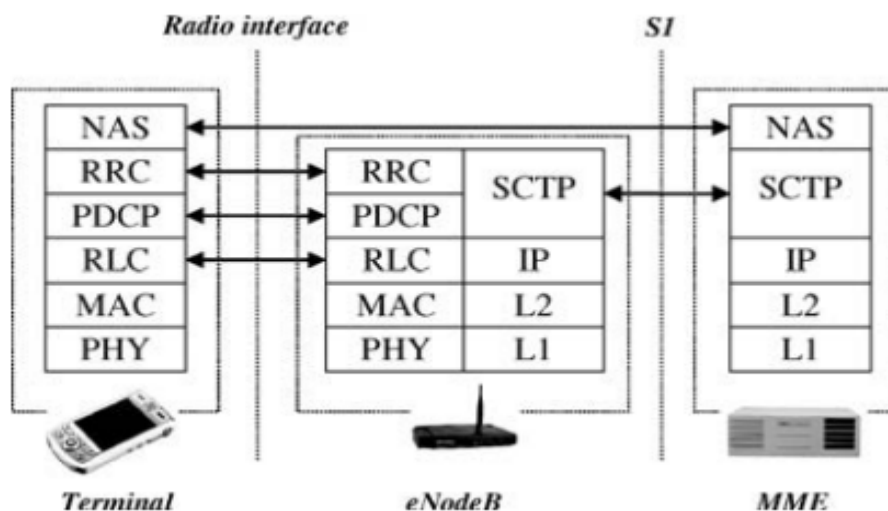
3.3.2 Control Plane

Το CP αντιστοιχεί στις ροές πληροφορίας που στην πραγματικότητα θεωρούνται ως σηματοδότηση από τα E-UTRAN και EPC. Για παράδειγμα, περιλαμβάνει όλες τις RRC (Radio Resource Control) E-UTRAN σηματοδοτήσεις (λειτουργίες υποστήριξης όπως διαχείριση των Radio Bearers, κινητικότητα και σελιδοποίηση) και τις NAS σηματοδοτήσεις, που αναφέρονται σε λειτουργίες και υπηρεσίες που είναι

ανεξάρτητες από την τεχνολογία πρόσβασης. Το NAS περιλαμβάνει επίσης τα GMM (GPRS Mobility Management) και SM (Session Management) επίπεδα για λογαριασμό όλων των διαδικασιών σηματοδότησης μεταξύ του τερματικού και της MME για διαχείριση, έλεγχο ασφάλειας και ταυτοποίηση της συνόδου (session) και του EPS φορέα (EPS bearer).

Η στοίβα πρωτοκόλλων CP παρουσιάζεται στην Εικόνα και όπως είναι εμφανές σταματά στην MME, αφού εκεί τερματίζουν τα πρωτόκολλα ανώτατου επιπέδου (top-level). Στη ραδιο-διεπαφή, το CP χρησιμοποιεί την ίδια στοίβα πρωτοκόλλων (PDCP, RLC, MAC, PHY) για να μεταφέρει τόσο την RRC (Radio Resource Control) όσο την Core Network NAS σηματοδότηση.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα, τα επίπεδα RLC, MAC και PHY υποστηρίζουν τις ίδιες λειτουργίες για τα UP και CP, ωστόσο, αυτό δε σημαίνει ότι οι πληροφορίες τους μεταδίδονται με τον ίδιο τρόπο. Πολλαπλοί ραδιο-φορείς μπορεί να εγκατασταθούν μεταξύ του τερματικού και του δικτύου, με τον καθένα από αυτούς να ανταποκρίνεται σε ένα συγκεκριμένο σχήμα μετάδοσης (transmission scheme), ραδιο-προστασία (radio protection) και χειρισμό προτεραιότητας (priority handling). Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται μέσω των ραδιο-καναλιών τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.



Εικόνα 3.6. Control Plane στοίβα πρωτοκόλλων

3.4 Κανάλια

Όπως έχει γίνει ήδη σαφές από τις απαιτήσεις, το E-UTRAN πρέπει να είναι σε θέση να μεταδίδει πληροφορίες με υψηλή ταχύτητα και χαμηλή καθυστέρηση με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Ωστόσο, δεν απαιτούν όλες οι ροές πληροφορίας την ίδια προστασία από σφάλματα ή την ίδια QoS.

