



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: ΚΙΝΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ 5G.
ΜΙΑ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ.
ΜΕΛΕΤΗ ΕΡΕΥΝΑΣ: 5G ΣΥΣΚΕΥΗ ΣΕ ΣΥΣΚΕΥΗ, ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕ MATLAB ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ 4G ΜΕ
5G.

ΑΔΑΜΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2016

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	Σελ. 4
Κατάλογος Πινάκων	Σελ. 4
Περίληψη	Σελ. 5
Abstract	Σελ. 6

Κεφάλαιο 1

Κεφάλαιο 1	Σελ. 7
1.1 - Ιστορία των Τηλεπικοινωνιών	Σελ. 7
1.2 - Ασύρματες επικοινωνίες	Σελ. 12
1.3 - Τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών	Σελ. 15
1.4 - Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας	Σελ. 18
1.4.1 - Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 1ης γενιάς (1G)	Σελ. 20
1.4.1.1 - Κανάλια	Σελ. 24
1.4.1.2 - Διαχείριση Κλήσεων	Σελ. 25
1.4.2 - Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2ης γενιάς (2G)	Σελ. 26
1.4.2.1 - Αρχιτεκτονική δικτύου GSM	Σελ. 28
1.4.2.2 - Χωρητικότητα δικτύου GSM	Σελ. 33
1.4.2.3 - Ζώνες συχνοτήτων δικτύου GSM	Σελ. 34
1.4.2.4 - Λογικά κανάλια του δικτύου GSM	Σελ. 36
1.4.2.5 - Μέθοδος CDMA	Σελ. 44
1.4.2.6 - Εξέλιξη των δικτύων δεύτερης γενιάς (2G+)	Σελ. 46
1.4.2.7 - Υπηρεσίες του 2G δικτύου	Σελ. 50
1.4.3 - Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3ης γενιάς (3G)	Σελ. 53
1.4.3.1 - UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)	Σελ. 55
1.4.3.2 - CDMA2000	Σελ. 61
1.4.3.3 - 3.5G: HSPA (High-Speed Packet Access)	Σελ. 62
1.4.3.4 - 3.75G: HSPA+ (Evolved High-Speed Packet Access)	Σελ. 65
1.4.4 - Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4ης γενιάς (4G)	Σελ. 66

Κεφάλαιο 2	Σελ. 72
2.1 - Τεχνολογίες τέταρτης γενιάς (4G)	Σελ. 72
2.1.1 - LTE και LTE Advanced	Σελ. 75
2.1.2 - WiMax και WiMax 2	Σελ. 80
2.1.3 - Κύριες μέθοδοι και τεχνικές των 4G δικτύων 2.2 – Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς (5G)	Σελ. 83
2.2 - Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς (5G)	Σελ. 86
2.2.1 - Αρχιτεκτονική 5G δικτύων	Σελ. 95
2.2.2 - Υποψήφιες 5G τεχνολογίες	Σελ. 97
 Κεφάλαιο 3	 Σελ. 99
3.1 - Περιγραφή μοντέλων προσομοίωσης	Σελ. 99
3.2 - Εκτέλεση μοντέλων προσομοίωσης	Σελ. 104
 Κεφάλαιο 4	 Σελ. 105
4.1.1 - Αποτελέσματα NetMIMO μοντέλου	Σελ. 105
4.1.2 - Αποτελέσματα NetMIMO-3 χρηστών μοντέλου	Σελ. 108
4.1.3 - Αποτελέσματα D2D μοντέλου	Σελ. 110
4.2 - Συμπεράσματα	Σελ. 111
 Παράρτημα Α - MatLab Κώδικας NetMIMO μοντέλου	 Σελ. 114
Παράρτημα Β - MatLab Κώδικας μοντέλου NetMIMO 3 χρηστών	Σελ. 116
Παράρτημα Γ - MatLab Κώδικας D2D μοντέλου	Σελ. 118
 Βιβλιογραφία	 Σελ. 120
Ιστοσελίδες	Σελ. 122

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 - Τοπολογίες δικτύων	Σελ. 13
Σχήμα 1.2 - Κυψελοειδές δίκτυο κινητής τηλεφωνίας	Σελ. 19
Σχήμα 1.3 - GSM 900 Φυσικά Κανάλια	Σελ. 37
Σχήμα 1.4 - Αντιστοιχία Φυσικών σε Λογικά κανάλια για τους συνδυασμούς (i) και (ii)	Σελ. 42
Σχήμα 1.5 - Αντιστοιχία Φυσικών σε Λογικά κανάλια για τον συνδυασμό (iv)	Σελ. 43
Σχήμα 1.6 - Αντιστοιχία Φυσικών σε Λογικά κανάλια για τον συνδυασμό (vii)	Σελ. 44
Σχήμα 1.7 - Δομή ενός UMTS δικτύου	Σελ. 57
Σχήμα 1.8 - Κίνηση δεδομένων των χρηστών δικτύων κινητής τηλεφωνίας ανά μήνα	Σελ. 68
Σχήμα 1.9 - Γενική δομή δικτύου τέταρτης γενιάς (LTE)	Σελ. 70
Σχήμα 2.1 - Λογότυπο LTE	Σελ. 75
Σχήμα 2.2 - Αρχιτεκτονική LTE δικτύου	Σελ. 76
Σχήμα 2.3 - Λογότυπο του WiMax	Σελ. 80
Σχήμα 2.4 - Γενική δομή WiMax δικτύου	Σελ. 83
Σχήμα 2.5 - Αρχιτεκτονική 5G δικτύων	Σελ. 95
Σχήμα 3.1 - Θέσεις και αποστάσεις χρηστών και Σταθμού Βάσης	Σελ. 102
Σχήμα 4.1 - NetMIMO μοντέλο για $R=1$	Σελ. 106
Σχήμα 4.2 - NetMIMO μοντέλο για $SNR=5$	Σελ. 108
Σχήμα 4.3 - NetMIMO-3 χρηστών μοντέλο για $R=1$	Σελ. 109
Σχήμα 4.4 - D2D μοντέλο	Σελ. 111

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 - Φορείς που συμμετέχουν στην 3GPP	Σελ. 56
--	---------

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει σαν θέμα της τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς (5G δίκτυα). Αποσκοπεί στην αναλυτική περιγραφή των δικτύων αυτών και στην σύγκρισή των δικτύων αυτών με τα αντίστοιχα της προηγούμενης γενιάς (τέταρτη γενιά-4G) μέσω του σχεδιασμού και υλοποίησης μίας προσομοίωσης στο περιβάλλον Matrix Laboratory (MatLab) για την παραγωγή ποσοτικών αποτελεσμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία ιστορική αναδρομή των τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών η οποία επικεντρώνεται στις ασύρματες τεχνολογίες και δη στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, όπου γίνεται περιγραφή της εξέλιξης τους μέχρι και την πέμπτη γενιά.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται πιο αναλυτικά οι δύο τελευταίες γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας, η τέταρτη γενιά και η πέμπτη γενιά, όπου γίνεται και μία πρώτη σύγκριση των χαρακτηριστικών τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μοντέλο που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση των δικτύων τέταρτης και πέμπτης γενιάς και η διαδικασία που ακολουθείται κατά την προσομοίωση του μοντέλου.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καθώς και τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα.

Abstract

The main purpose of this work is to study the 5th generation mobile networks. To that end there will be a detailed description of such networks and a simulation MatLab model will be implemented in order to compare these networks to the 4G cellular networks that preceded them.

The first chapter contains the chronological evolution of the telecommunication's technologies, focusing mainly on the wireless ones and, more specifically, the ones used in mobile networks, up to the 5th generation.

In the second chapter, a more thorough description of the last two generations, 4G and 5G, is been presented and the differences of these two technologies is been pointed out.

The third chapter contains a detailed description of the simulation model that has been implemented, in order to compare the 5th generation to the 4th. The model has been implemented using Matrix Laboratory environment.

In the fourth and last chapter the results of the simulations are being presented, leading to some conclusions about the 5th generation and the comparison between the 5th and the 4th generation.

Κεφάλαιο 1

1.1 - Ιστορία των τηλεπικοινωνιών

Από τις απαρχές του ανθρώπινου πολιτισμού, η επικοινωνία μεταξύ των ανθρώπων είχε εξέχουσα σημασία. Και μεγαλύτερης σημασίας ήταν η μετάδοση πληροφοριών σε μεγάλες αποστάσεις. Έτσι, γεννήθηκαν οι τηλεπικοινωνίες. Με τον όρο “Τηλεπικοινωνίες” ορίζεται η μετάδοση πληροφοριών, δηλαδή η επικοινωνία μεταξύ δύο σημείων, τα οποία απέχουν κάποια απόσταση, όπως φαίνεται και από την ετυμολογία του όρου: το πρόθεμα “τηλέ-” προσδίδει την έννοια της μεγάλης απόστασης, στο δεύτερο συνθετικό, την “επικοινωνία”. Επικοινωνία από απόσταση. Πρωτόγονες τέτοιες τεχνικές εντοπίζονται από το 1200 π.χ., που, βάσει αναφορών του Ομήρου στην Ιλιάδα, σήματα φωτιάς και σήματα καπνού χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ κάποιων ομάδων. Επόμενες, χρονολογικά, τεχνικές τηλεπικοινωνιών εμφανίζονται στην Κίνα, από το 1000π.Χ., όπου χρησιμοποιούσαν κατάλληλα διαμορφωμένους χαρταετούς για την μετάδοση μηνυμάτων μεταξύ απομακρυσμένων περιοχών. Στη συνέχεια, έχουμε από το 700 π.χ. τα ταχυδρομικά περιστέρια που χρησιμοποιούνταν στους Ολυμπιακούς αγώνες, από το 200 π.χ. τους αγγελιοφόρους, πεζούς ή έφιππους, που ήταν ένα κοινό φαινόμενο στην Αίγυπτο και την Κίνα. Η εξέλιξη της μεθόδου αυτής ήταν οι ταχυδρομικές υπηρεσίες, τις οποίες εγκαθίδρυσαν οι Ρωμαίοι, το 11π.Χ., και οι οποίες συνέχισαν να είναι μία βασική τεχνική τηλεπικοινωνιών μέχρι και τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, με την εταιρία “Pony Express”, μία εταιρία ταχυδρομικών υπηρεσιών των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, να είναι ο πιο γνωστός πάροχος τέτοιων υπηρεσιών και τη σημερινή μορφή της μεθόδου αυτής να είναι τα σύγχρονα ταχυδρομεία.

Αν και το ταχυδρομείο μπορεί να θεωρηθεί σαν τηλεπικοινωνιακή μέθοδος γιατί έχει σαν

αποτέλεσμα την επικοινωνία από απόσταση, είθισται πλέον να αναφερόμαστε με τον όρο αυτό σε τεχνικές οι οποίες δεν έχουν σαν κανάλι επικοινωνίας ανθρώπινο δυναμικό και δεν μεταφέρεται το ίδιο το μήνυμα αλλά η πληροφορία αυτού. Πρώτη τέτοια τεχνική στην σύγχρονη ιστορία είναι το σύστημα των “Σημοφάρων”. Το 1791 οι αδελφοί Chappe παίρνουν άδεια από την Γαλλία για να στήσουν ένα σύστημα αποστολής μηνυμάτων με κινητούς βραχιόνες πάνω σε ένα στύλο, έτσι ώστε να στέλνουν μηνύματα ο ένας στον άλλο, με την θέση των βραχιόνων να αναπαριστά γράμματα του αλφαβήτου. Αυτή είναι και η πρώτη τεχνική, στην οποία δεν έχουμε μεταφορά του μηνύματος αλλά και στην οποία μπορούν να μεταδοθούν ολοκληρωμένα μηνύματα. Το 1793 εγκαθίστουν το πρώτο εμπορικό σύστημα σημαφόρων μεταξύ δυο τοποθεσιών κοντά στο Παρίσι. Ο Ναπολέων το λάτρεψε και σύντομα κατασκευάστηκαν συστήματα σημαφόρων που κάλυπταν τις κυρίες πόλεις της Γαλλίας. Σύντομα το σύστημα υιοθετήθηκε από την Ιταλία, την Γερμανία και την Ρωσία με χιλιάδες άτομα να επανδρώνουν τους σταθμούς. Το σύστημα μπορούσε να μεταδώσει περίπου 125 χαρακτήρες το λεπτό. Για την αναπαράσταση ολόκληρων προτάσεων με λίγες κινήσεις χρησιμοποιούνταν κάποια βιβλία κωδικών. Οι σημαφόροι δεν ήταν τόσο επιτυχείς στην Αγγλία λόγω της αιθαλομίχλης από την Βιομηχανική Επανάσταση. Υπήρχαν συστήματα σημαφόρων και στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το τελευταίο σύστημα εν λειτουργία ήταν στην Αλγερία και σταμάτησε να λειτουργεί το 1860.

Ο λόγος που παρήκμασε το παραπάνω σύστημα ήταν η εξέλιξη των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Η μεγάλη επανάσταση και τεχνολογική εξέλιξη στις τηλεπικοινωνίες έγινε με την χρήση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας και, ειδικότερα, με την θεμελίωση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας από τον Σκωτσέζο θεωρητικό φυσικό James Clerk Maxwell. Πλέον, σαν συστήματα τηλεπικοινωνιών αναφερόμαστε στα συστήματα επικοινωνίας που λειτουργούν με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και μεταδίδουν τα μηνύματα με μορφή είτε ηλεκτρικών σημάτων (ενσύρματα) είτε ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ασύρματα). Η αρχή, έγινε με την εφεύρεση του ηλεκτρικού στοιχείου από τον Alessandro Volta, το 1799, βασικό στοιχείο της εφεύρεσης του ηλεκτρικού τηλέγραφου (από τον Samuel Morse), του οποία η πρώτη επίδειξη έγινε το 1837 στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Εφτά χρόνια μετά, το Μάιο του 1844, λειτούργησε η πρώτη τηλεγραφική γραμμή, η οποία ένωνε την Washington με την Baltimore. Η μετάδοση της πληροφορίας γίνεται με μεταβλητού μήκους κώδικες λέξεις, που αναπαριστούσαν τα γράμματα του λατινικού αλφαβήτου, τους αραβικούς αριθμούς και κάποια σύμβολα στίξης και ειδικούς χαρακτήρες. Ο κώδικας αυτός επινοήθηκε από τον Morse και ονομάστηκε “κώδικας Morse”. Ο κώδικας αυτός είναι δυαδικός, με την τελεία (σύντομη τάση)

και την παύλα (τάση μεγάλης διάρκειας) και είναι, όπως προαναφέρθηκε, μεταβλητού μήκους κώδικας, με τη μικρότερη να είναι ενός συμβόλου και την μεγαλύτερη να είναι έξι συμβόλων (με εξαίρεση το σήμα σφάλματος που είναι 8 τελείες). Οι στιγμές (τελείες) και οι γραμμές (παύλες) αντιστοιχούν σε ηλεκτρικά σήματα. Η διάρκεια της στιγμής λαμβάνεται ως μονάδα. Χρονικά, η στιγμή (τελεία) αντιστοιχεί στο $1/6$ του δευτερολέπτου. Η γραμμή έχει διάρκεια τρεις φορές μεγαλύτερη (δηλαδή μισό δευτερόλεπτο). Η απόσταση μεταξύ των λέξεων είναι ίση με επτά στιγμές. Η απόσταση μεταξύ των γραμμάτων είναι ίση με τρεις στιγμές, η απόσταση μεταξύ των ίδιων γραμμάτων είναι ίση με μια στιγμή. Ο κώδικας αυτός υπήρξε ο πρόδρομος μεθόδων ψηφιακής κωδικοποίησης οι οποίες αναπτύχθηκαν πολλά χρόνια μετά, και χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα στα σύγχρονα μέσα τηλεπικοινωνιών.

Το μονοπώλιο της Τηλεγραφίας στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα “έσπασε” με την γέννηση μίας άλλης μεγάλης εφεύρεσης, του τηλεφώνου, τη δεκαετία του 1870. Συγκεκριμένα, το 1876 ο Alexander Graham Bell κατοχύρωσε ευρεσιτεχνία για την εφεύρεση της τηλεφωνίας και το 1877 ίδρυσε την πρώτη τηλεφωνική εταιρία, την “Bell Telephony Company”. Οι υπηρεσίες που παρείχαν οι πρώτες παραλλαγές συστημάτων τηλεφωνίας ήταν σχετικά απλές και για αποστάσεις μερικών εκατοντάδων μιλίων, λόγω κακής ποιότητας ήχου αλλά και μεγάλης απόσβεσης του σήματος. Τις επόμενες δύο δεκαετίες όμως, με τη βοήθεια των εφευρέσεων του μικροφώνου άνθρακα και του επαγωγικού πηνίου έγιναν σημαντικές πρόοδοι και στην ποιότητα αλλά και στην εμβέλεια των υπηρεσιών. Ειδικά μετά το 1906 και την εφεύρεση της τριόδου ενισχύτριας λυχνίας (λυχνία κενού) από τον Lee De Frost, κατέστη δυνατή η τοποθέτηση ενισχυτών σήματος στα τηλεφωνικά συστήματα και η εμβέλεια των υπηρεσιών άρχισε να αυξάνεται πολύ και το 1915 άρχισαν να λειτουργούν διηπειρωτικές τηλεφωνικές επικοινωνίες. Παρόλα αυτά, όμως, η εγκαθίδρυση διηπειρωτικής τηλεφωνικής υπηρεσίας μεταξύ Ευρώπης και Αμερικής άργησε να γίνει λόγω των δύο παγκοσμίων πολέμων και της μεγάλης οικονομικής κρίσης του 1930 και μόλις το 1953 τέθηκε σε λειτουργία το πρώτο υπερατλαντικό καλώδιο και η τηλεφωνική υπηρεσία μεταξύ Ευρώπης και Αμερικής έγινε πραγματικότητα.

Η Τηλεγραφία και η Τηλεφωνία άρχισαν ως ενσύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Παράλληλα όμως με αυτά, αναπτύχθηκαν και εξελίχθηκαν και τα αντίστοιχα ασύρματα. Η ανάπτυξή τους έγινε εφικτή με την θεμελίωση της Ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας από τον Maxwell το 1864. Αλλά η αρχή είχε ήδη γίνει το 1820, όπου ο Oersted σε μία εργασία του

απέδειξε τη στενή σχέση μεταξύ ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, παράγοντας μαγνητικό πεδίο από ένα ηλεκτρικό. Εν συνεχεία, στις 29 Αυγούστου 1831 ο Micheal Faraday κάνει επίδειξη της μαγνητικής επαγωγής, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα κινώντας έναν μαγνήτη κοντά σε έναν αγωγό, φέρνοντας την ανθρωπότητα ένα βήμα πιο κοντά στην Ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Στηριζόμενος στα παραπάνω, το 1864 ο James C. Maxwell διατύπωσε τη βασική Ηλεκτρομαγνητική θεωρία του, η οποία επαληθεύτηκε πειραματικά από τον Hertz το 1887, και προέβλεπε την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία είναι η ακτινοβολία που χρησιμοποιούν τα ασύρματα συστήματα τηλεπικοινωνιών μέχρι και σήμερα.

Με τη θεωρία στην οποία στηρίζονται θεμελιωμένη, οι ασύρματες επικοινωνίες άρχισαν να αναπτύσσονται και να εξελίσσονται. Η πρώτη επιτυχής εφαρμογή της νέας, τότε, θεωρίας έγινε το 1894 από τον Oliver Lodge, ο οποίος εφηύρε μία διάταξη ονόματι coherer, η οποία μπορούσε να συλλαμβάνει ραδιοσήματα¹ και χρησιμοποιήθηκε στην επίδειξη ασύρματης επικοινωνίας σε απόσταση περίπου 140 m. Ένα χρόνο μετά, το 1895, ο Guglielmo Marconi εφηύρε τον ασύρματο και επέδειξε ασύρματη μετάδοση σε απόσταση περίπου 2 χιλιομέτρων και το 1897 λαμβάνει δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για ένα σύστημα ράδιο-τηλεγραφίας, τον Ασύρματο Τηλέγραφο, η ανάπτυξη του οποίου έγινε το διασημότερο επίτευγμα του. Η εξέλιξη του συνεχίστηκε και στις 12 Δεκεμβρίου 1901, στο Signal Hill του Newfoundland επετεύχθη λήψη ραδιοσήματος που είχε εκπεμφθεί από το Cornwall της Αγγλίας, από απόσταση περίπου 1700 μιλίων.

Όμως, αν και οι βάσεις είχαν μπει για τις ασύρματες τηλεπικοινωνίες, η τεχνολογία της εποχής δεν επέτρεπε, λόγω περιορισμένων ενεργειακών δυνατοτήτων, την περαιτέρω εξέλιξη. Αυτό άλλαξε με την εφεύρεση της διόδου κενού, το 1904 από τον Fleming και της τριόδου λυχνίας (λυχνία κενού) από τον Lee De Frost το 1906, η οποία, όπως προαναφέρθηκε, συνετέλεσε και στην εξέλιξη της Τηλεφωνίας, βελτιώνοντας τον λόγο απόστασης μετάδοσης προς ποιότητα λαμβανόμενου σήματος, αυξάνοντας εντυπωσιακά την εμβέλεια των ασύρματων πομπών. Στην περίπτωση του ασυρμάτου η λυχνία κενού έθεσε τις βάσεις και έκανε δυνατή την ανάπτυξη της ραδιοφωνίας. Η ραδιοφωνία AM (amplitude modulation- διαμόρφωση πλάτους) εγκαινιάστηκε το 1920 όταν ο ραδιοσταθμός KDKA του Pittsburg άρχισε να εκπέμπει και

¹ Με τον όρο “ραδιοσήματα” ορίζονται τα σήματα που μεταδίδονται με ραδιοκύματα.

κατάφερε να αναπτυχθεί γρήγορα σε παγκόσμιο επίπεδο, φτάνοντας μέχρι και σήμερα να είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για τις ασύρματες τηλεπικοινωνίες. Την AM διαμόρφωση ακολούθησε η FM (frequency modulation – διαμόρφωση συχνότητας) το 1933 και η οποία έγινε δημοφιλής και αναπτύχθηκε εμπορικά μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Η ανάπτυξη, τέλος, των ασύρματων αυτών συστημάτων επέτρεψε την υλοποίηση των τηλεοπτικών συστημάτων, με το πρώτο να επιδεικνύεται από τον V. K. Zworykin το 1929 και τις εμπορικές τηλεοπτικές εκπομπές να εγκαινιάζονται, στην Ευρώπη, το 1936 από το BBC² και στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής να δίνεται η έγκριση τηλεοπτικής εκπομπής από το FCC³ πέντε χρόνια αργότερα.

Η ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών, όπως έγινε φανερό και από τα παραπάνω, συμβαδίζει, ή καλύτερα εξαρτάται, από τις υπόλοιπες τεχνολογικές εξελίξεις. Και μάλιστα, τρεις είναι οι εφευρέσεις οι οποίες βοήθησαν στο να γίνουν τεχνολογικά άλματα. Αυτές είναι: η εφεύρεση του transistor από τους Walter Brattain, John Bardeen και William Shockley, το 1947, η εφεύρεση του ολοκληρωμένου κυκλώματος το 1958 από τους Jack Kilby και Robert Noyce, και του laser από τους Townes και Schawlow την ίδια χρονιά. Αυτές έκαναν δυνατή την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μικροσκοπικών διαστάσεων, χαμηλής ισχύος, μικρού βάρους και υψηλού ρυθμού λειτουργίας, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις επίγειες ασύρματες τηλεπικοινωνίες, στα συστήματα μικροκυματικών ραδιοεξέσεων ευρείας ζώνης, στα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών, στα συστήματα οπτικών επικοινωνιών με χρήση καλωδίου οπτικής ίνας και σε πολλά άλλα.

Ο πρώτος δορυφόρος για αναμετάδοση τηλεοπτικού σήματος μεταξύ Ευρώπης και Αμερικής είναι ο Telestar I, ο οποίος τέθηκε σε τροχιά το 1962 και ο πρώτος δορυφόρος που παρείχε υπηρεσίες εμπορικών υπηρεσιών ήταν ο Early Bird που εκτοξεύθηκε το 1965. Πλέον υπάρχουν πάνω από 2000⁴ δορυφόροι σε τροχιά, οι οποίοι εξυπηρετούν ποικίλους σκοπούς. Οι οπτικές ίνες τείνουν να αντικαταστήσουν τα χάλκινα καλώδια, δίνοντας την δυνατότητα στα ενσύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα να μεταφέρουν με μεγάλες ταχύτητες, πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων. Τέλος, μεγάλη τεχνολογική εξέλιξη έχουν παρουσιάσει τα τελευταία χρόνια,

² British Broadcasting Corporation

³ Federal Communications Commission

⁴ Οι περισσότεροι όμως από αυτούς δεν χρησιμοποιούνται γιατί είναι παλαιάς τεχνολογίας.

ειδικά την τελευταία 20ετία, και οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες και συγκεκριμένα τα κυψελοειδή δίκτυα την κινητής τηλεφωνίας, παρέχοντας από υπηρεσίες ανταλλαγής φωνής και εικόνας, μέχρι σύνδεση με το Διαδίκτυο.

1.2 - Ασύρματες επικοινωνίες

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι ασύρματες τεχνολογίες άρχισαν να αναπτύσσονται αρκετά νωρίς, στην ιστορία των τηλεπικοινωνιών. Ο λόγος είναι ότι οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν κάποια πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις ενσύρματες. Τα πλεονεκτήματα αυτά υπάρχουν λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους. Ένα από τα πιο σημαντικά είναι η κινητικότητα που έχει μία συσκευή ασύρματης επικοινωνίας, κάτι που λείπει από τις συσκευές ενσύρματης επικοινωνίας. Ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η μεγάλη ευκολία εγκατάστασης και λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου σε σχέση με ένα ενσύρματο. Για ένα ενσύρματο δίκτυο επικοινωνίας πρέπει να συνδεθούν όλοι οι χρήστες μεταξύ τους με καλώδια ενώ στο ασύρματο δίκτυο, ανάλογα με το είδος της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται, χρειάζεται να εγκατασταθούν από κάποιον αριθμό πομποδεκτών⁵, ώστε να μπορούν να συνδεθούν οι ασύρματες συσκευές επικοινωνίας, μέχρι και τίποτα, αν οι συσκευές ασύρματης επικοινωνίας έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους άμεσα. Λόγω των παραπάνω, είναι προτιμότερη η χρήση ασύρματων δικτύων επικοινωνίας από ενσύρματων σε κάποιες περιπτώσεις⁶. Κάποιες από αυτές τις περιπτώσεις αναφέρονται, χονδρικά, παρακάτω:

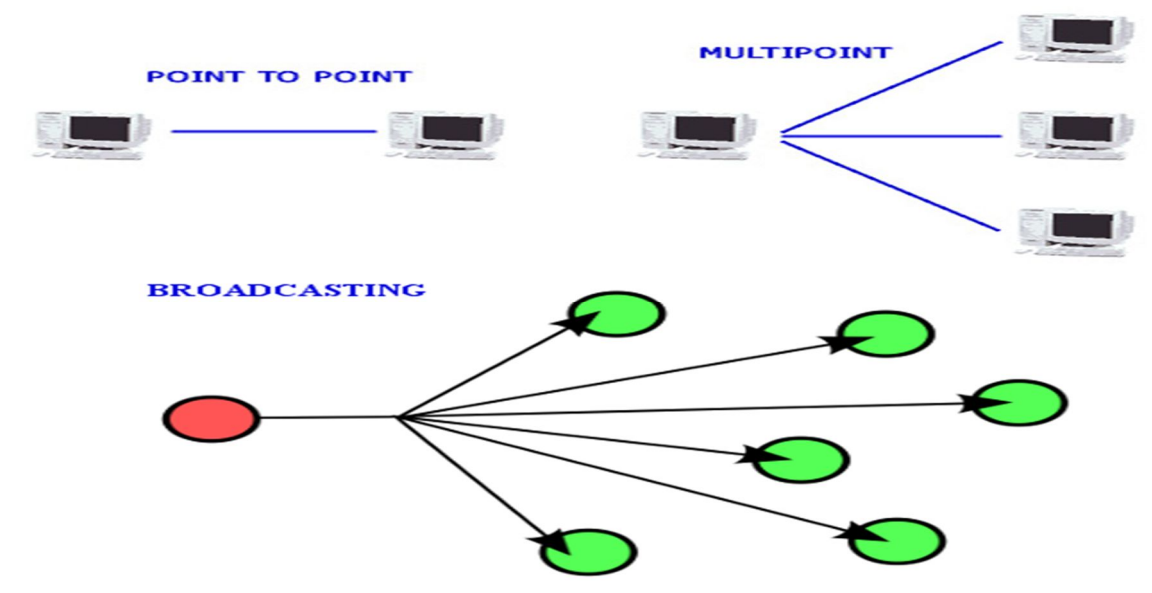
- Η επέκταση της επικοινωνίας μεταξύ χρηστών σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, πέρα από τις δυνατότητες των τυπικών καλωδιώσεων.
- Η ύπαρξη ενός εφεδρικού δικτύου επικοινωνιών που εύκολα τίθεται σε λειτουργία, σε περίπτωση βλάβης του βασικού, ενσύρματου.

⁵ Οι πομποδέκτες αυτοί ονομάζονται “σταθμοί βάσεις” και μέσω αυτών γίνεται η επικοινωνία των χρηστών.

⁶ Φυσικά έχουν και κάποια μειονεκτήματα, και για το λόγο αυτό επιλέγονται ασύρματα για κάποιες χρήσεις και ενσύρματα για άλλες.

- Η σύνδεση φορητών ή προσωρινών θέσεων εργασίας.
- Η εγκατάσταση δικτύων επικοινωνίας σε περιπτώσεις όπου είναι οικονομικά ασύμφορη ή και δύσκολη η εγκατάσταση ενσύρματου δικτύου. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι πολύ αραιοκατοικημένες περιοχές ή και οι πολύ δύσβατες.
- Η επικοινωνία κινούμενων χρηστών (πλοίων, αεροπλάνων κλπ.) με τον υπόλοιπο κόσμο.

Οι εφαρμογές των ασύρματων επικοινωνιών είναι πάρα πολλές και ποικίλες. Και ο τύπος ή το είδος της εφαρμογής καθορίζει και τη μορφή του δικτύου επικοινωνίας, που ονομάζεται “τοπολογία του δικτύου”. Η τοπολογία του κάθε δικτύου καθορίζεται από το πλήθος των χρηστών καθώς και τον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ τους. Οι τρόποι (τοπολογίες δικτύου) με τους οποίους μπορεί να γίνει η επικοινωνία μεταξύ χρηστών ενός δικτύου είναι:



Σχήμα 1.1 – Τοπολογίες δικτύων

- **Point-to-point (σημείο-σε-σημείο):** η επικοινωνία γίνεται μεταξύ δύο χρηστών, όπου συνδέονται ο ένας με τον άλλον, έχοντας αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ τους. Η πιο ευρέως γνωστή χρήση του τρόπου αυτού είναι στις τηλεφωνικές κλήσεις.

- **Point-to-multipoint (σημείο-σε-πολλαπλά-σημεία):** η επικοινωνία γίνεται μεταξύ ενός χρήστη και αρκετών άλλων, οι οποίοι έχουν αμφίδρομη επικοινωνία με τον αρχικό χρήστη αλλά όχι και μεταξύ τους. Χρήση του τρόπου αυτού γίνεται τα τελευταία χρόνια στην IP τηλεφωνία.
- **Broadcasting (μετάδοση):** η επικοινωνία είναι μονόδρομη, με έναν χρήστη να εκπέμπει κάποιο σήμα το οποίο λαμβάνουν πολλοί. Η επικοινωνία αυτή είναι συνήθως μονόδρομη και με τέτοιο τρόπο επικοινωνίας λειτουργούν τα Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης, Ραδιόφωνο και Τηλεόραση.

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση έγινε βάσει του πλήθους χρηστών με τους οποίους μπορεί να επικοινωνήσει ένας χρήστης, και οι τρεις τρόποι που αναφέρθηκαν φαίνονται στο παραπάνω σχήμα (σχήμα 1.1). Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο θα γίνεται η επικοινωνία, θα έχουμε δύο κατηγορίες:

- Απευθείας επικοινωνία χρηστών, όπου ο ένας χρήστης επικοινωνεί απευθείας με τον άλλο, χωρίς να μεσολαβεί κάποια άλλη συσκευή. Με τον τρόπο αυτό λειτουργούν πολλές συσκευές, όπως τα walkie-talkie, το ραδιόφωνο (θεωρώντας σαν χρήστες τον πομπό και τον δέκτη) καθώς και οι συσκευές που συνδέονται με χρήση της τεχνολογίας δικτύωσης Bluetooth. Το μεγάλο θετικό του τρόπου αυτού είναι το ότι δεν χρειάζονται κανενός είδους υποδομή για να λειτουργήσουν, απλά δύο, τουλάχιστον, συσκευές επικοινωνίας. Το αρνητικό τους είναι ότι έχουν περιορισμένη εμβέλεια και δεν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους χρήστες που είναι πολύ απομακρυσμένοι.
- Επικοινωνία με διαμεσολαβητή, όπου ο κάθε χρήστης επικοινωνεί πρώτα με κάποια συσκευή διαμεσολάβησης, η οποία τον συνδέει με τον χρήστη ή τους χρήστες της επιλογής του. Με τον τρόπο αυτόν πραγματοποιούνται οι τηλεφωνικές κλήσεις από τους χρήστες κινητής τηλεφωνίας. Το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας έχει πολλούς σταθμούς βάσης οι οποίοι καλύπτουν συγκεκριμένες περιοχές και μέσω αυτών γίνεται η

επικοινωνία χρηστών, σε όποιο σημείο και να βρίσκονται, αρκεί να έχουν επικοινωνία με κάποιον σταθμό βάσης. Το δίκτυο αυτό ονομάζεται “κυψελοειδές” ή “κυψελωτό”.

1.3 - Τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών

Λόγω των πλεονεκτημάτων των ασύρματων επικοινωνιών έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνολογίες για ασύρματες επικοινωνίες ή ασύρματη δικτύωση⁷. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν αναπτυχθεί εδώ και πολλά χρόνια, και συνεχώς αναπτύσσονται. Σαν κανάλι επικοινωνίας χρησιμοποιούν τον ελεύθερο χώρο και σαν μέσο μετάδοσης της πληροφορίας τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι ποικίλα και εξαρτώνται από την τεχνολογία που χρησιμοποιούν. Αν χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα των οποίων η συχνότητα ανήκει στη ζώνη των ραδιοεπικοινωνιών⁸, ονομάζονται συστήματα ραδιοεπικοινωνίας.

Πρώτη τέτοια τεχνολογία αναπτύχθηκε από τον Alexander Graham Bell και τον Charles Summer Tainter οι οποίοι εφηύραν και κατοχύρωσαν το photophone (φωτόφωνο). Η συσκευή αυτή ήταν ένα τηλέφωνο το οποίο είχε τη δυνατότητα ασύρματης μετάδοσης δεδομένων φωνής χρησιμοποιώντας μία κατάλληλα διαμορφωμένη ακτίνα φωτός. Η πρώτη επιτυχημένη επικοινωνία με φωτόφωνα έλαβε χώρα το 1880 μεταξύ των εφευρετών της. Αν και πολύ πρωτοπόρα για την εποχή της, η εφεύρεση αυτή δεν χρησιμοποιήθηκε. Αυτό οφείλεται στο ότι οι τεχνολογίες της εποχής για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας δεν είχαν πολλές δυνατότητες, το laser δεν υπήρχε ακόμα (εφευρέθηκε πάνω από μισό αιώνα μετά), και οι δυνατότητες της συσκευής περιορίζονταν από το φυσικό φως και τον καλό καιρό. Ακόμα, λόγω της φύσης των κυμάτων που χρησιμοποιούσε, έπρεπε να υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ δέκτη και πομπού. Αλλά, παρόλο

⁷ Σαν δίκτυο ορίζεται ένας συνδυασμός συστημάτων τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω κάποιου καναλιού επικοινωνίας, ώστε να έχουν δυνατότητα μονόδρομης ή αμφίδρομης μετάδοσης πληροφοριών.

⁸ Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ανήκουν στη συχνοτική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 0 Hz μέχρι και 300GHz ονομάζονται “Ραδιοκύματα” και ορίζουν τη “ζώνη των Ραδιοεπικοινωνιών”.

που σαν εφεύρεση δεν ευδοκίμησε, οι αρχές βάσει των οποίων σχεδιάστηκε χρησιμοποιήθηκαν σε κάποιες στρατιωτικές επικοινωνίες και, κυρίως, στις επικοινωνίες μέσω οπτικών ινών.

Η ασύρματη τηλεγραφία ήταν η επόμενη τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας που αναπτύχθηκε. Είναι ίδια μέθοδος με την ηλεκτρική τηλεγραφία με την διαφορά ότι δεν έχει ενσύρματη σύνδεση των σταθμών που επικοινωνούν μεταξύ τους. Οι πληροφορίες μεταδίδονται με μηνύματα σε κώδικα Morse μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ο εφευρέτης του πρώτου συστήματος ασύρματης τηλεγραφίας είναι ο Guglielmo Marconi, ο οποίος το 1897 έκανε την πρώτη επιτυχημένη επίδειξη μετάδοσης μηνύματος σε μεγάλη απόσταση. Αλλά, επειδή, λόγω της τεχνολογίας στην οποία βασίζονταν οι πομποί, δεν μπορούσαν να παραχθούν συνεχή ηλεκτρομαγνητικά κύματα, δεν μπορούσε να μεταδοθεί ήχος και, όταν αναπτύχθηκε η ασύρματη τηλεφωνία (ραδιοτηλεφωνία) τη δεκαετία του 1920, άρχισε να παραγκωνίζεται. Χρησιμοποιείται όμως ακόμα και σήμερα από αρκετούς ραδιοερασιτέχνες⁹.

Παράλληλα με την ασύρματη τηλεγραφία αναπτύχθηκε και η ραδιοφωνία, όπου η εμπορική ραδιοφωνία (AM αρχές δεκαετίας του 1920 και FM μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο) γνώρισε πολύ μεγάλη αποδοχή από το κοινό και ήταν το πρώτο ηλεκτρικό μέσον μαζικής ψυχαγωγίας. Αν και δεν είναι διαφορετική, σαν τεχνολογία πομπών και δεκτών, από τις πρώτες μορφές ραδιοτηλεφωνίας, λόγω μεγάλης δημοτικότητας είναι μία κατηγορία ασύρματης επικοινωνίας από μόνη της. Είναι μονόδρομη επικοινωνία όπου ο δέκτης κάνει broadcasting το σήμα του και οι δέκτες επιλέγουν από ποιο θα εξάγουν τις πληροφορίες (ποιο σταθμό θα ακούσουν). Στις ίδιες αρχές στηρίχθηκε και η τηλεόραση, η οποία αντικατέστησε την ραδιοφωνία σαν το βασικότερο μέσον μαζικής ενημέρωσης.

Με τον όρο “Ραδιοτηλεφωνία” αναφερόμαστε στις τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης φωνής, όπου η μετάδοση μηνυμάτων είναι αμφίδρομη¹⁰. Στην κατηγορία αυτή μπορούν να ενταχθούν αρκετές και διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα (GSM), οι ασύρματοι πομποδέκτες walkie-talkie καθώς και τα C.B.¹¹. Είναι η

⁹ Ο όρος αναφέρεται στους ερασιτέχνες που ασχολούνται με κάποια μορφή ραδιοεπικοινωνίας.

¹⁰ Για να υπάρξει διάκριση από την μονόδρομη μετάδοση ήχου η οποία ονομάζεται “Ραδιόφωνο”.

¹¹ **Citizen's Band radio:** ραδιοεπικοινωνίες πολιτών με ειδικούς εξοπλισμούς και σε συγκεκριμένες συχνότητες,

μεγαλύτερη κατηγορία ραδιοεπικοινωνιών και υπάρχουν ποικίλων ειδών πομποδέκτες και συστήματα που έχουν ευρεία χρήση. Τα πρώτα τέτοια συστήματα αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του 1920. Το πιο διαδεδομένο σύστημα ραδιοεπικοινωνίας αυτής της μορφής είναι τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας στα οποία θα γίνει εκτενής αναφορά σε επόμενη παράγραφο.

Οι τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας που αναφέρονται για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας παρέχουν ασύρματη επικοινωνία μεταξύ τηλεφωνικών συσκευών. Υπάρχουν όμως και τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας (δικτύωσης) ηλεκτρονικών υπολογιστών. Μία πολύ διαδεδομένη τέτοια τεχνολογία, και η πρώτη που δημιουργήθηκε, είναι το Wi-Fi (Wireless Fidelity). Είναι τεχνολογία τοπικής ασύρματης δικτύωσης με χρήση της οποίας μπορεί κάποια ηλεκτρονική συσκευή να ανταλλάξει δεδομένα με κάποια άλλη ή να συνδεθεί στο Διαδίκτυο. Τα ραδιοκύματα που χρησιμοποιούνται είναι συχνότητας 2.4 GHz (UHF) και 5GHz (SHF). Τα δίκτυα που δημιουργούνται ονομάζονται ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN-Wireless Local Area Networks) και βασίζεται στην ομάδα προτύπων 802.11 της IEEE¹².

Μία άλλη τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας ηλεκτρονικών συσκευών είναι το Bluetooth. Το Bluetooth είναι ένα βιομηχανικό πρότυπο για ασύρματα προσωπικά δίκτυα υπολογιστών (Wireless Personal Area Networks, WPAN). Πρόκειται για μια ασύρματη τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία μικρών αποστάσεων, η οποία μπορεί να μεταδώσει σήματα μέσω μικροκυμάτων σε ψηφιακές συσκευές. Από τεχνικής άποψης το Bluetooth είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης δικτύωσης σε φυσικό επίπεδο, υποεπίπεδο MAC και, προαιρετικά, υποεπίπεδο LLC. Η πρώτη του εμπορική εμφάνιση έγινε το 1998, ένα χρόνο μετά το WiFi, και ήταν προορισμένο να μπορεί να δικτυώσει και μικρότερων δυνατοτήτων συσκευές, σε αντίθεση με το WiFi το οποίο προοριζόταν αποκλειστικά σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Είναι ένα πρωτόκολλο¹³ το οποίο παρέχει προτυποποιημένη, ασύρματη επικοινωνία ανάμεσα σε PDA, κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές (laptops), προσωπικούς υπολογιστές (PCs-Personal Computers), εκτυπωτές, καθώς και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές ή ψηφιακές κάμερες, μέσω μιας ασφαλούς, φθηνής και παγκοσμίως διαθέσιμης χωρίς ειδική άδεια ραδιοσυχνότητας μικρής

μικρής εμβέλειας.

¹² Η συγκεκριμένη τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας ορίζεται στην ομάδα πρωτοκόλλων IEEE 802.11 και το όνομα “WiFi” προέκυψε από το όνομα του οργανισμού που παρέχει πιστοποιήσεις για τα προϊόντα που υπακούν στις προδιαγραφές των πρωτοκόλλων 802.11, τον “WiFi Alliance”, που είναι ανεξάρτητος της IEEE.

¹³ Η ομάδα πρωτοκόλλων που ορίζει το Bluetooth είναι η IEEE 802.15.

εμβέλειας. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούν οι πομποδέκτες που έχουν οι ηλεκτρονικές συσκευές που υποστηρίζουν αυτή την τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας για την μεταξύ τους επικοινωνία είναι μεταξύ 2.4 GHz και 2.485GHz (UHF).

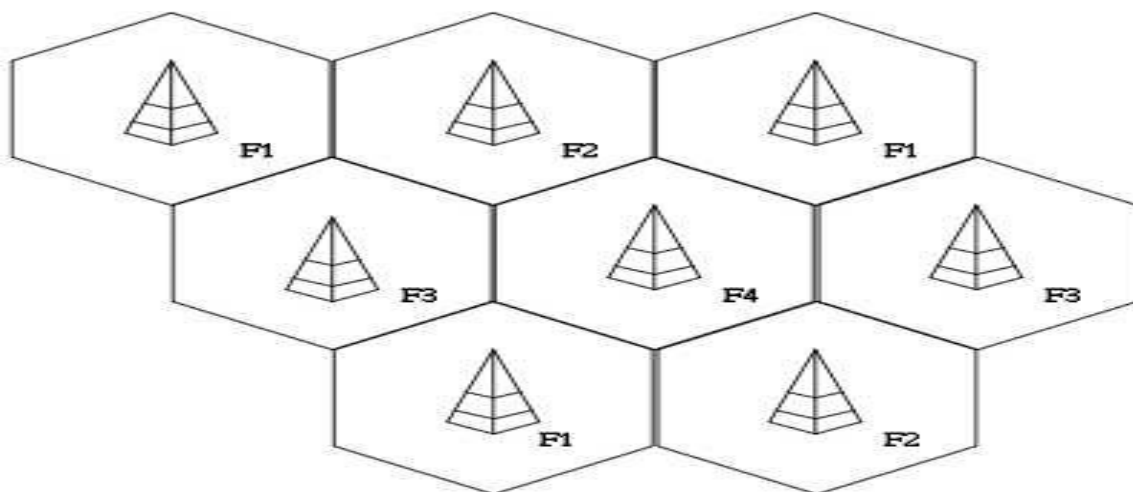
Η πιο πρόσφατη τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης (επικοινωνίας) που έχει αναπτυχθεί είναι το WiMax. Με τον όρο WiMax ορίζεται η νέα τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης, η οποία μπορεί να θεωρηθεί και ως απόγονος του Wi-Fi, λόγω παρόμοιων δυνατοτήτων, αν και λειτουργεί πολύ διαφορετικά. Ο όρος είναι ακρωνύμιο για τη φράση "Worldwide Interoperability for Microwave Access" και δόθηκε στην εν λόγω τεχνολογία από το WiMAX Forum το 2001. Η τεχνολογία αυτή υλοποιείται με το πρωτόκολλο 802.16 το οποίο άρχισε να σχεδιάζεται το 1999 από την IEEE και ολοκληρώθηκε, αρχικά, το 2001. Επίσημα, στην IEEE, η τεχνολογία αυτή ονομάζεται WirelessMAN (Wireless Metropolitan Area Networks - Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα), ενώ το όνομα WiMax είναι το εμπορικό όνομα της. Το WiMax δίνει δυνατότητα ασύρματης δικτύωσης εμβέλειας μεγαλύτερης των 40 χιλιομέτρων και παρέχει υπηρεσίες ευρυζωνικής πρόσβασης στο Διαδίκτυο σε τελικούς χρήστες. Ο απαραίτητος εξοπλισμός είναι εύκολος στην εγκατάσταση μιας και χρειάζεται μία κάρτα δικτύωσης που να υποστηρίζει την τεχνολογία, όπως ισχύει και για το Wi-Fi. Με την κάρτα αυτή θα μπορεί ο χρήστης να χρησιμοποιήσει τις ασύρματες υπηρεσίες που του παρέχει ο ISP (Internet Service Provider - Παροχέας Υπηρεσιών Διαδικτύου) που χρησιμοποιεί.

1.4 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

Με τον όρο “δίκτυο κινητής τηλεφωνίας” ορίζεται ένα δίκτυο συσκευών ασύρματων τηλεφώνων, τα οποία έχουν, κατά βάση, δυνατότητα μετάδοσης φωνής¹⁴. Το δίκτυο αυτό είναι σαν του ενσύρματου τηλεφώνου, όπου ο κάθε χρήστης αντιστοιχεί σε έναν μοναδικό αριθμό. Κάθε χρήστης έχει άμεση επαφή με κάποια κεντρικά συστήματα πομποδεκτών τα οποία

¹⁴ Ως “ασύρματα τηλέφωνα” νοούνται και οι ασύρματες τηλεφωνικές συσκευές που είναι προορισμένες για να λειτουργούν με τα ενσύρματα τηλεφωνικά δίκτυα οι οποίες αποτελούνται από τις ασύρματες συσκευές και τον σταθμό βάση, μέσω του οποίου οι ασύρματες συσκευές επικοινωνούν με το υπόλοιπο δίκτυο και η μελέτη των συσκευών αυτών ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας και δεν θα πραγματοποιηθεί. Στην υπόλοιπη εργασία με τον όρο “συσκευή κινητής τηλεφωνίας” ή “κινητό/ασύρματο τηλέφωνο” θα αναφέρεται η συσκευή που προορίζεται για χρήση σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

ονομάζονται “σταθμοί βάσης”, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.2), με τους F1, F2, F3 κλπ να είναι οι σταθμοί βάσης και η περιοχή που καλύπτει ο καθένας να είναι το εξάγωνο¹⁵ που είναι γύρω από τον καθένα. Κάθε σταθμός βάσης έχει μία συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων στην οποία λειτουργεί και επικοινωνεί με τους χρήστες που είναι συνδεδεμένοι με αυτήν. Κάθε χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα κομμάτι της περιοχής συχνοτήτων του σταθμού βάσης το οποίο του ανατίθεται από το σταθμό βάσης όταν πραγματοποιείται η σύνδεση του χρήστη με αυτόν. Κάθε σταθμός βάσης, λοιπόν, εξυπηρετεί παράλληλα πολλούς χρήστες με διαίρεση της διαθέσιμης ζώνης συχνοτήτων σε μικρότερες ζώνες. Ο τρόπος αυτός πολλαπλής πρόσβασης (πολλοί χρήστες σε έναν σταθμό βάσης) ονομάζεται “Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας”¹⁶. Για την καλύτερη και πιο αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου αυτού οι ζώνες συχνοτήτων των γειτονικών σταθμών βάσης δεν πρέπει να επικαλύπτονται, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.2) όπου θεωρούμε ότι το διαθέσιμο φάσμα του δικτύου έχει χωριστεί σε 4 περιοχές, F1, F2, F3 και F4 και δεν υπάρχουν γειτονικοί σταθμοί βάσης που να χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων.



Σχήμα 1.2 – Κυψελοειδές δίκτυο κινητής τηλεφωνίας

Για την επικοινωνία μεταξύ των χρηστών αρκεί κάποιος να πληκτρολογήσει τον αριθμό

¹⁵ Στην πραγματικότητα οι περιοχές που καλύπτει κάθε σταθμός βάσης είναι κυκλικές, αλλά στην αποτύπωση και μελέτη τέτοιων δικτύων, όπως θα γίνει και στην προκειμένη περίπτωση, θεωρούνται κανονικές εξαγωνικές κυψέλες.

¹⁶ Frequency Division Multiple Access (FDMA)

κάποιου άλλου. Μέσω του μοναδικού αυτού αριθμού ο σταθμός βάσης του χρήστη εντοπίζει τον σταθμό βάσης με τον οποίο είναι συνδεδεμένος ο προορισμός της κλήσης και ενεργοποιείται η σύνδεση μεταξύ των χρηστών. Το δίκτυο αυτό ονομάζεται “κυψελοειδές” ή “κυψελωτό” (μετάφραση του αγγλικού όρου “cellular”) γιατί κάθε σταθμός βάσης είναι συνδεδεμένος με τους χρήστες που βρίσκονται σε μία ορισμένη απόσταση, η οποία ορίζει μία περιοχή σαν κυψέλη και η κάλυψη του συνολικού δικτύου γίνεται με διαδοχική δημιουργία τέτοιων κυψελών. Οι πρώτες συσκευές κινητών τηλεφώνων παρουσιάστηκαν από την Motorola το 1973 και το πρώτο εμπορικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας υλοποιήθηκε στην Ιαπωνία το 1979 από την εταιρία NTT. Το 1981 υλοποιήθηκε και το σύστημα NMT (Nordic Mobile Telephone) ταυτόχρονα στην Φιλανδία, την Σουηδία, την Νορβηγία και την Ολλανδία. Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 η πρώτη γενιά κινητών τηλεφώνων (1st Generation - 1G) χρησιμοποιούνταν από αρκετές χώρες της Ευρώπης και της Αμερικής.

1.4.1 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 1ης γενιάς (1G)

Τα κινητά ραδιοτηλέφωνα ήταν σε σποραδική χρήση στις στρατιωτικές και τις θαλάσσιες επικοινωνίες ήδη από τις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα. Χαρακτηριστικό αυτής της τεχνολογίας ήταν η αναλογική και χαμηλής ποιότητας μετάδοση της φωνής, με αρκετές αποτυχίες κλήσεων και με ογκώδεις, δύσχρηστες και βαριές συσκευές. Το επίπεδο ασφαλείας της επικοινωνίας ήταν χαμηλό ενώ η ποικιλία των υπηρεσιών ήταν περιορισμένη. Για τις μη στρατιωτικές επίγειες εφαρμογές, πρώτη τέτοια απόπειρα έγινε το 1946 με την εγκατάσταση του πρώτου συστήματος τηλεφωνίας στα αυτοκίνητα, στο Σαιντ Λούις των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (ΗΠΑ). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιούσε έναν μεγάλο πομπό, που να είναι τοποθετημένος σε κάποιο ψηλό σημείο, ο οποίος διέθετε μόνο ένα κανάλι επικοινωνίας που μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν οι χρήστες για λήψη και αποστολή δεδομένων. Η λήψη και η αποστολή γινόταν μέσω του ίδιου καναλιού και για να “μιλήσει” ο χρήστης έπρεπε να πατήσει ένα κουμπί που απενεργοποιούσε τον δέκτη και ενεργοποιούσε τον πομπό (TDMA μέθοδος πρόσβασης καναλιού από πολλαπλούς χρήστες). Έτσι, κάθε στιγμή χρήση του καναλιού επικοινωνίας έκανε ένας από τους δύο χρήστες, καθιστώντας την επικοινωνία ημί-αμφίδρομη. Από το χαρακτηριστικό τους αυτόν τρόπο λειτουργίας τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται ως “συστήματα πίεσε για να μιλήσεις” (“push-to-talk systems”) και εγκαταστάθηκαν σε πολλές

πόλεις μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1950 ενώ σαν τεχνολογία χρησιμοποιείται και σήμερα στους ασυρμάτους CB και στα ραδιοταξί.

Η εξέλιξη του δικτύου αυτού υλοποιήθηκε την δεκαετία του 1960, χρονιά που εγκαταστάθηκε το Βελτιωμένο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας ή IMTS (Improved Mobile Telephone System). Στηριγμένο στην ίδια τεχνολογία, χρησιμοποιούσε ένα πομπό υψηλής ισχύος (200watt) σε κάποιο υπερυψωμένο σημείο, με την διαφορά όμως ότι ο πομπός αυτός είχε δύο διαθέσιμες συχνότητες επικοινωνίας όπου η μία ήταν για την αποστολή και η άλλη για την λήψη, δίνοντας χαρακτηριστικά αμφίδρομης επικοινωνίας στα δίκτυα αυτά. Το IMTS υποστήριζε 23 κανάλια, με διαθέσιμες συχνότητες που εκτείνονταν από τα 150MHz μέχρι τα 450MHz. Λόγω του μικρού πλήθους των καναλιών, οι χρήστες έπρεπε συχνά να περιμένουν αρκετή ώρα μέχρι να ελευθερωθεί κάποιο από τα διαθέσιμα κανάλια και επιπλέον, λόγω της υψηλής ισχύος του πομπού στο υπερυψωμένο σημείο που έχει τοποθετηθεί, παρόμοιοι πομποί πρέπει να τοποθετούνται αρκετά μακριά ώστε να μην παρεμβάλλεται ο ένας στον άλλο, καθιστώντας το σύστημα αυτό ως “μη-πρακτικό” λόγω της περιορισμένης χωρητικότητας του δικτύου αυτού.

Τα παραπάνω προβλήματα αντιμετωπίστηκαν επιτυχώς με το “Προηγμένο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας” ή “AMPS” (Advanced Mobile Phone System) που επινοήθηκε από τα Bell Labs και εγκαταστάθηκε για πρώτη φορά το 1982 στις ΗΠΑ (Το σύστημα αυτό χρησιμοποιούταν στην Βόρεια Αμερική και την Αυστραλία). Στην συνέχεια, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση ενός αντίστοιχου συστήματος στην Αγγλία (Ηνωμένο Βασίλειο) όπου ονομάστηκε “TACS” (Total Access Communication System), στην Δυτική Γερμανία, την Πορτογαλία και την Νότια Αφρική που ονομάστηκε “C-network” ή “C-450”, στην Ιταλία που ονομάστηκε “PTMI” (Radio Telefono Mobile Integrato) και σε όλες σχεδόν τις κατοικημένες περιοχές του σύγχρονου πολιτισμένου κόσμου, με διαφορετικό όνομα ανά περίπτωση, τα οποία όμως είχαν την ίδια αρχή λειτουργίας και τα ίδια χαρακτηριστικά με το AMPS. Το σύστημα αυτό (το AMPS) είναι η βάση των επόμενων γενεών συστημάτων κινητής τηλεφωνίας μιας και πολλές από τις βασικές του ιδιότητες και χαρακτηριστικά του συνεχίζουν να υπάρχουν (κληροδοτήθηκαν στα δίκτυα επόμενων γενεών), και για τον λόγο αυτό επόμενες

εξελίξεις του συστήματος, όπως το D-AMPS¹⁷, έχουν συμβατότητα προς τα πίσω¹⁸.

Το δίκτυο χωρίζεται, όπως προαναφέρθηκε, σε περιοχές κάλυψης του κάθε σταθμού βάσης, τις κυψέλες, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (σχήμα 1.2). Στο AMPS οι κυψέλες έχουν διάμετρο περίπου 10 με 20 χιλιόμετρα και κάθε τέτοια κυψέλη μπορεί να χρησιμοποιεί συγκεκριμένο σύνολο συχνοτήτων όπως οι F1, F2, F3 και F4 που είναι σημειωμένες πάνω στις κυψελίδες στο σχήμα 1.2. Οπότε η πολυπλεξία του δικτύου αυτού θα επιτυγχάνεται με διαίρεση συχνοτήτων (FDMA). Κάθε τέτοιο σύνολο συχνοτήτων είναι μοναδικό για τις κυψέλες που γειτνιάζουν, δηλαδή αν σε κάποια κυψέλη χρησιμοποιούνται οι συχνότητες F1, καμία άλλη κυψέλη που να γειτονεύει με αυτήν δεν θα τις χρησιμοποιεί, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2. Όμως θα χρησιμοποιείται από πιο απομακρυσμένες κυψέλες, επιτυγχάνοντας έτσι την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου αυτού με την επαναχρησιμοποίηση τους. Έτσι, αν σε ένα αντίστοιχο σύστημα IMTS με διάμετρο 100 χιλιόμετρα μπορούσε να εξυπηρετηθεί μία κλήση σε κάθε συχνότητα, στο σύστημα AMPS θα μπορούσε αυτός ο χώρος να καλυφθεί με 1000 κυψέλες με διάμετρο 10 χιλιόμετρα και η κάθε συχνότητα να επαναχρησιμοποιείται 10-15 φορές (θεωρώντας τις κυψέλες αυτές σε αρκετά απομακρυσμένη απόσταση ώστε να μην έχουμε παρεμβολές), έχοντας αυξήσει την χωρητικότητα του δικτύου 10 με 15 φορές. Η αύξηση αυτή της χωρητικότητας του δικτύου γίνεται, όπως είναι φανερό, αντιστρόφως ανάλογα με το μέγεθος της κυψελίδας, οπότε θεωρώντας μικρότερες των 10 km κυψελίδες, η αύξηση του δικτύου μεγαλώνει και όσο μικρότερες οι κυψελίδες, τόσο μεγαλύτερη η αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Όμως, μείωση του μεγέθους της κυψελίδας θα πρέπει να οδηγήσει σε μείωση της ισχύος του σταθμού βάσης ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές μεταξύ των κυψελίδων που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες και αυτό θα οδηγήσει στην ανάγκη μικρότερων και φθηνότερων πομπών αλλά και συσκευών χρηστών. Τα χαρακτηριστικά εκπομπής και λήψεις των πομπών και των δεκτών καθορίζονται πλήρως για κάθε σύστημα και η εργασία αυτή έχει ανατεθεί σε συγκεκριμένο φορέα σε κάθε περιοχή όπως η FCC (Federal Communications Commission) στις ΗΠΑ και η CE (European Conformity) στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Παραδείγματος χάριν, η FCC καθορίζει την μέγιστη ισχύος εκπομπής των τηλεφώνων χειρός σε 0.6 watt και των πομπών αυτοκινήτου στα 3 watt.

¹⁷ Το δίκτυο D-AMPS είναι ο ψηφιακός διάδοχος του AMPS.

¹⁸ Με την έννοια ότι κάθε σύστημα επόμενης γενεάς θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις συσκευές που προορίζονταν για συστήματα προηγούμενων γενεών.

¹⁹ Ένα συνηθισμένο όριο ασφαλείας είναι οι δύο κυψέλες διαφορά στην ευθεία.

Σε περιοχές στις οποίες είναι πολύ αυξημένη η χρήση του δικτύου, σε σημείο που να υπερφορτώνεται ο σταθμός βάσης και να μην λειτουργεί σωστά, οι υπερφορτωμένες κυψέλες διασπώνται σε μικρότερες, τις “μικροκυψέλες”, επιτυγχάνοντας αύξηση της χωρητικότητας στο δίκτυο της περιοχής αυτής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί και προσωρινά, σε περιπτώσεις όπως αθλητικά δρώμενα και συναυλίες, όπου για περιορισμένο χρονικό διάστημα θα βρίσκονται πολλοί χρήστες συγκεντρωμένοι σε μία περιοχή, και με την χρήση προσωρινών-κινητών σταθμών βάσης, δημιουργώντας έτσι προσωρινές μικροκυψέλες και αυξάνοντας κατάλληλα την χωρητικότητα του δικτύου.

Βασικό στοιχείο της κάθε κυψέλης (όποιο και να είναι το μέγεθος της) αποτελεί ο σταθμός βάσης (base station). Αποτελείται από έναν υπολογιστή και έναν πομπό-δέκτη που είναι συνδεδεμένοι σε μία κεραία. Ο πομποδέκτης αναλαμβάνει την εκπομπή και λήψη των σημάτων και ο υπολογιστής την δρομολόγηση του κάθε σήματος και την όποια επεξεργασία πρέπει να γίνει. Σε ένα μικρό σύστημα, όλοι οι σταθμοί βάσης θα συνδέονται σε μία κοινή συσκευή η οποία ονομάζεται Κέντρο Μεταγωγής Κινητής Τηλεφωνίας ή “MTSO” (Mobile Telephone Switching Office) καθώς και Κέντρο Μεταγωγής Κινητών ή “MSC” (Mobile Switching Center) ενώ σε μεγαλύτερα συστήματα μπορεί να υπάρχουν περισσότερα επίπεδα μεταγωγέων (πολλά συστήματα σταθμών βάσης να ενώνονται σε ένα MTSO, το οποίο μαζί με άλλα MTSO να ενώνονται σε ένα MTSO δεύτερου επιπέδου κλπ) ανάλογα με το μέγεθος του δικτύου που είναι επιθυμητό να δημιουργηθεί και να “καλυφθεί” με σταθμούς βάσης.

Ανά πάσα στιγμή κάθε συσκευή κινητής τηλεφωνίας που είναι συνδεδεμένη με κάποιο τέτοιο δίκτυο θα ανήκει σε μία συγκεκριμένη κυψελίδα. Αφού όμως η συσκευή αυτή είναι κινητή, θα έχει την δυνατότητα της μετακίνησης. Όταν λοιπόν μία συσκευή απομακρύνεται από την περιοχή του σταθμού βάσης στον οποίο ανήκε, ο σταθμός βάσης αυτός “παρατηρεί” ότι το σήμα εξασθενεί και ελέγχει την στάθμη σήματος που έχει η ίδια συσκευή στους σταθμούς βάσης των γειτονικών κυψελίδων. Αν κάποια από αυτές τις στάθμες είναι υψηλότερη, ο σταθμός βάσης της πρώτης κυψελίδας θα μεταφέρει τον έλεγχο της επικοινωνίας της συσκευής στον σταθμό βάσης της κυψελίδας με την υψηλότερη στάθμη ισχύος λήψης της συσκευής. Ενημερώνεται η συσκευή για την αλλαγή αυτή και, αν υπάρχει κάποια συνομιλία σε εξέλιξη, θα της ζητηθεί να την μεταφέρει σε ένα νέο κανάλι επικοινωνίας (με διαφορετική συχνότητα γιατί, όπως προαναφέρθηκε, κάθε συχνότητα χρησιμοποιείται μόνο μία φορά σε γειτονικές κυψελίδες). Η

διαδικασία αυτή ονομάζεται μεταβίβαση (handoff) και στα συστήματα αυτά (πρώτης γενιάς) απαιτούσε γύρω στα 300miliseconds. Η εκχώρηση των καναλιών αυτών γίνεται από το MTSO, καθιστώντας τους σταθμούς βάσης απλούς αναμεταδότες ραδιοκυμάτων.

Υπάρχουν δύο πιθανοί τρόποι επίτευξης της μεταβίβασης: η ομαλή μεταβίβαση (soft handoff) και η απότομη μεταβίβαση (hard handoff). Ο πρώτος τρόπος, η ομαλή μεταβίβαση, απαιτεί συσκευές που να έχουν την δυνατότητα χρήσης ταυτόχρονα δύο καναλιών επικοινωνίας (να συντονίζονται ταυτόχρονα με δύο συχνότητες, την “παλιά” και την “καινούρια”)²⁰ και ο νέος σταθμός βάσης αποκτά τον έλεγχο της επικοινωνίας της συσκευής πριν διακοπεί η επικοινωνία με τον προηγούμενο, χωρίς να υπάρχει καμία απώλειας σύνδεσης. Ο δεύτερος τρόπος, η απότομη μεταβίβαση, δεν έχει την παραπάνω απαίτηση από τις συσκευές (για ταυτόχρονο συντονισμό σε δύο συχνότητες) αλλά η επικοινωνία με τον πρώτο σταθμό σταματάει πριν επιτευχθεί η επικοινωνία με τον δεύτερο. Αν η επικοινωνία με τον δεύτερο δεν είναι δυνατόν να γίνει εντός ενός μικρού χρονικού διαστήματος η κλήση που πραγματοποιείται αποσυνδέεται και έχουμε πλήρη απώλεια της σύνδεσης.

1.4.1.1 - Κανάλια

Το σύστημα AMPS χρησιμοποιεί 832 πλήρως αμφίδρομα κανάλια, με κάθε κανάλι να αποτελείται από ένα ζεύγος μονόδρομων καναλιών. Υπάρχουν 832 μονόδρομα κανάλια μετάδοσης από τα 824 έως τα 849 Mhz και 832 μονόδρομα κανάλια λήψης από τα 869 έως τα 894 Mhz. Το κάθε ένα από τα κανάλια αυτά έχει εύρος συχνοτήτων 30kHz. Έτσι, η μέθοδος πολύπλεξης είναι FDMA. Στη ζώνη των 800MHz τα ραδιοκύματα έχουν μήκος γύρω στα 40 εκατοστά και ταξιδεύουν σε ευθεία γραμμή ενώ ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, απορροφάται από τα δέντρα, τα φυτά και τα κτίρια και ανακλάται από τα κτίρια και το έδαφος. Ένα σήμα, λοιπόν, που θα σταλθεί από μία κινητή συσκευή θα φθάσει το σταθμό βάσης πολλές φορές, με μικρές χρονικές διαφορές μεταξύ των σημάτων της κάθε φοράς. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε “ηχώ” ή σε παραμόρφωση του σήματος (εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών).

²⁰ Την δυνατότητα αυτή δεν την είχαν ούτε οι συσκευές κινητής τηλεφωνίας 1^{ης} γενιάς ούτε της 2^{ης} γενιάς. Η αναφορά στο σημείο αυτό της εργασίας γίνεται για πιο πλήρη περιγραφή της μεταβίβασης.

Τα 832 κανάλια διαιρούνται σε τέσσερις κατηγορίες:

- Έλεγχος (βάση προς κινητό) για την διαχείριση του συστήματος.
- Ειδοποίηση (βάση προς κινητό) για ενημέρωση των κινητών χρηστών ότι καλούνται,
- Πρόσβαση (αμφίδρομο) για εγκαθίδρυση κλήσεων και εκχώρηση καναλιών.
- Δεδομένα (αμφίδρομο) για φωνή, fax η δεδομένα.

Εικοσιένα από τα κανάλια του συστήματος είναι δεσμευμένα για έλεγχο και είναι καλωδιωμένα σε μία PROM²¹ σε κάθε τηλέφωνο. Επειδή, όπως προαναφέρθηκε, σε γειτονικές κυψέλες δεν επαναχρησιμοποιούνται οι ίδιες συχνότητες, το πραγματικό πλήθος των καναλιών φωνής που είναι διαθέσιμο ανά κυψέλη είναι πολύ μικρότερο των 832 και συνήθως είναι γύρω στα 45.

1.4.1.2 – Διαχείριση Κλήσεων

Κάθε κινητό τηλέφωνο που προορίζεται για σύνδεση στο AMPS θα έχει έναν μοναδικό τριανταδυάμπιτο (32bit) αριθμό σειράς και έναν δεκαψήφιο αριθμό τηλεφώνου στην μνήμη PROM του. Ο αριθμός τηλεφώνου αναπαρίσταται από έναν τριψήφιο υπεραστικό κωδικό με 10bit και έναν επταψήφιο αριθμό συνδρομητή με 24bit. Όταν γίνει η ενεργοποίηση κάποιας συσκευής θα γίνει έρευνα σε όλα τα κανάλια επικοινωνίας που περιέχει η PROM του ως “κανάλια επικοινωνίας” (τα 21 κανάλια που αναφέρθηκαν προηγουμένως) και θα επιλεγεί εκείνο με το ισχυρότερο σήμα. Στην συνέχεια, η συσκευή θα εκπέμψει τον 32bit αριθμό σειράς και τον 34bit αριθμό τηλεφώνου που περιέχει προς τον σταθμό βάσης της επιλογής του, ο οποίος θα τον προωθήσει σε ένα MTSO για την εκχώρηση του καναλιού επικοινωνίας, ενημερώνοντας παράλληλα και τα άλλα MTSO με τα οποία είναι σε σύνδεση για τα νέα δεδομένα, οπότε ενημερώνεται έτσι όλο το δίκτυο για την προσθήκη της νέας συσκευής. Κατά την διάρκεια της κανονικής λειτουργίας μία συσκευής εντός ενός τέτοιου δικτύου, η παραπάνω διαδικασία γίνεται μία φορά ανά 15 περίπου λεπτά, όπου το τηλέφωνο επαναγράφεται στο σύστημα.

²¹ Η μνήμη PROM είναι

Για να κάνει μία κλήση ένας χρήστης του δικτύου αυτού θα πρέπει να πληκτρολογήσει τον αριθμό του χρήστη που θέλει να καλέσει στην συσκευή του και να πατήσει το πλήκτρο της κλήσης. Τότε, η συσκευή θα μεταδώσει τον αριθμό αυτό στο κανάλι πρόσβασης, μαζί με τον δικό της αριθμό. Αν δεν είναι εφικτή η αποστολή αυτή, γίνεται επανεκπομπή αργότερα, μέχρι να επιτευχθεί η επικοινωνία ή να ακυρωθεί η διαδικασία από τον χρήστη. Όταν επιτευχθεί η αποστολή, τα δεδομένα αυτά προωθούνται, από τον σταθμό βάσης, στο MTSO όπου ερευνάται η ύπαρξη του αριθμού προς κλήση. Αν βρεθεί ο αριθμός και είναι σε σύνδεση με μία κυψέλη, ερευνάται ένα ελεύθερο κανάλι (ή “διαδρομή” καναλιών αν απέχουν πολλές κυψέλες μεταξύ τους οι συσκευές μεταξύ των οποίων θα πραγματοποιηθεί η κλήση) για την πραγματοποίηση της κλήσης και όταν αυτό βρεθεί, στέλνεται ο αριθμός του στην συσκευή που πραγματοποιεί την κλήση, η οποία με χρήση του καναλιού αυτού αναμένει τον χρήστη της καλούμενης συσκευής να “σηκώσει” το τηλέφωνο του. Για να βρεθεί όμως ο αριθμός θα πρέπει να είναι σε σύνδεση με κάποιο σταθμό βάσης μέσω του οποίου θα γίνει η επίτευξη της κλήσης με τον καλών.

1.4.2 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2^{ης} γενιάς (2G)

Η δεύτερη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας είναι ψηφιακή ενώ, όπως προαναφέρθηκε, η πρώτη ήταν αναλογική. Όπως, όμως, και στην πρώτη γενιά, δεν υπήρξε κάποιας μορφής παγκόσμιας τυποποίησης, δημιουργήθηκαν διαφορετικά συστήματα ανά χώρα ή περιοχή, επικρατέστερα των οποίων είναι τα: D-AMPS, GSM, CDMA και PDC, όπου στα τρία πρώτα θα γίνει αναφορά παρακάτω. Το PDC χρησιμοποιείται μόνο στην Ιαπωνία και είναι, στην ουσία, το D-AMPS τροποποιημένο ώστε να είναι συμβατό με το Ιαπωνικό σύστημα πρώτης γενιάς (συμβατότητα προς τα πίσω). Ως όρος χρησιμοποιείται μερικές φορές στις διαφημίσεις για να υποδείξει ένα ψηφιακό σύστημα δεύτερης γενιάς. Τέλος, το σύστημα αυτό χρησιμοποιούσε, στην αρχική του υλοποίηση, τη ζώνη των 1900MHz.

Το **D-AMPS** αποτελεί την εξέλιξη του συστήματος AMPS σε πλήρως ψηφιακό²² και περιγράφεται στα πρότυπα IS-54 και το IS-136. Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε έτσι ώστε να

²² Με τον όρο “πλήρως” γίνεται αναφορά στην ύπαρξη αναλογικού σήματος (σήμα φωνής) μέσω ψηφιακών πακέτων που είχαμε στα δίκτυα πρώτης γενιάς.

μπορεί να συνυπάρξει με ένα σύστημα AMPS έτσι ώστε να μπορούν να είναι συνδεδεμένα σε μία κυψέλη κινητές συσκευές πρώτης και δεύτερης γενιάς ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα, έχει το ίδιο εύρος ζώνης συχνοτήτων, 30 kHz, που αντιστοιχεί σε κάθε κανάλι και μάλιστα στις ίδιες συχνότητες κάτι που επιτρέπει σε ένα κανάλι να είναι αναλογικό και τα γειτονικά του να είναι ψηφιακά. Ανάλογα με την ζήτηση που έχουν από τους χρήστες του δικτύου θα αποφασίζεται από το MTSO το είδος της επικοινωνίας (ψηφιακή ή αναλογική) που θα αντιστοιχηθεί σε κάθε κανάλι. Έχει όμως περισσότερες συχνότητες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κανάλια επικοινωνίας μιας και κληρονόμησε τις συχνότητες από το AMPS και του διατέθηκε μία νέα ζώνη συχνοτήτων ώστε να ικανοποιηθεί το αυξημένο φορτίο. Συγκεκριμένα διατέθηκαν οι ζώνες συχνοτήτων στην περιοχή 1850-1910 Mhz για ανερχόμενα κανάλια και στην περιοχή 1930-1990 Mhz για κατερχόμενα κανάλια, σε ζεύγη (όπως και στο AMPS). Στην περιοχή συχνοτήτων στην οποία ανήκουν οι παραπάνω, τα κύματα έχουν μήκος περίπου 16 εκατοστά και έτσι, μία τυπική κεραία θα έχει μήκος το 1/4 του μήκους κύματος, άρα 4 εκατοστά, κάτι που οδήγησε σε μεγάλη μείωση του μεγέθους των κινητών συσκευών. Και οι συσκευές που υποστηρίζουν και τις δύο παραπάνω ζώνες συχνοτήτων (την παλιά στα 850 Mhz και την καινούρια στα 1900 Mhz) έχουν μεγαλύτερο εύρος καναλιών προς επιλογή καθιστώντας λιγότερο πιθανό την απώλεια σύνδεσης σε περίπτωση μεταβίβασης κλήσης από μία κυψέλη σε μία άλλη (handoff).

Σε μία συσκευή προορισμένη να λειτουργεί σε ένα D-AMPS δίκτυο, το σήμα φωνής θα ψηφιοποιείται από το μικρόφωνο και θα συμπιέζεται, μέσω ενός μοντέλου που λαμβάνει υπόψιν του τις ακριβείς ιδιότητες του ανθρώπινου φωνητικού και ακουστικού συστήματος περιορίζοντας το εύρος ζώνης του σήματος, απορρίπτοντας παραδείγματος χάριν, τις πολύ υψηλές συχνότητες, κατεβάζοντας το εύρος ζώνης από τα 56kbps που έχει ένα τυπικό σύστημα PCM κωδικοποίησης στα 8kbps. Το κύκλωμα που πραγματοποιεί την συμπίεση ονομάζεται “κωδικοποιητής φωνής” και ο κύριος λόγος που ενσωματώνεται στις συσκευές κινητής τηλεφωνίας (δηλαδή να γίνεται η συμπίεση στον χρήστη και όχι στον σταθμό βάσης) είναι το γεγονός ότι με μείωση του όγκου δεδομένων που στέλνει κάθε συσκευή αυξάνει, σε χρήστες, την χωρητικότητα του δικτύου. Το κέρδος αυτό γίνεται τόσο μεγάλο στο D-AMPS που τρεις χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ίδιο κανάλι με διαίρεση χρόνου (TDMA). Το κάθε ζεύγος συχνοτήτων υποστηρίζει 25 πλαίσια ανά δευτερόλεπτο των 40 msec το καθένα. Κάθε πλαίσιο διαιρείται σε έξι χρονικές υποδοχές των 6.67msec η κάθε μία, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.3). Κάθε τέτοιο πλαίσιο υποστηρίζει τρεις χρήστες οι οποίοι χρησιμοποιούν με την σειρά τα κανάλια αποστολής και λήψης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του ζευγαριού

καναλιών στην υποδοχή 1 του παραπάνω σχήματος (σχήμα 1.3), ο χρήστης 1 στέλνει προς τον σταθμό βάσης και ο χρήστης 3 λαμβάνει από το σταθμό βάσης. Κάθε τέτοια υποδοχή έχει μήκος 324 bit, από τα οποία τα 64 bit χρησιμοποιούνται για χρόνο προστασίας, συγχρονισμό και έλεγχο. Οπότε στα άλλα 260 bit θα περιέχονται bit δεδομένων του σήματος. Από αυτά, τα 101 χρησιμοποιούνται για διόρθωση σφαλμάτων πάνω από θορυβώδη ασύρματη σύνδεση, απομένοντας 159 bits για το αρχικό σήμα πληροφορίες. Αναφορικά με τα σήματα ομιλίας, με 50 υποδοχές ανά δευτερόλεπτο, το εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο για σήματα συμπιεσμένης ομιλίας είναι λίγο μικρότερο από 8kbps, οπότε η παραπάνω συμπίεση των σημάτων ομιλίας στην συσκευή, πριν την αποστολή στον σταθμό βάσης, δικαιολογείται παραπάνω.

Το D-AMPS χρησιμοποιήθηκε ευρέως στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς στις Η.Π.Α. . Το αντίστοιχο ευρωπαϊκό δίκτυο είναι το GSM²³. Το GSM είναι ένα κοινό Ευρωπαϊκό ψηφιακό σύστημα κινητής τηλεφωνίας για τη δημιουργία του οποίου η μελέτη άρχισε το 1982. Στόχος ήταν η δημιουργία ενός κοινού Ευρωπαϊκού ψηφιακού συστήματος κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς (2nd Generation–2G) που να υποστηρίζει υπηρεσίες τηλεφωνίας και δεδομένων. Αυτό το σύστημα ονομάστηκε GSM. Είναι ένα κυψελοειδές ψηφιακό σύστημα κινητής τηλεφωνίας, το οποίο χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά σήματα και την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαχωρισμό του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων σε ένα αριθμό καναλιών και την διαίρεση αυτών σε χρονοθυρίδες για την μετάδοση σημάτων. Οπότε η πολλαπλή πρόσβαση γίνεται εφικτή με χρήση δύο τεχνικών, της διαίρεσης συχνότητας (FDMA) και της διαίρεσης χρόνου (TDMA²⁴). Αν και αναπτύχθηκε και ξεκίνησε σαν Ευρωπαϊκό πρότυπο, δεν είναι πλέον μόνο Ευρωπαϊκό αφού υιοθετήθηκε από πολλές άλλες χώρες των άλλων Ηπείρων, εκμεταλλευόμενο διάφορες ζώνες συχνοτήτων.