Σε γενικές γραμμές είναι ζωτικής σημασίας, ειδικά στην περίπτωση κινητικότητας, τα μηνύματα σηματοδότησης του E-UTRAN να διαβιβάζονται όσο το δυνατόν γρηγορότερα, χρησιμοποιώντας το καλύτερο σχήμα προστασίας από σφάλματα (error protection scheme). Αντιθέτως, η φωνή ή οι εφαρμογές ροής δεδομένων μπορεί να έχουν μία, λογική, ανοχή σε σφάλματα κατά τη μετάδοσή τους.

Το E-UTRAN, προκειμένου να είναι ευέλικτο και να επιτρέπει διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης δεδομένων, υποστηρίζει τα εξής είδη καναλιών:

- λογικά (logical) κανάλια (περιέχουν το αντικείμενο που μεταδίδεται)
- κανάλια μεταφοράς (transport) (εκφράζουν τον τρόπο που μεταδίδεται)
- φυσικά (physical) κανάλια

3.4.1 Λογικά κανάλια

Τα λογικά κανάλια ανταποκρίνονται στις υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων που παρέχονται από τα πρωτόκολλα ραδιο-διεπαφών, στα ανώτερα στρώματα. Υπάρχουν δύο είδη λογικών καναλιών: τα κανάλια ελέγχου (control channels,

Πίνακας 3.1) για τη μεταφορά των πληροφοριών CP και τα κανάλια δοσοληψίας (traffic channels,

Πίνακας 3.2) για τη μεταφορά UP πληροφοριών. Κάθε ένα από τα κανάλια των δύο αυτών κατηγοριών αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο τύπο ροής πληροφοριών.

BCCH	Broadcast Control Channel
PCCH	Paging Control Channel
CCCH	Common Control Channel
MCCH	Multicast Control Channel
DCCH	Dedicated Control Channel

Πίνακας 3.1 Control Channels

DTCH	Dedicated Traffic Channel
MTCH	Multicast Traffic Channel

Πίνακας 3.2 Traffic Channels

3.4.2 Κανάλια μεταφοράς

Τα κανάλια μεταφοράς περιγράφουν το πώς και με ποια τα χαρακτηριστικά μεταφέρονται τα δεδομένα μέσω των ραδιο-διεπαφών, ενώ χωρίζονται και αυτά σε δύο υποκατηγορίες: στα κανάλια μεταφοράς κατερχόμενης ζεύξης (downlink transport channels,

Πίνακας 3.3) και στα κανάλια μεταφοράς ανερχόμενης ζεύξης (uplink transport channels,

Πίνακας)

BCH	Broadcast Channel
PCH	Paging Channel
DL-SCH	Downlink Shared Channel
MCH	Multicast Channel

Πίνακας 3.3 Downlink Transport Channels

UL-SCH	Uplink Shared Channel
RACH	Random Access Channel

Πίνακας 3.4 Uplink Transport Channels

3.4.3 Φυσικά κανάλια

Τα φυσικά κανάλια είναι η ουσιαστική εφαρμογή του καναλιού μεταφοράς πάνω στη ραδιο-διεπαφή. Είναι γνωστά μόνο στο φυσικό επίπεδο του E-UTRAN και η δομή τους έχει ισχυρή εξάρτηση από τα χαρακτηριστικά της φυσικής διεπαφής του OFDM. Χωρίζονται και πάλι σε δύο υποκατηγορίες: σε αυτά της κατερχόμενης (downlink physical channels,

Πίνακας 3.4) και σε αυτά της ανερχόμενης ζεύξης (uplink physical channels,

Πίνακας 3.5).

PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
-------	----------------------------------

PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PMCH	Physical Multicast Channel
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel

Πίνακας 3.4. Downlink Physical Channels

PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PRACH	Physical Random Access Channel