1.4.2.1 Αρχιτεκτονική δικτύου GSM

Ένα GSM δίκτυο είναι ένα ψηφιακό κυψελωτό δίκτυο. Για να μπορεί ένας χρήστης να συνδεθεί με το δίκτυο αυτό και να έχει επικοινωνία με τους υπόλοιπους χρήστες του δικτύου πρέπει να βρίσκεται στην περιοχή που βρίσκεται να υπάρχει ένας σταθμός βάσης (ΣΒ). Ο

²³ Global System for Mobile communications (Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών)

²⁴ Time Division Multiple Access (Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου)

σταθμός αυτός θα ορίζει μία περιοχή κάλυψης. Οπότε, για να εισέλθει μία περιοχή στο GSM δίκτυο διαμελίζεται σε μικρότερες περιοχές, τις “κυψέλες”, και στο κέντρο κάθε κυψέλης εγκαθίσταται ένας σταθμός βάσης. Οι περιοχές αυτές εφάπτονται μεταξύ τους συνθέτοντας έτσι μία κυψελοειδή δομή. Η πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται μέσω της ανάθεσης συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων προς χρήση σε κάθε κυψέλη, με τις γειτονικές κυψέλες να έχουν διαφορετική ζώνη συχνοτήτων ώστε να μην δημιουργείται παρεμβολή μεταξύ τους. Η ακτίνα της κάθε κυψέλης ποικίλει, από μερικές δεκάδες μέτρα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές μέχρι και δεκάδες χιλιόμετρα σε αραιοκατοικημένες με μέγιστη ακτίνα να ορίζονται από τα GSM πρότυπα τα 35 km. Σε περιοχές με πολύ μεγάλη κίνηση δικτύου, όπως σε αστικά κέντρα, οι σταθμοί βάσης υπερφορτώνονται και έτσι υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερη χωρητικότητα του δικτύου. Έτσι για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός γίνεται διάσπαση των υπάρχοντων κυψελών σε μικρότερες, ενώ γι’ αυτές χρησιμοποιούνται σταθμοί βάσης ανάλογης ισχύος (macro ΣΒ - micro ΣΒ - pico ΣΒ κ.α.) όπως σε κτήρια, στο μετρό, Δημόσιους Οργανισμούς και οδικές αρτηρίες.

Υπάρχουν 5 διαφορετικά μεγέθη κυψελών: macro, micro, pico, femto, και umbrella cells (κυψέλες “ομπρέλες”). Η περιοχή κάλυψης κάθε κυψέλης ποικίλει βάση του περιβάλλοντος. Ως macro κυψέλες θεωρούνται οι κυψέλες όπου η κεραία του σταθμού βάσης βρίσκεται σε κάποιο σημείο το οποίο να είναι ψηλότερα από το μέσο ύψος του περιβάλλοντος και είναι οι κυψέλες με την μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης. Στις micro κυψέλες, οι οποίες συναντώνται κυρίως σε αστικές περιοχές, η κεραία βρίσκεται κάτω από το μέσο ύψος του περιβάλλοντος και η περιοχή κάλυψης είναι μικρότερη από αυτήν των macro κυψελών. Οι pico κυψέλες έχουν πολύ μικρότερη περιοχή κάλυψης από αυτή των micro κυψελών φτάνοντας τις μερικές δεκάδες μέτρα και προορίζονται κυρίως για κάλυψη εσωτερικών. Οι femto κυψέλες είναι ειδικά σχεδιασμένες για την κάλυψη μικρών χώρων εκτός GSM δικτύου και συνδέονται με το δίκτυο του κάθε παρόχου μέσω ευρυζωνικής διαδικτυακής σύνδεσης. Τέλος, τις μικρές περιοχές μεταξύ των παραπάνω κυψελών που λόγω ιδιοτήτων της τοπογραφίας του περιβάλλοντος δεν μπορούν να καλυφθούν τις καλύπτουν οι umbrella κυψέλες.

Για την υλοποίηση και σωστή λειτουργία ενός GSM δικτύου, λοιπόν, απαιτεί την ύπαρξη τριών βασικών μερών:

Του Κινητού Σταθμού (Mobile Station): Είναι η συσκευή του χρήστη του GSM δικτύου. Έχει οπωσδήποτε πομπό-δέκτη, κεραία, οθόνη και την κάρτα SIM²⁵, ή αλλιώς, μία συσκευή συμβατή με το GSM δίκτυο και συνδρομή σε κάποιον πάροχο του GSM δικτύου. Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς εκπομπής στην Ευρώπη μιας κινητής μονάδας για τη ζώνη συχνοτήτων GSM 900 (στις ζώνες συχνότητας των GSM δικτύων θα γίνει αναφορά στην παράγραφο 2.2.3) είναι στα 2 Watt ενώ σε Αυστραλία και Αμερική είναι 1,6Watt και για GSM 1800 1 Watt. Οι τιμές αυτές καθορίστηκαν από την Διεθνή Επιτροπή για την προστασία από τη μη ιονίζουσα ακτινοβολία. Βάσει αυτών των τιμών, σε συνδυασμό με δεδομένα μετρήσεων του ιδίου αλλά και τιμών που λαμβάνει από το δίκτυο γίνεται και η επιλογή από τον κάθε κινητό σταθμό του σταθμού βάσης με τον οποίο θα συνδεθεί, καθιστώντας δυνατή την συνεχή επικοινωνία με το δίκτυο εντός της περιοχής κάλυψης του, μέσω του μηχανισμού “handover” (αλλαγή κυψέλης), στον οποίο θα γίνει αναφορά παρακάτω. Και μάλιστα, κάθε κινητός σταθμός έχει τουλάχιστον 6 επιλεγμένες κυψέλες με τις οποίες μπορεί να συνδεθεί με το δυνατότερο σήμα και τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται κατά το handover.

Το Βασικό Υποσύστημα Σταθμού (Base Station Subsystem): Το BSS ή σταθμός βάσης, διαχειρίζεται, όπως προαναφέρθηκε, τις κλήσεις σε μια γεωγραφική περιοχή, την κυψέλη. Το είδος, το μέγεθος και η ισχύς του που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του χώρου στον οποίο θα εγκατασταθεί καθώς και από την προβλεπόμενη κίνηση που θα πρέπει να εξυπηρετεί, καθορίζουν το μέγεθος της κυψέλης. Οι σταθμοί βάσης χωρίζονται στο βασικό σταθμό πομπό-δέκτη (Base Transceiver Station) και στο βασικό σταθμό ελέγχου (Base Station Controller).

- Το Βασικό Υποσύστημα Σταθμού (BTS) φροντίζει την επικοινωνία μεταξύ του δικτύου GSM και του χρήστη. Διαχειρίζεται την κεραία και τα σήματα εκπομπής και λήψης. Ένα BTS μπορεί να ελέγχει μια ή και περισσότερες κεραίες. Η ισχύς των κεραιών σε ένα BTS μπορεί είναι 40W έως 500W, ανάλογα με το μέγεθος της κυψέλης που εξυπηρετούν καθώς και το πλήθος των διαθέσιμων κεραιών του BTS. Το μέγεθος της κυψέλης και η ισχύς των κεραιών είναι μεγέθη ανάλογα. Για την πραγματοποίηση μίας κλήσης ενός συνδρομητή Α προς έναν συνδρομητή Β, ο Α επικοινωνεί με τον σταθμό βάσης της κυψέλης στην οποία βρίσκεται στέλνοντας ένα “αίτημα” επικοινωνίας, ο σταθμός βάσης

²⁵ Subscriber Identity Module (Μονάδα Ταυτότητας Συνδρομητή)

κάνει αναζήτηση του B στο τηλεπικοινωνιακό κέντρο της εταιρίας του. Το τηλεπικοινωνιακό κέντρο εντοπίζει την κυψέλη στην οποία βρίσκεται ο B και του μεταβιβάζει το αίτημα επικοινωνίας ανοίγοντας ένα κανάλι μεταξύ των χρηστών A και B.

Το Υποσύστημα Δικτύου μεταγωγής (NNS- Network Switching Subsystem) είναι το μέρος του GSM δικτύου που συχνά αποκαλείται σαν πυρήνας του δικτύου, είναι παρόμοιο με ένα σταθερό δίκτυο και αποτελείται από:

- Το Κέντρο Διανομής (Mobile Switching Center) που είναι υπεύθυνο για την διασύνδεση, τον έλεγχο και την δρομολόγηση εισερχόμενων/εξερχόμενων κλήσεων μεταξύ του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και ενός (ή και παραπάνω του ενός) άλλου δικτύου. Όταν ένα MSC συνδέεται με ένα δίκτυο σταθερής τηλεφωνίας θα πρέπει να δέχεται 64kbps φωνής, όταν όμως ο MSC συνδέεται με ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας τότε θα πρέπει να γνωρίζει που βρίσκεται εκείνη τη δεδομένη χρονική στιγμή ο χρήστης. Αυτό επιτυγχάνεται με την ύπαρξη δύο βάσεων δεδομένων χρηστών, τις VLR (Visitor Locator Register) και τις HLR (Home Locator Register).
- Η HLR είναι η κεντρική βάση δεδομένων των συνδρομητών του δικτύου και περιέχει στατικά στοιχεία όπως είναι ο εμπορικός συνδρομητικός αριθμός MSISDN (Mobile Subscriber ISDN Number), κάποιες συμπληρωματικές υπηρεσίες (όπως είναι η προώθηση κλήσης ή η απόκρυψη ταυτότητας του) και η ταυτότητα του (IMSI). Επίσης περιλαμβάνονται και στοιχεία δυναμικού περιεχομένου όπως για παράδειγμα το MSC στην οποία βρίσκεται ο συνδρομητής. Τα δυναμικής φύσης στοιχεία ενημερώνονται κάθε φορά που αλλάζουν με την συνδρομή του MSC και της VLR βάσης δεδομένων που περιέχει.
- Οι VLR βάσεις δεδομένων (καταχωρητής θέσης αναζήτησης επισκεπτών ή εικονικό κέντρο εγγραφής χρήστη) αντιστοιχούν από μία σε κάθε MSC και περιέχουν δυναμικά στοιχεία για τους συνδρομητές που είναι συνδεδεμένοι με το MSC στο οποίο ανήκουν.

Τα δεδομένα κάθε συνδρομητή που περιέχει τα διαγράφει, υπό την καθοδήγηση της HLR, όταν αυτός φεύγει από την περιοχή εξυπηρέτησης του MSC, ανακτά από την HLR τα στοιχεία οποιουδήποτε συνδρομητή συνδεθεί με το MSC της και ενημερώνει την HLR για τις αλλαγές των δυναμικών στοιχείων όπως για παράδειγμα για την αλλαγή θέσης ή κατάστασης ενός συνδρομητή.

- Το κέντρο πιστοποίησης (Authentication Centre – AuC) ο ρόλος του οποίου έγκειται στη διαχείριση δεδομένων για την πιστοποίηση της ταυτότητας του χρήστη βάσει των δεδομένων χρηστών που περιέχει, ελέγχοντας τη γνησιότητα των συνδρομητών και συνακόλουθα την πρόσβαση τους στο δίκτυο. Παράλληλα, φροντίζει να υποστηρίξει τη δημιουργία κλειδιών κρυπτογράφησης (Ciphering Key), με τα οποία κωδικοποιείται η πληροφορία όταν μεταδίδεται στον αέρα. Δεδομένου ότι οι υπηρεσίες κρυπτογράφησης και ελέγχου γνησιότητας/πρόσβασης ζητούνται από την HLR, η βάση δεδομένων AUC συνήθως αποτελεί μέρος της HLR.
- Ο Βασικός Σταθμός Ελέγχου (BSC) διαχειρίζεται τα σήματα της κυψέλης και το BTS (ή τα BTS σε σταθμούς βάσης υψηλών απαιτήσεων κίνησης δεδομένων όπου υπάρχουν μικρότερες κυψέλες τις οποίες διαχειρίζεται το ίδιο BSC) παίρνοντας τα από ένα ή περισσότερα BTS καθώς και τα διαθέσιμα κανάλια της κυψέλης. Τα σήματα που λαμβάνει τα κατευθύνει στο MSC (Mobile Switching Centre) και όταν χρειάζεται μετατρέπει τα 16kbps φωνής που είναι στην κινητή τηλεφωνία σε 64kbps που χρησιμοποιείται στην σταθερή τηλεφωνία.
- Τέλος, υπάρχει και η βάση δεδομένων EIR (Equipment Identity Register) η οποία έχει καταχωρημένα τα IMEI (η ταυτότητα της συσκευής σε επίπεδο hardware) όλων των συσκευών οι οποίες είναι καταχωρημένες στο δίκτυο. Δεδομένου ότι μία κάρτα SIM μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιαδήποτε συσκευή, είτε είναι νόμιμα στην κατοχή του χρήστη είτε παράνομα, η EIR λειτουργεί σαν μία βάση ελέγχου της ταυτότητας των συσκευών, ανεξάρτητα από την SIM και τα συνδρομητικά στοιχεία. Ουσιαστικά η EIR προσφέρει λίστες με νόμιμες (white listed) και παράνομες (black listed) συσκευές και

είναι η βάση δεδομένων μέσω της οποίας γίνεται ο εντοπισμός κλεμμένων συσκευών.

Μία πολύ σημαντική δυνατότητα που προσφέρουν τα GSM δίκτυα είναι η αλλαγή καναλιού επικοινωνίας, με τα κανάλια να μπορεί αν ανήκουν στην ίδια κυψέλη ή σε διαφορετικές κυψέλες²⁶ (handover) χωρίς τη διακοπή της λειτουργίας της συσκευής. Σαν handover λοιπόν ορίζεται η εναλλαγή μιας κλήσης που βρίσκεται σε εξέλιξη σε διαφορετικό κανάλι επικοινωνίας, συνήθως όταν η κινητή μονάδα βρίσκεται εν κινήσει, χωρίς τη διακοπή της κλήσης και υπάρχουν διαφορετικοί τύποι handover που μπορούν να γίνουν στο GSM που περιέχουν εναλλαγή κυψέλης. Ο πρώτος αφορά εναλλαγή κυψελών που βρίσκονται υπό τον έλεγχο του ίδιου BSC και χαρακτηρίζονται σαν “εσωτερικά handover” και τα διαχειρίζεται το BSC, ενημερώνοντας το MSC μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Ο άλλος τύπος handover εμπεριέχει εναλλαγή μεταξύ κυψελών που ανήκουν σε διαφορετικά BSC και τα handovers αυτού του τύπου καλούνται εξωτερικά. Αυτά τα διαχειρίζονται τα MSCs ώστε να επιτευχθεί η μεταβίβαση της κλήσης από τον ένα BSC στον άλλο. Επίσης τα handovers μπορούν να ενεργοποιηθούν από το ίδιο το κινητό ή το MSC σαν λύση για την καταπολέμηση της αυξημένης κίνησης σε μια κυψέλη, κάνοντας εναλλαγή μεταξύ των πιθανών κυψελών που έχει αποθηκεύσει η συσκευή (όπως προαναφέρθηκε) ή ακόμα και μεταξύ διαφορετικών καναλιών επικοινωνίας στην ίδια κυψέλη (τρίτος τύπος handover). Οι πληροφορίες αυτές περνάνε στο BSC και στο MSC και χρησιμοποιούνται για τον αλγόριθμο του handover. Βάση του αλγορίθμου αυτού, όταν το σήμα φθίνει πιο κάτω από ένα καθορισμένο όριο, η ισχύς του κινητού αυξάνεται ώστε να αυξηθεί η ισχύς του σήματος και όταν η αύξηση αυτή δεν βελτιώσει το σήμα δημιουργείται νέο handover. Στα διπλής ζώνης (Dual Band) δίκτυα GSM (900GSM-1800GSM) (στις ζώνες συχνότητας των GSM δικτύων θα γίνει αναφορά στην παράγραφο 2.2.3) μπορεί να γίνει ταυτόχρονη χρήση των δύο αυτών συστημάτων με handovers, χωρίς να γίνεται αντιληπτό από τη κινητή μονάδα. Ο συνδρομητής θα πρέπει, όμως, να διαθέτει κινητή μονάδα που να υποστηρίζει τα δύο συστήματα ταυτόχρονα.

1.4.2.2 Χωρητικότητα δικτύου GSM

²⁶ Έχει υπολογιστεί ότι ο μέσος χρόνος παραμονής σε μία κυψέλη μιας κινούμενης μονάδας είναι 4,5 λεπτά.

Για να υπολογιστεί η τηλεφωνική "κίνηση" χρησιμοποιείται μια μονάδα μέτρησης, το Erlang. Ένα Erlang δείχνει το φορτίο κίνησης που μεταφέρεται από ένα κανάλι που είναι δεσμευμένο. Αν, δηλαδή, ένα κανάλι χρησιμοποιείται για μία ώρα και 30 λεπτά, κατά την διάρκεια μιας ώρας μεταφέρει 5 Erlangs. Εάν Q κλήσεις, μέσης διάρκειας T , πραγματοποιούνται κατά το χρονικό διάστημα t , τότε η τηλεφωνική κίνηση A δίνεται από τη σχέση:

$$A = \frac{Q \cdot T}{t} \text{ Erlangs}$$

1.4.2.3 Ζώνες συχνοτήτων δικτύου GSM

Τα δίκτυα GSM, όπως και όλων των ειδών τα δίκτυα επικοινωνίας, έχουν δυνατότητα λειτουργίας σε κάποιες συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων. Οι ζώνες αυτές στη συνέχεια χωρίζονται σε κανάλια συχνοτήτων, τα οποία με τη σειρά τους χωρίζονται σε χρονοθυρίδες που αποτελούν τα κανάλια επικοινωνίας των χρηστών με τους σταθμούς βάσης. Έτσι, για κάθε συχνότητα δημιουργούνται οκτώ κανάλια πλήρους ρυθμού, ή 16 μισού ρυθμού ανά συχνότητα και η τεχνική πολύπλεξης που χρησιμοποιείται είναι TDMA/FDD.

GSM 900: Η πρώτη ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιήθηκε για τα δίκτυα GSM ήταν η ζώνη των 900MHz. Τα δίκτυα αυτά άρχισαν να λειτουργούν το 1990 και η Διεθνής ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) όρισε σαν ζεύγη συχνοτήτων λειτουργίας των δικτύων αυτών τις ζώνες 890-915 MHz και 935-960 MHz. Η ζώνη συχνοτήτων 890-915 MHz ορίστηκε σαν η ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιεί η κινητή συσκευή για την επικοινωνία της με τον σταθμό βάσης (Up Link) ενώ η ζώνη 935-960 MHz σαν η ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιεί ο σταθμός βάσης για την επικοινωνία του με τις κινητές συσκευές (Down Link). Κάθε μία από αυτές τις ζώνες συχνοτήτων, εύρους 25MHz, υποδιαιρούνται σε 125 κανάλια, κάθε ένα από τα οποία έχει εύρος ζώνης συχνοτήτων 200kHz, από τα οποία τα 124 κανάλια χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία των σταθμών βάσης με τις κινητές συσκευές (και αντίστροφα), ενώ 1 κανάλι μένει ελεύθερο.

GSM 1800: Η εξέλιξη του GSM-900 έγινε ένα χρόνο αργότερα, το 1991, χρονιά που αναπτύχθηκε το σύστημα GSM-1800 (που σε κάποιες χώρες ονομάζεται "Digital Cellular System 1800" (DCS-1800) που ήταν και το πρώτο όνομα που δόθηκε στα δίκτυα αυτά, με την αλλαγή του σε GSM-1800 να λαμβάνει χώρα στα τέλη της δεκαετίας του 1990 που η GSM World Association αποφάσισε να μετονομάσει το DCS-1800 σε GSM-1800 για να φανεί η δυναμικότητα και η παγκοσμιότητα του GSM.). Το σύστημα αυτό έχει την ίδια δομή με το GSM-900 με την ειδοποιό διαφορά να είναι οι ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται. Όπως γίνεται φανερό και από το όνομα του εν λόγω δικτύου, οι ζώνες αυτές είναι στην περιοχή των 1800MHz και συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η ζώνη των 1710-1785MHz για Up Link και η ζώνη των 1805-1880MHz για Down Link. Το εύρος των ζωνών αυτών είναι 75MHz και, όπως και στο GSM-900 χωρίζονται σε κανάλια των 200kHz, δημιουργώντας έτσι 375 κανάλια επικοινωνίας (με τα 374 κανάλια να χρησιμοποιούνται και 1 να μένει ελεύθερο), αυξάνοντας έτσι την χωρητικότητα του δικτύου σχεδόν τρεις φορές.

GSM 1900: Λόγω της συνεχώς αυξανόμενης ανάπτυξης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας και της ανάγκης για αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων αυτών, δημιουργήθηκε το PCS-1900, το οποίο, όπως και το DCS-1800, αργότερα μετονομάστηκε σε GSM-1900, το οποίο, με την ίδια δομή με τα παλαιότερα GSM δίκτυα, χρησιμοποιεί ζώνες συχνοτήτων στην περιοχή των 1900MHz. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οι ζώνες 1850-1910MHz και 1930-1990MHz, με την πρώτη να χρησιμοποιείται για Up Link και η δεύτερη για Down Link. Οι ζώνες αυτές, με εύρος 60MHz, υποδιαιρούνται, όπως και στα GSM-900 και GSM-1800, σε κανάλια εύρους 200kHz, δημιουργώντας έτσι 300 διαθέσιμα κανάλια επικοινωνίας, με τα 299 κανάλια να χρησιμοποιούνται και 1 να μένει ελεύθερο.

E-GSM (Extended-GSM 900 - Εκτεταμένη ζώνη GSM): Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ραδιοεπικοινωνιών επέκτεινε το αρχικό GSM-900 δίκτυο και δημιούργησε το E-GSM, με σκοπό την αντικατάσταση του για την αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η δομή του δικτύου διατηρήθηκε ως είχε ενώ οι ζώνες συχνοτήτων 890-915 MHz και 935-960 MHz που χρησιμοποιούσε το GSM-900 επεκτάθηκαν/αντικαταστάθηκαν από τις ζώνες 880-915 MHz και 925-960 MHz, αυξάνοντας τον αριθμό των διαθέσιμων καναλιών κατά 50, επιτρέποντας την αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων ώστε να ικανοποιηθούν οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες από την αυξημένη κίνηση των χρηστών των

δικτύων αυτών.

1.4.2.4 Φυσικά και Λογικά κανάλια του δικτύου GSM

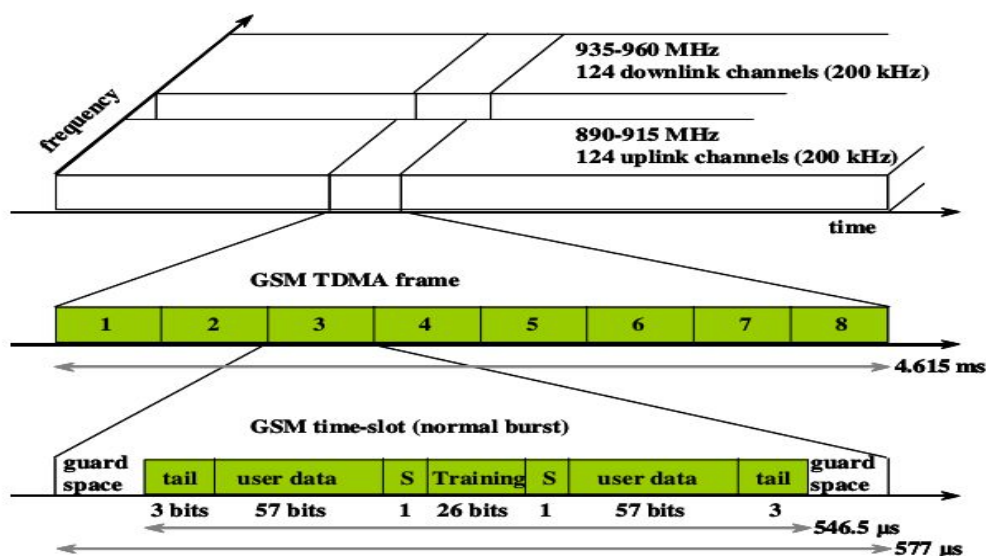
Η επικοινωνία των κινητών συσκευών με τους σταθμούς βάσης πραγματοποιείται, όπως προαναφέρθηκε, με χρήση των καναλιών επικοινωνίας που έχουν οριστεί για κάθε δίκτυο. Τα κανάλια αυτά ονομάζονται “Φυσικά Κανάλια” και κάθε ένα από αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία μίας κινητής συσκευής με έναν σταθμό βάσης. Κάθε κανάλι επικοινωνίας καταλαμβάνει, όπως προαναφέρθηκε, ένα εύρος συχνοτήτων 200 kHz και στο σύνολο του διαθέσιμου εύρους ζώνης συχνοτήτων προκύπτουν:

- 124 full duplex κανάλια για το GSM 900 και επιπλέον 50 κανάλια για το E-GSM.
- 374 full duplex κανάλια για το GSM 1800.
- 299 full duplex κανάλια για το GSM 1900.

Σε κάθε κανάλι ανατίθεται ένας μοναδικός αριθμός καναλιού, ο οποίος ονομάζεται Absolute Radio Frequency Channel Number (ARFCN) και χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση των διαφόρων καναλιών που έχει κάθε δίκτυο. Κάθε τέτοιο κανάλι διαιρείται σε οκτώ χρονοθυρίδες (TS-Time Slots), κάθε μία από τις οποίες έχει διάρκεια 577 μ sec και ορίζει την έννοια του “Φυσικού Καναλιού”. Τα οκτώ TS ορίζουν ένα πλαίσιο (frame) του οποίου η διάρκεια είναι 4.615 msec. Η δομή αυτή, για το GSM-900 παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.3).

Όμως, οι πληροφορίες που μεταδίδονται μέσω αυτών των καναλιών είναι ποικίλων ειδών, που μπορεί να είναι, γενικά, δεδομένα για επικοινωνία μεταξύ των χρηστών του δικτύου, που χαρακτηρίζονται σαν “Συνδρομητικά Δεδομένα” και δεδομένα ελέγχου και σηματοδοσίας μεταξύ των χρηστών και του δικτύου, που χαρακτηρίζονται ως “Μηνύματα Σηματοδοσίας”. Για

την μετάδοση των δεδομένων αυτών ορίζονται κάποια λογικά κανάλια, που ανάλογα με το είδος των δεδομένων για την μετάδοση των οποίων χρησιμοποιούνται, ομαδοποιούνται σε δύο γενικές κατηγορίες:



Σχήμα 1.3 - GSM 900 Φυσικά Κανάλια

Κανάλια Δεδομένων (Traffic Channels-TCH): Τα λογικά αυτά κανάλια χρησιμοποιούνται για την μεταφορά συνδρομητικών δεδομένων, και ανάλογα με τον ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να υποστηριχθεί διακρίνονται σε:

- Λογικά κανάλια πλήρους ρυθμού (Full rate, TCH/F), των οποίων ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας είναι 22.8kbps και
- Λογικά κανάλια μισού ρυθμού (Half rate, TCH/H), των οποίων ο ρυθμός μετάδοσης είναι 11.4kbps.

Κανάλια Σηματοδοσίας/Ελέγχου (Signalling/Control Channels): Τα λογικά αυτά κανάλια χρησιμοποιούνται για την μεταφορά μηνυμάτων ελέγχου και σηματοδοσίας μεταξύ της κινητής συσκευής και του δικτύου. Ανάλογα με την λειτουργικότητα των μηνυμάτων για τα οποία χρησιμοποιούνται, τα λογικά κανάλια Σηματοδοσίας/Ελέγχου διακρίνονται στις εξής τρεις γενικές κατηγορίες:

Κανάλια Ευρείας Μετάδοσης (Broadcast CHannels, BCH): Τα κανάλια αυτά μεταδίδονται σε μία και μόνο συχνότητα σε κάθε κελί, συγκεκριμένη για κάθε δίκτυο, και η πληροφορία που μεταδίδεται μέσω αυτών αφορά την εισαγωγή νέων χρηστών στο δίκτυο. Υπάρχουν τρία διαφορετικά BCH κανάλια:

- **Frequency Correction CHannel (FCCH):** Το κανάλι αυτό μεταδίδει μόνο λογικά “0”. Η μετάδοση των “0” αυτών χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της φέρουσας συχνότητας του BCH από την κινητή συσκευή για να συντονιστεί στην συχνότητα του BCH ώστε, μέσω των λογικών καναλιών SCH και BCCH, να ανακτήσει σημαντικές πληροφορίες για την εισαγωγή του στο δίκτυο.
- **Synchronization CHannel (SCH):** Αφού έχει συγχρονιστεί η κινητή συσκευή στο BCH, μέσω των λογικών αυτών καναλιών μεταδίδεται πληροφορία για τον αριθμό του TDMA πλαισίου, επιτρέποντας τον συντονισμό της κινητής συσκευής σε επίπεδο πλαισίου, καθώς και πληροφορία για την ταυτότητα του Βασικού Υποσυστήματος Σταθμού (BTS).
- **Broadcast Control CHannel (BCCH):** Έχοντας εγκαθιδρυθεί η επικοινωνία της κινητής συσκευής με το δίκτυο, μέσω του λογικού αυτού καναλιού μεταφέρονται πληροφορίες σχετικά με την ταυτότητα της περιοχής θέσης, την μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ στο συγκεκριμένο κελί, τις διαθέσιμες συχνότητες των καναλιών που χρησιμοποιούνται από το κελί αυτό, τις συχνότητες που χρησιμοποιούν τα γειτονικά κελιά για τα BCH κανάλια τους, στοιχεία για τη χρήση του CCCH καναλιού κ.α. .

Κοινόχρηστα Κανάλια Ελέγχου (Common Control CHannels, CCCH) : Τα Κοινόχρηστα Κανάλια Ελέγχου χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ της κινητής συσκευής και του δικτύου, χρησιμοποιώντας την ίδια συχνότητα με τα BCH, και μπορεί να τα χρησιμοποιήσει οποιοσδήποτε χρήστης του δικτύου, είναι “κοινόχρηστα”, σε αντίθεση με τα Αφιερωμένα Κανάλια Ελέγχου που θα αναφερθούν παρακάτω και τα οποία αποδίδονται από το δίκτυο σε κάποιο συγκεκριμένο χρήστη. Τα CCCH κανάλια χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες είναι:

- **Paging CHannel (PCH):** Τα κανάλια αυτά χρησιμοποιούνται από τις κινητές συσκευές ανά τακτά χρονικά διαστήματα για τον έλεγχο πιθανών εισερχόμενων κλήσεων και μηνυμάτων (SMS). Τα μηνύματα που μεταδίδονται μέσω των καναλιών αυτών περιέχει το IMSI της κινητής συσκευής έτσι ώστε να γίνει η αναγνώριση του αποδέκτη της κλήσης ή του μηνύματος. Τα κανάλια αυτά, μιας και χρησιμοποιούνται μόνο για την μετάδοση μηνυμάτων πληροφορίας από το δίκτυο προς την κινητή συσκευή χρησιμοποιούν την Down Link συχνότητα.
- **Random Access CHannel (RACH):** Το είδος των καναλιών αυτών χρησιμοποιείται από την κινητή συσκευή για να αιτηθεί ένα αφιερωμένο κανάλι ελέγχου/σηματοδοσίας από το δίκτυο και, ανάλογα με την περίπτωση των PCH, αφού χρησιμοποιείται μόνο από τις κινητές συσκευές για την αποστολή μηνυμάτων προς το δίκτυο, χρησιμοποιούν μόνο την Up Link συχνότητα.
- **Access Grant CHannel (AGCH):** Όταν μία κινητή συσκευή έχει χρησιμοποιήσει ένα RACH κανάλι και έχει αιτηθεί ένα αφιερωμένο κανάλι ελέγχου/σηματοδοσίας, μέσω των καναλιών αυτών (AGCH) το δίκτυο της αποδίδει το κανάλι που αιτήθηκε (αν είναι διαθέσιμο). Χρησιμοποιούνται μόνο για την μετάδοση μηνυμάτων από το δίκτυο προς τους χρήστες και άρα χρησιμοποιεί μόνο τις Down Link συχνότητες.

Αφιερωμένα Κανάλια Ελέγχου (Dedicated Control CHannels, DCCH) : Η τελευταία

κατηγορία λογικών καναλιών ελέγχου/σηματοδοσίας είναι τα DCCH. Τα κανάλια αυτά, όπως προαναφέρθηκε, αποδίδονται από το δίκτυο σε κάποιο συγκεκριμένο χρήστη ο οποίος αιτήθηκε την χρήση ενός τέτοιου και, ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζονται, χωρίζονται με τη σειρά τους στις εξής τρεις κατηγορίες:

- **Stand alone Dedicated Control CHannel (SDCCH):** Τα λογικά αυτά κανάλια χρησιμοποιούνται για την εγκαθίδρυση κλήσης (call setup) καθώς και για την μετάδοση μηνυμάτων (SMS), όταν η κινητή συσκευή δεν είναι κατειλημμένη. Χρησιμοποιεί και τις Down Link και τις Up Link συχνότητες και όταν η διαδικασία εγκαθίδρυσης της κλήσης ολοκληρωθεί, αποδίδεται στην συσκευή ένα συγκεκριμένο TCH για την κλήση αυτή.
- **Slow Associated Control CHannel (SACCH):** Τα λογικά αυτά κανάλια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητα, αλλά συνδέονται με ένα SDCCH ή ένα TCH έτσι ώστε να σταλούν δεδομένα σχετικά με την επικοινωνία της κινητής συσκευής με το δίκτυο. Χρησιμοποιούν και το Down Link και το Up Link του καναλιού με το οποίο συνδέεται και μέσω του Down Link η κινητή συσκευή λαμβάνει εντολές σχετικά με την ισχύ εκπομπής του (power control commands) καθώς και τον χρόνο εκπομπής του (timing advance) ενώ μέσω του Up Link η κινητή συσκευή στέλνει αποτελέσματα μετρήσεων από το τρέχον BTS καθώς και από γειτονικά. Μία χρήση των δεδομένων αυτών είναι η μεταφορά της κινητής συσκευής σε άλλο σταθμό βάσης (Handover).
- **Fast Associated Control CHannel (FACCH):** Αν παρθεί απόφαση μεταφοράς της μίας κινητής συσκευής από έναν σταθμό βάσης σε έναν άλλο (handover) τότε χρησιμοποιείται το είδος των λογικών αυτών καναλιών ώστε να ολοκληρωθεί η διαδικασία της μεταφοράς. Το είδος αυτό του καναλιού έχει μία ιδιαιτερότητα: όταν χρησιμοποιείται, χρησιμοποιεί χρονικές θυρίδες δεδομένων και όχι ελέγχου/σηματοδοσίας.

Όπως γίνεται φανερό από τα παραπάνω, κάθε Φυσικό κανάλι χρησιμοποιείται από περισσότερες της μία κατηγορίες Λογικών καναλιών που αναφέρθηκαν παραπάνω και μάλιστα

από συγκεκριμένους συνδυασμούς. Οι πιθανοί συνδυασμοί λογικών καναλιών μπορεί να είναι οι παρακάτω:

$$(i) TCH/F+FACCH/F+SACCH/F$$

$$(ii) TCH/H(0,1)+FACCH/H(0,1)+SACCH/H(0,1)$$

$$(iii) TCH/H+FACCH/H+SACCH/H$$

$$(iv) FCCH+SCH+BCCH+CCCH$$

$$(v) FCCH+SCH+BCCH+CCCH+SDCCH/4+SACCH/4$$

$$(vi) BCCH+CCCH$$

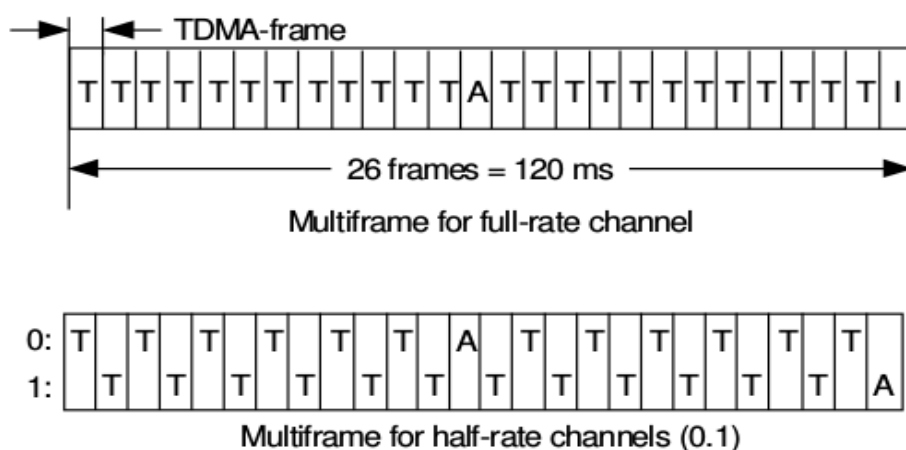
$$(vii) SDCCH/8+SACCH/8$$

Κάθε ένας από τους προαναφερόμενους συνδυασμούς αντιστοιχεί σε ένα φυσικό κανάλι ως εξής:

- **Συνδυασμός (i):** Ο συνδυασμός αυτός αφορά τα κανάλια πλήρους ρυθμού μετάδοσης και, σε μία περίοδο 26 επαναλήψεων του ίδιου TS, στις 24 από αυτές μεταφέρονται δεδομένα συνδρομητών, την μία μεταφέρονται δεδομένα ελέγχου/σηματοδοσίας και η μία δεν χρησιμοποιείται.
- **Συνδυασμός (ii):** Ο συνδυασμός αυτό αφορά κανάλια δεδομένων μισού ρυθμού μετάδοσης και, σε μία περίοδο 26 επαναλήψεων χρησιμοποιείται το ίδιο TS 12 φορές για την μετάδοση δεδομένων και μία φορά για την μετάδοση δεδομένων ελέγχου/σηματοδοσίας και, στην ίδια περίοδο, γίνεται η ίδια χρήση για τις υπόλοιπες 13 φορές από άλλο χρήστη του δικτύου.

Το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.4) αναπαριστά τα προαναφερόμενα με τους ακόλουθους συμβολισμούς: το T αντιστοιχεί στο TS δεδομένων, το A στο TS ελέγχου/σηματοδοσίας και το I (Idle) στο TS το οποίο δε χρησιμοποιείται. Το πάνω σχήμα αναφέρεται στον συνδυασμό (i),

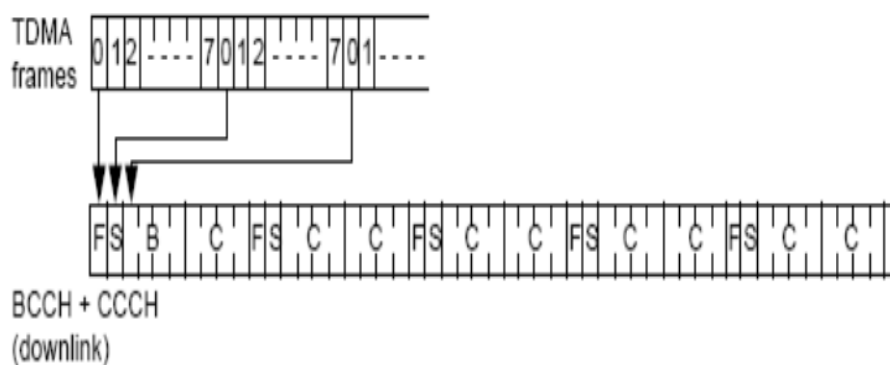
όπου η χρήση του καναλιού γίνεται από έναν χρήστη ενώ το κάτω στον συνδυασμό (ii), όπου η χρήση του καναλιού γίνεται από δύο χρήστες στην ίδια περίοδο (όχι όμως ταυτόχρονα, όπως φαίνεται και στο σχήμα).