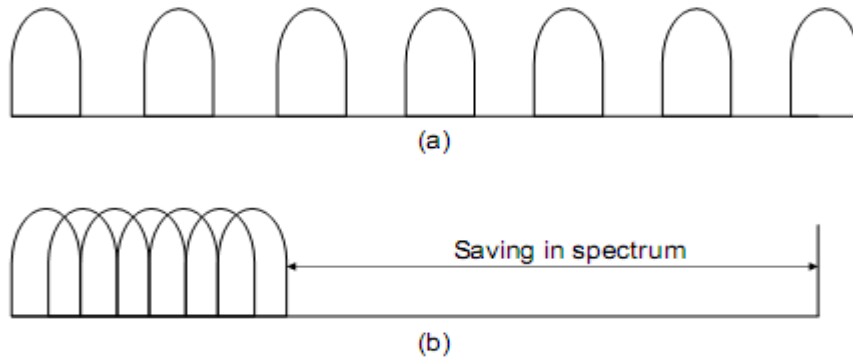
Πίνακας 3.5. Uplink Physical Channels

3.5 Βασικές Τεχνικές Μετάδοσης Πληροφορίας Στο LTE

Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτήσεων είναι προφανές ότι η τεχνολογία LTE πρέπει να βασιστεί σε βέλτιστες τεχνολογίες μετάδοσης πληροφορίας στο ασύρματο τμήμα του δικτύου πρόσβασης. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις εξής τεχνολογίες: multicarrier τεχνολογία και τεχνολογία πολλαπλών κεραιών (multiple antenna technology).

3.5.1 Multicarrier τεχνολογία

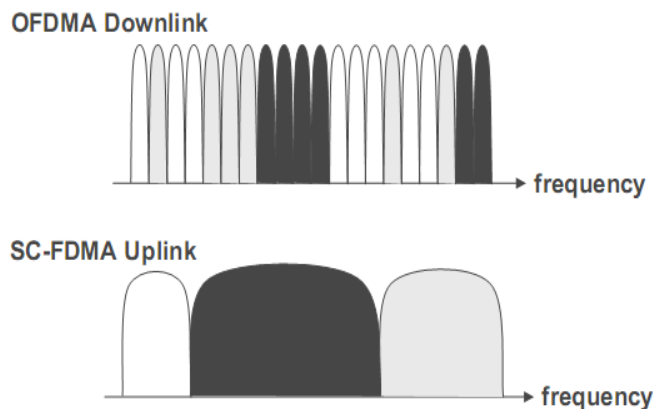
Μία από τις κύριες τεχνολογίες που υιοθετεί η τεχνολογία LTE είναι το Orthogonal Frequency Division Multiplexing. Κύριος λόγος υιοθέτησης του OFDM ως μοντέλου διαμόρφωσης για το LTE είναι η μεγάλη αντοχή που επιδεικνύει σε περιβάλλοντα εξασθένησης σήματος και παρεμβολών. Επίσης, ιδιαίτερης σημασίας είναι το γεγονός ότι επιτυγχάνει καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης του καναλιού (Εικόνα), χωρίζοντας αυτό σε υποκανάλια (subchannels) που είναι μεν επικαλυπτόμενα αλλά ακολουθούν την αρχή της ορθογωνιότητας.



Εικόνα 3.7 *a) Απλός διαχωρισμός εύρους ζώνης καναλιού b) OFDM διαχωρισμός εύρους ζώνης καναλιού*

Αυτό απαλλάσσει τους κατασκευαστές από την ανάγκη να διαχωρίσουν τους φορείς (carriers) με τη χρήση guard-bands, αποφεύγοντας την άσκοπη σπατάλη του παρεχόμενου εύρους ζώνης.

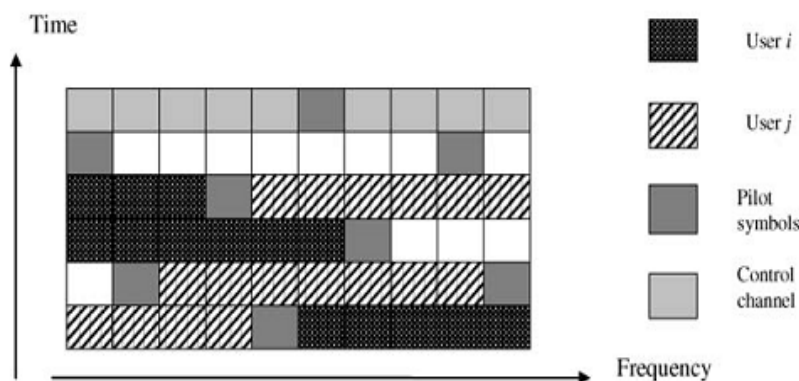
Ειδικότερα, για την περίπτωση της μετάδοσης δεδομένων στον κατερχόμενο σύνδεσμο χρησιμοποιείται η Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) τεχνολογία, ενώ για την περίπτωση του ανερχόμενου συνδέσμου προτείνεται η χρήση της τεχνολογίας Single Carrier OFDM (SC-OFDM). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα και οι δύο αυτές τεχνολογίες χρησιμοποιούν το επίπεδο της συχνότητας σα μία νέα παράμετρο, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία στη σχεδίαση.