Σχήμα 1.4 – Αντιστοιχία Φυσικών σε Λογικά κανάλια για τους συνδυασμούς (i) και (ii)

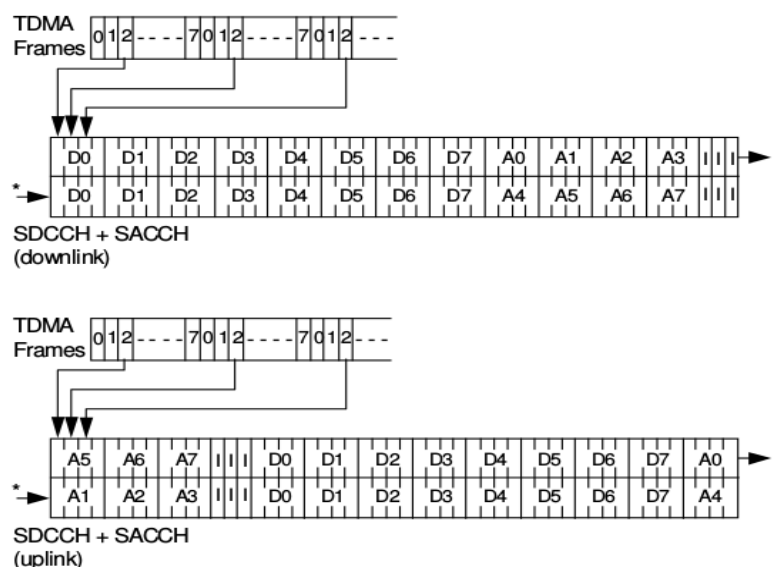
- **Συνδυασμός (iii):** Ο συνδυασμός αυτός είναι ανάλογος του συνδυασμού (ii) με τη διαφορά ότι δύο κανάλια μισού ρυθμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον ίδιο χρήστη, αλλά για μετάδοση διαφορετικών ειδών δεδομένων, π.χ. παράλληλη μετάδοση φωνής και δεδομένων.
- **Συνδυασμός (iv):** Ο συνδυασμός αυτός αφορά την φυσική υλοποίηση των BCH καναλιών ως εξής: Στο TS 0 (πρώτη χρονοθυρίδα του πλαισίου), σε μία Down Link συχνότητα, μεταδίδεται πληροφορία με χρήση των λογικών καναλιών FCCH, SCH, BCCH και CCCH. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.5) όπου τα παραπάνω λογικά κανάλια σημειώνονται ως F, S, B και C αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, στην διάρκεια 51 πλαισίων, η συγκεκριμένη χρονοθυρίδα (TS 0) χρησιμοποιείται πέντε φορές ως FCCH λογικό κανάλι, πέντε φορές ως SCH, τέσσερις φορές ως BCCH και 36 φορές (4x9) ως CCCH (δηλαδή PCH και AGCH). Στο ίδιο TS, στην αντίστοιχη

Up Link συχνότητα, χρησιμοποιείται ως RACH λογικό κανάλι.



Σχήμα 1.5 – Αντιστοιχία Φυσικών σε Λογικά κανάλια για τον συνδυασμό (iv)

- **Συνδυασμός (v):** Ο συνδυασμός αυτός αποτελεί μια παραλλαγή του συνδυασμού (iv) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές με μικρή τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Σε αυτές τις περιπτώσεις το TS 0 χρησιμοποιείται τόσο για την υποστήριξη BCH όσο και DCCH καναλιών προκειμένου να εξοικονομηθούν TCH.
- **Συνδυασμός (vi):** Ο συνδυασμός αυτός υποστηρίζει την χρήση ως BCCH και CCCH λογικών καναλιών στις χρονοθυρίδες 2,4 και 6, και σε περιπτώσεις όπου υπάρχει αυξημένη κίνηση δεδομένων λειτουργεί παράλληλα με τον συνδυασμό (iv).



Σχήμα 1.6 – Αντιστοιχία Φυσικών σε Λογικά κανάλια για τον συνδυασμό (vii)

- Συνδυασμός (vii) :** Ο συνδυασμός αυτός αφορούν κανάλια ελέγχου/σηματοδοσίας όπου, σε μία περίοδο 51 επαναλήψεων της ίδιας χρονοθυρίδας (παραδείγματος χάριν της TS-2 όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6), η οποία χρησιμοποιείται από μία φορά από οκτώ διαφορετικούς χρήστες για την μεταφορά δεδομένων σηματοδοσίας (D0,D1,...,D7 στο σχήμα 1.6) και, παράλληλα, η ίδια χρονοθυρίδα χρησιμοποιείται από τέσσερις φορές από τους προηγούμενους οκτώ χρήστες (A0, A1, A2, ...,A7) για την μετάδοση δεδομένων μετρήσεων, χρησιμοποιώντας την Up Link συχνότητα της ή εντολές ελέγχου ισχύος χρησιμοποιώντας την Down Link συχνότητα.

1.4.2.5 – Μέθοδος CDMA

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι μέθοδοι πολύπλεξης που χρησιμοποιούνται από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς, στο D-AMPS και στο GSM είναι η διαίρεση χρόνου (TDMA) και διαίρεση συχνότητας (FDMA). Υπάρχει όμως και μία τρίτη μέθοδος πολύπλεξης, η Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Κώδικα (CDMA-Code Division Multiple

Access) η οποία λειτουργεί εντελώς διαφορετικά. Στην μέθοδο αυτή δεν χρειάζεται να διαιρεθεί το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων του δικτύου (ή της κυψέλης) σε ένα πλήθος στενών καναλιών, κάθε ένα από τα οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο ένας χρήστης (FDMA) ή να οριστούν χρονοθυρίδες σε κάθε κανάλι, με κάθε χρονοθυρίδα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από έναν χρήστη (TDMA). Στην CDMA μέθοδο κάθε σταθμός μπορεί να μεταδίδει συνεχώς, σε όλο το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων χρησιμοποιώντας έναν μοναδικό κωδικό και ο διαχωρισμός των σημάτων γίνεται με βάση τη θεωρία κωδικοποίησης.

Μία αναλογία για το πως λειτουργεί κάθε τεχνική είναι η εξής: Θεωρούμε ότι έχουμε μία αίθουσα με πολλούς ανθρώπους, οι οποίοι συζητούν μεταξύ τους. Στην τεχνική TDMA, κάθε άνθρωπος μιλάει για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, στο οποίο οι υπόλοιποι απλά τον ακούν, περιμένοντας την σειρά τους για να μιλήσουν, με τους ανθρώπους να είναι διεσπαρμένοι σε όλο τον χώρο. Στην τεχνική FDMA, οι άνθρωποι είναι σε διαφορετικά, χωριστά σημεία του χώρου έτσι ώστε να μην ακούν τους άλλους που μιλάνε και σε κάθε σημείο γίνεται και μία συγκεκριμένη συζήτηση. Στην τεχνική CDMA, οι άνθρωποι βρίσκονται σε όλα τα σημεία του χώρου, χωρίς διαχωρισμούς, και μπορούν να μιλάνε ταυτόχρονα, αλλά σε διαφορετικές γλώσσες. Οπότε, αν γίνεται μία συζήτηση στα Ελληνικά ταυτόχρονα με μία άλλη που γίνεται στα Αγγλικά, αυτοί που μιλάνε Αγγλικά και αυτοί που μιλάνε Ελληνικά μιλάνε ταυτόχρονα, αλλά καταλαβαίνουν μόνο την δική τους γλώσσα και την συζήτηση που πραγματοποιείται στα Αγγλικά την εκλαμβάνουν σαν θόρυβο.

Στην μέθοδο CDMA, το κάθε ψηφίο (bit) που θα αποσταλεί χωρίζεται σε μικρότερα διαστήματα, τα οποία ονομάζονται “θραύσματα” (chips). Συνήθως αντιστοιχούν 64 ή 128 θραύσματα ανά ψηφίο. Σε κάθε σταθμό εκχωρείται ένας μοναδικός συνδυασμός θραυσμάτων, που ονομάζεται “ακολουθία θραυσμάτων” (chip sequence), που κωδικοποιεί το ψηφίο “1”. Οπότε, για την μετάδοση του “1”, ο σταθμός θα στείλει την ακολουθία θραυσμάτων που του έχει εκχωρηθεί και είναι μοναδική, ενώ για την μετάδοση του “0” θα στείλει το συμπλήρωμα ως προς ένα της παραπάνω ακολουθίας. Σύμφωνα με τα παραπάνω, για να σταλεί η ίδια ποσότητα πληροφορίας που περιέχουν b ψηφία, με μία ακολουθία θραυσμάτων μεγέθους m θραυσμάτων, θα πρέπει να αποσταλούν $m \cdot b$ θραύσματα. Οπότε, για να σταλεί η ίδια ποσότητα πληροφορίας στον ίδιο χρόνο θα πρέπει να αυξηθεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης κατά έναν παράγοντα m και για τον λόγο αυτό η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται ως μία μορφή επικοινωνίας με εξάπλωση

φάσματος. Έχοντας όμως διαθέσιμο όλο το φάσμα συχνοτήτων του δικτύου αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, καθιστώντας την μέθοδο αυτή ανώτερη των άλλων δύο. Παραδείγματος χάριν, σε ένα δίκτυο με διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων 1MHz, με την τεχνική FDMA, για 100 σταθμούς, σε κάθε σταθμό θα αντιστοιχούσε εύρος 10kHz και, θεωρώντας ένα bit ανά Hz, ο κάθε σταθμός θα μπορούσε να έχει ρυθμό μετάδοσης 10kbps. Με την CDMA τεχνική, κάθε σταθμός θα μπορεί να χρησιμοποιεί όλο το διαθέσιμο εύρος των 1MHz και, για τους παραπάνω 100 σταθμούς, θα απαιτούνταν τουλάχιστον 100 μοναδικές ακολουθίες θραυσμάτων, άρα η κάθε ακολουθία να αποτελείται από τουλάχιστον 7 θραύσματα ($7^2=128$ μοναδικοί κωδικοί) και ο ρυθμός με τον οποίο θα μπορεί να στέλνει κάθε σταθμός θα είναι μεγαλύτερος κατά, τουλάχιστον, μία τάξη μεγέθους. Ο ίδιος ρυθμός αποστολής, με την περίπτωση των 100 σταθμών της τεχνικής FDMA θα αντιστοιχεί σε ακολουθία 100 θραυσμάτων, δίνοντας δυνατότητα πλήθους συνδεδεμένων χρηστών στο συγκεκριμένο δίκτυο της τάξης των 10^{30} . Οπότε, από την παραπάνω ανάλυση γίνεται φανερή η μεγάλη αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου που μπορεί να επιτευχθεί με την μέθοδο CDMA.

Η μέθοδος αυτή, αν και έχει προταθεί από το 1935 από τον καθηγητή Dmitriy V. Ageev, άρχισε αρκετά αργότερα να χρησιμοποιείται, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων υπολογιστικής ισχύος από τις συσκευές που υλοποιούνται. Άρχισε να χρησιμοποιείται από το 1958, πειραματικά, στην Σοβιετική Ένωση, στην οποία μέχρι το 1970 χρησιμοποιούνταν σε 30 πόλεις για την υλοποίηση δικτύου ασύρματων τηλεφώνων σε αυτοκίνητα. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η πρώτη εφαρμογή της ήταν στο σύστημα GPS (Global Positioning System). Για την εισαγωγή της στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας υπεύθυνη είναι η εταιρία Qualcomm η οποία επέμενε στην ανάπτυξη της μεθόδου αυτής και η οποία την ανέπτυξε σε σημείο που, όχι μόνο να είναι υλοποιήσιμη και κατάλληλη για τα δίκτυα αυτά αλλά και να αποτελέσει, όπως θα δειχθεί παρακάτω, την βάση για την μετέπειτα εξέλιξη των δικτύων αυτών και συγκεκριμένα της εξέλιξης από τα δίκτυα δεύτερης γενιάς στα δίκτυα τρίτης. Το πρότυπο με το οποίο περιγράφεται η μέθοδος που χρησιμοποιείται από τα 2G δίκτυα είναι το IS-95 της Qualcomm και η εμπορική της ονομασία είναι “cdmaOne”.

1.4.2.6 - Εξέλιξη των δικτύων δεύτερης γενιάς (2G+)

Όπως προαναφέρθηκε, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς υλοποιήθηκαν με χρήση των τεχνολογιών D-AMPS, GSM, CDMA και PDC. Από αυτές, κάποιες εξελίχθηκαν και κάποιες παραγκωνίστηκαν και αντικαταστάθηκαν από άλλες. Το PDC χρησιμοποιούνταν μόνο στην Ιαπωνία και συνεχώς μειώνονταν οι χρήστες των δικτύων αυτού του τύπου, με αποτέλεσμα την αντικατάσταση των δικτύων αυτών από δίκτυα τρίτης γενιάς, οπότε το PDC σταμάτησε να υφίσταται σαν χρησιμοποιούμενη τεχνολογία. Την ίδια μοίρα είχε και το D-AMPS, το οποίο αντικαταστάθηκε είτε από το GSM, είτε από τεχνολογίες τρίτης γενιάς. Η εξέλιξη της μεθόδου πολύπλεξης CDMA είναι το W-CDMA, το οποίο χρησιμοποιείται από τα UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) συστήματα, τα οποία ανήκουν στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς, και αναφορά σε αυτό θα γίνει σε επόμενη παράγραφο και του συστήματος IT-95 (το δίκτυο δεύτερης γενιάς που χρησιμοποιεί την CDMA μέθοδο) η εξέλιξη είναι το CDMA2000, τεχνολογία τρίτης γενιάς στην οποία, εξίσου, θα γίνει αναφορά σε επόμενη παράγραφο.

Η εξέλιξη των δικτύων δεύτερης γενιάς έγινε με την εξέλιξη του GSM. Η εξέλιξη αυτού ήταν, αρχικά η τεχνολογία GPRS (General Packet Radio Service) και στην συνέχεια το EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution). Οι τεχνολογίες αυτές είναι τεχνολογίες δεύτερης γενιάς, αλλά “πλησιάζουν” τις τεχνολογίες τρίτης γενιάς σε χωρητικότητα δικτύου, υποστηριζόμενους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και παρεχόμενες υπηρεσίες. Ονομάστηκαν 2.5G και 2.7G, οι οποίες όμως είναι ανεπίσημες ονομασίες για καθαρά εμπορικούς σκοπούς, σε αντίθεση με τις ονομασίες 2G και 3G, οι οποίες έχουν καθοριστεί από πρότυπα της ITU (International Telecommunication Union). Είναι η μεταβατική διαδικασία αναβάθμισης των υπάρχοντων δικτύων GSM 2G με σκοπό την αύξηση χωρητικότητας του δικτύου και την προσφορά περισσότερων και ποιοτικότερων υπηρεσιών, παρόμοιων με αυτές των δικτύων τρίτης γενιάς.

- **Τεχνολογία GPRS (2.5G) - (General Packet Radio Service):** Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στο GSM δημιουργείται μία σύνδεση μεταξύ των χρηστών που επικοινωνούν μεταξύ τους με την μέθοδο μεταγωγής κυκλώματος (circuit switching), όπου οι πόροι του δικτύου καταλαμβάνονται από τους χρήστες αυτούς οι οποίοι όμως δεν κάνουν συνεχή χρήση τους, καθιστώντας την μέθοδο αυτή μη αποδοτική. Για την πιο αποδοτική εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων, το GSM εξελίχθηκε στο GPRS, όπου

χρησιμοποιείται η μέθοδος μεταγωγής πακέτων (packet switching). Στην μέθοδο αυτή, τα δεδομένα χωρίζονται σε μικρότερα “πακέτα”, τα οποία μεταδίδονται μέσω των διαθέσιμων πόρων του δικτύου, δεσμεύοντας μία χρονοθυρίδα μόνο κατά την διάρκεια της μετάδοσης τους, αποδεσμεύοντας την όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία. Έτσι, οι πόροι του δικτύου χρησιμοποιούνται πιο αποδοτικά, αυξάνοντας την χωρητικότητα του δικτύου καθώς και τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. Ακόμα, επιτρέπεται σε κάποιον χρήστη η ταυτόχρονη χρήση περισσότερων της μία χρονοθυρίδας, αυξάνοντας έτσι τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Συνήθως χρησιμοποιούνται τρεις με τέσσερις χρονοθυρίδες για λήψη δεδομένων και μία για αποστολή. Μπορεί να παρέχει ρυθμούς δεδομένων μεταξύ 56kbps και 115kbps, καθιστώντας εφικτή την υλοποίηση πιο προηγμένων υπηρεσιών από αυτές των άλλων τεχνολογιών δεύτερης γενιάς όπως η μετάδοση μηνυμάτων πολυμέσων, στην οποία θα γίνει αναφορά στην επόμενη παράγραφο όπου αναφέρονται οι βασικότερες υπηρεσίες των δικτύων δεύτερης γενιάς. Ακόμα, έκανε δυνατή την χρήση του πρωτοκόλλου WAP (Wireless Application Protocol), που είναι ένα τεχνικό πρότυπο που επιτρέπει την πρόσβαση σε δεδομένα και υπηρεσίες του παγκόσμιου ιστού (WEB) και του διαδικτύου, όπως η λήψη και αποστολή μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και η πλοήγηση σε ιστοσελίδες.

- **Τεχνολογία EDGE (2.7G)²⁷ - (Enhanced Data rates for GSM Evolution):** Η τεχνολογία αυτή αποτελεί εξέλιξη του GPRS και για τον λόγο αυτό ονομάζεται και EGPRS (Enhanced GPRS)²⁸. Χρησιμοποιεί τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα GPRS, χωρίς να απαιτείται η εγκατάσταση νέου εξοπλισμού και δεν μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα (αναφορικά με το GPRS). Ως εξέλιξη του GPRS, παρέχει όλες τις δυνατότητες που παρέχει και το GPRS, εξελίσσοντας τες. Υποστηρίζει και τις δύο μεθόδους μεταγωγής, πακέτων και κυκλώματος και για τον λόγο αυτό αντικατέστησε, σε πολλές περιπτώσεις, τα ήδη υπάρχοντα GSM δίκτυα. Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε από την Cingular (η οποία είναι πλέον γνωστή ως AT&T) και αναπτύχθηκε και μία παραλλαγή της για χρήση σε δίκτυα D-AMPS, η οποία όμως δεν εξελίχθηκε παραπάνω, μιας και τα δίκτυα D-AMPS, όπως προαναφέρθηκε, δεν χρησιμοποιούνται πλέον. Οι ρυθμοί δεδομένων που υποστηρίζει είναι υψηλότεροι από αυτούς του GPRS, σχεδόν τριπλάσιοι. Για

²⁷ Η τεχνολογία αυτή αναφέρεται και ως “2.75G” αλλά και “2.9G”.

²⁸ Μία άλλη ονομασία με την οποία μπορεί να γίνει αναφορά στην τεχνολογία αυτή είναι “IMT-SC” (IMT μονού φέροντος).

παράδειγμα, ένα αρχείο κειμένου μεγέθους 40kB, στο GPRS θα μεταφερόταν σε έξι δευτερόλεπτα ενώ με χρήση του EDGE θα μεταφερθεί σε δύο δευτερόλεπτα. Λόγω του υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, τα δίκτυα που χρησιμοποιούν την τεχνολογία αυτή μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες τρίτης γενιάς, όπως είναι οι βίντεο κλήσεις και σαν τεχνολογία έχει ενσωματωθεί στην οικογένεια προτύπων IMT-2000 που καθορίζει τις προδιαγραφές των τεχνολογιών τρίτης γενιάς, μιας και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που μπορεί να παρέχει είναι μεγαλύτερος του ελάχιστου ρυθμού των 3G δικτύων που είναι 200kbps (πιο αναλυτική αναφορά θα γίνει σε επόμενη παράγραφο).

Η διαδικασία κωδικοποίησης καναλιού, τόσο στο GPRS όσο και στο EDGE αποτελείται από δύο βήματα: αρχικά χρησιμοποιείται ένας κυκλικός κώδικας για την προσθήκη ψηφίων ισοτιμίας στα δεδομένα, τα οποία ψηφία ισοτιμίας ονομάζονται Ακολουθία Ελέγχου Μπλοκ (Block Check Sequence) και στην συνέχεια, τα δεδομένα κωδικοποιούνται με την χρήση ενός συνελκτικού αλγόριθμου ο οποίος αφαιρεί κάποια από τα ψηφία ισοτιμίας²⁹. Στο GPRS, υπάρχουν τέσσερα “σχεδιαγράμματα” κωδικοποίησης (Coding Schemes) τα οποία καθορίζουν το πλήθος των ψηφίων ισοτιμίας που προστίθενται από τον κυκλικό κώδικα καθώς και τον ρυθμό αφαίρεσης ψηφίων ισοτιμίας (puncturing rate) του συνελκτικού κώδικα. Στα τρία πρώτα CS, τα CS-1, CS-2 και CS-3, ο συνελκτικός κώδικας έχει ρυθμό $1/2$ ³⁰. Στα CS-2 και CS-3, η έξοδος του συνελκτικού κώδικα είναι “κομμένη” (punctured), ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός κώδικα. Στο CS-4 δεν εφαρμόζεται συνελκτική κωδικοποίηση. Στο EDGE, τα αντίστοιχα σχεδιαγράμματα ονομάζονται MCS (Modulation and Coding Scheme), είναι εννιά και καθορίζουν, εκτός των χαρακτηριστικών που καθορίζουν τα CS, και ποια διαμόρφωση θα χρησιμοποιηθεί, GMSK³¹ ή 8PSK³². Τα πρώτα τέσσερα έχουν παρόμοιες, αλλά βελτιωμένες, επιδόσεις με το GPRS και χρησιμοποιούν την τεχνική GMSK ενώ τα άλλα πέντε χρησιμοποιούν την τεχνική 8PSK. Σε όλα, καθορίζεται ο ρυθμός του συνελκτικού κώδικα να είναι $1/3$ και χρησιμοποιείται η τεχνική του κοψίματος (puncturing) για την επίτευξη του επιθυμητού ρυθμού κώδικα.

²⁹ Οι κώδικες που αφαιρούν ψηφία ισοτιμίας χαρακτηρίζονται ως “punctured” κώδικες.

³⁰ Δηλαδή κάθε ψηφίο εισόδου κωδικοποιείται σε δύο κωδικοποιημένα ψηφία.

³¹ **Gaussian minimum shift keying (GMSK):** είναι μία τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης συνεχούς φάσης, εναλλαγής με μετατόπιση συχνότητας (continuous-phase frequency-shift keying). Είναι παρόμοια με την MSK (minimum-shift keying) με την ειδοποιό διαφορά ότι η ακολουθία δεδομένων αρχικά μορφοποιείται με ένα Gaussian φίλτρο, πριν εφαρμοστεί στον διαμορφωτή συχνότητας.

³² **8PSK:** είναι μία τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης εναλλαγής φάσης (Phase Shift Keying) στην οποία χρησιμοποιούνται 3 ψηφία, οπότε υπάρχουν 8 διαθέσιμες καταστάσεις.

Μία περαιτέρω εξέλιξη των παραπάνω τεχνολογιών είναι το “Evolved EDGE”. Όπως και το EDGE, του οποίου είναι η εξέλιξη, αποτελεί επέκταση των προτύπων κινητής τηλεφωνίας, GSM, και οι βελτιώσεις που φέρει στο EDGE είναι αρκετές και θα αναφερθούν οι σημαντικότερες γιατί παραπάνω ανάλυση ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Μία από τις σημαντικότερες είναι ο χρόνος απόκρισης (latency), ο οποίος έχει μειωθεί, μειώνοντας το TTI (Transmission Time Interval)³³ από 20msec, που είναι στο EDGE, σε 10msec. Ο ρυθμός δεδομένων που υποστηρίζει έχει αυξηθεί μέχρι 1Mbps μέγιστο εύρος και ο χρόνος απόκρισης που αναφέρθηκε παραπάνω έχει μειωθεί στα 80msec με την χρήση διπλού φέροντος, υψηλότερο ρυθμό συμβόλων και μορφοποίηση υψηλότερης τάξης (32QAM και 16QAM³⁴, αντί της 8PSK) καθώς και την χρήση κωδικών turbo για την βελτίωση της διόρθωσης σφαλμάτων. Αυτό οδηγεί σε πραγματικούς ρυθμούς λήψης δεδομένων μέχρι 600kbps. Ακόμα, η ποιότητα του σήματος βελτιώνεται με την χρήση διπλών κεραιών, βελτιώνοντας έτσι το μέσο ρυθμό ψηφίων και την αποδοτικότητα του φάσματος. Σκοπός της ανάπτυξης της τεχνολογίας αυτής ήταν η παροχή ρυθμών μετάδοσης και, άρα, διαθέσιμων υπηρεσιών τρίτης γενιάς στα δίκτυα δεύτερης γενιάς, και για τον λόγο αυτό η τεχνολογία αυτή, αν και είναι συμβατή με τα πρότυπα που ορίζονται στο IMT-2000 και έχει γίνει αποδεκτή ως πρότυπο “3GPP Rel-7”, δεν θεωρείται ως τεχνολογία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς. Τέλος, αν και η τεχνολογία αυτή έχει δοκιμαστεί με επιτυχία σε πραγματικές συνθήκες, λόγω της μεγάλης διάδοσης πιο εξελιγμένων τεχνολογιών, όπως το UMTS (3G) και το LTE (4G), και την σταδιακή κατάργηση των δικτύων δεύτερης γενιάς, ίσως να μην υλοποιηθεί ποτέ σε πραγματικό εμπορικό δίκτυο.

1.4.2.7 - Υπηρεσίες του 2G δικτύου

Τα δεύτερης γενιάς δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έχουν μία ποικιλία παρεχόμενων υπηρεσιών, με βασική υπηρεσία την πραγματοποίηση και λήψη τηλεφωνικών κλήσεων. Οι

³³ Χαρακτηριστική τιμή των τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών που σχετίζεται με τον χρόνο που απαιτείται για ένα block δεδομένων να εισαχθεί, από το φυσικό επίπεδο, στο επίπεδο ραδιοσύνδεσης.

³⁴ **QAM (Quadrature Amplitude Modulation-Ορθογωνική διαμόρφωση πλάτους):** είναι μία τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης που χρησιμοποιεί δύο φέροντα σήματα ίδιας συχνότητας, μεταξύ τους ορθογώνια (διαφορά φάσης 90°), τα οποία διαμορφώνονται κατά πλάτος και συνδυάζονται, δημιουργώντας μία κυματομορφή διαμορφωμένη με εναλλαγή πλάτους (ASK) και φάσης (PSK). Ανάλογα με τα ψηφία που χρησιμοποιούνται και τις πιθανές καταστάσεις που είναι διαθέσιμες, υπάρχουν αρκετά είδη της συγκεκριμένης τεχνικής. Η 16QAM χρησιμοποιεί τέσσερα ψηφία ανά σύμβολο, παράγοντας 16 πιθανά σύμβολα ενώ η 32QAM χρησιμοποιεί πέντε ψηφία και έχει 32 διαθέσιμα σύμβολα.

σημαντικότερες υπηρεσίες που παρέχονται είναι³⁵:

- Called ID: Δυνατότητα στους χρήστες να γνωρίζουν την ταυτότητα του χρήστη που τους καλεί.
- Εκτροπή κλήσεων: Η υπηρεσία αυτή επιτρέπει στο χρήστη την δυνατότητα προώθησης αναπάντητων ή μη εφικτών ή κατειλημμένων ή άμεσων εισερχόμενων κλήσεων προς έναν άλλο προορισμό.
- Απόκρυψη κλήσεων: Δυνατότητα απόκρυψης της ταυτότητας του καλούντος.
- Φραγή κλήσεων: Η υπηρεσία αυτή δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να ενεργοποιήσουν φραγή εισερχόμενων ή εξερχόμενων ή εισερχόμενων διεθνών ή εξερχόμενων διεθνών ή σε περιαγωγή ή και όλων κλήσεων όποτε είναι επιθυμητό και για όσο χρονικό διάστημα είναι επιθυμητό.
- Cell Broadcast: Η υπηρεσία αυτή δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να λαμβάνει στην οθόνη του κινητού του σύντομες πληροφορίες σχετικά με τον τόπο στον οποίο βρίσκεται.
- Ειδοποίηση κλήσεων: Είναι μια υπηρεσία δικτύου με την οποία δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να ενημερώνεται με γραπτό μήνυμα για τον ποιος και πότε επιχείρησε να επικοινωνήσει μαζί του και δεν κατέστη δυνατό λόγω μη εφικτής σύνδεσης μαζί του ή ήταν απενεργοποιημένη η συσκευή του.

³⁵ Στην παρακάτω λίστα δεν αναφέρονται οι προηγμένες υπηρεσίες τρίτης γενιάς, η παροχή των οποίων έγινε με την ανάπτυξη του EDGE.

- SMS-Short Messaging Service: Η υπηρεσία αυτή προσφέρει την δυνατότητα αποστολής και λήψης κειμένου μέχρι και 160 αλφαριθμητικών χαρακτήρων από μία συσκευή προς μία άλλη, με την προϋπόθεση βέβαια ότι υπάρχει κάποιο κέντρο υπηρεσίας SMS για την διαχείριση τους. Έτσι η υπηρεσία SMS έχει 2 επιμέρους υπηρεσίες, τις SMS-MO και SMS-MT.
 - SMS-MO (SMS-Mobile Originated): Γίνεται η αποστολή ενός γραπτού μηνύματος, από το κινητό προς το Κέντρο Υπηρεσίας SMS.
 - SMS-MT (SMS-Mobile Terminated): Γίνεται η παράδοση του γραπτού μηνύματος στον παραλήπτη, από το Κέντρο Υπηρεσίας SMS.
- MMS-Multimedia Messaging Service: Είναι μια υπηρεσία 2.5G και προσφέρει την αποστολή και την λήψη μηνυμάτων εμπλουτισμένων με περιεχόμενο πολυμέσων.
- Advice of Change: Η υπηρεσία αυτή δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να ενημερώνεται μετά από κάθε εξερχόμενη κλήση στην οθόνη του κινητού του, την διάρκεια και την χρέωση της κλήσης του.
- Αναμονής και κράτησης κλήσεων: Η υπηρεσία αυτή δίνει την δυνατότητα σε έναν χρήστη να πραγματοποιεί ή να δέχεται κάποια κλήση, ενώ υπάρχει μία κλήση σε εξέλιξη. Αυτό επιτυγχάνεται με την δυνατότητα “κράτησης” κάποιας κλήσης, όπως παραδείγματος χάριν στην δεύτερη περίπτωση, όπου δέχεται κάποια κλήση ενώ μία άλλη είναι σε εξέλιξη, όπου μπορεί ο χρήστης να βάλει σε “κράτηση” την κλήση σε εξέλιξη και να απαντήσει στην νέα κλήση.
- Συνδιάσκεψης: Η υπηρεσία αυτή, εφόσον είναι διαθέσιμη από τον πάροχο του δικτύου,

επιτρέπει την ταυτόχρονη συνομιλία μέχρι και 5+1 ατόμων.

- Roaming: Στην υπηρεσία αυτή επιτρέπεται σε συνδρομητές που βρίσκονται εκτός της περιοχής κάλυψης του δικτύου τους, να συνδέονται σε κάποιο άλλο δίκτυο ακόμα και άλλης χώρας και να χρησιμοποιούν τις διαθέσιμες υπηρεσίες του δικτύου.

1.4.3 - Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς (3G)

Κάθε γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας, όπως γίνεται φανερό και από τα παραπάνω, είχε κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, με την επόμενη γενιά να έχει μεγάλες βελτιώσεις των παρεχόμενων υπηρεσιών και αυξημένη χωρητικότητα δικτύου. Η πρώτη γενιά ήταν αναλογική και χρησιμοποιούσε ζώνη συχνοτήτων μεταξύ των 800MHz και 900MHz για την επικοινωνία μεταξύ των χρηστών και του δικτύου, χρησιμοποιώντας την FDMA μέθοδο πολύπλεξης, υποστηρίζοντας ρυθμούς δεδομένων μέχρι 10kbps. Οι βελτιώσεις και καινοτομίες που εισήγαγε η δεύτερη γενιά ήταν πολλές (αναφέρθηκαν παραπάνω κατά την περιγραφή των δικτύων δεύτερης γενιάς) με σημαντικότερες την ψηφιοποίηση του σήματος, την προσθήκη ζωνών συχνοτήτων (900MHz, 1800MHz και 1900MHz) και την χρήση, εκτός της FDMA, της TDMA (και της CDMA στο IT-95), προσφέροντας ρυθμούς δεδομένων μέχρι 64kbps (και μέχρι 144kbps στην 2.5G και σχεδόν τριπλάσιο στην 2.7G). Φυσικά, την παραπάνω εξέλιξη των δικτύων ακολούθησε (ή και προκάλεσε) και η τεχνολογία των συσκευών που χρησιμοποιούν οι χρήστες για την σύνδεση στα δίκτυα αυτά, με τις συσκευές της πρώτης γενιάς να είναι ογκώδεις και σχετικά δύσχρηστες, παρέχοντας μόνο την δυνατότητα φωνητικών κλήσεων, και τις συσκευές της δεύτερης γενιάς να είναι πολύ μικρότερες και να παρέχουν πολλές και ποικίλες υπηρεσίες. Αντίστοιχα, η τρίτη γενιά (3G) δικτύων κινητής τηλεφωνίας εισήγαγε ακόμα περισσότερες υπηρεσίες, σε υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και με τις συσκευές να έχουν δυνατότητες εφάμιλλες με αυτές των ηλεκτρονικών υπολογιστών, και για τον λόγο αυτό οι συσκευές κινητών

τηλεφώνων χαρακτηρίζονται ως “έξυπνα τηλέφωνα” (smartphones)³⁶.

Η γενιά αυτή, όπως και η προηγούμενη, δεν χρησιμοποιεί μόνο μία τεχνολογία για την υλοποίηση των δικτύων αλλά βασίζεται σε πρότυπα που χρησιμοποιούνται από ασύρματες συσκευές και οι πάροχοι χρησιμοποιούν και παρέχουν υπηρεσίες και δίκτυα που πρέπει να είναι σύμφωνες και σύμφωνα με τις προδιαγραφές που περιέχονται στο IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000), μία οικογένεια προτύπων της ITU, ώστε οι υπηρεσίες που παρέχουν να χαρακτηρίζονται ως 3G υπηρεσίες. Αναπτύχθηκε με κύριο στόχο την δυνατότητα υποστήριξης ευρυζωνικής σύνδεσης στο Διαδίκτυο και υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων και παρέχει εφαρμογές ασύρματης τηλεφωνίας, ασύρματης σύνδεσης στο Διαδίκτυο και χρήση των πρωτοκόλλων IP, βίντεο-κλήσεις καθώς και υπηρεσίες ασύρματης τηλεόρασης. Οι συχνότητες³⁷ που χρησιμοποιούν τα δίκτυα αυτά είναι στις ζώνες των 850MHz, 900MHz, 1800MHz, 1900MHz και 2100MHz, με τις πρώτες ζώνες να χρησιμοποιούνται και από τα δίκτυα δεύτερης γενιάς και την τελευταία να είναι προσθήκη στα τρίτης γενιάς δίκτυα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την υλοποίηση δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς έχουν προταθεί και προτυποποιηθεί περισσότερες της μίας τεχνολογίες. Οι τεχνολογίες αυτές είναι, στην ουσία, εξέλιξη των τεχνολογιών των δικτύων δεύτερης γενιάς, και συγκεκριμένα των IT-95 και GPRS (όπως προαναφέρθηκε, η τεχνολογία EDGE, που είναι η εξέλιξη του GPRS και είναι συμβατή, οριακά, με τα πρότυπα της τρίτης γενιάς, IMT-2000 και η εξέλιξη της, Evolved EDGE που έχει γίνει αποδεκτή από τα πρότυπα IMT-2000 ως “3GPP Rel-7”) και αναπτύχθηκαν από διαφορετικούς οργανισμούς³⁸. Όλες όμως αυτές οι τεχνολογίες είναι συμβατές με τα πρότυπα που καθορίζονται από τα IMT-2000 πρότυπα, όπως τα ελάχιστα όρια ποιότητας υπηρεσιών και ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Όσον αφορά τον ρυθμό μετάδοσης, για να μπορεί ένα σύστημα να θεωρηθεί ως τρίτης γενιάς θα πρέπει να μπορεί να παρέχει ελάχιστο ρυθμό δεδομένων 200kbps και μία ποικιλία υπηρεσιών, όπως αυτές που αναφέρθηκαν

³⁶ Ως “έξυπνες συσκευές” ορίζονται οι συσκευές κινητής τηλεφωνίας οι οποίες έχουν δυνατότητα πρόσβασης σε υπηρεσίες και δεδομένα του Διαδικτύου και του Παγκόσμιου Ιστού.

³⁷ Στην Ελλάδα μέχρι τη δεύτερη γενιά δικτύων, οι Panafon (σήμερα Vodafone) και Telestet (μετέπειτα TIM και σήμερα WIND) χρησιμοποιούσαν συχνότητες της περιοχής των 900 Mhz και η Cosmote 1800 MHz. Από τα τρίτης γενιάς δίκτυα και μετά δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ των εταιριών και προστέθηκε και η περιοχή των 2100 MHz.

³⁸ Οι δύο κύριοι οργανισμοί που ασχολούνται με την ανάπτυξη των δικτύων τρίτης γενιάς είναι οι 3GPP και 3GPP2 στους οποίους θα γίνει αναφορά παρακάτω.

παραπάνω. Οπότε η ανάπτυξη των δικτύων αυτών, όπως και των επόμενων γενεών, γίνεται από αρκετούς φορείς, τα συστήματα και οι τεχνολογίες που αναπτύσσουν αυτοί όμως πρέπει να υπακούν στα πρότυπα που έχουν καθοριστεί από την ITU, τα οποία περιγράφονται από την οικογένεια προτύπων IMT-2000. Οι κύριες τεχνολογίες είναι το CDMA2000 και το UMTS³⁹.

1.4.3.1 – UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)

Το UMTS είναι ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας, το οποίο αναπτύσσεται από το 3GPP (3rd Generation Partnership Project), ένα πρόγραμμα συνεργασίας από επτά διαφορετικούς φορείς, οι οποίοι παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 1). Ο αρχικός σκοπός του προγράμματος αυτού ήταν η υλοποίηση ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς, το οποίο να είναι εφαρμόσιμο σε παγκόσμιο επίπεδο και να στηρίζεται σε εξελιγμένα GSM συστήματα, εντός των πλαισίων που καθορίζονται από το IMT-2000 (απαραίτητη προϋπόθεση, όπως προαναφέρθηκε, για να θεωρείται το σύστημα αυτό τρίτης γενιάς). Δημιουργήθηκε τον Δεκέμβριο του 1998 και βρίσκεται στα κεντρικά γραφεία του ETSI, στην Γαλλική πόλη Sophia-Antipolis. Στην πορεία του το πρόγραμμα αυτό επέκτεινε το αντικείμενο εργασίας του στην ανάπτυξη και υποστήριξη του GSM και των εξελίξεων του, GPRS και EDGE, του UMTS και παρόμοιων προτύπων τρίτης γενιάς, συμπεριλαμβανομένου και του HSPA40, του LTE και παρόμοιων προτύπων τέταρτης γενιάς, στα οποία θα γίνει αναφορά σε επόμενη παράγραφο, και στην ανάπτυξη ενός εξελιγμένου IP Multimedia Subsystem (IMS)⁴¹. Τα αποτελέσματα των εργασιών του δημοσιεύονται σαν “Releases” (εκδόσεις) οι οποίες περιέχουν τα πρωτόκολλα που αναπτύσσουν με λεπτομερή περιγραφή των τεχνολογιών αυτών (η αναφορά στις δημοσιεύσεις αυτές στην συνέχεια της παρούσας εργασίας θα γίνεται ως “έκδοση x του 3GPP”).

³⁹ Και οι τεχνολογίες DECT cordless phones και Mobile WiMAX είναι συμβατές με τις απαιτήσεις των δικτύων τρίτης γενιάς αλλά λόγω της μειωμένης χρήσης τους και της ακαταλληλότητάς τους για χρήση σε συσκευές κινητών τηλεφώνων, συνήθως δεν αναφέρονται στις τεχνολογίες τρίτης γενιάς και για τον λόγο αυτό δεν θα γίνει περαιτέρω αναφορά σε αυτές.