Εικόνα 3.8. *Τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης στο LTE*

Η OFDMA είναι μια multiuser έκδοση του δημοφιλούς OFDM ψηφιακού modulation. Η πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται στην OFDMA με την ανάθεση των

υποσυνόλων των υπομεταφορέων (subcarrier) στους μεμονωμένους χρήστες. Αυτό, όπως φαίνεται και στην Εικόνα , επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση από διάφορους χρήστες, αλλά και τη μετάδοση των πιλοτικών συμβόλων (pilot symbols) και των δεδομένων των καναλιών ελέγχου (control channels) χωρίς παρεμβολές.



Εικόνα 3.9. Δέσμευση πόρων στο πεδίο του χώρο-χρόνου

Όσο αφορά στο SC-OFDM και στον ανερχόμενο σύνδεσμο, χρήζει αναφοράς το γεγονός ότι η τεχνολογία LTE διαφοροποιείται από το πρότυπο WiMAX, το οποίο χρησιμοποιεί την OFDMA τεχνική για τον ανερχόμενο σύνδεσμο. Η OFDMA τεχνική, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά της, μπορεί να αποβεί ανασταλτικός παράγοντας για τη μπαταρία των κινητών συσκευών των χρηστών, καθώς απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ισχύος. Για το λόγο αυτό, στην τεχνολογία LTE υιοθετείται η SC-OFDM τεχνική. Η SC-OFDM τεχνική παρουσιάζει ιδιαίτερα καλή απόδοση, αφού έχει και πολύ υψηλό λόγο Peak-to-Average Ratio (PAR) σήματος. Ο λόγος PAR είναι πολύ κρίσιμη μετρική για τον ανερχόμενο σύνδεσμο, και σχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση ισχύος. Επιπλέον, η SC-OFDM τεχνική επιτρέπει υψηλή απόδοση και μικρή πολυπλοκότητα υλοποίησης της κεραίας του σταθμού βάσης. Εν γένει, η SC-OFDM τεχνική επιφέρει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης στον ανερχόμενο σύνδεσμο, κυρίως όταν ο χρήστης βρίσκεται κοντά στο σταθμό βάσης.

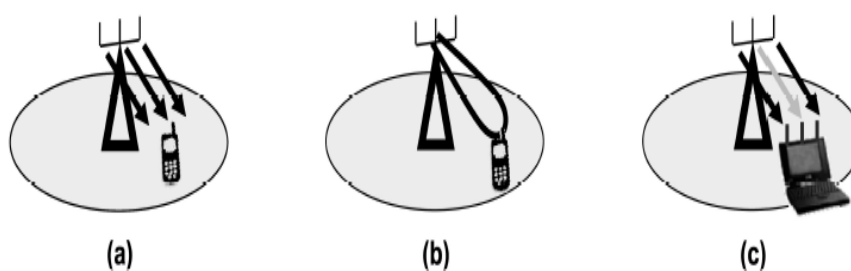
3.5.2 Τεχνολογία πολλαπλών κεραιών

Μία ακόμη τεχνολογία που υπόσχεται ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, αυξημένη κάλυψη δικτύου και αυξημένη χωρητικότητα στην τεχνολογία

LTE είναι αυτή των πολλαπλών κεραιών. Η χρήση τους επιτρέπει την εκμετάλλευση του πεδίου του χώρου (spatial domain), έχοντας σαν αποτέλεσμα η απόδοση φάσματος να αυξάνει γραμμικά με την αύξηση των κεραιών εκπομπής και λήψης.

Η τεχνολογία πολλαπλών κεραιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με το πλήθος των κεραιών που υπάρχουν στον πομπό και στο δέκτη (SIMO, MISO, MIMO), ή ανάλογα τον τρόπο σύνδεσης του συστήματος κεραιών με τον UE (Single-User για p-t-p και Multi-User για p-t-m). Όλοι αυτοί στηρίζονται σε τρεις βασικές αρχές οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.2 και είναι οι ακόλουθες:

- 1) Diversity gain. Χρήση της ποικιλομορφίας στο χώρο που παρέχεται από τις πολλαπλές κεραιές, έτσι ώστε να βελτιωθεί η ανθεκτικότητα της μετάδοσης ενάντια στην εξασθένιση από τις πολλαπλές διαδρομές (multipath fading).
- 2) Array gain. Συγκέντρωση της ενέργειας σε μία ή περισσότερες κατευθύνσεις (επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών που βρίσκονται σε διαφορεικά σημεία MU-MIMO).
- 3) Spatial Multiplexing gain. Μετάδοση πολλαπλών ροών (signal stream) σε ένα χρήστη σε πολλαπλά επίπεδα χώρου που έχουν δημιουργηθεί από τις διαθέσιμες κεραιές.



Εικόνα 3.20. Πλεονεκτήματα Πολλαπλών Κεραιών

Πιο ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση της μετάδοσης πολλαπλής εισόδου- πολλαπλής εξόδου (Multiple Input- Multiple Output) στην οποία ωστόσο συχνά περικλείονται και οι SIMO και MISO σαν ειδικές περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία MIMO συνίσταται στην ύπαρξη πολλαπλών κεραιών (κεραιοσυστημάτων) τόσο στον πομπό-

σταθμό βάσης όσο και στο δέκτη-UE. Σε πρώτη φάση υποστηρίζεται η ύπαρξη MIMO κεραιοσυστημάτων 2x2 (δύο κεραίες στο σταθμό βάσης και δύο κεραίες στη συσκευή του χρήστη) για την επίτευξη υψηλής απόδοσης, ενώ είναι δυνατό να γίνει χρήση συστημάτων MIMO 4x4.

4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έρευνα στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες κινείται προς την κατεύθυνση της επίτευξης υψηλής κινητικότητας και ταυτόχρονα προς τη μεγιστοποίηση των δυνατοτήτων του ραδιοδιαύλου όσον αφορά τη χωρητικότητα της γραμμής και την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού χρηστών. Φαίνεται από την εξέλιξη της τεχνολογίας ότι το ασύρματο δίκτυο του μέλλοντος θα διαθέτει ταχύτατη εξυπηρέτηση χρηστών και με μικρό ποσοστό σφαλμάτων.

Στόχος είναι η υποστήριξη IMT-Advanced (4G) ταχυτήτων της τάξης των 100 Mbps στην κάτω ζεύξη και 50 Mbps στη άνω με τη μέση φασματική απόδοση να είναι 3 με 4 φορές καλύτερη από την αντίστοιχη του HSPA. Για να επιτευχθούν τόσο οι υψηλές ταχύτητες όσο και η φασματική αποδοτικότητα θα πρέπει στο φυσικό στρώμα μετάδοσης να εφαρμοστούν τεχνικές OFDM/OFDMA και MIMO, όπως αντίστοιχα συμβαίνει και στο WiMAX. Οι συσκευές που κανουν χρήση του WiFi δικτύου δεν είναι σχεδιασμένες να παρέχουν υπηρεσίες σε χρήστες που βρίσκονται εν κινήσει. Εντούτοις ένα σημαντικό πλεονέκτημα των Wi-Fi συστημάτων έναντι των 3G είναι η ταυτόχρονη παροχή υπηρεσιών σε ένα μεγάλο αριθμό τερματικών. Η πλήρης όμως αξιοποίηση του WiMAX επιτυγχάνεται μέσω των ασύρματων κινητών συστημάτων όπου δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να απολαμβάνουν ευρυζωνικές υπηρεσίες ανεξαρτήτου τοποθεσίας και κίνησης. Το μέλλον δείχνει προς την κατεύθυνση του WiMAX και είναι βέβαιο ότι θα αποτελέσει τον κυρίαρχο τρόπο δικτύωσης των συσκευών που χρησιμοποιούνται στην καθημερινότητα.

Όσον αφορά τον ευρυζωνικό ασύρματο δίαυλο παρατηρήθηκαν τα εξής σημαντικά:

α) Η διασυμβολική παρεμβολή προκαλεί υψηλούς ρυθμούς σφαλμάτων BER που δεν μειώνονται με την αύξηση της ισχύος. Άμεση συνέπεια της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI) είναι η χρήση χαμηλών ρυθμών μετάδοσης ώστε η χρονική διασπορά να είναι μικρότερη της διάρκειας του bit. β) Οι τιμές της λαμβανόμενης ισχύος μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικές από τη μέση τιμή που προβλέπεται από το μαθηματικό μοντέλο. Στην πράξη, ικανοποιητικές τιμές της σκίασης είναι $\sigma_{\text{shadow}} = 8 \text{ dB}$.

Οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης επιτρέπουν στους χρήστες να μοιράζονται το διαθέσιμο εύρος ζώνης με ελάχιστη παρουσία κάθε χρήστη σε κάποιο κλάσμα των συνολικών πόρων του συστήματος. Η πείρα έχει δείξει ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν δραματικές διαφορές στις επιδόσεις μεταξύ των διαφόρων στρατηγικών πολλαπλής πρόσβασης. Οι πιο κοινοί τρόποι για κατανομή των διαθέσιμων διαστάσεων μεταξύ των πολλών χρηστών είναι μέσω της χρήσης πολύπλεξης χρόνου, συχνότητας ή διάσπασης κώδικα. Η ορθογωνιότητα δεν είναι δυνατή στα πυκνά ασύρματα συστήματα. Οι τεχνικές εγγυώνται ορθογωνιότητα μόνο μεταξύ των χρηστών στο ίδιο κελί, ενώ οι χρήστες σε διαφορετικά, ενδεχομένως γειτονικά κύτταρα θα μπορεί να τους έχει δοθεί η ίδια θυρίδα χρόνου ή συχνότητας. Περαιτέρω, η ορθογωνιότητα θυσιάζεται λόγω ατελούς bandpass φιλτραρίσματος (FDMA), πολυδιαδρομικών καναλιών και ατελούς συγχρονισμού (στο TDMA και ιδιαίτερα στο CDMA). Στην πράξη, κάθε τεχνική πολλαπλής πρόσβασης (FDMA, TDMA, CDMA) περιλαμβάνει έναν κατάλογο από πλεονεκτήματα και των μειονεκτημάτων. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του OFDMA είναι ότι πολλά από τα καλύτερα χαρακτηριστικά της κάθε τεχνικής μπορούν να επιτευχθούν.

Συνοψίζοντας το OFDMA κληρονομεί όλα τα υπέρ και τα κατά του OFDM: Α) Είναι ανθεκτικό στην πολυδιαδρομική μετάδοση. Β) Η υλοποίησή του στο ψηφιακό πεδίο είναι εύκολη μέσω της χρήσης IFFT ολοκληρωμένων. Γ) Ο διαμελισμός του εύρους ζώνης σε υποφέροντα προσφέρει νέες δυνατότητες για το επίπεδο υπηρεσιών και τη διαχείριση ραδιοπόρων. Δεν υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ τους παρά το γεγονός ότι επικαλύπτονται. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της OFDM τεχνολογίας είναι το πρόβλημα του λόγου της μέγιστης ισχύος προς την μέση (peak-to-average-power ratio). Το OFDM σήμα αποτελείται από N ανεξάρτητα διαμορφωμένα σήματα τα οποία, όταν προστίθενται με την ίδια φάση, έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία

ισχύος εξόδου N φορές μεγαλύτερη από τη μέση. Αυτές οι διακυμάνσεις του σήματος ισχύος αποτελούν σημαντικό πρόβλημα στον σχεδιασμό τόσο των RF ενισχυτών όσο και των AD/DA μετατροπέων. Επιπλέον, τα νέα πλεονεκτήματα του OFDMA είναι: 1) Προσφέρει πολυχρηστική ποικιλία (multiuser diversity) 2) Προσφέρει ευελιξία 3) Μειώνει τον λόγο της μέγιστης ισχύος προς την μέση PAPR (peak-to-average-power ratio), με ένα βασικό μειονέκτημα του OFDMA τις διακαναλικές παρεμβολές, οι οποίες είναι αναπόφευκτες στο πολυχρηστικό περιβάλλον. Συνεπώς απαιτείται η αναζήτηση τεχνικών για την κατάλληλη διαχείριση των ραδιοπόρων με σκοπό την ελαχιστοποίηση της επίδρασης μεταξύ των χρηστών. Στα πλαίσια του OFDMA, η διαχείριση ραδιοπόρων απαιτεί την σωστή ανάθεση υποφέροντων στους χρήστες, κατάλληλο bit loading στα υποφέροντα και έλεγχο της ισχύος ανά υποφέρον.