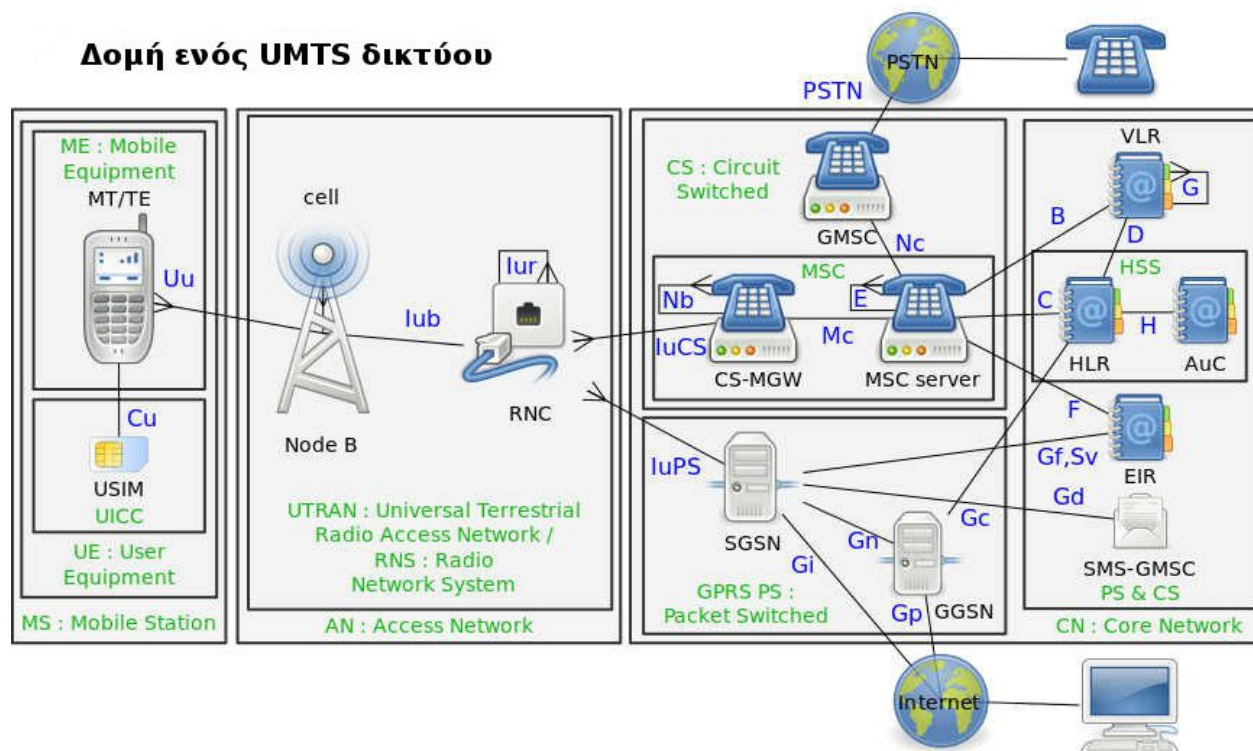
⁴⁰ Το HSPA θεωρείται 3.5G τεχνολογία, στην οποία θα γίνει αναφορά σε επόμενη παράγραφο.

⁴¹ Το IMS είναι ένα σχέδιο για ένα ολοκληρωμένο δίκτυο τηλεπικοινωνιακών φορέων που θα έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα IP για την μεταφορά πακέτων δεδομένων σε όλες τις διαθέσιμες μορφές, είτε ασύρματα είτε ενσύρματα, με την αρχική του παρουσίαση να είναι η 3GPP Rel-5.

Οργανισμός	Τοποθεσία βάσης
Association of Radio Industries and Businesses (ARIB)	Ιαπωνία
Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS)	Η.Π.Α.
China Communications Standards Association (CCSA)	Κίνα
European Telecommunications Standards Institute (ETSI)	Ευρώπη
Telecommunications Technology Association (TTA)	Κορέα
Telecommunication Technology Committee (TTC)	Ιαπωνία
Telecommunications Standards Development Society India (TSDSI)	Ινδία

Πίνακας 1.1 – Φορείς που συμμετέχουν στην 3GPP

Το UMTS είναι μέρος της οικογένειας προτύπων IMT-2000. Βασίστηκε στα πρότυπα του GSM και χρησιμοποιεί σαν μέθοδο πολύπλεξης μία εξέλιξη του CDMA, την W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access - Πολύπλεξη με διαίρεση κώδικα ευρείας ζώνης) έτσι ώστε να μπορεί να προσφέρει υψηλότερη απόδοση φάσματος και εύρους ζώνης στους χρήστες των ασύρματων δικτύων. Καθορίζει ένα πλήρες σύστημα δικτύου το οποίο περιλαμβάνει το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης “UTRAN” (UMTS Terrestrial Radio Access Network), τον πυρήνα του δικτύου “MAP” (Mobile Application Part) και την ταυτοποίηση των χρηστών μέσω των καρτών “SIM” (subscriber identity module). Μερικές φορές αναφέρεται και ως “FOMA” (Freedom of Mobile Multimedia Access) ή 3GSM, μιας και αποτελεί την εξέλιξη του GSM σε τρίτης γενιάς δίκτυο. Λόγω των παραπάνω, είναι φανερό ότι για την υλοποίηση του το UMTS απαιτεί την εγκατάσταση συμβατών σταθμών βάσης και την απόδοση νέων συχνοτήτων, σε αντίθεση με το EDGE που αναφέρθηκε παραπάνω, το οποίο μπορεί να υλοποιηθεί στα δίκτυα δεύτερης γενιάς και το CDMA2000, στο οποίο θα γίνει αναφορά σε επόμενη παράγραφο. Μία γενική εικόνα ενός ολοκληρωμένου UMTS δικτύου, με τα κύρια χαρακτηριστικά και μέρη από τα οποία αποτελείται, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (σχήμα 1.7).



Σχήμα 1.7 – Δομή ενός UMTS δικτύου

Για την ασύρματη επικοινωνία των χρηστών με το δίκτυο, καθορίζονται διάφορες μέθοδοι ή διεπαφές (interfaces), οι οποίες ονομάζονται “UTRA” (UMTS Terrestrial Radio Access) και περιέχονται στην οικογένεια πρωτοκόλλων IMT-2000, με την πιο διαδεδομένη να είναι η W-CDMA (ή UTRA-FDD⁴²), η οποία αναφέρεται στα IMT-2000 ως “IMT Direct Spread”. Χρησιμοποιεί DS-SS⁴³ μέθοδο πρόσβασης καναλιών, με ένα ζεύγος καναλιών εύρους 5MHz, ενώ τα συστήματα CDMA2000 χρησιμοποιούν ένα ή περισσότερα διαθέσιμα κανάλια εύρους 1.25MHz για κάθε κατεύθυνση επικοινωνίας (για αποστολή ή λήψη δεδομένων). Οι ζώνες συχνοτήτων που καθορίζονται είναι οι 1885–2025 MHz για την αποστολή δεδομένων από τις συσκευές προς το σταθμό βάσης (uplink) και 2110–2200 MHz για την αποστολή δεδομένων από τους σταθμούς βάσης προς τις συσκευές (downlink). Στις Η.Π.Α. χρησιμοποιούνται οι ζώνες 1710–1755 MHz και 2110–2155 MHz (αντίστοιχα) γιατί η ζώνη των

⁴² **UTRA-FDD**: είναι η UTRA μέθοδος που χρησιμοποιεί πολύπλεξη συχνότητας, με την έκδοση του UMTS που την χρησιμοποιεί να ονομάζεται UMTS-FDD).

⁴³ **DS-SS (Direct-Sequence Code Division Multiple Access)**: είναι μία μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης που στηρίζεται στην μέθοδο διαμόρφωσης εκτεταμένου φάσματος (DSSS) και επιτυγχάνει την πολλαπλή πρόσβαση “εξαπλώνοντας” τα σήματα από και προς διαφορετικούς χρήστες με διαφορετικούς κώδικες και είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος CDMA μεθόδου.

1900MHz ήταν σε χρήση όταν άρχισαν να υλοποιούνται τα εμπορικά δίκτυα τρίτης γενιάς, ενώ σε άλλες χώρες χρησιμοποιούνται οι ζώνες των 850MHz και των 1900MHz, με την αποστολή και την λήψη να πραγματοποιούνται μέσω της ίδιας ζώνης συχνοτήτων. Στην Ελλάδα, η ζώνη συχνοτήτων 2100MHz χρησιμοποιείται αποκλειστικά από τα δίκτυα τρίτης γενιάς, με ζώνες συχνοτήτων αποστολής και λήψης στα όρια που καθορίζονται από το UMTS, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι υπόλοιπες διαθέσιμες ζώνες, των 800MHz, των 900MHz και των 1800MHz, ανάλογα με τις ανάγκες κάθε δικτύου, μιας και το UMTS είναι εξέλιξη των GSM δικτύων και οι συσκευές που το υποστηρίζουν υποστηρίζουν και τις τεχνολογίες GSM που προηγήθηκαν (backwards compatibility).

Η τεχνολογία αυτή υποστηρίζει μέγιστο θεωρητικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 42Mbps όταν έχει υλοποιηθεί στο δίκτυο το HSPA+ (θα γίνει αναφορά σε επόμενη παράγραφο). Χωρίς αυτό, οι συσκευές που είναι συμβατές με την αρχική έκδοση του, “R99” (Release '99), μπορούν να έχουν ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για λήψη μέχρι 384kbps και 7.2Mbps για συσκευές συμβατές με το HSPDA (High-Speed Downlink Packet Access), η οποία θεωρείται τεχνολογία 3.5G και στην οποία θα γίνει αναφορά σε επόμενη παράγραφο.

Η μέθοδος UTRA-FDD, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιεί ως μέθοδο πολύπλεξης την διαίρεση συχνότητας. Μία άλλη μέθοδος είναι η UTRA-TDD (UTRA-Time Division Duplexing), η οποία χρησιμοποιεί μέθοδο πολύπλεξης με διαίρεση χρόνου. Η έκδοση των UMTS δικτύων που χρησιμοποιεί την μέθοδο αυτή ονομάζεται UMTS-TDD (Universal Mobile Telecommunications System - Time-Division Duplexing) και είναι μία προτυποποιημένη έκδοση των δικτύων UMTS από το πρόγραμμα 3GPP. Αν και είναι μία πλήρης υλοποίηση των δικτύων αυτών, χρησιμοποιείται, ως επί το πλείστον, για την παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο. Τα UMTS-TDD δίκτυα χρησιμοποιούν δύο μεθόδους πρόσβασης καναλιών, τις TD-CDMA και TD-SCDMA, ορίζοντας έτσι δύο διαφορετικά είδη UMTS-TDD δικτύων, η ομάδα των προτύπων στα οποία ορίζονται ονομάζεται IMT-2000 CDMA-TDD ή IMT 2000 Time-Division (IMT-TD) και κάθε ένα από αυτά χρησιμοποιεί και διαφορετική διεπαφή ασύρματης πρόσβασης χρηστών στο δίκτυο, τα UTRA-TDD HCR και UTRA-TDD LCR, αντίστοιχα.

- TD-CDMA (UTRA-TDD 3.84 Mcps High Chip Rate (HCR)) :** Η μέθοδος TD-CDMA (Time-Division-Code Division Multiple Access) είναι μία μέθοδος πρόσβασης καναλιού που βασίζεται στην χρήση της μεθόδου πολύπλεξης διαίρεσης κώδικα (CDMA) με εξάπλωση φάσματος, η οποία συνδυάζεται με την χρήση πολλαπλών χρονοθυρίδων (TDMA). Είναι η μέθοδος που χρησιμοποιεί η έκδοση UMTS-TDD δικτύων η οποία έχει προτυποποιηθεί με το όνομα UTRA-TDD HCR (UMTS Terrestrial Radio Access-Time Division Duplex High Chip Rate). Στα δίκτυα αυτά, το κάθε κανάλι των 5MHz χωρίζεται σε πλαίσια των 10msec, περιέχοντας δεκαπέντε χρονοθυρίδες (1500 ανά δευτερόλεπτο). Οι χρονοθυρίδες αυτές κατανέμονται, σε καθορισμένα ποσοστά, για την επικοινωνία του χρήστη με το δίκτυο (uplink) και του δικτύου με τον χρήστη (downlink). Η TD-CDMA χρησιμοποιείται για την πολύπλεξη ροών δεδομένων (data streams) από και προς πολλαπλούς χρήστες και, αντίθετα με την W-CDMA, η οποία χρησιμοποιεί πολύπλεξη συχνότητας, δεν απαιτεί τον διαχωρισμό των ζωνών συχνοτήτων για το uplink και το downlink, καθιστώντας την κατάλληλη για εφαρμογές σε δίκτυα με περιορισμένη ζώνη συχνοτήτων. Όμως, ως διαφορετική μέθοδος από την UTRA-FDD, τα δίκτυα που την χρησιμοποιούν είναι διαφορετικά από τα UMTS-FDD δίκτυα και δεν είναι συμβατή με αυτά. Οπότε, μία συσκευή, για να είναι συμβατή και με τα δύο είδη δικτύων θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να υποστηρίξει και τις δύο μεθόδους (ή δίκτυα).
- TD-SCDMA (UTRA-TDD 1.28 Mcps Low Chip Rate (LCR)) :** Η μέθοδος TD-SCDMA (Time Division-Synchronous Code Division Multiple Acces)⁴⁴ είναι η δεύτερη μέθοδος πρόσβασης καναλιών με διαίρεση χρόνου, η οποία, όπως και η TD-CDMA, χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (CDMA) και διαίρεση χρόνου (TDMA), χωρίζοντας κάθε ζώνη συχνοτήτων σε χρονοθυρίδες, οι οποίες με τη σειρά του χωρίζονται σε κανάλια χρησιμοποιώντας CDMA κώδικες εξάπλωσης, μην έχοντας προκαθορισμένη διάκριση των καναλιών σε uplink και downlink, εκχωρώντας τα ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου, δυναμικά. Το χαρακτηριστικό αυτό προσδίδει στα δίκτυα που την χρησιμοποιούν την δυνατότητα να παροχής στους χρήστες διαφορετικών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων για τις uplink και

⁴⁴ Ο χαρακτηρισμός της μεθόδου ως "synchronous" της αποδίδεται λόγω του συγχρονισμού των σημάτων προς το δίκτυο (uplink) στον σταθμό βάσης, με χρήση προσαρμογής συνεχούς χρόνου. Η μέθοδος αυτή μειώνει την παρεμβολή μεταξύ των σημάτων από διαφορετικούς χρήστες της ίδιας χρονοθυρίδας με την χρήση διαφορετικών κωδικών βελτιώνοντας την ορθογωνικότητα μεταξύ των κωδικών, αυξάνοντας παράλληλα την χωρητικότητα του συστήματος αλλά και την πολυπλοκότητα των απαραίτητων κυκλωμάτων για την επίτευξη του συγχρονισμού του uplink.

downlink συνδέσεις των χρηστών του δικτύου, ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου, δυνατότητα που δεν υπάρχει με την χρήση της FDD μεθόδου, αυξάνοντας ταυτόχρονα την ευελιξία της κατανομής του διαθέσιμου φάσματος. Κάθε κανάλι έχει εύρος 1.6MHz, επιτρέποντας την χρήση της μεθόδου αυτής σε δίκτυα με περισσότερο περιορισμένες ζώνες συχνοτήτων από την μέθοδο TD-CDMA. Η διεπαφή ασύρματης πρόσβασης των χρηστών στο δίκτυο που χρησιμοποιεί την μέθοδο αυτή ανήκει στα πρωτόκολλα IMT-2000 CDMA-TDD⁴⁵ και έχει προτυποποιηθεί από την 3GPP με το όνομα UTRA-TDD LCR. Αναπτύχθηκε με την συνεργασία των Chinese Academy of Telecommunications Technology (CATT), Datang Telecom, και Siemens AG και χρησιμοποιείται στα Κινέζικα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα ως εναλλακτική τεχνολογία για το W-CDMA. Είναι συμβατή και με τις άλλες δύο μεθόδους (ή δίκτυα), την μέθοδο W-CDMA στα δίκτυα UMTS-FDD και την TD-CDMA στα δίκτυα UMTS-TDD (HCR).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το UMTS καθορίζει ένα πλήρες σύστημα δικτύου το οποίο περιλαμβάνει το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης “UTRAN” (UMTS Terrestrial Radio Access Network), τον πυρήνα του δικτύου “MAP” (Mobile Application Part). Το UTRAN αποτελείται από πολλούς σταθμούς βάσης, κάθε ένας από τους οποίους μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετική διεπαφή ασύρματης πρόσβασης του δικτύου από τους χρήστες (UTRA) ή και διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Λόγω του ότι το UMTS είναι εξέλιξη των δικτύων GSM, συχνά τα UMTS δίκτυα συνδυάζονται με τα δίκτυα GSM/EDGE, μιας και σαν τεχνολογία η EDGE έχει γίνει αποδεκτή από τα πρωτόκολλα IMT-2000, των οποίων το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης ονομάζεται GERAN (GSM/EDGE RAN). Τα δύο αυτά είδη δικτύων μπορούν να μοιράζονται τον ίδιο πυρήνα δικτύου, καθιστώντας το UTRAN ως μία εναλλακτική του GERAN, επιτρέποντας την εναλλαγή των RAN, ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου, όσον αφορά την κάλυψη των χρηστών και τις διαθέσιμες υπηρεσίες. Ο συνδυασμός των δύο αυτών το δικτύων ασύρματης πρόσβασης χαρακτηρίζεται ως UTRAN/GERAN. Έτσι, η αναβάθμιση ενός GSM/EDGE δικτύου σε UMTS μπορεί να γίνει με χρήση του ήδη υπάρχοντος δικτύου, με προσθήκη όμως εξοπλισμού στους σταθμούς βάσης συμβατού με τις τεχνολογίες του UMTS.

⁴⁵ Αντίθετα με την TD-CDMA η οποία ήταν μέρος του UMTS από την αρχική του έκδοση (οι εκδόσεις του UMTS ονομάζονται “releases”), η TD-SCDMA εισήχθη στο UMTS στην τέταρτη έκδοση του (Release 4).

1.4.3.2 - CDMA2000

Η δεύτερη κύρια τεχνολογία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς είναι, όπως προαναφέρθηκε, το CDMA2000. Είναι γνωστή και ως C2K ή IMT-MC (Multi Carrier - πολλαπλών φορέων) και είναι μία οικογένεια προτύπων τεχνολογιών τρίτης γενιάς για την αποστολή φωνής, δεδομένων χρηστών και δεδομένων σηματοδότησης μεταξύ συσκευών κινητών τηλεφώνων και σταθμών βάσης. Τα πρότυπα αυτά αναπτύσσονται από την 3GPP2⁴⁶ με σκοπό να “διαδεχθούν” τα πρότυπα cdmaOne (IS-95) που αναφέρθηκαν στα δίκτυα δεύτερης γενιάς, όντας όμως συμβατά με τις παλαιότερες τεχνολογίες (backwards-compatibility) που βασίζονται στα πρότυπα αυτά. Η οικογένεια προτύπων CDMA2000 αποτελείται από τα πρότυπα “1xRTT” και “1X Advanced” τα οποία αφορούν μετάδοση φωνής, και τα πρότυπα “1xEV-DO” (Evolution-Data Optimized): Έκδοση (Release) 0, Έκδοση A, Έκδοση B, Ultra Mobile Broadband (UMB) ⁴⁷ τα οποία αφορούν μετάδοση δεδομένων.

- **1xRTT (1 times Radio Transmission Technology):** Το πρότυπο 1xRTT, γνωστό και ως 1X (IS-2000) είναι το βασικό CDMA2000 πρότυπο ασύρματης διεπαφής. Χρησιμοποιεί το ίδιο εύρος συχνοτήτων με το IS-95, ένα αμφίδρομο ζεύγος ασύρματων καναλιών εύρους 1.25 MHz, αυξάνοντας όμως την χωρητικότητα του δικτύου (συγκριτικά με το IS-95, σχεδόν την διπλασιάζει) προσθέτοντας 64 ορθογώνια κανάλια κυκλοφορίας δεδομένων στα ήδη υπάρχοντα 64 του IS-95. Υποστηρίζει, θεωρητικά, ταχύτητες πακέτων δεδομένων μέχρι 153 kbps, επιτυγχάνοντας στην πράξη ρυθμούς 80–100 kbps στις περισσότερες εμπορικές εφαρμογές. Μία ακόμα σημαντική αλλαγή (εξέλιξη) που περιέχει το πρότυπο αυτό, αναφορικά με το IS-95 είναι οι αλλαγές που εισήγαγε στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων⁴⁸ (data link layer) το οποίο, στο IS-95, παρείχε μόνο την

⁴⁶ Η 3GPP2 (3rd Generation Partnership Project 2) είναι μία συνεργασία αντίστοιχη με την 3GPP που αναπτύσσει την τεχνολογία UMTS, η οποία έχει και αυτή σαν στόχο την ανάπτυξη ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς βασισμένο στο cdmaOne, το οποίο να είναι παγκόσμια εφαρμόσιμο, και ως τέτοιο, οι τεχνολογίες που αναπτύσσει είναι σύμφωνες με το IMT-2000. Δημιουργήθηκε τον Δεκέμβριο του 1998 και οι συμμετέχουσες οργανώσεις είναι οι: ARIB/TTC (Ιαπωνία), China Communications Standards Association, Telecommunications Industry Association (Βόρεια Αμερική) και Telecommunications Technology Association (Νότια Κορέα).

⁴⁷ Το UMB, το οποίο είναι η τρίτη έκδοση του προτύπου EV-DO (Release C) προοριζόταν να είναι ο διάδοχος του CDMA2000, μία τεχνολογία τέταρτης γενιάς, η οποία όμως τελικά εγκαταλείφθηκε από την 3GPP2, η οποία ασχολήθηκε με την ανάπτυξη της τεχνολογίας LTE, η οποία, όπως θα αναφερθεί παρακάτω, είναι η διάδοχος των CDMA2000 και GSM/UMTS τεχνολογιών.

⁴⁸ Το “επίπεδο ζεύξης δεδομένων”, καθώς και τα επίπεδα που θα αναφερθούν παρακάτω, αφορούν τα επίπεδα του

δυνατότητα “προσπάθειας την βέλτιστης δυνατής μεταφοράς” (best efforts delivery) για τα δεδομένα και τα κυκλώματα μεταγωγής καναλιών για φωνή (ένα πλαίσιο για φωνή κάθε 20 msec), για την επίτευξη καλύτερης χρήσης των υπηρεσιών δεδομένων, συμπεριλαμβάνοντας πρωτόκολλα για τον έλεγχο της πρόσβασης των χρηστών καθώς και υπηρεσίες ελέγχου ποιότητας (QoS – Quality of Service) στο CDMA2000.

- **1X Advanced :** Το 1X Advanced αποτελεί την εξέλιξη το CDMA2000 1X, παρέχοντας μέχρι και τέσσερις φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα και βελτιωμένη κάλυψη μέχρι και 70%.
- **1xEV-DO (Evolution-Data Optimize):** Το πρότυπο αυτό, το οποίο αναφέρεται και ως “EV-DO” ή “EV” είναι ένα πρότυπο τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων μέσω ραδιοσημάτων, παρέχοντας ευρυζωνική πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Χρησιμοποιεί τις μεθόδους πολύπλεξης με διαίρεση κώδικα (CDMA) και με διαίρεση χρόνου (TDMA) για την μεγιστοποίηση της παρεχόμενης κίνησης δεδομένων στο δίκτυο.

1.4.3.3 – 3.5G: HSPA (High-Speed Packet Access)

Η εξέλιξη των UMTS δικτύων έγινε με τα πρωτόκολλα HSPA, τα οποία αποτελούνται από τα HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) και HSUPA (High Speed Uplink Packet Access), τα οποία επεκτείνουν και βελτιώνουν τα ήδη υπάρχοντα UMTS δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών. Ως βελτίωση των ήδη υπάρχοντων δικτύων τρίτης γενιάς, δεν αποτελούν ξεχωριστή τεχνολογία και για τον λόγο αυτό χαρακτηρίζονται ως τεχνολογίες “3.5G” (γνωστές και ως “3G+” ή turbo 3G τεχνολογίες). Τα πρωτόκολλα από τα οποία αποτελείται το HSPA είναι:

μοντέλου αναφοράς Ανοικτής Διασύνδεσης Συστημάτων (Open Systems Interconnection – OSI), το οποίο είναι ένα μοντέλο περιγραφής της σχεδίασης τηλεπικοινωνιακών και δικτυακών πρωτοκόλλων που αποτελείται από επτά επίπεδα: το φυσικό επίπεδο (physical layer), το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (data link layer), το επίπεδο δικτύου (network layer), το επίπεδο μεταφοράς (transport layer), το επίπεδο συνόδου (session layer), το επίπεδο παρουσίασης (presentation layer) και το επίπεδο εφαρμογών (application layer).

- **High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)** : Το πρωτόκολλο αυτό επιτρέπει την αύξηση της χωρητικότητας και των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων των UMTS δικτύων και αφορά τις downlink συνδέσεις του δικτύου. Περιέχεται στην πέμπτη έκδοση του 3GPP (Release 5), η οποία περιέχει και βελτιώσεις στους ρυθμούς των uplink συνδέσεων, παρέχοντας ρυθμούς μετάδοσης των 384kbps (το ανώτατο όριο των προηγούμενων τεχνολογιών ήταν 128kbps). Παράλληλα με την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων από το δίκτυο στους χρήστες (downlink) μέχρι και 14Mbps, το HSDPA παρέχει μείωση του λανθάνοντος χρόνου των χρηστών (latency), μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο για τις διαθέσιμες εφαρμογές, βελτιώνοντας την υποστήριξη των εφαρμογών πακέτων δεδομένων υψηλής απόδοσης. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι η χρήση κοινών καναλιών μετάδοσης δεδομένων από τους χρήστες, η μετάδοση δεδομένων με χρήση πολλαπλών κωδικών σε συνδυασμό με την διαμόρφωση υψηλότερης τάξης⁴⁹, σχετικά με τις προηγούμενες τεχνολογίες, μικρό χρονικό διάστημα μετάδοσης δεδομένων (short Transmission Time Interval – TTI) και γρήγορη προσαρμογή και δρομολόγηση των συνδέσεων μαζί με την χρήση της HARQ⁵⁰ μεθόδου. Τα κοινόχρηστα κανάλια μετάδοσης δεδομένων που εισάγει το HSDPA στο επίπεδο μεταφοράς αναφέρονται ως "κοινόχρηστα downlink κανάλια υψηλών ταχυτήτων" (HS-DSCH: High Speed Downlink Shared Channels). Τα κανάλια αυτά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: Τα HS-SCCH (High Speed-Shared Control Channel) που είναι κανάλια που χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση προς τον χρήστη ότι θα του σταλούν δεδομένα στο HS-DSCH, τα HS-DPCCH (Uplink High Speed-Dedicated Physical Control Channel) μέσω των οποίων μεταδίδονται δεδομένα από τον χρήστη, αναφορικά με την αναμενόμενη αποστολή των δεδομένων για τα οποία πληροφορήθηκε από το HS-DPCCH, προς το δίκτυο (όπως το αν είναι έτοιμος να δεχθεί τα δεδομένα καθώς και πληροφορίες για την ποιότητα της επικοινωνίας μέσω του καναλιού αυτού) και τα HS-

⁴⁹ Η μέθοδος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης του σήματος έχει την δυνατότητα να μεταβάλλεται ανάλογα με τις ανάγκες επικοινωνίας του χρήστη και τις δυνατότητες και την κίνηση του δικτύου. Η βασική μέθοδος είναι η QPSK, η οποία, με χρήση πέντε κωδικών παρέχει μέγιστο ρυθμό δεδομένων 1.8Mbps, αλλά αν οι συνθήκες της ασύρματης επικοινωνίας το επιτρέπουν, η μέθοδος αυτή μπορεί να αλλάξει σε 16QAM ή 64QAM, αυξάνοντας σημαντικά τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (παραδείγματος χάριν, με χρήση πέντε κωδικών η 16QAM παρέχει μέγιστο ρυθμό 3.6 Mbps), οι οποίοι μπορούν να αυξηθούν παραπάνω με την χρήση περισσότερων κωδικών.

⁵⁰ Η μέθοδος αυτή, σε γενικές γραμμές λειτουργεί ως εξής: παράλληλα με τα δεδομένα μεταδίδονται και ψηφία διόρθωσης σφαλμάτων, παρέχοντας την δυνατότητα διόρθωσης κάποιων σφαλμάτων χωρίς να είναι απαραίτητη η επαναποστολή των δεδομένων αυτών (οι μέθοδοι αυτές χαρακτηρίζονται ως μέθοδοι "προς τα εμπρός διόρθωσης σφαλμάτων (forward error correction)). Για την περίπτωση που απαιτείται η επαναποστολή των δεδομένων, η συσκευή του χρήστη αποθηκεύει τα πακέτα δεδομένων που είναι για επαναποστολή και τα συνδυάζει με άλλα πακέτα δεδομένων που προορίζονται για να σταλθούν ξανά έτσι ώστε να ανακτηθούν όλα τα εσφαλμένα δεδομένα με την καλύτερη δυνατή απόδοση.

PDSCH (High Speed-Physical Downlink Shared Channel) που είναι τα κανάλια μέσω των οποίων θα μεταδοθούν τα δεδομένα προς τον χρήστη. Η αναβάθμιση σε HSDPA τεχνολογία γίνεται με την αναβάθμιση του λογισμικού των WCDMA δικτύων, ο οποίος είναι ένας ακόμα λόγος για τον οποίο σαν τεχνολογία θεωρείται τρίτης γενιάς και όχι τέταρτης.

- High-Speed Uplink Packet Access (HSUPA):** Το πρωτόκολλο αυτό αποτελεί την δεύτερη σημαντική εξέλιξη του UMTS (μετά το HSDPA) και περιέχεται στην έκτη έκδοση του 3GPP (Release 6). Σκοπός της δημιουργίας του ήταν η βελτίωση του ρυθμού δεδομένων από τον χρήστη προς το δίκτυο (uplink) στα 5.76Mbps, η αυξημένη χωρητικότητα του δικτύου και ο μειωμένος λανθάνων χρόνος. Προσθέτει ένα νέο κανάλι μετάδοσης δεδομένων στο WCDMA, το οποίο ονομάζεται “E-DCH” (Enhanced Dedicated Channel - Βελτιωμένο αφιερωμένο κανάλι) καθώς και κάποια κανάλια στο φυσικό επίπεδο, τα οποία για downlink μεταφορά δεδομένων είναι τα: *E-AGCH* (Absolute Grant Channel), που χρησιμοποιείται για την μεταφορά δεδομένων που αφορούν τα όρια των πόρων ενέργειας της συσκευής που είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο αυτό, *E-RGCH* (Relative Grant Channel), που χρησιμοποιείται για την ενημέρωση των χρηστών για μικρές μεταβολές των παραπάνω ορίων, *E-HICH* (E-DCH Hybrid ARQ Indicator Channel), που μεταφέρει δεδομένα αναφορικά με την παραλαβή των απεσταλμένων δεδομένων στον χρήστη προορισμού. Για uplink μεταφορά δεδομένων τα νέα κανάλια είναι τα: *E-DPCCH* (E-DCH Dedicated Physical Control Channel), που χρησιμοποιείται για την μετάδοση πληροφοριών σχετικά με το E-DCH που θα χρησιμοποιηθεί, και *E-DPDCH* (E-DCH Dedicated Physical Data Channel), που χρησιμοποιείται για την μετάδοση δεδομένων του E-DCH. Παρόμοια με το HSDPA, περιέχει την χρήση μετάδοσης με πολλαπλούς κώδικες, την ελάττωση του TTI επιτρέποντας ταχύτερη προσαρμογή των συνδέσεων και την γρήγορη HARQ με σταδιακή μεταβολή του πλεονασμού των δεδομένων, καθιστώντας την επαναποστολή τους (όπου δεν μπορεί να επιτευχθεί η διόρθωση σφάλματος προς τα εμπρός) πιο αποδοτική. Αντίθετα όμως με το HSDPA, τα διαθέσιμα πολλαπλά κανάλια (E-DCH) για την ταυτόχρονη μεταφορά δεδομένων προς το δίκτυο (uplink) δεν είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Οι παραπάνω βελτιώσεις έκανα εφικτή την χρήση νέων εφαρμογών και υπηρεσιών, όπως οι υπηρεσίες VoIP (Voice over IP - μετάδοση φωνής με το πρωτόκολλο

IP) και η αποστολή εικόνων και μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου μεγάλου μεγέθους.

1.4.3.4 – 3.75G: HSPA+ (Evolved High-Speed Packet Access)

Η εξέλιξη του HSPA είναι το εξελιγμένο HSPA (Evolved High-Speed Packet Access) ή HSPA+ το οποίο είναι ένα τεχνικό πρότυπο για ευρυζωνικά ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, και η πρώτη του έκδοση περιέχεται στην έβδομη έκδοση του 3GPP (Release 7) και εξελίχθηκε περαιτέρω σε επόμενες εκδόσεις. Μία από τις κύριες καινοτομίες του προτύπου αυτού είναι η χρήση των στοιχειοκεραιών, με τις οποίες επιτυγχάνεται, αρχικά, η διαμόρφωση της δέσμης της κεραίας (περιστροφή του κύριου λοβού του διαγράμματος ακτινοβολίας της στην επιθυμητή κατεύθυνση), εστιάζοντας την ισχύ αποστολής της προς την επιθυμητή κατεύθυνση (κεραίες επιλεκτικής κατευθυντικότητας σε αντίθεση με τις πανκατευθυντικές κεραίες που χρησιμοποιούνταν από τις προηγούμενες τεχνολογίες) μειώνοντας έτσι την συνολικά εκπεμπόμενη ισχύ αλλά και εστιάζοντας την λαμβανόμενη ακτινοβολία, μειώνοντας έτσι τις πιθανές παρεμβολές από άλλες κατευθύνσεις. Ακόμα, με τις στοιχειοκεραίες έγινε δυνατή η υλοποίηση “MIMO” (Multiple Input Multiple Output) μεθόδου μέσω της χρήσης πολλαπλών κεραιών για αποστολή και λήψη.

Με χρήση των παραπάνω και τις διαμορφώσεις σήματος υψηλότερης τάξης (σε σχέση με το UMTS) που χρησιμοποιούνται, όπως προαναφέρθηκε, και από το HSPA, υλοποιούνται τα εξελιγμένα HSDPA (Evolved HSDPA) δίκτυα, η εξέλιξη των HSDPA δικτύων, τα οποία μπορούν να παρέχουν, με χρήση ενός φορέα εύρους 5MHz, θεωρητικούς ρυθμούς λήψης δεδομένων από την συσκευή του χρήστη (downlink) μέχρι 28Mbps με συνδυασμό της μεθόδου MIMO και διαμόρφωσης 16QAM (όπως περιγράφεται στην Release 7 της 3GPP) ενώ με χρήση MIMO και διαμόρφωσης 64QAM (Release 8) το θεωρητικό όριο είναι 42Mbps με καλές συνθήκες καναλιού και χαμηλή συσχέτιση μεταξύ των κεραιών αποστολής (οι πραγματικές ταχύτητες όμως είναι αρκετά χαμηλότερες). Εκτός όμως από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, μεγάλη βελτίωση εμφανίζεται και στην ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών (QoS) ειδικά σε περιπτώσεις όπου το λαμβανόμενο σήμα είναι αρκετά ασθενές για να γίνει χρήση των παραπάνω

μεθόδων (MIMO και διαμορφώσεις υψηλής τάξης).

Περαιτέρω βελτίωση του HSDPA επιτυγχάνεται με τον διπλασιασμό του εύρους ζώνης, από 5MHz σε 10MHz. Αυτό επιτεύχθηκε με το “DC-HSDPA” (Dual Carrier HSDPA⁵¹ – HSDPA διπλού φέροντος) που αποτελεί κομμάτι της όγδοης έκδοσης του 3GPP (Release 8), δίνοντας την δυνατότητα σε μία συσκευή να χρησιμοποιεί δύο φέροντα, διπλασιάζοντας έτσι το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Με τον τρόπο αυτόν μπορεί να υποστηριχθεί ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μέχρι 42.2Mbps χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση της μεθόδου MIMO. Με χρήση της μεθόδου MIMO σε συνδυασμό με το DS-HSDPA, όπως προβλέπεται στην ένατη έκδοση του 3GPP (Release 9), ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων μπορεί να φθάσει τα 84.4Mbps ενώ με χρήση τεσσάρων φερόντων, ο ρυθμός αυτός αυξάνεται μέχρι τα 168.8Mbps. Τα φέροντα που μπορεί να χρησιμοποιήσει μία συσκευή ταυτόχρονα, σύμφωνα με την όγδοη έκδοση, μπορεί να είναι μόνο γειτονικών συχνοτήτων, ενώ στην ένατη έκδοση προβλέπεται η χρήση φερόντων διαφορετικών συχνοτήτων. Στην ίδια έκδοση περιέχεται και η χρήση της παραπάνω μεθόδου και για την εξέλιξη του HSUPA, η οποία είναι η Dual-Carrier HSUPA (αντίστοιχα και Dual-Cell HSUPA). Χρησιμοποιούνται και στην περίπτωση αυτή δύο φέροντα για την αποστολή δεδομένων προς το δίκτυο (uplink) διπλασιάζοντας έτσι τον ρυθμό αποστολής δεδομένων από τον χρήστη.

Το HSPA+, εκτός των παραπάνω βελτιώσεων που εισάγει, προσφέρει και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας από τις συσκευές καθώς και μικρότερους χρόνους “ξυπνήματος” από την αδράνεια, παρέχοντας μία πραγματικά συνεχώς ενεργή σύνδεση. Όμως, παρά τις σημαντικές βελτιώσεις που εισάγει, λόγω του ότι είναι εξέλιξη των τεχνολογιών δικτύων τρίτης γενιάς και υλοποιείται στα δίκτυα αυτά, δεν θεωρείται τεχνολογία τέταρτης γενιάς αλλά 3.75G. Αποτελεί το ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ των δικτύων τρίτης και των δικτύων τέταρτης γενιάς, παρέχοντας την δυνατότητα επίτευξης ρυθμών μετάδοσης δεδομένων από δίκτυα τρίτης γενιάς κοντά σε αυτούς των δικτύων τέταρτης γενιάς.

1.4.4 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4^{ης} γενιάς (4G)

⁵¹ Είναι γνωστό και σαν Dual-Cell HSDPA (HSDPA διπλής κυψέλης).

Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς είναι η τέταρτης γενιάς (4G) δίκτυα τα οποία παρέχουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και βελτιωμένες και εμπλουτισμένες υπηρεσίες, κυρίως όσον αφορά την πρόσβαση στο Διαδίκτυο καθώς και δυνατότητα σύνδεσης σε μεγαλύτερη ποικιλία συσκευών, όπως USB ασύρματα modem⁵² και συσκευές IP τηλεφωνίας⁵³. Η εξέλιξη αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι επιβλήθηκε, μέχρι ένα βαθμό, από την εξέλιξη των συσκευών που χρησιμοποιούν οι χρήστες των δικτύων κινητής τηλεφωνίας οι οποίες υποστηρίζουν μία μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Λόγω των ποικίλων υπηρεσιών που υποστηρίζουν οι συσκευές κινητής τηλεφωνίας έχει εμφανιστεί ο όρος “έξυπνη συσκευή κινητού τηλεφώνου” που ορίζει τις συσκευές κινητής τηλεφωνίας που μπορούν να έχουν πρόσβαση σε υπηρεσίες και δεδομένα του Διαδικτύου. Η πρόσβαση στο διαδίκτυο έχει αναχθεί σε “καθημερινή ανάγκη” των χρηστών των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, όπου μέσω των έξυπνων συσκευών μπορούν να έχουν πρόσβαση σε έναν πολύ μεγάλο όγκο πληροφοριών και ποικιλία υπηρεσιών είτε για επαγγελματικούς λόγους είτε απλά για ψυχαγωγία και επικοινωνία με το κοινωνικό τους περιβάλλον. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την συνεχή αύξηση της κίνησης δεδομένων των δικτύων και την ανάγκη αύξησης της χωρητικότητας των δικτύων καθώς και των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων και της ποιότητας της επικοινωνίας.

Η συνεχής αύξηση της κίνησης δεδομένων των δικτύων κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να είναι πολύ μεγάλη, όπως γίνεται φανερό και από το παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 1.8) στο οποίο εμφανίζονται τα αποτελέσματα έρευνας της Cisco⁵⁴ αναφορικά με την κίνηση δεδομένων των δικτύων κινητών επικοινωνιών. Τα δεδομένα ανά μήνα μετρώνται σε “Exabytes⁵⁵” και η αύξηση των δεδομένων αυτών είναι θεαματική. Σύμφωνα με την ίδια έρευνα ο όγκος των δεδομένων ανά μήνα αυξήθηκε 4000 φορές τα τελευταία δέκα χρόνια και 400 εκατομμύρια φορές τα τελευταία 15 χρόνια. Το 2015, συγκριτικά με το 2014, η αύξηση ήταν 74%, ενώ όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 1.8) ο όγκος των δεδομένων αναμένεται να αυξηθεί σχεδόν δέκα φορές μέχρι το 2020, με τον όγκο των δεδομένων ανά μήνα από 3.7 Exabytes το 2015 να ανέρχεται στα 30.6 Exabytes το 2020. Την κίνηση τέτοιων όγκων δεδομένων δεν μπορούν να την υποστηρίξουν τα δίκτυα τρίτης γενιάς (πόσο μάλλον τα δίκτυα παλαιότερων γενεών) με αποτέλεσμα να “επιβάλλεται”, όπως αναφέρθηκε, η εξέλιξη τους.