Όσον αφορά τη χωρητικότητα του καναλιού επισημαίνεται ότι οι αποκλίσεις που απαντώνται στα υπάρχοντα κυψελωτά τηλεπικοινωνιακά συστήματα μεταξύ θεωρητικού ορίου και εφικτής τιμής χωρητικότητας αγγίζουν το 90%. Το MIMO σύστημα απλοποιείται και γίνεται ισοδύναμο με n SISO κανάλια. Η χωρητικότητα του καναλιού στην περίπτωση του MIMO συστήματος να εξαρτάται και από το πίνακα H του καναλιού. Σε σύστημα MIMO πολλαπλών χρηστών η γνώση του καναλιού στον πομπό δεν είναι μόνο επιθυμητή, είναι απαραίτητη, ώστε να μπορεί να στρέφει κατάλληλα το προς εκπομπή σήμα ανάλογα με τη χωρική κατανομή των χρηστών. Όταν το περιβάλλον σκέδασης είναι εξαιρετικά έντονο τότε το ασύρματο κανάλι μπορεί να περιγραφεί με το μοντέλο Rayleigh. Διαπιστώνεται μαθηματικά και από τις προσομοιώσεις ότι για μεγάλο αριθμό στοιχείων στην κεραία του πομπού η χωρητικότητα αποκτά γραμμική εξάρτηση από τον αριθμό των στοιχείων του δέκτη.

1. 3GPP TR 25.858. *Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access*. Version 5.0.0. 2002.
2. 3GPP TS 25.308. *High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overall description; Stage 2*. Version 9.1.0. 2009.
3. 3GPP TS 25.423. *UTRAN Iur interface Radio Network Subsystem Application Part (RNSAP) signaling*. Version 9.1.0. 2009.
4. Cai, J., Goodman, D. General Packet Radio Service in GSM. *IEEE Communications Magazine*. 1997. 122-131.
5. Eylert, B. *The Mobile Multimedia Business: Requirements and Solutions*. John Wiley & Sons. 2005.
6. Holma, H., Toskala, A. *HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications*. John Wiley & Sons. 2006.
7. Lescuyer, P., Lucidarme, T. *Evolved Packet System (EPS): The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS*. John Wiley & Sons. 2008.
8. Sesia, S., Toufik, I., Baker, M. *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons. 2009.
9. H. Holma, and A. Toskala, *LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA based radio access*, John Wiley & Sons: Chichester, 2009.
10. Motorola, white paper, *Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview*, 2007.
11. R. Bosisio and U. Spagnolini, *Inteference Coordination versus Interference Randomization in Multicell 3GPP LTE System*, IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2008.
12. A. Abrardo, A. Alessio, P. Detti and M. Moretti, *Centralized Radio Resource Allocation for OFDMA Cellular Systems*, IEEE International Conference on Communications '07, pp. 269-274, 2007
13. E. Dahlman, *3G Evolution - HSPA and LTE for Mobile Broadband*, 2nd Edition, Wiley 2008
14. G. Li and H. Liu, *Downlink Radio Resource Allocation for Multi-cell OFDMA System*, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 5, No. 12, pp. 3451-3459, December 2006
15. ICIC Time Scale: Impact on the Specifications, 3GPP contribution. *Downlink and Uplink Intercell Interference Coordination/Avoidance: Impact on the Specifications*, 3GPP Contribution R1-060586, 2006.

16. A. Simonsson, *Frequency Reuse and Intercell Interference Coordination in E-UTRA*, IEEE Vehicular Technology Conference, VTC Spring, pp. 3091-3095 April 2007
17. A. Racz, N. Reider and G. Fodor, *On the Impact of Inter-Cell Interference in LTE*, IEEE Globecom, New Orleans, LN, USA, November 2008
18. S. H. Ali and V. C. M. Leung, *Dynamic Frequency Allocation in Fractional Frequency Reused OFDMA Networks*
19. Raymond Kwan and Cyril Leung, *A Survey of Scheduling and Interference Mitigation in LTE*.
20. 3GPP, London, *Interference mitigation – Considerations and Results on Frequency Reuse*, R1-050738, September 2005
21. Holma, H., Toskala, A. *WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE. 4th edition*. John Wiley & Sons. 2007.
22. M. Sternad, T. Ottoson, A. Ahlen, and A. Svensson, *Attaining both coverage and high spectral efficiency with adaptive OFDM downlinks*, in Proc. of the 58th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall 03), vol. 4, Oct. 2003, pp. 2486–2440
23. 3GPP, Huawei, *Soft frequency reuse scheme for UTRAN LTE*, R1-050507, May 2005.
24. Mobile WiMAX-Part II: *A Comparative Analysis. Technical report*, WiMAX Forum, May 2006.