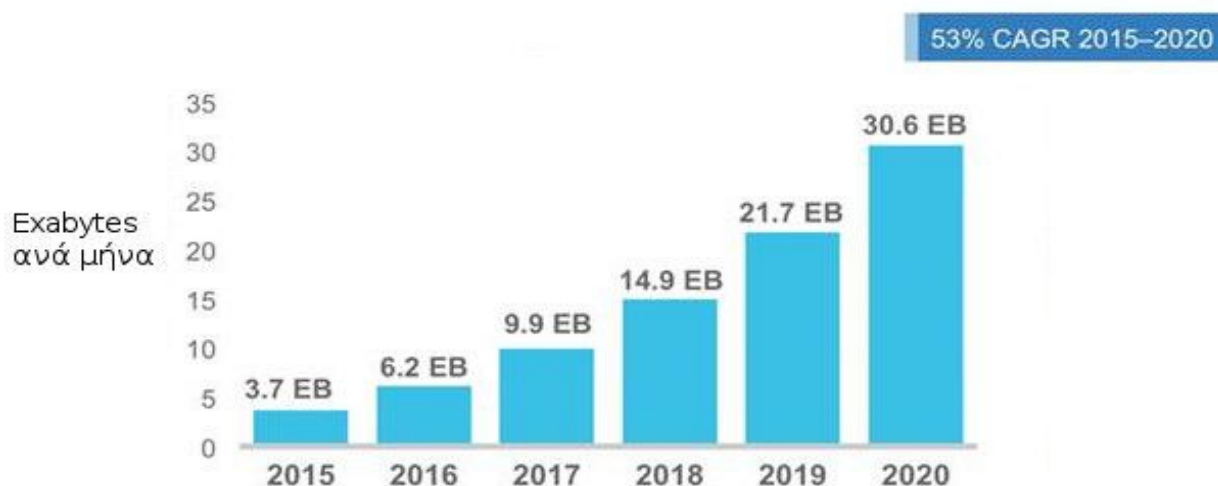
⁵² **Modem:** modulator-demodulator (διαμορφωτής- αποδιαμορφωτής). Είναι συσκευές που διαμορφώνουν κάποιο ψηφιακό σήμα για τη μετάδοση του μέσω του καναλιού επικοινωνίας και αποδιαμορφώνουν το λαμβανόμενο σήμα.

⁵³ Υπηρεσίες τηλεφωνίας που χρησιμοποιούν το βασικό πρωτόκολλο του Διαδικτύου, IP (Internet Protocol).

⁵⁴ Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020 White Paper

⁵⁵ Το ένα Exabyte ορίζεται από το SI ίσο με 1 EB = 1000⁶bytes, που αντιστοιχεί σε 1 δισεκατομμύριο bytes.

Πηγή: Cisco VNI Mobile, 2016



Σχήμα 1.8 – Κίνηση δεδομένων των χρηστών δικτύων κινητής τηλεφωνίας ανά μήνα

Η εξέλιξη των δικτύων τρίτης γενιάς είναι, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην ουσία η εξέλιξη του UMTS, που σαν τεχνολογία ονομάστηκε LTE (Long Term Evolution). Αναπτύχθηκε, αρχικά, από την 3GPP, και η πρώτη παρουσίαση της τεχνολογίας αυτής έγινε στην έκδοση 8 (Release 8) τον Δεκέμβριο του 2008. Οι κύριοι στόχοι που τέθηκαν (καθώς και τα κύρια χαρακτηριστικά της τεχνολογίας αυτής) ήταν οι παρακάτω:

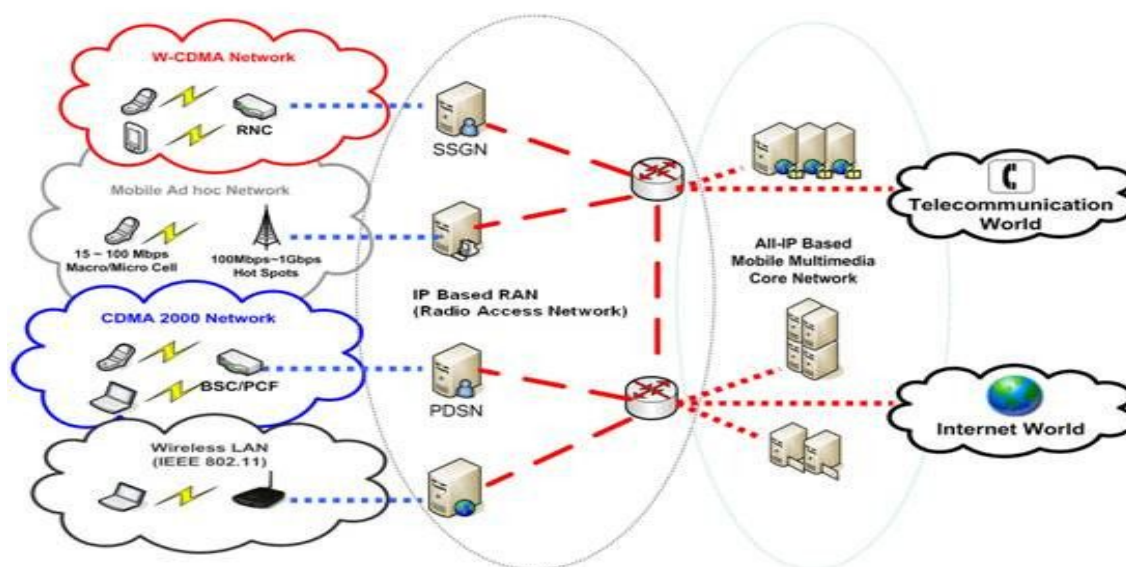
- Η κλιμακωτή χρήση φάσματος εύρους ζώνης με χρήση πολλαπλών φερόντων, μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στο USPA+ που αναφέρθηκε παραπάνω, επιτυγχάνοντας δυνατό εύρος ζώνης 5, 10, 15 και 20 MHz, αλλά και η δυνατότητα χρήσης μικρότερου εύρους ζώνης των 5MHz, ανάλογα με τις ανάγκες κάθε χρήστη, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη και αποδοτικότερη χρήση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου.
- Η επίτευξη ρυθμών μετάδοσης δεδομένων μέχρι και 100Mbps για την λήψη δεδομένων

από τον χρήστη (downlink) και 50 MHz για την αποστολή δεδομένων προς το δίκτυο (uplink) με χρήση εύρους ζώνης 20MHz.

- Χρήση όλων των δυνατών μεθόδων πολύπλεξης, δηλαδή συνδυασμός της πολύπλεξης χρόνου (TDD) και της πολύπλεξης συχνότητας (FDD) με την πολύπλεξη κώδικα (CDMA), σε αντίθεση με τις παλαιότερες τεχνολογίες οι οποίες συνδύαζαν την πολύπλεξη κώδικα με μία από τις άλλες δύο μεθόδους.
- Αύξηση της αποδοτικότητας του φάσματος και επίτευξη δύο με τρεις φορές μεγαλύτερης αποδοτικότητας συγκριτικά με το HSDPA.
- Αύξηση της δυνατότητα κινητικότητας των χρηστών όπου για ταχύτητες κίνησης τους μέχρι 15kmph να υπάρχει η δυνατότητα της βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος και, με μειωμένη απόδοση, να είναι δυνατή η υποστήριξη των κινούμενων χρηστών με μέχρι και 350 kmph.
- Η δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας των συσκευών και των δικτύων με δίκτυα και, αντίστοιχα, συσκευές, που χρησιμοποιούν παλαιότερης γενιάς τεχνολογίες αλλά και διαφορετικές από τις τεχνολογίες που αναπτύσσει η 3GPP (GSM/UMTS) και η δυνατότητα μεταγωγής από ένα δίκτυο σε άλλο χωρίς την διακοπή της σύνδεσης (handover) ακόμα και μεταξύ δικτύων διαφορετικών τεχνολογιών.
- Όλα τα παραπάνω να υποστηρίζουν υψηλή ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών, ακόμα και ευρυζωνικών υπηρεσιών όπως αυτές που χρησιμοποιούν οι VoIP εφαρμογές.

Ένας άλλος στόχος της ανάπτυξης της τεχνολογίας LTE ήταν και η ενοποίηση όλων των υπαρκτών δικτύων σε ένα για να μπορεί κάθε χρήστης να συνδέεται στα LTE δίκτυα με μία

ποικιλία συσκευών. Προς την κατεύθυνση αυτή, το LTE στηρίχθηκε στην μεταγωγή πακέτων, σε αντίθεση με προηγούμενες τεχνολογίες που χρησιμοποιούσαν μεταγωγή κυκλώματος, και τα πρωτόκολλα IP (Internet Protocols), που αποτελούν τα βασικά πρωτόκολλα του Διαδικτύου. Έτσι γίνεται δυνατή η χρήση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας από μία ποικιλία συσκευών όπως τα USB ασύρματα modem και οι συσκευές IP τηλεφωνίας που αναφέρθηκαν παραπάνω. Έτσι δημιουργείται ένα “υπερ-δίκτυο” το οποίο μπορεί να ενοποιήσει τα υπάρχοντα δίκτυα, όπως το CDMA2000, το UMTS καθώς και δίκτυα παλαιότερης γενιάς, αλλά και δίκτυα που δεν ανήκουν στις κινητές επικοινωνίες, όπως τα τοπικά δίκτυα (LAN-Local Area Network) που ανήκουν στην κατηγορία των δικτύων υπολογιστών.



Σχήμα 1.9 – Γενική δομή δικτύου τέταρτης γενιάς (LTE)

Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται από τα δίκτυα αυτά είναι (ονομαστικά, γιατί πιο αναλυτική αναφορά θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο) οι:

- Η μέθοδος MIMO που εισήχθη από το HSPA+.

- Διαμόρφωση OFDM καθώς και χρήση της μεθόδου πολύπλεξης OFDMA.
- Turbo κώδικες για την κωδικοποίηση.
- Mobile IP πρωτόκολλα.

Στις τεχνολογίες δικτύων τρίτης γενιάς, για να μπορέσουν να αναγνωριστούν σαν τεχνολογίες τρίτης γενιάς έπρεπε να είναι συμβατές με τις προδιαγραφές που περιγράφονταν στο IMT-2000. Αντίστοιχα, οι τεχνολογίες τέταρτης γενιάς πρέπει να ικανοποιούν τις προδιαγραφές που περιγράφονται στο πρότυπο (η οικογένεια προτύπων) IMT Advanced⁵⁶, που αποτελεί εξέλιξη του IMT-2000. Λόγω αυτού, όπως θα αναφερθεί εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο, η τεχνολογία LTE δεν θεωρείται ως αμιγής, τέταρτης γενιάς τεχνολογία. Όμως, η εξέλιξη της, το εξελιγμένο LTE (LTE Advanced) είναι σύμφωνο με το IMT Advanced και είναι μία τεχνολογία τέταρτης γενιάς.

Μία άλλη τεχνολογία η οποία είναι σύμφωνη με το IMT Advanced είναι η εξέλιξη του WiMax. Το WiMax είναι μία τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης η οποία αναπτύσσεται και προτυποποιείται από την IEEE⁵⁷ και θεωρείται ως ο απόγονος του Wi-Fi⁵⁸. Η τεχνολογία αυτή υλοποιείται με την οικογένεια πρωτοκόλλων “IEEE 802.16”, που άρχισε να σχεδιάζεται το 1999 από την IEEE και ολοκληρώθηκε, αρχικά, το 2001. Επίσημα, στην IEEE, η τεχνολογία αυτή ονομάζεται WirelessMAN (Wireless Metropolitan Area Networks - Ασύρματα Μητροπολιτικά

⁵⁶ Τα IMT-Advanced πρότυπα (International Mobile Telecommunications-Advanced) περιγράφουν τα βασικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες που πρέπει να παρέχει μία τεχνολογία ή και μία υπηρεσία ώστε να χαρακτηριστεί ως τεχνολογία (ή υπηρεσία) τέταρτης γενιάς. Εκδόθηκε από την ITU-R της International Telecommunication Union (ITU) το 2008 και αποτελεί, στην ουσία, εξέλιξη του IMT-2000 που αφορούσε την τρίτη γενιά.

⁵⁷ **IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers-Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών):** είναι ένας επαγγελματικός οργανισμός του οποίου τα κεντρικά γραφεία βρίσκονται στην Νέα Υόρκη, ο οποίος ιδρύθηκε το 1963 από την ένωση του Αμερικανικού Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και του Ινστιτούτου Ραδιομηχανικών και έχει ως βασικό σκοπό την εκπαιδευτική προώθηση και την τεχνολογική εξέλιξη της ηλεκτρικής και ηλεκτρολογικής μηχανικής, των τηλεπικοινωνιών, της επιστήμης των υπολογιστών και των ενοποιημένων προτύπων.

⁵⁸ Το Wi-Fi (Wireless Fidelity) αποτελεί το καθιερωμένο πρότυπο της βιομηχανίας στο χώρο των ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN: Wireless Local Area Network). Η επίσημη ονομασία της οικογένειας προτύπων είναι “IEEE 802.11” και το όνομα Wi-Fi προέρχεται από την WiFi Alliance, έναν οργανισμό ανεξάρτητο της IEEE, ο οποίος παρέχει την πιστοποίηση για τα προϊόντα που εμπίπτουν στις προδιαγραφές του 802.11.

Δίκτυα), ενώ το όνομα WiMax είναι το εμπορικό όνομα της. Η τεχνολογία αυτή άρχισε την προσαρμογή της για χρήση από κινητές συσκευές με το Mobile WiMax (πρότυπο “IEEE 802.16e”) το οποίο θεωρείται τεχνολογία “3.9G” γιατί πληρεί τις προδιαγραφές που καθορίζονται στο IMT-2000, η οποία όμως δεν είναι συμβατή με τα 3G δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αλλά υλοποιείται σε ξεχωριστά δίκτυα, και για τον λόγο αυτό δεν αναφέρθηκε στην παράγραφο με τις τεχνολογίες τρίτης γενιάς. Η εξέλιξη του (και προσαρμογή του WiMax για τα δίκτυα τέταρτης γενιάς) είναι το WiMax που προτυποποιείται ως “IEEE 802.16m” και αποτελεί, μαζί με το LTE Advanced, τις κυρίαρχες τεχνολογίες δικτύων τέταρτης γενιάς, στο οποίο θα γίνει πιο εκτενής αναφορά στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 2

2.1 – Τεχνολογίες τέταρτης γενιάς (4G)

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, κάθε γενιά δικτύων κινητών επικοινωνιών εισήγαγε, εκτός των μεγάλων βελτιώσεων, όσον αφορά την χωρητικότητα του δικτύου, τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και τις παρεχόμενες υπηρεσίες, κάποιες τεχνολογικές καινοτομίες σε σχέση με την προηγούμενη. Η δεύτερη γενιά εισήγαγε την χρήση ψηφιακών σημάτων έναντι των αναλογικών της πρώτης γενιάς. Η τρίτη γενιά έκανε χρήση της CDMA μεθόδου πολύπλεξης σε συνδυασμό με μία μέθοδο TDMA ή FDMA ενώ η δεύτερη γενιά χρησιμοποιούσε μόνο μία από τις μεθόδους αυτές, χρησιμοποιούσε ψηφιακή διαμόρφωση σήματος ανώτερης τάξης σε σχέση με την προηγούμενη γενιά και ήταν η γενιά που εισήγαγε τις στοιχειοκεραίες στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και την χρήση πολλαπλών κεραιών (MIMO). Αντίστοιχα, η τέταρτη γενιά εισάγει αρκετές καινοτομίες, κάποιες από τις οποίες αναφέρθηκαν, σύντομα, στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο στόχος της γενιάς αυτής είναι η δημιουργία ενός ενιαίου δικτύου το οποίο να μπορεί να ενοποιήσει τις υπάρχουσες τεχνολογίες και θα μπορεί να παρέχει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και ποιότητα επικοινωνίας πολύ υψηλότερες από την προηγούμενη γενιά. Η γενιά αυτή είναι ακόμα σε εξέλιξη⁵⁹ και λειτουργεί παράλληλα με τα

⁵⁹ Μέχρι τον Ιούνιο του 2016 που γράφτηκε η συγκεκριμένη εργασία.

δίκτυα τρίτης γενιάς (ακόμα και με δίκτυα δεύτερης γενιάς), με πολλά από τα δίκτυα που προωθούνται ως τέταρτης γενιάς να είναι δίκτυα HSPA/HSPA+ ή και δίκτυα LTE.

Όπως και για τις προηγούμενες τεχνολογικές γενιές, έτσι και για την τέταρτη γενιά αναπτύχθηκε από την ITU μία ομάδα πρωτοκόλλων (ή προτύπων) τα οποία περιέχουν τις προδιαγραφές που πρέπει να έχει μία τεχνολογία καθώς και τα κριτήρια που πρέπει αν πληρεί έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ως “4G τεχνολογία”. Τα πρότυπα αυτά αποτελούν εξέλιξη του IMT-2000 που καθόριζε τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών τρίτης γενιάς και είναι τα IMT-Advanced⁶⁰ πρότυπα (International Mobile Telecommunications Advanced), τα οποία περιγράφουν τα βασικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες που πρέπει να παρέχει μία τεχνολογία (ή και μία υπηρεσία) ώστε να χαρακτηριστεί ως τεχνολογία (ή υπηρεσία) τέταρτης γενιάς.

Τα κυριότερα από αυτά τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει μία τεχνολογία για να χαρακτηριστεί ως “4G τεχνολογία” είναι:

- Πρέπει να βασίζεται, αποκλειστικά, στην μεταγωγή πακέτων με χρήση IP πρωτοκόλλων.
- Να έχει ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μέχρι και 100Mbps για περιπτώσεις υψηλής κινητικότητας (χρήστες που κινούνται με σχετικά χαμηλές ταχύτητες) και μέχρι και 1Gbps για περιπτώσεις χαμηλής κινητικότητας (παραδείγματος χάρις τοπικά δίκτυα κτιρίων) για μετάδοση δεδομένων από το δίκτυο προς τον χρήστη (downlink).
- Να μπορεί να χρησιμοποιεί και να διαχειρίζεται δυναμικά τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου έτσι ώστε να μπορεί να υποστηριχθεί ο μέγιστο δυνατός αριθμός χρηστών σε ένα δίκτυο, χωρίς όμως να υπάρχουν απώλειες σχετικά με την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών.

⁶⁰ **International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT-Advanced Standard):** οικογένεια προτύπων της ITU-R που εκδόθηκε το 2008 έτσι ώστε να καθορίσει τις προδιαγραφές των τεχνολογιών τέταρτης γενιάς.

- Δυνατότητα χρήσης κλιμακωτού εύρους καναλιών 5-20MHz, το οποίο, ανάλογα με τις δυνατότητες και τις ανάγκες του δικτύου, να μπορεί είτε να μειωθεί και να γίνει μικρότερο των 5MHz είτε να αυξηθεί μέχρι και τα 40MHz.
- Να έχει φασματική απόδοση ζεύξης μέχρι 15bit/sec/Hz για μετάδοση δεδομένων από το δίκτυο προς τον χρήστη (downlink) και 6.75 bit/sec/Hz για μετάδοση δεδομένων από τον χρήστη προς το δίκτυο (uplink) (οπότε, για ο παραπάνω ρυθμός των 1Gbps να μπορεί να επιτευχθεί με χρήση εύρους ζώνης μικρότερου των 67MHz).
- Η φασματική απόδοση του συστήματος να είναι, σε περιπτώσεις εσωτερικών χώρων, 3bit/sec/Hz/cell για downlink και 2.25 bits/sec/Hz/cell για uplink.
- Δυνατότητα αποδοτικού handover μεταξύ των διαφορετικών δικτύων που απαρτίζουν ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς.
- Την δυνατότητα παροχής υπηρεσιών πολυμέσων νέας γενιάς, υψηλής ποιότητας.

Τις παραπάνω απαιτήσεις πληρούν δύο ανταγωνιστικές τεχνολογίες. Η πρώτη από αυτές είναι η εξέλιξη των τεχνολογιών τρίτης γενιάς που αναπτύσσει η 3GPPP (UMTS, HSPA και HSPA+), το LTE (Long Term Evolution), και η δεύτερη είναι μία τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης που αναπτύσσεται από την IEEE, η οποία τροποποιήθηκε και εξελίχθηκε έτσι ώστε να γίνει κατάλληλη για την χρήση της σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς, το WiMax. Οι δύο αυτές τεχνολογίες, αν και έχουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους μιας και αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα η μία από την άλλη, έχουν και πολλά κοινά χαρακτηριστικά και μεθόδους και τεχνικές που χρησιμοποιούν. Στις επόμενες παραγράφους θα γίνει μία σύντομη περιγραφή των δύο αυτών τεχνολογιών και στην συνέχεια θα γίνει αναφορά στις κύριες μεθόδους και τεχνικές που χρησιμοποιούνται από τα δίκτυα τέταρτης γενιάς και είναι κοινές και στα δύο συστήματα.

2.1.1 – LTE και LTE Advanced

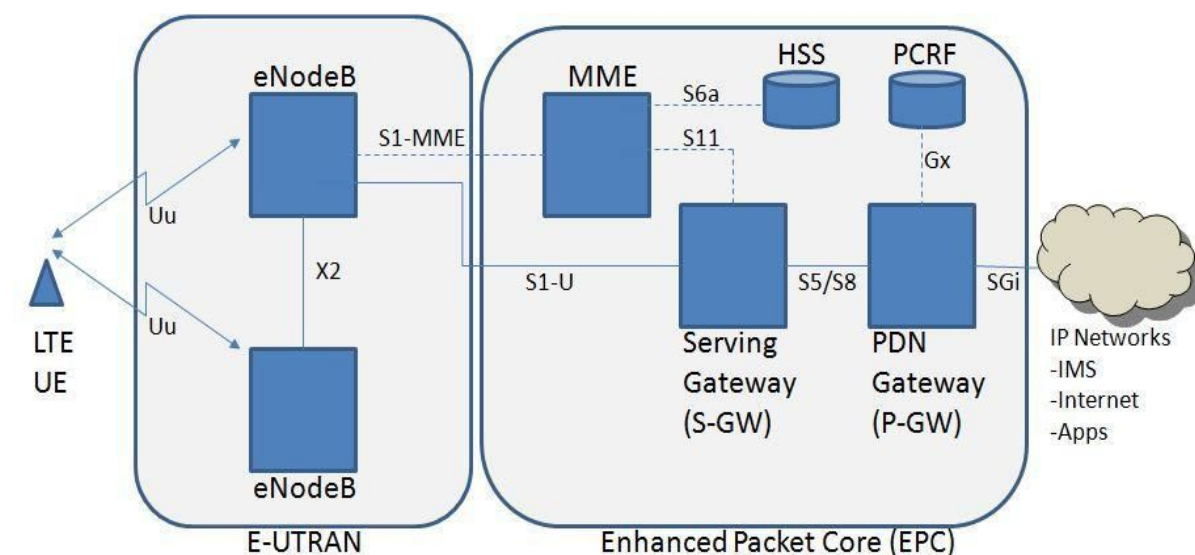


Με την ονομασία “3GPP Long Term Evolution (LTE)” αναφέρεται η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς, και συγκεκριμένα των UMTS και HSPA, η οποία προοριζόταν να είναι μία τεχνολογία τέταρτης γενιάς, σύμφωνα με τις συστάσεις της οικογένειας προτύπων IMT-Advanced (εξέλιξη των IMT-2000 που καθόριζαν τις τεχνολογίες τρίτης γενιάς). Το εμπορικό σήμα της τεχνολογίας αυτής φαίνεται στο διπλανό σχήμα (Σχήμα 2.1). Συγκριτικά με τις παλαιότερες τεχνολογίες, αυξάνει την χωρητικότητα και την ταχύτητα του δικτύου χρησιμοποιώντας νέες τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης και πολύπλεξης. Το πρώτο δημόσιο δίκτυο LTE που εγκαταστάθηκε στο κόσμο, ήταν στο Όσλο και τη Στοκχόλμη από την εταιρεία TeliaSonera στις 14 Δεκεμβρίου 2009.

Αν και σε πολλές εφαρμογές, αναφέρεται σαν “σύστημα τέταρτης γενιάς”, επειδή δεν πληρεί τις βασικές προϋποθέσεις που θέτει το IMT Advanced που αναφέρθηκαν παραπάνω, δεν είναι, επίσημα, 4G τεχνολογία, αλλά θεωρείται ως μεταβατική τεχνολογία γενιάς “3.9G”. Για τον λόγο αυτό, το LTE⁶¹ αναβαθμίστηκε στο LTE Advanced που είναι μία, αμιγώς, 4G τεχνολογία. Είναι ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί την μέθοδο μεταγωγής πακέτων δεδομένων με χρήση των πρωτοκόλλων IP και ο πυρήνας του δικτύου ονομάζεται “Enhanced Packet Core” (EPC). Ως εξέλιξη των δικτύων UMTS έχει παρόμοιες δομές στην αρχιτεκτονική του, οι οποίες όμως είναι εξέλιξη των δομών του UMTS, πως το δίκτυο πρόσβασης που είναι

⁶¹ Το LTE περιγράφηκε πρώτη φορά στην έκδοση 8 (Release 8) της 3GPP το 2008 και η εξέλιξη του, το LTE Advanced στην έκδοση 10 (Release 10) το 2011.

εξέλιξη του UTRAN που περιγράφηκε στην παράγραφο που αφορούσε το UMTS, το οποίο ονομάζεται “Evolved UTRAN” (E-UTRAN). Η γενική αρχιτεκτονική του LTE δικτύου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.2), τα δομικά μέρη της οποίας αποτελούνται από τα παρακάτω:



Σχήμα 2.2 – Αρχιτεκτονική LTE δικτύου

- **LTE UE (LTE User Equipment):** Αποτελεί τον εξοπλισμό των χρηστών (smartphones, tablets κλπ) που χρησιμοποιούν για την πρόσβαση στα LTE δίκτυα.
- **E-UTRAN:** Το E-UTRAN είναι το δίκτυο πρόσβασης του LTE και αποτελείται από ένα δίκτυο με eNodeBs (Evolved Node B), όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 2.2). Αυτά αποτελούν μία εξέλιξη των σταθμών βάσης του UMTS. Για κανονική χρήση επικοινωνίας χρήστη προς χρήστη (όχι broadcasting) δεν υπάρχει κάποιος κεντρικός ελεγκτής και η λειτουργία ελέγχου των ραδιοζεύξεων είναι ενσωματωμένη σε όλα τα eNodeBs, μιας και τα eNodeBs έχουν ενσωματωμένα πρωτόκολλα Φυσικού στρώματος, στρώματος MAC, Radio Link Control πρωτόκολλα και Packet Data Control Protocol. Επίσης παρέχει Radio Resource Control λειτουργίες οι οποίες εντάσσονται στο πεδίο

ελέγχου. Για τον λόγο αυτό η αρχιτεκτονική του E-UTRAN χαρακτηρίζεται ως "επίπεδη". Τα διάφορα eNodeBs επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω των διεπαφών X2 και με τον πυρήνα του δικτύου, EPC, μέσω των διεπαφών S1, οι οποίες είναι δύο ειδών: οι S1-U που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία με την S-GW και οι S1-MME για την επικοινωνία με την MME. Ένα e-NodeB μπορεί να συνδεθεί με περισσότερα του ενός MME και S-GW, χαρακτηριστικό που ενισχύει την ικανότητα των eNodeBs να διαχειρίζονται αποδοτικότερα τους πόρους του δικτύου, μοιράζοντας το φορτίο των χρηστών σε αρκετά MME/S-GW, εξαλείφοντας παράλληλα φαινόμενα αποτυχίας επικοινωνίας λόγω υπερφορτωμένων MME/S-GW. Τα πρωτόκολλα στα οποία βασίζονται οι παραπάνω διεπαφές είναι γνωστά ως "Access Stratum"⁶² (AS) και το επίπεδο αυτό είναι υπεύθυνο για τις λειτουργίες ραδιοσύζευξης, βασικότερες των οποίων είναι: το Radio Resource Management (διαχείριση πόρων ραδιοζεύξεων), που καλύπτει όλες τις λειτουργίες σχετικά με την διαχείριση των πόρων του δικτύου και την κατανομή τους στους συνδεδεμένους χρήστες, η οποία γίνεται δυναμικά, το Header Compression (συμπίεση κεφαλίδων), που συμπιέζει τις IP κεφαλίδες των πακέτων δεδομένων για αποδοτικότερη χρήση των πόρων ραδιοζεύξεων, την ασφάλεια, κρυπτογραφώντας τα δεδομένα που ανταλλάσσονται μέσω του δικτύου, και, τέλος, η συνδεσιμότητα με το επίπεδο EPC.

Κάποια από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του E-UTRAN είναι: Χρήση τεχνικής OFDM⁶³ για το downlink με υποστηριζόμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων των 100Mbps και SC-FDMA για το uplink με υποστηριζόμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 50Mbps, για εύρος ζώνης 20MHz. Η χρήση της OFDM, μέσω του καταμερισμού των δεδομένων σε πακέτα τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικά φέροντα παρέχοντας ανοσία στην εξασθένιση του σήματος και στην αύξηση της αξιοπιστίας μετάδοσης των δεδομένων. Καθυστέρηση τελικού χρήστη μικρότερη από 10msec. Δυναμική διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων και του αποδιδόμενου εύρους ζώνης στους χρήστες, ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη και την κατάσταση του δικτύου καθώς και την υποστήριξη προγενέστερων τεχνολογιών. Υποστήριξη υψηλής κινητικότητας χρηστών, μέχρι θεωρητικά τα 500kmph και κάλυψη κυψέλης μέχρι τα 100km (με κλιμάκωση των υποστηριζόμενων ρυθμών δεδομένων από τα 30km και πάνω). Τέλος, συγκριτικά με τα δίκτυα

⁶² Στα οποία ορίζονται και οι διεπαφές των δικτύων UMTS.

⁶³ **Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM):** Τεχνική ψηφιακής κωδικοποίησης δεδομένων στην οποία θα γίνει αναφορά σε επόμενη παράγραφο.

UMTS, αυξάνει μέχρι και τέσσερις φορές την χωρητικότητα για υπηρεσίες τηλεφωνίας με χρήση της μεθόδου VoIP (Voice over IP).

- **EPC:** Το Evolved Packet Core αποτελεί τον πυρήνα των LTE δικτύων και αποτελεί σταδιακή εξέλιξη του πυρήνα των δικτύων τρίτης γενιάς. Χρησιμοποιεί μόνο μεθόδους μεταγωγής πακέτων και τεχνολογιών καθολικού IP, έχοντας την δυνατότητα να παρέχει υψηλής ποιότητας υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες πολυμέσων υψηλών απαιτήσεων. Ένα βασικό του χαρακτηριστικό είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των λειτουργιών ελέγχου και διαχείρισης των δεδομένων, όπως θα γίνει φανερό και από τα παρακάτω. Οι βασικές του αλλαγές, αναφορικά με τις προηγούμενες γενιές δικτύων, που οφείλονται στα παραπάνω χαρακτηριστικά, είναι αρκετές. Μία από τις βασικότερες είναι η χρήση της τεχνολογίας VoIP, “αντιμετωπίζοντας” τα δεδομένα φωνής ως πακέτα δεδομένων, επιτυγχάνοντας την αύξηση της ποιότητας και της ποικιλίας υπηρεσιών καθώς και των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων σε επίπεδα αντίστοιχα με τα ενσύρματα ευρυζωνικά δίκτυα. Αυτό οδηγεί και στην μείωση του κόστους των παρεχόμενων υπηρεσιών, μειώνοντας το κόστος ανά ψηφίο (μονάδα μέτρησης κόστους των ψηφιακών υπηρεσιών), μιας και μία κυψέλη του E-UTRAN μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι και τετραπλάσιο αριθμό χρηστών, σχετικά με μία κυψέλη του UTRAN. Τέλος, λόγω της καθολικότητας των IP πρωτοκόλλων και την δυνατότητα λειτουργίας σε όλες τις διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων, τα LTE δίκτυα μπορούν να παρέχουν δυνατότητες χρήσης όλων των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, σε οποιαδήποτε χώρα και οποιασδήποτε γενιάς και να είναι το δίκτυο, διασφαλίζοντας την συνεχή επικοινωνία των χρηστών ανεξάρτητα της περιοχής ή ακόμα και της χώρας στην οποία βρίσκονται. Τα δομικά μέρη του EPC που παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 2.2) είναι τα εξής:

Serving Gateway (S-GW): Οι λειτουργίες της πύλης S-GW την δρομολόγηση και την προώθηση των πακέτων δεδομένων του χρήστη και λειτουργεί και ως σημείο αναφοράς για το handover ενός χρήστη μεταξύ των eNodeBs του ίδιου ή και διαφορετικού LTE δικτύου καθώς και το handover σε δίκτυο διαφορετικής τεχνολογίας. Οι λειτουργίες της καθοδηγούνται από την MME, η οποία ελέγχει και την εναλλαγή ενός χρήστη από μία S-GW σε άλλη. Μεταβιβάζει τα πακέτα δεδομένων από το eNodeB στο P-GW και vice versa, και αποθηκεύει τα δεδομένα προς έναν χρήστη του οποίου, λόγω αδράνειας, έχουν ελευθερωθεί οι πόροι που χρησιμοποιούσε για

την επικοινωνία με το eNodeB, αιτώντας νέα σύνδεση από την MME για την ολοκλήρωση της μεταφοράς των πακέτων δεδομένων. Συνδέεται με την MME Μέσω των διεπαφών S11, με τα eNodeBs μέσω των S1-U και με τα P-GW μέσω των διεπαφών S5/S8.

Packet Data Network Gateway (P-GW) : Η οντότητα αυτή λειτουργεί ως σημείο εξόδου και εισόδου των πακέτων δεδομένων των χρηστών προς και από εξωτερικά δίκτυα πακέτων δεδομένων. Κάθε χρήστης μπορεί να είναι συνδεδεμένος με περισσότερες της μία P-GW, επιτρέποντας του την ταυτόχρονη πρόσβαση σε πολλαπλά δίκτυα πακέτων δεδομένων (Packet Data Networks – PDNs), όπως δίκτυα WiMax, το Διαδίκτυο και άλλα. Συνήθως είναι η οντότητα που αποδίδει την IP διεύθυνση στους χρήστες και περιλαμβάνει λειτουργίες PCEF (Policy Control Enforcement Function), συλλέγοντας και αναφέροντας πληροφορίες σχετικά με την χρέωση του χρήστη. Σε περίπτωση αλλαγής του S-GW του χρήστη, λαμβάνει πληροφορίες από το νέο S-GW για την αλλαγή των χρησιμοποιούμενων φορέων και καναλιών ώστε να ολοκληρωθεί η διαδικασία του handover. Επικοινωνεί με τις S-GW μέσω διεπαφών S5/S8, με τις PCRF μέσω των Gx και με τα εξωτερικά δίκτυα μέσω των SGi.

Policy and Charging Resource Function (PCRF) : Η οντότητα αυτή είναι υπεύθυνη για την πολιτική και τον έλεγχο της χρέωσης του χρήστη παρέχοντας τις απαραίτητες πληροφορίες στην P-GW για τις PCEF που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι πληροφορίες αυτές ονομάζονται κανόνες PCC (Policy Control and Charging) και θα τις αποστέλλει κάθε φορά που ένας νέος χρήστης συνδέεται στο δίκτυο.

Mobility Management Entity (MME) : Αποτελεί την οντότητα που είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο πρόσβασης στο LTE δίκτυο. Εκτελεί λειτουργίες, οι βασικότερες των οποίων είναι η παρακολούθηση των χρηστών για την απελευθέρωση των πόρων σε περίπτωση αδράνειας ενός χρήστη και την απόδοση νέων πόρων όταν ο χρήστης ξαναγίνει ενεργός καθώς και για την περίπτωση που ένας χρήστης εισέλθει στο δίκτυο, ο έλεγχος της ταυτότητας των χρηστών, σε συνεργασία με το HSS με το οποί επικοινωνεί μέσω της διεπαφής S6a, η διαχείριση των κλειδιών ασφαλείας για την κρυπτογράφηση των δεδομένων των χρηστών και τέλος, λειτουργίες ελέγχου για το handover χρηστών μεταξύ του LTE δικτύου και των δικτύων παλαιότερων γενιών.

Home Subscription Server (HSS) : Αποτελεί την βάση δεδομένων του δικτύου με τις εγγραφές όλων των συνδεδεμένων χρηστών και βρίσκεται σε κεντρικό σημείο στις εγκαταστάσεις του παρόχου του κάθε δικτύου. Οι εγγραφές αυτές αφορούν τις διαθέσιμες υπηρεσίες για κάθε χρήστη καθώς και πληροφορίες σχετικά με την δυνατότητα PDN συνδέσεων και την δυνατότητα περιαγωγής. Για το αποδοτικότερο handover προς ένα μη-3GPP δίκτυο, αποθηκεύει τις ταυτότητες των διαθέσιμων P-Gws προς χρήση. Για την ταυτοποίηση των χρηστών, η οποία γίνεται, όπως προαναφέρθηκε, σε συνεργασία με την MME, περιέχει το Κέντρο Ταυτοποίησης (Authentication Center) και για τον λόγο αυτό κάθε HSS συνδέεται με κάθε MME που υπάρχει στο δίκτυο της.

Η εξέλιξη του LTE στο LTE Advanced αφορά την βελτίωση των χαρακτηριστικών της απόδοσης των LTE δικτύων έτσι ώστε να είναι σύμφωνες με το IMT Advanced και να αναγνωριστεί ως τεχνολογία τέταρτης γενιάς. Τα κύρια χαρακτηριστικά του LTE Advanced που το καθιστούν ως τεχνολογία τέταρτης γενιάς είναι οι μέγιστοι υποστηριζόμενοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων για downlink συνδέσεις 1 Gbps και για uplink συνδέσεις 500 Mbps, με υποστηριζόμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων μέχρι 100MHz, η σχεδόν τρεις φορές υψηλότερη χωρητικότητα του δικτύου σε σχέση με το LTE, με μέγιστη αποδοτικότητα φάσματος για το downlink 30bps/Hz και 15 bps/Hz για το uplink και η μεγαλύτερη ευελιξία, όσον αφορά το υποστηριζόμενο εύρος ζώνης, διασφαλίζοντας καλύτερη συμβατότητα με άλλα, μη LTE δίκτυα.

2.1.2 – WiMax και WiMax 2



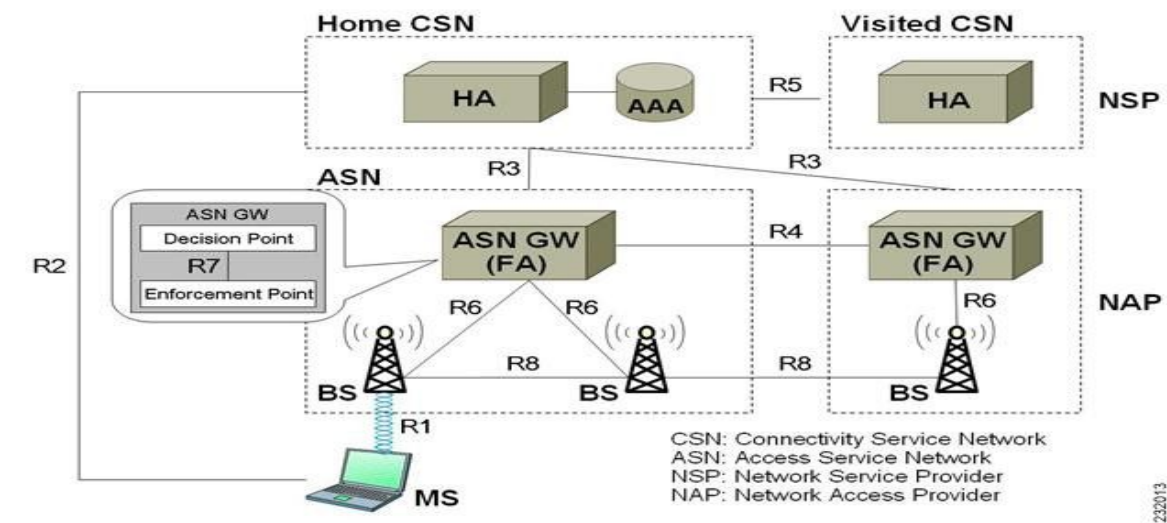
Σχήμα 2.3 - Λογότυπο του WiMax

Η δεύτερη τεχνολογία τέταρτης γενιάς είναι το WiMax που υλοποιείται με την οικογένεια πρωτοκόλλων 802.16 της IEEE που άρχισε να σχεδιάζεται το 1999 και ολοκληρώθηκε, στην αρχική της μορφή, το 2001. Το εμπορικό λογότυπο της τεχνολογίας αυτής παρατίθεται στο διπλανό σχήμα (Σχήμα 2.3). Θεωρείται ως εξέλιξη του Wi-Fi (οικογένεια πρωτοκόλλων IEEE 802.11) και ως τέτοια, είναι μία τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης η οποία σχεδιάστηκε αρχικά για δίκτυα υπολογιστών και προσαρμόστηκε, στην συνέχεια, για χρήση σε δίκτυα κινητών συσκευών με το Mobile WiMax (IEEE 802.16e – Δεκέμβριος 2005), που δίνει δυνατότητα ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης σε οποιαδήποτε κινητή συσκευή που υποστηρίζει την τεχνολογία αυτή σε αποστάσεις μέχρι και 40 χιλιομέτρων. Χρησιμοποιεί την μέθοδο μεταγωγής πακέτων και τα πρωτόκολλα IP και αυτός είναι ένας από τους λόγους που ήταν κατάλληλη για να γίνει τεχνολογία δικτύων κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς μιας και είχε, από την δημιουργία της, την δυνατότητα σύνδεσης με όλα τα υπόλοιπα διαθέσιμα δίκτυα που χρησιμοποιούσαν μεταγωγή πακέτων, απαραίτητη προϋπόθεση για να αναγνωριστεί μία τεχνολογία ως 4G, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Από την δημιουργία της, υπερείχε των υπόλοιπων τεχνολογιών δικτύωσης, ενσύρματης και ασύρματης, λόγω των παρακάτω:

- Λόγω της παροχής ευρυζωνικών συνδέσεων στους χρήστες των WiMax δικτύων μέσω ασύρματων συνδέσεων, υπερέχει των αντίστοιχων ενσύρματων γιατί η εγκατάσταση ενός ολοκληρωμένου δικτύου είναι πολύ πιο εύκολη, γρήγορη και με πολύ μειωμένο κόστος, παρέχοντας παράλληλα σύνδεση σε κινητούς χρήστες, ανεξάρτητα με τον τόπο που βρίσκονται (αρκεί να είναι εντός της περιοχής κάλυψης του WiMax δικτύου), δυνατότητα που δεν υπάρχει τα αντίστοιχα ενσύρματα.
- Λόγω της ευρυζωνικότητας των παρεχόμενων ρυθμών μετάδοσης των δικτύων αυτών υπερείχε από τις τεχνολογίες των δικτύων τρίτης γενιάς, με μόνο τα δίκτυα HSPA+ να παρέχουν συγκρίσιμες ταχύτητες. Όμως, λόγω της μεγάλης εξάπλωσης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας που είχε ήδη επιτευχθεί όταν δημιουργήθηκε το WiMax σαν τεχνολογία, οι υλοποιήσεις εμπορικών WiMax δικτύων ήταν πολύ λίγες, με μία από τις πρώτες υλοποιήσεις να γίνονται στην Νότια Κορέα με εμπορικό όνομα WiBro, το δεύτερο εξάμηνο του 2006.

Η δομή ενός WiMax δικτύου μοιάζει με αυτή την κυψελωτών δικτύων, όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.4). Αποτελείται από αντίστοιχους, με το GSM, σταθμούς βάσης, οι οποίοι είναι οι ηλεκτρονικές εγκαταστάσεις εκπομπής και λήψης των δεδομένων των χρηστών του δικτύου, με τους οποίους συνδέονται οι σταθμοί συνδρομητών, ή κοινώς χρήστες του δικτύου, οι οποίοι μπορεί να είναι κάποια αυτόνομη συσκευή ή και κάποια κατάλληλη συσκευή Modem που είναι συνδεδεμένη σε ένα laptop ή έναν σταθερό υπολογιστή. Οι σταθμοί βάσης επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ασύρματων συνδέσεων και αποτελούν ένα "υπερδίκτυο" αντίστοιχο του Διαδικτύου, το οποίο ανταλλάσσει δεδομένα μεταξύ των σταθμών ώστε να είναι δυνατή η μετακίνηση ενός χρήστη από ένα σταθμό σε ένα άλλο, όπως γίνεται και στο GSM. Τα πρωτόκολλα στα οποία βασίζεται η λειτουργία του δικτύου είναι πρωτόκολλα σχεδιασμένα για TCP/IP δίκτυα, με την διαχείριση αυτών να γίνεται με το πρωτόκολλο DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol). Οι σταθμοί βάσης συνδέονται με μία αντίστοιχη, με το LTE, πύλη GW, την ASN GW (Access Services Network GateWay), η οποία αποτελεί το σημείο πρόσβασης των χρηστών στις υπηρεσίες πρόσβασης του δικτύου, και οι δύο αυτές οντότητες αποτελούν το επίπεδο NAP (Network Access Provider). Μέσω της σύνδεσης των ASN GW με το επίπεδο NSP (Network Service Provider) και τις υπηρεσίες συνδεσιμότητας του δικτύου (CSN-Connectivity Services Network) οι οποίες παρέχουν την IP συνδεσιμότητα και όλες τις λειτουργίες του IP δικτύου κορμού, επιτυγχάνεται η πρόσβαση των χρηστών στις υπηρεσίες του WiMax δικτύου.

WiMAX Forum NWG - Mobile WiMAX NRM (Network Reference Model)



Σχήμα 2.4 – Γενική δομή WiMax δικτύου

Η έκδοση Mobile WiMax (IEEE 802.16e), η οποία ήταν η πρώτη έκδοση που υποστήριζε την σύνδεση κινητών συσκευών στο WiMax δίκτυο, υποστήριζε, θεωρητικά, ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 70 Mbps για downlink και για uplink και για τον λόγο αυτό δεν θεωρείται 4G τεχνολογία. Η εξέλιξη του πραγματοποιήθηκε με το WiMax 2 (IEEE 802.16m-2011), που έγινε αποδεκτό από το IMT Advanced ως 4G τεχνολογία. Παρέχει μέχρι και τέσσερις φορές μεγαλύτερους, πραγματικούς, ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, μέχρι και 110 Mbps για downlink και 70 Mbps για uplink, με εύρος ζώνης συχνοτήτων μονού φέροντος 20 MHz με χρήση 2x2 MIMO τεχνικής. Τέλος, το WiMax 2, όπως αντίστοιχα και το LTE, είναι συμβατό με τις προηγούμενες εκδόσεις του (backward compatibility).

2.1.3 – Κύριες μέθοδοι και τεχνικές των 4G δικτύων

Ο κύριος στόχος της ανάπτυξης της τέταρτης γενιάς δικτύων κινητών επικοινωνιών είναι, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η δημιουργία ενός ενιαίου δικτύου, το οποίο να παρέχει

ευρυζωνικές υπηρεσίες υψηλής ποιότητας και ταχύτητας. Μάλιστα, με το όριο των 100Mbps που έχει τεθεί σαν ελάχιστος ρυθμός για τις 4G τεχνολογίες, τα δίκτυα αυτά παρέχουν ταχύτητες υψηλότερες των σταθερών ενσύρματων δικτύων⁶⁴. Για να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι, οι 4G τεχνολογίες χρησιμοποιούν καινοτόμες μεθόδους και τεχνολογίες, κάποιες από τις οποίες αποτελούν εξέλιξη προηγούμενων που χρησιμοποιούσαν παλαιότερες τεχνολογίες. Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει αναφορά μόνο στις καινοτομίες που εισήγαγαν τα δίκτυα τέταρτης γενιάς, χωρίς να ξαναγίνει αναφορά στις παλαιότερες μεθόδους και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται.

Η κυριότερη από αυτές τις τεχνικές είναι η εξέλιξη της τεχνικής MIMO (Multiple Input Multiple Output), που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά, σε δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, από τα δίκτυα HSPA+. Η τεχνική αυτή, έγινε εφικτή, όπως προαναφέρθηκε, με την χρήση των στοιχειοκεραιών στον εξοπλισμό, είτε του χρήστη είτε του δικτύου. Με την χρήση της τεχνικής αυτής επιτυγχάνεται καλύτερη αποτελεσματικότητα στην χρήση του διαθέσιμου συχνοτικού φάσματος. Η τεχνική MIMO έχει κάποιες παραλλαγές, ανάλογα με την διαθεσιμότητα των κεραιών στον πομπό και στον δέκτη, οι οποίες διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Single-Input Multiple-Output (SIMO): Ο πομπός χρησιμοποιεί μια απλής μετάδοσης ζεύξη κατά την οποία πολλαπλές κεραιές στον δέκτη λαμβάνουν το σήμα αυτό.
- Multiple-Input Single-Output (MISO): Ο πομπός χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές για την αποστολή του σήματος το οποίο λαμβάνεται από μία κεραία στον δέκτη.
- Single-User Multiple Input Multiple Output (SU-MIMO): Και ο πομπός και ο δέκτης χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραιές για την αποστολή και λήψη του ίδιου σήματος, με την επικοινωνία να πραγματοποιείται μεταξύ δύο χρηστών (ή ενός χρήστη και ενός σταθμού βάσης).

⁶⁴ Αναφορικά με τα δίκτυα ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), του οποίου το όριο είναι στα 24Mbps, VDSL (Very-high-bitrate DSL), του οποίου το όριο είναι στα 26Mbps, και AVDSL, που έχει όριο 52Mbps. Δεν συμπεριλαμβάνονται τα δίκτυα οπτικών ινών τα οποία μπορούν να παρέχουν υψηλότερες ταχύτητες.

- Multi-User Multiple Input Multiple Output (MU-MIMO): Και ο πομπός και ο δέκτης χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραίες για την αποστολή και λήψη του ίδιου σήματος, με την επικοινωνία να πραγματοποιείται μεταξύ αρκετών χρηστών και ενός, κοινού, σταθμού βάσης.

Για την επίτευξη της πολλαπλής πρόσβασης, συνδυαστικά με τις υπόλοιπες τεχνικές, χρησιμοποιείται η μέθοδος διαμόρφωσης OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing-ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας). Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην διαμόρφωση πολλών φερόντων, οι συχνότητες των οποίων είναι ορθογωνικές μεταξύ τους και τα οποία μεταδίδονται ταυτόχρονα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η βελτίωση της αντοχής του σήματος στις απώλειες που οφείλονται στις πολλαπλές διαδρομές που μπορεί να κάνει το σήμα μέχρι αν φθάσει στον δέκτη, λόγω ανακλάσεων του στα φυσικά εμπόδια, όπως είναι τα κτίρια και τα βουνά. Λόγω των πολλαπλών αυτών διαδρομών, το σήμα μπορεί ο δέκτης να το λάβει αρκετές φορές, σε διαφορετικούς χρόνους. Με την χρήση πολλαπλών φερόντων, ο ρυθμός συμβόλων ανά φέρον είναι μικρός (ή ισοδύναμα, η διάρκεια του κάθε συμβόλου είναι μεγάλη) και η καθυστέρηση λόγω πολλαπλών διαδρομών θα είναι μικρή σε σύγκριση με τη διάρκεια του κάθε συμβόλου, μειώνοντας έτσι την απώλεια του σήματος λόγω διασυμβολικής παρεμβολής. Ανάλογα με το πλήθος των φερόντων που χρησιμοποιείται χαρακτηρίζεται και η OFDM μέθοδος, όπου αν χρησιμοποιούνται 1705 φέροντα αναφέρεται ως 2K OFDM ενώ αν χρησιμοποιούνται 6817 φέροντα αναφέρεται ως 8K OFDM.

Για την μεταφορά δεδομένων από το δίκτυο προς τον χρήστη (downlink) χρησιμοποιείται η Orthogonal Frequency- Division Multiple Access (OFDMA) τεχνολογία. Η OFDMA είναι υλοποίηση της τεχνικής OFDM για πολλούς χρήστες και η πολύπλεξη επιτυγχάνεται με την ανάθεση ενός υποσυνόλου των φερόντων σε κάθε χρήστη. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση από διάφορους χρήστες είτε δεδομένων επικοινωνίας είτε δεδομένων ελέγχου της σύνδεσης στο συγκεκριμένο δίκτυο. Για το uplink, χρησιμοποιείται η τεχνική SC-OFDM (Single Carrier OFDM) η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερα καλή απόδοση, έχοντας πολύ υψηλό λόγο PAR (Peak to Average Ratio) σήματος, και μικρή πολυπλοκότητα των κεραιών που πρέπει να υλοποιηθούν στους σταθμούς βάσης. Τέλος, ειδικά στις περιπτώσεις όπου ο χρήστης βρίσκεται σε μικρή απόσταση από τον σταθμό βάσης, η χρήση της τεχνικής αυτής μπορεί να προσφέρει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Για την βελτίωση της ποιότητας της μετάδοσης του σήματος, και συγκεκριμένα, για την μείωση του SNR⁶⁵ στην πλευρά του δέκτη, εισάγεται η χρήση turbo κωδικών για την κωδικοποίηση του σήματος. Το είδος των κωδικών αυτών έχει την ικανότητα να λειτουργούν πολύ κοντά στο όριο Shannon, επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων υψηλότερους συγκριτικά με τις άλλες κατηγορίες κωδικών. Πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των κωδικών αυτών είναι η μεγάλη ικανότητα ανίχνευσης και διόρθωσης λαθών, στο οποίο οφείλεται και ο μειωμένος SNR, συγκριτικά με άλλους κώδικες.

2.2 – Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς (5G)

Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι η τελευταία υλοποιημένη εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Όμως, η κίνηση των δεδομένων στα δίκτυα αυτά συνεχώς αυξάνεται, καθιστώντας αναγκαία την εξέλιξη τους. Εκτός αυτού όμως, η αναγκαιότητα της εξέλιξης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς εγείρεται και από την συνεχή ανάπτυξη των συσκευών κινητής τηλεφωνίας (οι απαιτήσεις των οποίων αυξάνονται, όσον αφορά, κυρίως, τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και τον όγκο δεδομένων που λαμβάνουν ή εκπέμπουν), των διαθέσιμων υπηρεσιών καθώς και η ανάπτυξη νέων ευρυζωνικών υπηρεσιών, αλλά και ηλεκτρονικών συσκευών, κινητών ή σταθερών, οι οποίες θα πρέπει να μπορούν να συνδεθούν στα δίκτυα αυτά. Η εξέλιξη αυτή είναι τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G). Η γενιά αυτή είναι ακόμα⁶⁶ στο στάδιο του σχεδιασμού και των συζητήσεων όσον αφορά την οριστικοποίηση των τεχνικών χαρακτηριστικών της ώστε να αρχίσει η προτυποποίηση της και, στην συνέχεια, η υλοποίηση εμπορικών δικτύων πέμπτης γενιάς. Η προτυποποίηση της αναμένεται να έχει ολοκληρωθεί μέχρι το 2020, χρονιά που προβλέπεται να γίνει και η πρώτη υλοποίηση ενός τέτοιου δικτύου. Λόγω του χρονοδιαγράμματος αυτού, η οικογένεια προτύπων που θα περιγράφει τις τεχνολογίες πέμπτης γενιάς, αντίστοιχα με τις προηγούμενες γενιές, θα είναι το

⁶⁵ SNR (Signal to Noise ratio-λόγος σήματος προς θόρυβο)

⁶⁶ Μέχρι τον Μάιο του 2016 που γράφτηκε η παρούσα εργασία.

IMT-2020⁶⁷.

Το IMT-2020, όπως και οι προηγούμενες αντίστοιχες οικογένειες προτύπων, θα εκδοθεί από την ITU. Εκτός όμως από την ITU, όπως συνέβη και για στις προηγούμενες περιπτώσεις, υπάρχουν και άλλοι φορείς οι οποίοι εργάζονται για την ανάπτυξη των δικτύων πέμπτης γενιάς. Οι φορείς αυτοί είναι πολλοί και με μεγάλη ποικιλία. Κάποιοι από αυτούς είναι οι οργανισμοί που αναφέρθηκαν παραπάνω, όπως ο 3GPP. Εκτός όμως από αυτούς, έχουν δημιουργηθεί και νέοι, με σημαντικότερο και μεγαλύτερο, στην Ευρώπη, το 5G PPP (5G Public-Private partnership), που είναι μία συνεργασία από, κυρίως, εταιρίες που δραστηριοποιούνται στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, είτε ως πάροχοι υπηρεσιών, όπως η Orange, η Telecom Italia και η Turk Telecom, είτε ως κατασκευαστές του εξοπλισμού των δικτύων αυτών, όπως η Nokia, η Ericsson, η NEC, η Intracom και η Samsung⁶⁸, όπου όμως συμμετέχουν και φορείς που δεν δραστηριοποιούνται στο εμπορικό κομμάτι των νέων τεχνολογιών, όπως το πανεπιστήμιο του Surrey⁶⁹ και το ινστιτούτο Fraunhofer⁷⁰.

Η ανάπτυξη των δικτύων πέμπτης γενιάς, όπως και αντίστοιχα αναφέρθηκε για την τέταρτη γενιά, αποσκοπεί σε κάποιους γενικούς στόχους, εκτός της αύξησης της χωρητικότητας, της ταχύτητας των δικτύων και της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών. Βασικότερος αυτών είναι η σύγκλιση των διαδικτυακών υπηρεσιών με τα πρότυπα των υπαρχόντων δικτύων κινητών επικοινωνιών, κάτι που θα οδηγήσει στο “Mobile Internet” (Κινητό διαδίκτυο) μέσω ετερογενών δικτύων (HetNets – Heterogenous Networks) με πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Με την δημιουργία των ετερογενών αυτών δικτύων θα γίνει εφικτή η χρήση του “Διαδικτύου Πραγμάτων” (IoT-Internet of Things⁷¹) στα 5G δίκτυα. Πολύ βασικός στόχος είναι και η ανάπτυξη των δικτύων αυτών με βάση τις αρχές των “Πράσινων επικοινωνιών”⁷² με αρκετούς

⁶⁷ Η 3GPP έχει συμπεριλάβει στην έκδοση 14 (Release 14) 5G τεχνολογίες, αλλά η κοινώς αποδεκτή προτυποποίηση θα γίνει από την ITU με το IMT-2020.

⁶⁸ Τα παραπάνω στοιχεία αναφέρονται στον ιστότοπο της 5G PPP και συγκεκριμένα στον παρακάτω σύνδεσμο: “<https://5g-ppp.eu/history/>”

⁶⁹ Πόλη της κομητείας του Guildford, στην Βορειοανατολική Αγγλία.

⁷⁰ Τα Ιδρύματα Έρευνας Φράουνχοφερ της Εταιρείας Φράουνχοφερ αποτελούν με 18000 υπαλλήλους σε 80 ιδρύματα τη μεγαλύτερη οργάνωση έρευνας στην Ευρώπη, η οποία ιδρύθηκε στις 26 Μαρτίου του 1949.

⁷¹ Ο όρος αυτός αναφέρεται στην σύνδεση ποικίλων ηλεκτρονικών συσκευών, όπως παραδείγματος χάριν οι οικιακές συσκευές και τα οχήματα, με το διαδίκτυο και τον χειρισμό τους από απόσταση, με χρήση των τεχνολογιών του Διαδικτύου.

⁷² Ο όρος “πράσινες επικοινωνίες” (green communications) αναφέρεται στην ανάπτυξη οικολογικών δικτύων και τεχνολογιών

φορείς να προσανατολίζονται σε πιο οικολογικές τεχνολογίες με τις προσεγγίσεις σχεδιασμού των τεχνολογιών αυτών να προσανατολίζονται στην αύξηση της απόδοσης των συστημάτων που θα αναπτυχθούν, συγκριτικά με τα συστήματα που χρησιμοποιούνται. Οπότε τα 5G δίκτυα προσανατολίζονται προς την μείωση του κόστους ανά ψηφίο και της ενέργειας που καταναλώνεται, και από τις συσκευές των χρηστών αλλά και από τον εξοπλισμό του δικτύου, καθώς και στην συνεχή παροχή υπηρεσιών με υψηλές ταχύτητες.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, αναπτύσσονται και προτείνονται⁷³ αρκετές τεχνολογίες οι οποίες προσανατολίζονται γύρω από κάποιες βασικές αρχές, οι οποίες είναι:

- **Εξέλιξη των υπάρχοντων τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (RAT-Radio Access Technologies)** : Για την δημιουργία του ετερογενούς δικτύου που φιλοδοξούν να είναι τα 5G δίκτυα, τα δίκτυα αυτά δεν θα χρησιμοποιούν μία τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης, αλλά πολλές, κάποιες από τις οποίες θα είναι εξέλιξη των ήδη υπάρχοντων. Η εξέλιξη των τεχνολογιών αυτών αφορά την απόδοση φάσματος, την ενεργειακή απόδοση, το latency καθώς και την υποστήριξη ευέλικτης κοινής χρήσης των RANs (Radio Access Networks) από διάφορους παρόχους. Για την επίτευξη αυτού, το LTE θα πρέπει να εξελιχθεί ώστε να υποστηρίξει καινοτόμες MIMO τεχνικές, όπως το 3D MIMO, μέσω εξελιγμένων διαμορφώσεων πολλαπλών χρηστών του εκπεμπόμενου σήματος ώστε να βελτιωθεί η ακύρωση των παρεμβολών και η ικανότητα συντονισμού των παρεμβολών σε περιπτώσεις όπου εμφανίζεται μεγάλη κίνηση δεδομένων σε μία μικρή κυψέλη. Τι WiFi θα πρέπει να εξελιχθεί έτσι ώστε να βελτιωθεί η απόδοση χρήσης του φάσματος συχνοτήτων που χρησιμοποιεί. Η τελευταία εξέλιξη του, όπως καθορίζεται από το IEEE 802.11ac πρότυπο, μπορεί να παρέχει ευρυζωνικές ασύρματες συνδέσεις με ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων αρκετών Gbps. Χρησιμοποιεί εύρος ζώνης συχνοτήτων μέχρι και 160MHz στην ISM⁷⁴ ζώνη συχνοτήτων των 5GHz, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση QAM υψηλής τάξης, μέχρι και 256 QAM. Ακόμα, μπορεί να υποστηριχθεί σύγχρονη μετάδοσης μέχρι και τεσσάρων ροών δεδομένων,

⁷³ Μέχρι να προτυποποιηθούν οι 5G τεχνολογίες, όλες οι τεχνολογίες που αναπτύσσονται κατατίθενται προς αποδοχή από το IMT-2020, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις που αναφέρθηκαν, όπως π.χ. το Mobile WiMax το οποίο, αν και λόγω χαρακτηριστικών μπορεί να θεωρηθεί ως τεχνολογία 3.9G, δεν είναι αποδεκτό ως 3G τεχνολογία, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του IMT-2000.

⁷⁴ **ISM ζώνες:** Είναι ζώνες συχνοτήτων οι οποίες προορίζονται για συγκεκριμένες χρήσεις, οι οποίες ανήκουν σε έναν από τους τρεις κλάδους: Industrial, Scientific and Medical (Βιομηχανικός, Επιστημονικός και Ιατρικός).

χρησιμοποιώντας τεχνικές MU-MIMO. Τέλος, εταιρίες όπως η Qualcomm προσανατολίζονται στην υλοποίηση πομποδεκτών διαφόρων τεχνολογιών, όπως 3G, 4G, WiFi και WiMax, σε έναν σταθμό βάσης, έτσι ώστε ο 5G εξοπλισμός των χρηστών να μπορεί να επιλέγει την καλύτερη δυνατή τεχνολογία για την επικοινωνία του με τον σταθμό βάσης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των χρησιμοποιούμενων εφαρμογών, όσον αφορά την ποιότητα των υπηρεσιών.

- **Υλοποίηση μικρών κυψελών υψηλής πυκνότητας :** Για την αύξηση της χωρητικότητας των κυψελών, θα πρέπει να υλοποιηθούν μικρές κυψέλες υψηλής πυκνότητας⁷⁵. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους: ο πρώτος είναι η μείωση το μεγέθους των κυψελών ενός δικτύου συγκεκριμένης τεχνολογίας, χρησιμοποιώντας micro-κυψέλες, pico-κυψέλες και fempto-κυψέλες, αυξάνοντας έτσι την χωρητικότητα του δικτύου σε μία περιοχή, ενώ ο δεύτερος είναι η υλοποίηση κυψελών διαφορετικών τεχνολογιών στον ίδιο χώρο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, έτσι ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου με το να μοιράζονται οι χρήστες στις διάφορες διαθέσιμες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RAT). Με χρήση του πρώτου τρόπου, κάθε φορά που διπλασιάζεται το πλήθος των κυψελών (ή υλοποιούνται κυψέλες μισού μεγέθους), διπλασιάζεται και η χωρητικότητα του δικτύου. Όμως, μειώνοντας το μέγεθος των κυψελών, αυξάνεται η παρεμβολή μεταξύ των κυψελών καθώς και η απαραίτητη σηματοδότηση ελέγχου, καθιστώντας μείζονος σημασίας την ανάπτυξη τεχνικών ακύρωσης παρεμβολών από την πλευρά του χρήστη, και εξελεγχόμενες τεχνικές διαχείρισης των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών, από την πλευρά του δικτύου. Μία τέτοια τεχνική εισήχθη από την 3GPP στην Release 12, όπου παρουσιάζεται ένα νέου τύπου φέρον (NCT-New Carrier Type) που ονομάζεται Lean Carrier, το οποίο θα έχει μικρότερο μέγεθος των σημάτων ελέγχου καναλιού και θα χρησιμοποιεί σήματα που θα περιέχουν πληροφορίες για συγκεκριμένη κυψέλη. Αυτό θα επιτρέπει τον αποδοτικότερο έλεγχο του δικτύου μέσω μίας macro-κυψέλης, αυξάνοντας ταυτόχρονα την χωρητικότητα και την φασματική αποδοτικότητα των μικρών κυψελών. Εκτός όμως από τα παραπάνω, η δημιουργία μικρών κυψελών αυξάνει την ενεργειακή απόδοση του δικτύου, μιας και μειώνεται η απόσταση των χρηστών από τους σταθμούς βάσης των κυψελών, μειώνοντας έτσι την απαιτούμενη εκπεμπόμενη ισχύ και του εξοπλισμού του

⁷⁵ Η έννοια της “πυκνότητας” αναφέρεται στην ικανότητα της κυψέλης να υποστηρίξει την εξυπηρέτηση πολλών χρηστών.

δικτύου και του εξοπλισμού των χρηστών.

- Αυτό-οργάνωση δικτύων :** Η ικανότητα των δικτύων να αυτό-οργανώνονται είναι ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό των 5G δικτύων. Όσο μικραίνουν οι κυψέλες, τόσο αυξάνει το πλήθος του σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Έχει παρατηρηθεί ότι σχεδόν το 80% την κίνησης δεδομένων στα υπάρχοντα δίκτυα οφείλεται σε χρήστες οι οποίοι βρίσκονται εντός κτιρίων. Για την εξυπηρέτηση των χρηστών αυτών, απαιτείται η υλοποίηση μικρών κυψελών υψηλής πυκνότητας εντός των κτιρίων αυτών. Οι κυψέλες αυτές θα μπορούν να εγκαθίστανται και να συντηρούνται από τους χρήστες, χωρίς να ελέγχονται από τον κάθε πάροχο. Για τον λόγο αυτό, οι κυψέλες αυτές πρέπει να έχουν την ικανότητα να αυτό-οργανώνονται έτσι ώστε να μπορούν να τις διαχειριστούν οι χρήστες και να εγκαθίστανται εύκολα, έχοντας παράλληλα την ικανότητα να προσαρμόζονται στο περιβάλλον, σχετικά με τις υπόλοιπες μικρές ή όχι κυψέλες που λειτουργούν στην ίδια περιοχή έτσι ώστε να μειώνονται οι παρεμβολές μεταξύ των κυψελών. Έτσι, μία τέτοια κυψέλη θα μπορεί να συγχρονιστεί αυτόνομα με το δίκτυο, προσαρμόζοντας τα χαρακτηριστικά ασύρματης κάλυψης, όπως οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες και το μέγεθος της περιοχής κάλυψης της.
- Επικοινωνία τύπου μηχανών (Machine Type Communication) :** Εκτός των χρηστών που συνδέονται σε ένα δίκτυο, στόχος των 5G δικτύων είναι και η ενσωμάτωση του IoT. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, θα πρέπει να υποστηρίζονται και εφαρμογές ή υπηρεσίες οι οποίες να αφορούν την επικοινωνία μεταξύ ενός χρήστη και μίας μηχανής, ή και μεταξύ δύο μηχανών. Με τον τρόπο αυτό θα μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο οποιαδήποτε συσκευή, καθιστώντας εφικτή τον απομακρυσμένο έλεγχο, σε πραγματικό χρόνο, των συσκευών αυτών, όπως παραδείγματος χάριν κάποιο όχημα ή κάποια συσκευή σε ένα “έξυπνο σπίτι”⁷⁶. Το πλήθος των συσκευών που μπορούν να συνδεθούν σε ένα δίκτυο είναι πολύ μεγάλο⁷⁷ και η επικοινωνία με πολλές από αυτές θα πρέπει να είναι πραγματικού χρόνου. Για τον λόγο αυτό, τα 5G δίκτυα πρέπει να έχουν πολύ μικρό

⁷⁶ Ένα “έξυπνο σπίτι” είναι ένα σπίτι του οποίου όλα, όπως η ασφάλεια, η θέρμανση, ο φωτισμός και οι ηλεκτρικές συσκευές ελέγχονται από ένα κεντρικό σύστημα, το οποίο έχει την δυνατότητα ασύρματης σύνδεσης με κάποιο δίκτυο για τον απομακρυσμένο έλεγχο του.

⁷⁷ Σύμφωνα με την Ericsson, ο αριθμός αυτός αναμένεται να ξεπεράσει τα 50 εκατομμύρια μέχρι το 2020, χρονιά που αναμένεται η πρώτη υλοποίηση 5G δικτύων.

latency, μικρότερο του ενός msec, δηλαδή το latency να μειωθεί, συγκριτικά με τα 4G δίκτυα, είκοσι φορές, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

- **Ανάπτυξη cm και mm κυμάτων τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (RATs) :** Οι υπάρχουσες RATs χρησιμοποιούν ζώνες συχνοτήτων κάτω των 3GHz⁷⁸, στις οποίες τα κύματα έχουν μήκος της τάξης των εκατοστών. Οι ζώνες αυτές συχνοτήτων, λόγω του πλήθους των χρηστών των δικτύων, τείνει να γίνουν υπερπλήρεις και οι τεχνολογίες που τις χρησιμοποιούν τείνουν να φθάσουν το όριο του Shannon, κάτι που σημαίνει ότι δεν μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ανάπτυξη RATs οι οποίες να μπορούν να χρησιμοποιούν ζώνες συχνοτήτων υψηλότερης συχνότητας (μεγαλύτερης των 3GHz), ή αλλιώς, κύματα μικρότερου μήκους (μικρότερου της τάξης των δέκατων του μέτρου). Τα κύματα αυτά, όμως, έχουν κάποια αρνητικά. Αρχικά, οι απώλειες ελεύθερης διαδρομής αλλά και οι απώλειες κατά την διείσδυση εντός των κτιρίων των κυμάτων αυτών είναι μεγαλύτερη από αυτά με συχνότητες κάτω των 3GHz, και, εν συνεχεία, επειδή τα κύματα διαδίδονται σε ευθεία διεύθυνση (Line of Sight-LoS) είναι ευάλωτα στα διάφορα εμπόδια που συναντάνε και τα οποία μπορεί να εμποδίσουν την διάδοση τους ή να προκαλέσουν μεγάλες απώλειες στο σήμα, με τις σταγόνες της βροχής, μιας και είναι στην τάξη μεγέθους των κυμάτων αυτών και άρα τα επηρεάζουν, να είναι το πιο απλό παράδειγμα⁷⁹. Για τον λόγο αυτό, θα πρέπει να υπάρχει και ένα σύστημα που να λειτουργεί σε χαμηλότερες συχνότητες, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή η αποδοτική επικοινωνία με το δίκτυο με χρήση των mm ή cm κυμάτων. Εκτός όμως από τα παραπάνω μειονεκτήματα, τα mm κύματα παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα. Αρχικά, το φάσμα συχνοτήτων των mm κυμάτων αυτών είναι πολύ μεγάλο⁸⁰, μιας και δεν υπάρχουν πολλές εφαρμογές που χρησιμοποιούν τις συχνότητες αυτές, οπότε μεγάλο μέρος του φάσματος είναι αχρησιμοποίητο⁸¹. Η μεγάλη διαθεσιμότητα του φάσματος στις συχνότητες αυτές μπορεί να οδηγήσει στην χρήση

⁷⁸ Η συχνότητα των 3GHz είναι το όριο μεταξύ των dm κυμάτων, τα οποία αντιστοιχούν σε συχνότητες από 300MHz μέχρι 3GHz και των cm κυμάτων, τα οποία αντιστοιχούν σε συχνότητες από 3GHz μέχρι 30GHz

⁷⁹ Τα εμπόδια που μπορούν να επηρεάσουν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι αυτά των οποίων οι διαστάσεις είναι παρόμοιες με το μήκος του κύματος.

⁸⁰ Τα mm κύματα αντιστοιχούν σε συχνότητες μεταξύ των 30GHz και των 300GHz.

⁸¹ Παραδείγματος χάριν, στην ζώνη των 60GHz υπάρχει ένα φάσμα των 9GHz ελεύθερο, το οποίο, αν συγκριθεί με το συνολικό φάσμα που χρησιμοποιείται παγκοσμίως από όλες τις τεχνολογίες κυψελωτών δικτύων είναι περίπου στα 800MHz, είναι εξαιρετικά μεγάλο.

υπέρ-ευρυζωνικών ασύρματων συνδέσεων, οι οποίες να μπορούν να ενώσουν τα ενσύρματα με τα ασύρματα δίκτυα. Εν συνεχεία, με χρήση των cm και mm κυμάτων, μειώνονται και οι διαστάσεις των κεραιών⁸² καθώς και την μεταξύ τους απόσταση, καθιστώντας εφικτή την τοποθέτηση δεκάδων κεραιών σε ένα τετραγωνικό εκατοστό, χρησιμοποιώντας έτσι στοιχειοκεραίες περισσότερων στοιχείων. Έτσι μπορεί να επιτευχθούν πολύ υψηλές τιμές κέρδους δέσμης σε, συγκριτικά, μικρές περιοχές, κάτι που μπορεί να υλοποιηθεί και στον σταθμό βάσης αλλά και στον εξοπλισμό του χρήστη. Τέλος, αναφορικά με τον εξοπλισμό των κινητών χρηστών, μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη κατευθυντικότητα της δέσμης, ώστε να στοχεύει κάθε στιγμή προς τον σταθμό βάσης και να υπάρχει η μικρότερη δυνατή απώλεια εκπεμπόμενης ισχύος.

- **Διανομή νέου συχνοτικού φάσματος :** Παραπάνω αναφέρθηκε η χρήση κυμάτων μικρότερου μήκους κύματος (άρα μεγαλύτερης συχνότητας) από τα 5G δίκτυα. Για να είναι όμως αυτό εφικτό θα πρέπει να διανεμηθούν οι συγκεκριμένες φασματικές ζώνες και να αποδοθούν στις εφαρμογές των 5G δικτύων από την ITU, αντίστοιχα με τις προηγούμενες γενιές όπου σε κάθε μία αποδιδόταν και μία ή περισσότερες ζώνες συχνοτήτων για την λειτουργία των αντίστοιχων δικτύων. Στις περιοχές συχνοτήτων των cm και mm κυμάτων, όπως προαναφέρθηκε, υπάρχει αρκετό διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων που δεν χρησιμοποιείται. Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν τις συχνότητες αυτές είναι λίγες, με κυριότερες τις δορυφορικές συνδέσεις, τα ραδιοτηλεσκόπια, τα οπτικά συστήματα και τα radar. Και οι εφαρμογές αυτές δεν χρησιμοποιούν το φάσμα που τους έχει αποδοθεί διαρκώς. Έτσι, εκτός του αδιάθετου φάσματος που μπορεί να αποδοθεί στα 5G δίκτυα, μπορεί να γίνει και χρήση συχνοτήτων που έχουν αποδοθεί σε άλλες εφαρμογές, είτε από μικρές κυψέλες σε περιοχές όπου οι συγκεκριμένες συχνότητες δεν χρησιμοποιούνται είτε η χρήση συχνοτήτων άλλων εφαρμογών όταν αυτές δεν κάνουν χρήση αυτών. Για τον λόγο αυτό, η Qualcomm έχει προτείνει ένα μοντέλο εξουσιοδοτημένης ή αδειοδοτημένης κοινής χρήσης (Authorized Shared Access-ASA ή Licenced Shared Access-LSA) που προβλέπει την χρήση συχνοτήτων κάποιων εφαρμογών σε περιοχές όπου δεν παρεμβάλλονται τα 5G δίκτυα με τις εφαρμογές αυτές. Αναμένεται να προταθούν και άλλα παρόμοια μοντέλα έτσι ώστε να

⁸² Μία κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ηλεκτρομαγνητικά κύματα των οποίων το μήκος κύματος είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος της κεραίας και ειδικά στις στοιχειοκεραίες, μπορεί το κάθε στοιχείο της να είναι ένα δίπολο μισού μήκους κύματος ($\lambda/2$) του εκπεμπόμενου ή λαμβανόμενου κύματος.

γίνει η βέλτιστη χρήση του διαθέσιμου συχνοτικού φάσματος.

- **Επανασχεδιασμός των backhaul συνδέσεων⁸³** : Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα σχετικά με τα 5G δίκτυα είναι ο επανασχεδιασμός των backhaul συνδέσεων. Παράλληλα με την βελτίωση των RAN, οι backhaul συνδέσεις πρέπει να επανασχεδιαστούν έτσι ώστε να μπορούν να διαχειριστούν τον μεγάλο όγκο δεδομένων που θα δημιουργείται από το μεγάλο πλήθος των κυψελών, το οποίο στην περίπτωση των μικρών κυψελών υψηλής πυκνότητας που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των δικτύων παλαιότερων γενεών, και να μην συμβαίνει συμφόρηση σε αυτές, γεγονός που θα μπορούσε να επηρεάσει την σωστή λειτουργία του δικτύου. Εκτός της αύξησης του πλήθους των κυψελών, τον επανασχεδιασμό των backhaul συνδέσεων τον επιτάσσει και η χρήση πολλαπλών RATs που αναφέρθηκε παραπάνω, η οποία αυξάνει σημαντικά τον απαιτούμενο όγκο δεδομένων ελέγχου του δικτύου που μεταδίδονται μέσω των backhaul συνδέσεων.
- **Ενεργειακή απόδοση** : Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η βελτίωση της απόδοσης, όσον αφορά την ενέργεια, από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στα ασύρματα δίκτυα, είτε είναι εξοπλισμός υποδομής του δικτύου είτε εξοπλισμός του χρήστη, είναι βασικός στόχος της ανάπτυξης των 5G δικτύων. Μέχρι και τα 4G δίκτυα, η κατανάλωση σε παγκοσμίως παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα δίκτυα αυτά και τους χρήστες τους είναι περίπου στο 5% και είναι υπεύθυνη για την παραγωγή περίπου του 2% των παραγόμενων αερίων θερμοκηπίου. Μέχρι το 2020, εκτιμάται ότι τα ποσοστά αυτά θα διπλασιαστούν. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να βελτιωθεί η απόδοση ενέργειας, μειώνοντας την ενέργεια που καταναλώνεται από τα δίκτυα αυτά. Εκτός όμως από την οικολογική πλευρά του θέματος αυτού, η βελτίωση της απόδοσης ενέργειας θα οδηγήσει σε μειωμένες τιμές παροχής υπηρεσιών κάνοντας πιο προσιτές τις παρεχόμενες υπηρεσίες προς τους χρήστες, αλλά και στην αύξηση του χρόνου που μπορεί μία συσκευή ενός χρήστη να λειτουργεί αυτόνομα (χωρίς σύνδεση σε κάποια πηγή ενέργειας).

⁸³ Οι backhaul συνδέσεις είναι οι συνδέσεις μεταξύ ενός κεντρικού σημείου του δικτύου, όπως ένας κεντρικός σταθμός βάσης μίας macro-κυψέλης, με τους άλλους σταθμούς βάσης, π.χ. τις μικρές κυψέλες υψηλής πυκνότητας που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι συνδέσεις αυτές αφορούν τα κανάλια έλεγχου του δικτύου, όπως αυτά που παρουσιάστηκαν για την δεύτερη γενιά.

- **Εικονικοποίηση⁸⁴ του RAN** : Ένας πολύ σημαντικός στόχος για την ανάπτυξη 5G δικτύων είναι η εικονικοποίηση του RAN. Μέχρι και την τέταρτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας, το RAN των δικτύων αποτελείται από μία σταθερή υποδομή⁸⁵, όπως το UTRAN των 3G δικτύων. Στόχος των δικτύων πέμπτης γενιάς θα είναι τα χρησιμοποιούμενα RAN να είναι υλοποιημένα σε προγραμματιστικό επίπεδο και όχι κυκλωματικό. Να είναι, δηλαδή, το RAN ένα κεντρικό λογισμικό το οποίο θα μπορεί να υλοποιηθεί σε διάφορα επίπεδα του δικτύου, δημιουργώντας ένα πιο ευέλικτο και αποδοτικό δίκτυο, μειώνοντας παράλληλα το κόστος εγκατάστασης του. Έτσι, θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κοινού οι σταθερές υποδομές του δικτύου και να γίνει αποδοτική διαχείριση όλων των ασύρματων και ενσύρματων δικτύων που χρησιμοποιούνται μέσω μίας κεντρικής μονάδας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, λοιπόν, τα δίκτυα πέμπτης γενιάς θα μπορούν να υποστηρίξουν:

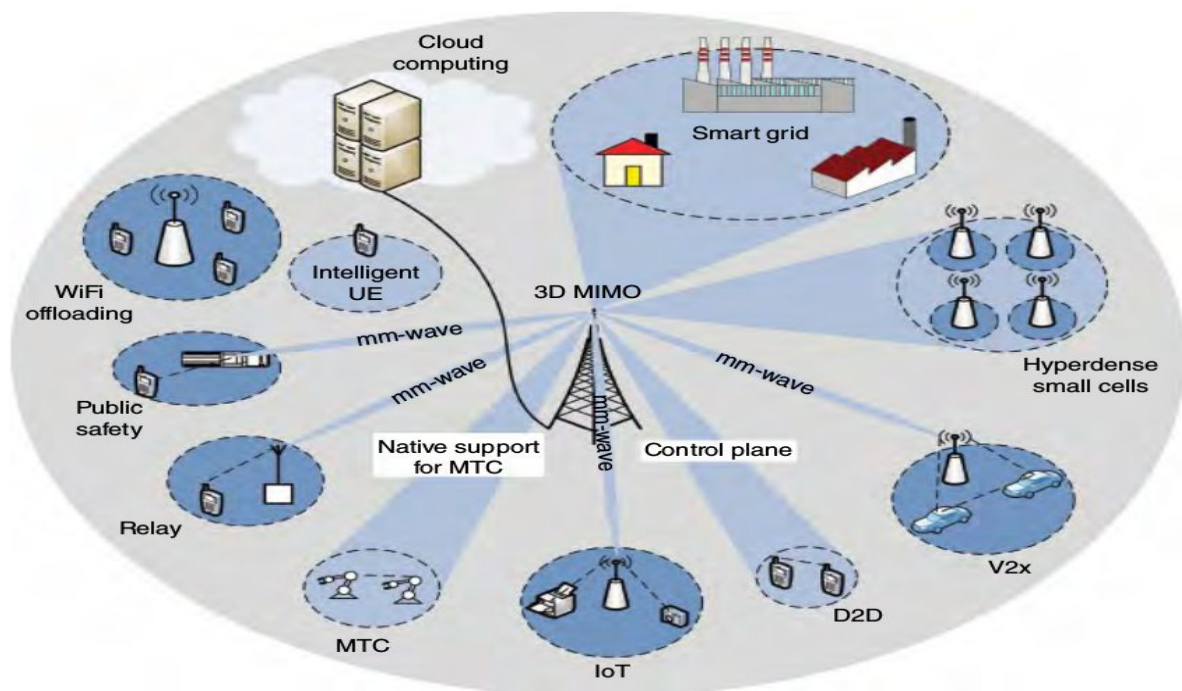
- 1000x αύξηση της χωρητικότητας
- 10 με 100x μεγαλύτερο πλήθος συνδεδεμένων συσκευών.
- 10 με 100x υψηλότερος ρυθμός δεδομένων για τους χρήστες.
- 10x μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας για χαμηλής κατανάλωσης επικοινωνία τύπου μηχανής.
- 20x μείωση του end to end latency.

⁸⁴ Εικονικοποίηση (Virtualization): Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζεται η τεχνολογία με την οποία τα φυσικά συστήματα μετατρέπονται σε ιδεατά (virtual machines). Κάθε φυσικός πόρος (επεξεργαστική ισχύς, μνήμη, δίκτυο, storage κλπ.) γίνεται ένας ενιαίος πόρος και μοιράζεται ταυτόχρονα σε πολλά εικονικά συστήματα.

⁸⁵ Ανάλογα με την τεχνολογία μεταγωγής που χρησιμοποιείται ποικίλει και το είδος της υποδομής αυτής. Στην περίπτωση χρήσης μεταγωγής πακέτων, αυτή θα αποτελείται από έναν δρομολογητή (router) ενώ στην περίπτωση μεταγωγής κυκλώματος αυτή θα αποτελείται από ολοκληρωμένα κυκλώματα που θα παίζουν το ρόλο διακοπών, δημιουργώντας και τερματίζοντας συνδέσεις, όπως τα MSC στα GSM δίκτυα που αναφέρθηκαν παραπάνω.

2.2.1 - Αρχιτεκτονική 5G δικτύων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το 5G δίκτυο έχει στόχο να είναι ένα δίκτυο στο οποίο θα χρησιμοποιούνται πολλές και ποικίλες τεχνολογίες, ενοποιώντας όλα τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα, υποστηρίζοντας έτσι μία μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Οι εφαρμογές αυτές μπορεί να είναι από την μετάδοση φωνής και την πρόσβαση στο Διαδίκτυο με ταχύτητες αρκετών Gbps μέχρι και την απευθείας επικοινωνία μεταξύ των χρηστών (*Device to Device-D2D*) και την επικοινωνία ενός οχήματος, είτε με άλλο όχημα (*Vehicle to Vehicle-V2V*) είτε με κάποια υποδομή του δικτύου (*Vehicle to Infrastructure-V2I*). Μία τέτοια δομή δικτύου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.5), όπου η κεραία στο κέντρο αντιπροσωπεύει τον σταθμό βάσης μίας macro-κυψέλης, οι υποδομές της οποίας, όποιες δεν αναφέρθηκαν παραπάνω, αναφέρονται περιληπτικά παρακάτω.



Σχήμα 2.5 - Αρχιτεκτονική 5G δικτύων

Η απόδοση του παραπάνω συστήματος, όσον αφορά την κάλυψη, την χωρητικότητα και την ενεργειακή απόδοση που μπορεί να έχει ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να βελτιωθεί με την χρήση κάποιων εφεδρικών τοπολογιών δικτύου (*Relay*), όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, την χρήση μικρών κυψελών υψηλής πυκνότητας (*Hyperdense small cells*) καθώς και την χρήση τοπικών WiFi δικτύων για την κάλυψη συγκεκριμένων περιοχών ή απλά την αποσυμφόρηση του κυρίως δικτύου (*WiFi offloading*). Η απευθείας επικοινωνία μεταξύ των χρηστών (*D2D*), αν και αυτόνομη, θα επικουρείται από τον σταθμό βάσης της macro-κυψέλης, παρέχοντας το απαραίτητο επίπεδο ελέγχου (*Control plane*). Το “έξυπνο δίκτυο” (*Smart grid*) αφορά τον έλεγχο του ηλεκτροδοτικού δικτύου της περιοχής, και γενικότερα των μέσων παραγωγής, μέσω των 5G δικτύων, ώστε να μπορεί να λειτουργεί πιο αξιόπιστα και αποδοτικά. Το *cloud computing*⁸⁶ αφορά την χρήση απομακρυσμένων πόρων για την εκτέλεση διάφορων εφαρμογών και προγραμμάτων και μπορεί να εφαρμοσθεί και στα RANs (Εικονικοποίηση του RAN) και στους χρήστες, οι οποίοι θα μπορούν να σχηματίσουν ένα εικονικό δίκτυο κοινόχρηστων πόρων, τους οποίους θα μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλοι οι συνδεδεμένοι χρήστες. Με τον τρόπο αυτό μπορεί αν μειωθεί το latency για τους τελικούς χρήστες, καθιστώντας εφικτή την υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στόχος της ανάπτυξης των 5G δικτύων είναι η ενοποίηση όλων των υπάρχοντων RATs, όπως το GSM, το HSPA, το LTE και το WiFi, σε ένα δίκτυο, μαζί με τις νέες που αναπτύσσονται ως 5G τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, οι οποίες θα χρησιμοποιούν τα cm και mm κύματα. Οι νέες αυτές τεχνολογίες, εκτός του μεγάλου συχνοτικού φάσματος που έχουν διαθέσιμο, θα μειώσουν πολύ τις διαστάσεις των κεραιών, κάνοντας εφικτή την υλοποίηση στοιχειοκεραιών με κάποιες εκατοντάδες ή και χιλιάδες στοιχεία, ακόμα και στον εξοπλισμό των χρηστών. Τα χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας των κεραιών αυτών επιτρέπουν, εκτός του πολύ στενού κύριου λοβού τους, την στρέψη του με πολύ μεγάλη ακρίβεια προς την επιθυμητή κατεύθυνση, μειώνοντας την απαιτούμενη ισχύ για την μετάδοση των δεδομένων αλλά και την παρεμβολή του σήματος του κάθε χρήστη με των υπολοίπων. Ακόμα, καθιστούν εφικτή την χρήση τεχνικών 3D MIMO από τις υποδομές του δικτύου και από τον εξοπλισμό των χρηστών.

⁸⁶ Το cloud computing είναι ένα μοντέλο λειτουργίας των διαφόρων δικτύων που επιτρέπει την ευέλικτη, on-demand απομακρυσμένη πρόσβαση σε ένα κοινόχρηστο σύνολο παραμετροποιήσιμων υπολογιστικών πόρων (όπως δίκτυα, servers, αποθηκευτικοί χώροι, εφαρμογές και υπηρεσίες), το οποίο θα μπορεί να τροφοδοτηθεί γρήγορα και να διατεθεί με ελάχιστη προσπάθεια διαχείρισης ή αλληλεπίδραση με τον πάροχο της υπηρεσίας.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι τα 5G δίκτυα θα είναι ετερογενή δίκτυα, τα οποία όμως δεν θα έχουν κάποια συγκεκριμένη και πλήρως καθορισμένη αρχιτεκτονική, όπως αυτή που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες γενιές δικτύων, αλλά θα είναι συνδυασμός όλων των παραπάνω. Ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία θα υλοποιηθεί κάθε 5G δίκτυο, όπως η μορφολογία του εδάφους, το πλήθος των χρηστών και τα προϋπάρχοντα δίκτυα, θα σχεδιάζεται αυτό με μοναδική αρχιτεκτονική, η οποία όμως θα είναι στα πρότυπα της αρχιτεκτονικής που παρουσιάστηκε παραπάνω και απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα (σχήμα 2.5), η οποία παρουσιάζει στην ουσία μία γενική εικόνα του τρόπου υλοποίησης τέτοιων δικτύων.

2.2.2 - Υποψήφιες 5G τεχνολογίες

Στις προηγούμενες παραγράφους, περιγράφηκαν οι στόχοι και τα χαρακτηριστικά που αναμένεται να έχουν οι 5G τεχνολογίες. Παράλληλα, αναφέρθηκαν και κάποιες τεχνολογίες που είναι υποψήφιες, μαζί με την εξέλιξη των ήδη υπαρχόντων, να ενσωματωθούν στα 5G δίκτυα. Στην παράγραφο αυτή θα γίνει αναφορά σε κάποιες άλλες τεχνολογίες οι οποίες είναι υποψήφιες για να ενσωματωθούν στα δίκτυα αυτά.

- **Network MIMO (Δικτυακό MIMO)** : Μία από τις υποψήφιες 5G τεχνολογίες είναι η Network MIMO. Η τεχνική αυτή, γνωστή και ως Cooperative MIMO (Co-MIMO - Συνεργατική MIMO) είναι μία MIMO τεχνική η οποία αποτελεί συνδυασμό της D2D επικοινωνίας, της επικοινωνίας τύπου μηχανής, του cloud computing αλλά και των παλαιότερων MIMO τεχνικών. Με χρήση της τεχνικής αυτής, κάποιος χρήστης θα μπορεί να χρησιμοποιεί του διαθέσιμους πόρους του δικτύου (cloud computing) και συγκεκριμένα τις κατανομημένες κεραίες που ανήκουν σε άλλους χρήστες ή γενικά, σε συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο ίδιο δίκτυο. Οπότε θα γίνεται η άμεση επικοινωνία της συσκευής ενός χρήστη με

την συσκευή ενός άλλου (D2D) ή και με οποιαδήποτε συσκευή είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο αυτό (IoT), κατανέμοντας σε περισσότερες της μίας κεραίες αποστολής τον όγκο των δεδομένων που είναι προς μετάδοση, αυξάνοντας έτσι τον δυνατό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Έτσι, βελτιώνεται η απόδοση του ασύρματου δικτύου, όσον αφορά το μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό μετάδοσης, την χρήση του διαθέσιμου φάσματος καθώς και της ποιότητας της επικοινωνίας (αλλά όχι τη χωρητικότητα του).

- **Εξελιγμένες τεχνικές διαμόρφωσης κυματομορφής :** Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε νέα γενιά δικτύων χρησιμοποιούσε όλο και πιο εξελιγμένες τεχνικές διαμόρφωσης του σήματος, όπως η PSK διαμόρφωση της δεύτερης γενιάς, οι QAM διαμορφώσεις της τρίτης και η OFDM της τέταρτης γενιάς. Για την πέμπτη γενιά, εκτός των παραπάνω, υποψήφιος είναι και άλλες τεχνικές. Μία από αυτές είναι μία εξέλιξη της OFDM, η f-OFDM (filtered OFDM), η οποία είναι παρόμοια με την OFDM, με την ειδοποιό διαφορά ότι το διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων χωρίζεται σε μικρότερα κομμάτια, κάθε ένα από τα οποία χρησιμοποιείται από διαφορετική εφαρμογή, έχοντας παράλληλα την δυνατότητα να γίνει η επιλογή των επιμέρους παραμέτρων της διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί από την συγκεκριμένη εφαρμογή στην συγκεκριμένη υπό-ζώνη συχνοτήτων. Μία άλλη τέτοια τεχνική είναι η *Filter Bank-based Multi-Carrier (FBMC)*, η οποία έχει μικρότερη ευαισθησία στην διασπορά συχνότητας και μπορεί να χρησιμοποιήσει μεγάλο πλήθος υπό-φερόντων, όπως αντίστοιχα η f-OFDM χρησιμοποιεί υπο-ζώνες συχνοτήτων, καθιστώντας την καταλληλότερη για ασύρματα δίκτυα και εφαρμογές πολλαπλής πρόσβασης, παρέχοντας, παράλληλα και την μέγιστη δυνατή φασματική απόδοση. Η *Generalized frequency division multiplex (GFDM)* είναι άλλη μία υποψήφια τεχνική διαμόρφωσης η οποία, όπως και η FBMC, χρησιμοποιεί υπό-φέροντα για την αποστολή των δεδομένων και προσφέρει καλύτερη διαχείριση του διαθέσιμου συχνοτικού φάσματος, καθιστώντας την κατάλληλη για τα 5G δίκτυα. Τέλος, μία ακόμα τεχνική διαμόρφωσης είναι η *Universal filtered multicarrier (UFMC)*, η οποία χρησιμοποιεί χωρισμό της διαθέσιμης ζώνης συχνοτήτων σε μικρότερες, όπως και η f-OFDM.

Κεφάλαιο 3

Στα δύο προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας έγινε αναφορά στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται από τα υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αλλά και αυτών που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν από τα μελλοντικά δίκτυα πέμπτης γενιάς, με παράλληλη σύγκριση των χαρακτηριστικών τους. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία σύγκριση των δικτύων τέταρτης γενιάς με τα δίκτυα πέμπτης γενιάς, αναφορικά με την χρήση της απευθείας επικοινωνίας των συσκευών μεταξύ τους. Για την σύγκριση αυτή υλοποιήθηκαν δύο μοντέλα, από τα οποία στο ένα θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος D2D όπως ενσωματώνεται στην τεχνική NetMIMO που παρουσιάστηκε παραπάνω καθώς και στο άλλο ως μέθοδος άμεσης επικοινωνίας των συσκευών μεταξύ τους και θα υλοποιηθεί ένας προσομοιωτής για το κάθε ένα με τον οποίο θα γίνει η σύγκριση της απόδοσης των 4G δικτύων που χρησιμοποιούν απλές MIMO τεχνικές και η επικοινωνία γίνεται απαραίτητα μέσω του σταθμού βάσης, με την απόδοση των 5G δικτύων, τα οποία με χρήση της D2D θα μπορούν να χρησιμοποιούν την NetMIMO τεχνική και οι συσκευές να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους.

3.1 - Περιγραφή μοντέλων προσομοίωσης

Μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες που αναμένεται να ενσωματωθούν στα 5G δίκτυα, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι η επικοινωνία τύπου μηχανών. Ο καινοτόμος αυτός τύπος επικοινωνίας θα κάνει εφικτή την επικοινωνία των συσκευών μεταξύ τους (D2D), χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση των υποδομών του δικτύου, καθιστώντας εφικτή, εκτός της άμεσης επικοινωνίας των χρηστών μεταξύ τους, και την ενσωμάτωση του IoT και του cloud computing στα δίκτυα αυτά. Μία από τις εφαρμογές που αναμένεται να έχει η D2D επικοινωνία είναι η τεχνική NetMIMO. Στην τεχνική αυτή θα μπορεί ένας χρήστης να χρησιμοποιήσει πόρους άλλων συσκευών, και συγκεκριμένα τους πομπούς/κεραίες αυτών, για τον διαμοιρασμό του όγκου των δεδομένων που αποστέλλει προς το δίκτυο, σε αντίθεση με τα παλαιότερα δίκτυα στα οποία κάθε χρήστης έχει διαθέσιμο μόνο τον δικό του εξοπλισμό και μπορεί να επικοινωνεί μόνο με έναν σταθμό βάσης, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η επικοινωνία του με το υπόλοιπο δίκτυο. Έτσι λοιπόν τα σήματα που θα αποστέλλουν δύο

συσκευές δεν θα προκαλούν παρεμβολές το ένα στο άλλο ενώ στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται η τεχνική αυτή θα πρέπει να προστεθεί, ως θόρυβος, στο σήμα και η επίδραση των υπολοίπων σημάτων. Στην τελευταία περίπτωση, το σήμα “διέρχεται” μέσω ενός πολύ πιο θορυβώδους καναλιού, θόρυβος ο οποίος είναι ανάλογος του πλήθους των συσκευών που είναι ενεργές στο δίκτυο αυτό.

Ένα δεύτερο σενάριο που θα εξετασθεί είναι η περίπτωση όπου ένας χρήστης στέλνει δεδομένα σε έναν άλλο. Στην περίπτωση των δικτύων τέταρτης γενιάς, ο χρήστης θα πρέπει να στείλει τα δεδομένα στον σταθμό βάσης, ο οποίος θα τα αποστείλει στον χρήστη για τον οποίο προορίζονται. Χρησιμοποιώντας την επικοινωνία D2D, στην περίπτωση των δικτύων πέμπτης γενιάς, δεν είναι απαραίτητη η διαμεσολάβηση του σταθμού βάσης και τα δεδομένα του ενός χρήστη θα μπορούν να αποσταλούν απευθείας από χρήστη σε χρήστη. Με τον τρόπο αυτό, εκτός της αποσυμφόρησης του σταθμού βάσης, μιας και έχει μικρότερο όγκο δεδομένων να διαχειριστεί, υπάρχουν λιγότερα σήματα τα οποία “κυκλοφορούν” στο συγκεκριμένο δίκτυο οπότε το περιβάλλον του δικτύου αυτό είναι λιγότερο θορυβώδες. Ο θόρυβος αυτός του καναλιού θα είναι ανάλογος με το πλήθος των ενεργών χρηστών του, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Για τον λόγο αυτό, στην προσομοίωση που υλοποιήθηκε το δίκτυο αποτελείται από δύο χρήστες και έναν σταθμό βάσης, έτσι ώστε να δειχθούν τα πλεονεκτήματα των 5G δικτύων στην απλούστερη των περιπτώσεων.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα 5G δίκτυα θα χρησιμοποιούν πιο εξελιγμένες τεχνικές διαμόρφωσης σήματος από τα 4G δίκτυα. Για τον λόγο αυτό, για να γίνει πιο εύκολα αντιληπτή η βελτίωση της απόδοσης του συστήματος απλά με την δυνατότητα της επικοινωνίας D2D, για την προσομοίωση που υλοποιήθηκε επιλέχθηκε η απλούστερη τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης, η BPSK (Binary PSK-Δυναδική PSK) και για τις δύο περιπτώσεις. Στην διαμόρφωση αυτή στην οποία το σήμα που μεταδίδεται είναι ένα ημιτονοειδές σήμα σταθερού πλάτους, το οποίο, όταν τα δεδομένα είναι σε μία στάθμη, παραδείγματος χάριν το ψηφίο είναι το “1”, έχει μία συγκεκριμένη φάση ενώ όταν τα δεδομένα είναι στην άλλη στάθμη, “0”, η φάση του σήματος είναι διαφορετική κατά π (180°). Έτσι, το ψηφίο “1” θα κωδικοποιείται με το σήμα $u_{BPSK}(t) = A \cdot \cos(\omega_0 t)$ ενώ το “0” με το $u_{BPSK}(t) = A \cdot \cos(\omega_0 t + \pi) = -A \cdot \cos(\omega_0 t)$. Θέτοντας, για απλότητα υπολογισμών, το πλάτος του σήματος ίσο με τη μονάδα, τα BPSK σήματα που θα

παραχθούν μπορούν να μοντελοποιηθούν ως “1” και “-1”.

Ως μοντέλο καναλιού μετάδοσης των δεδομένων επιλέχθηκε το μοντέλο απωλειών διάδοσης καναλιού Rayleigh, ή αλλιώς, κανάλι Rayleigh. Αυτό αποτελείται από ένα στατιστικό μοντέλο, το οποίο προσομοιώνει το περιβάλλον διάδοσης ενός ραδιοσήματος, όπως συμβαίνει και στα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Στο μοντέλο αυτό, το πλάτος του σήματος που διαδίδεται μέσω του καναλιού Rayleigh θεωρείται ότι θα έχει τυχαίες διακυμάνσεις ή απώλειες, σύμφωνα με μία Rayleigh κατανομή, την ακτινική συνιστώσα του αθροίσματος δύο ασυσχέτιστων Gaussian τυχαίων μεταβλητών. Έτσι, η αλλοίωση του πλάτους και της φάσης του διαδιδόμενου σήματος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένας μιγαδικός αριθμός, του οποίου το πραγματικό και το φανταστικό μέρος μοντελοποιούνται ως οι δύο ασυσχέτιστες, τυχαίες, Gaussian μεταβλητές. Το μοντέλο αυτό θεωρείται αποδεκτό για διάδοση σημάτων στην τροπόσφαιρα και την ιονόσφαιρα, όπως και σε αστικές περιοχές με πολλά φυσικά εμπόδια. Οπότε το μοντέλο αυτό ταιριάζει απόλυτα με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν τα δίκτυα που μελετώνται και για το λόγο αυτό θα χρησιμοποιηθεί και για τις δύο περιπτώσεις δικτύων που μελετώνται.

Όσον αφορά την σχετική θέση των χρηστών και του σταθμού βάσης, ενδιαφέρον παρουσιάζει ο λόγος των αποστάσεων των χρηστών από τον σταθμό βάσης, $R=D_1/D_2$, όπου οι αποστάσεις D_1 και D_2 φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 3.1). Ο λόγος αυτός θα επηρεάσει την παρεμβολή που προκαλεί ο ένας χρήστης στον άλλο πολλαπλασιάζοντας την με έναν παράγοντα $R^{-a/2}$, όπου $a=4$.



Σχήμα 3.1 - Θέσεις και αποστάσεις χρηστών και Σταθμού Βάσης

Τέλος, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η τεχνική προ-κωδικοποίησης “Zero-Forcing”, σύμφωνα με την οποία τα μεταδιδόμενα σήματα προ-κωδικοποιούνται πολλαπλασιαζόμενα με τον ανάστροφο πίνακα/μήτρα του καναλιού (την αντίστοιχη συνάρτηση της συνάρτησης μεταφοράς ενός συστήματος). Έτσι, πριν εισέλθει στο κανάλι, το σήμα “δέχεται” την επίδραση ενός “καναλιού” το οποίο είναι αντίστροφο με αυτό στο οποίο εισέρχεται, εξαλείφοντας έτσι την επίδραση του καναλιού στο σήμα, έτσι ώστε ο πομπός να επιβαρύνεται με την γνώση των χαρακτηριστικών του καναλιού, μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα του δέκτη. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των μοντέλων αυτών και για την εκτέλεση των προσομοιώσεων είναι το MatLab 7.12.0 (R2011a), το οποίο είναι διαδραστικό (interactive) πρόγραμμα για αριθμητικούς υπολογισμούς και για κατασκευή γραφημάτων, αλλά παρέχει επίσης και τη δυνατότητα προγραμματισμού.

- **NetMIMO μοντέλο** : Το σύστημα που υλοποιήθηκε για την διερεύνηση της πρώτης περίπτωσης είναι το μοντέλο NetMIMO. Στο μοντέλο αυτό, η μέθοδος D2D υλοποιείται ως συνεργασία μεταξύ των χρηστών του δικτύου και η αποστολή κοινού σήματος προς τον δέκτη, τον σταθμό βάσης εξαλείφοντας τις παρεμβολές του ενός χρήστη προς τον άλλο. Χρησιμοποιείται ένα σύστημα που αποτελείται από δύο χρήστες και δύο δέκτες. Και οι δύο χρήστες επικοινωνούν με τον σταθμό βάσης, στέλνοντας ψηφιακά δεδομένα, τα οποία παράγονται τυχαία έχοντας όμως τα ίδια χαρακτηριστικά. Το πλήθος των

δεδομένων που παράγονται προς αποστολή είναι 1000 ψηφία. Η διαμόρφωση είναι, όπως προαναφέρθηκε, BPSK, το κανάλι προσομοιώνεται σύμφωνα με το μοντέλο Rayleigh και χρησιμοποιείται, και στους δύο χρήστες, η τεχνική προ-κωδικοποίησης “Zero Forcing”. Επειδή η παραγωγή των δεδομένων και η μοντελοποίηση του καναλιού στηρίζεται σε τυχαίες διαδικασίες, σε κάθε περίπτωση η προσομοίωση επαναλαμβάνεται 100 φορές και τα αποτελέσματα είναι ο μέσος όρος από όλες τις φορές επανάληψης της προσομοίωσης.

- **NetMIMO 3x3 μοντέλο:** Το σύστημα που υλοποιήθηκε για την διερεύνηση της πρώτης περίπτωσης αλλά για 3 χρήστες, είναι το μοντέλο NetMIMO 3x3. Το μοντέλο αυτό έχει υλοποιηθεί βάσει των ίδιων αρχών όπως και στην περίπτωση του NetMIMO μοντέλου για 2 χρήστες, με την ειδοποιό διαφορά ότι μελετάται η περίπτωση τριών χρηστών, με σταθερό $R=1$ και μεταβλητό SNR από 0 μέχρι 10. Και στην περίπτωση αυτή η προσομοίωση επαναλαμβάνεται 100 φορές και τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι ο μέσος όρος από όλες τις επαναλήψεις.
- **D2D μοντέλο :** Στο μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται το ίδιο σύστημα με το μοντέλο NetMIMO, δύο χρήστες που χρησιμοποιούν τον ίδιο σταθμό βάσης, με την διαφορά ότι η μέθοδος D2D χρησιμοποιείται για την απευθείας επικοινωνία των χρηστών μεταξύ τους. Το σήμα που στέλνει κάθε χρήστης παρεμβάλλεται με το σήμα του άλλου χρήστη προκαλώντας πρόσθετο θόρυβο στο διαδιδόμενο σήμα. Για την περίπτωση του 4G δικτύου, όπου δεν εφαρμόζεται η D2D επικοινωνία, ο ένας χρήστης στέλνει δεδομένα στον άλλο μέσω του σταθμού βάσης, ενώ στην περίπτωση του 5G δικτύου όπου εφαρμόζεται η D2D επικοινωνία, τα δεδομένα από τον ένα χρήστη μεταδίδονται απευθείας στον άλλο.

3.2 - Εκτέλεση μοντέλων προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα δεδομένα που μεταδίδει κάθε χρήστης είναι 1000 bit, τα οποία διαμορφώνονται με την τεχνική BPSK. Τα δεδομένα αυτά, στην περίπτωση που αποστέλλονται ανεξάρτητα από τον κάθε χρήστη, παρεμβάλλονται μεταξύ τους προκαλώντας πρόσθετο θόρυβο το ένα στο άλλο (θεωρείται σύστημα δύο χρηστών, άρα στον συγκεκριμένο χώρο διαδίδονται δύο σήματα). Στην περίπτωση που συνεργάζονται οι συσκευές των δύο χρηστών μεταξύ τους, αποστέλλεται ένα κοινό σήμα και δεν προστίθεται θόρυβος παρεμβολής. Τα δεδομένα που λαμβάνει ο δέκτης θα είναι τα BPSK δεδομένα που έστειλα κάθε χρήστης, τα οποία όμως λόγω της διέλευσης τους μέσω του Rayleigh καναλιού και της προσθήκης θορύβου, έχουν υποστεί αλλοιώσεις. Η BPSK αποδιαμόρφωση εφαρμόζεται μέσω ενός συγκριτή (hard decision), ο οποίος αν η τιμή του σήματος είναι αρνητική θεωρεί ότι το ψηφίο που λήφθηκε είναι το “0” ενώ αν είναι θετική το “1” (υπενθυμίζεται ότι κωδικοποιούνται τα ψηφία έτσι ώστε το σήμα για το ψηφίο “0” να έχει αρνητική τιμή και για το “1” θετική). Έτσι, τα δεδομένα που λαμβάνει ο δέκτης ελέγχονται για την ακρίβεια τους και υπολογίζεται το πλήθος των σφαλμάτων που εμφανίζει κάθε περίπτωση.

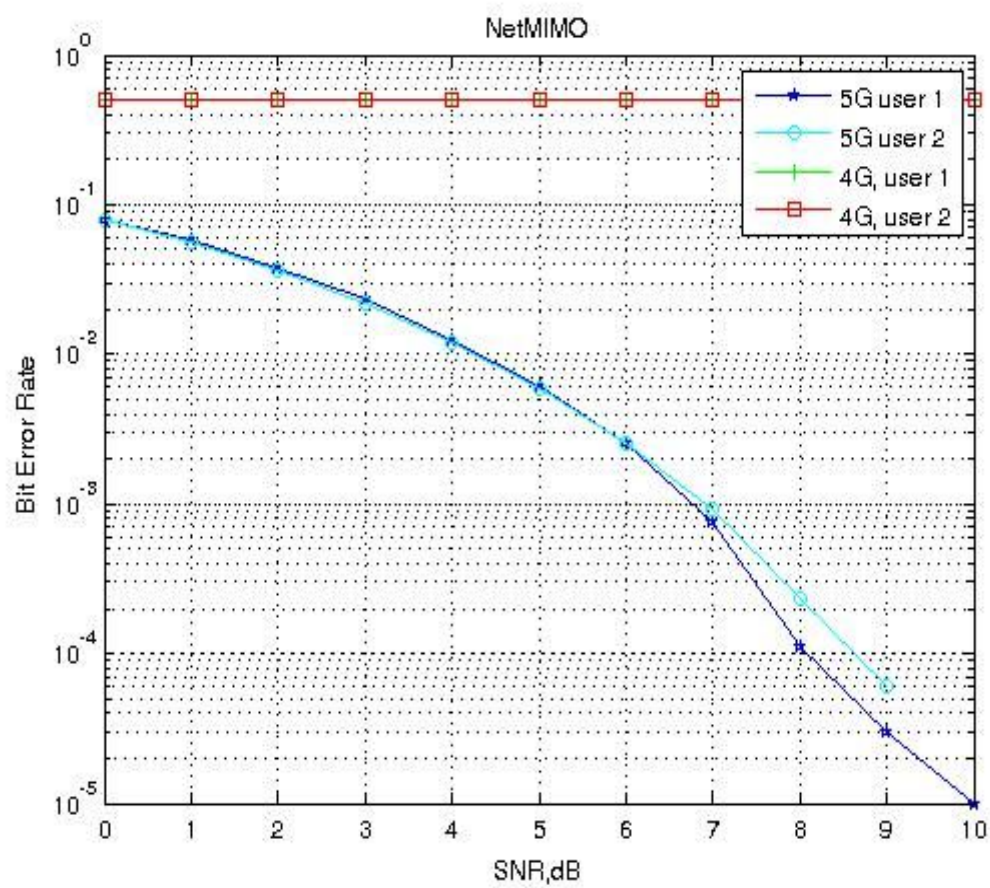
Το μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται για την σύγκριση των δύο περιπτώσεων είναι ο ρυθμός εσφαλμένων ψηφίων BER (Bit Error Rate) ο οποίος υπολογίζεται για κάθε περίπτωση συγκρίνοντας τα αρχικά δεδομένα με τα δεδομένα που ανακτήθηκαν στον δέκτη. Για την γενίκευση των αποτελεσμάτων, η παραπάνω διαδικασία (οι 100 επαναλήψεις αποστολής και λήψης δεδομένων, η ανάκτηση τους και ο υπολογισμός του BER) επαναλαμβάνεται για διάφορες τιμές SNR (Signal to Noise Ratio) έτσι ώστε να γίνει η σύγκριση για αρκετές περιπτώσεις, μεταβάλλοντας το πόσο θορυβώδες είναι το περιβάλλον ή το πόσο μεγάλη είναι η ισχύς αποστολής συγκριτικά με τον θόρυβο του περιβάλλοντος δικτύου. Η μεταβολή του SNR γίνεται από 0dB (ισχύς σήματος ίση με την ισχύ του θορύβου) μέχρι 10dB (η ισχύς του θορύβου είναι το ένα δέκατο της ισχύς του σήματος) και τα αποτελέσματα, και στα δύο μοντέλα προσομοίωσης, παρουσιάζονται ως τιμές του BER συναρτήσει του SNR.

Κεφάλαιο 4

Στο προηγούμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 3) έγινε η περιγραφή των μοντέλων που σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν για την εργασία αυτή, ώστε να μελετηθεί η επίδραση της μεθόδου επικοινωνίας D2D (device to device) που αναμένεται να ενσωματωθεί στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων και, στο τέλος του, γίνεται μία ανασκόπηση της εργασίας και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν.

4.1.1 – Αποτελέσματα NetMIMO μοντέλου

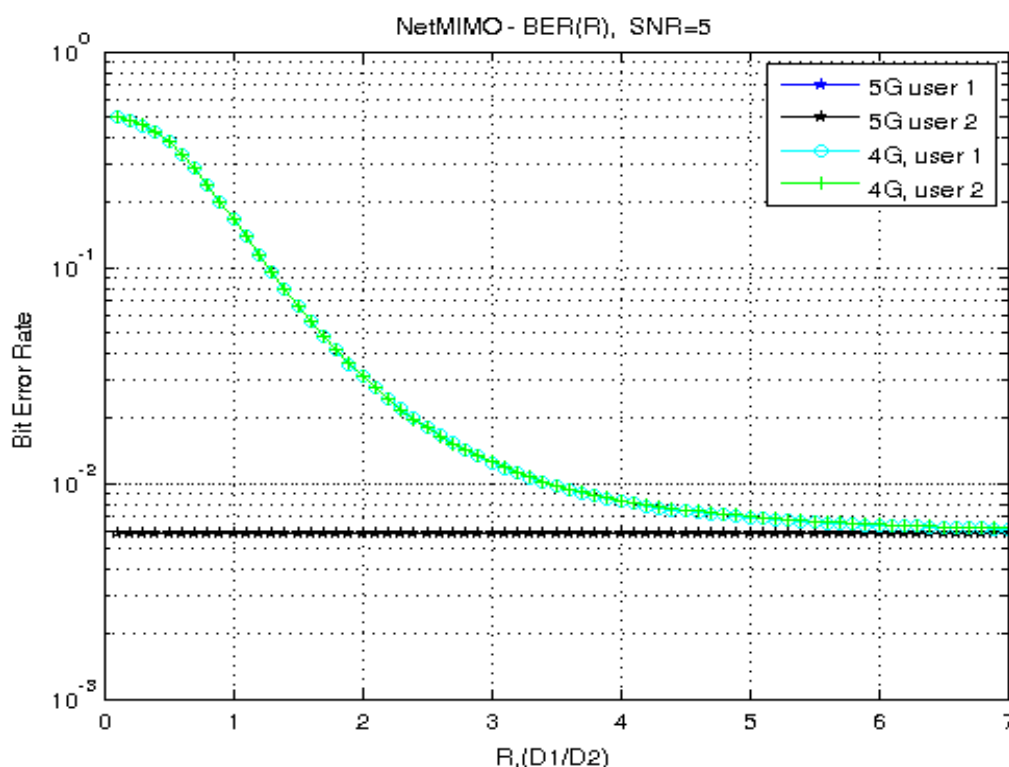
Εκτελώντας την προσομοίωση του μοντέλου NetMIMO, χρησιμοποιώντας τις τιμές παραμέτρων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, παράγεται, αρχικά, το διάγραμμα του παρακάτω σχήματος (σχήμα 4.1). Στο διάγραμμα αυτό, εμφανίζονται 4 καμπύλες BER-SNR, μία για κάθε χρήστη για την περίπτωση των 4G δικτύων, χωρίς την δυνατότητα συνεργασίας των συσκευών τους, και μία για κάθε χρήστη για την περίπτωση των 5G δικτύων όπου οι συσκευές μπορούν να συνεργάζονται μεταξύ τους. Η μπλε και η κυανή καμπύλη αντιστοιχούν στους χρήστες των οποίων οι συσκευές συνεργάζονται (5G) ενώ η κόκκινη και η πράσινη στους χρήστες οι οποίοι παρεμβάλλονται ο ένας στον άλλο (4G). Όπως γίνεται φανερό από το διάγραμμα, στην περίπτωση που τα σήματα μεταδίδονται ανεξάρτητα (4G δίκτυα) η ποιότητα της επικοινωνίας είναι πολύ χειρότερη από την περίπτωση όπου οι συσκευές συνεργάζονται μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, στην πρώτη περίπτωση, στο σήμα προστίθεται πρόσθετος, από αυτόν του καναλιού, θόρυβος, που οφείλεται στην παρεμβολή του ενός σήματος με το άλλο ενώ στην δεύτερη περίπτωση, όπου οι συσκευές συνεργάζονται, τα σήματα δεν παρεμβάλλουν μεταξύ τους, οπότε ο θόρυβος του καναλιού θα είναι μικρότερος από ότι στην προηγούμενη περίπτωση.



Σχήμα 4.1 – NetMIMO μοντέλο για R=1

Το δεύτερο διάγραμμα που παράγεται από την προσομοίωση είναι το διάγραμμα του παρακάτω σχήματος (σχήμα 4.2). Στο διάγραμμα αυτό, εμφανίζονται 4 καμπύλες BER-R, μία για κάθε χρήστη για την περίπτωση των 4G δικτύων, χωρίς την δυνατότητα συνεργασίας των συσκευών τους, και μία για κάθε χρήστη για την περίπτωση των 5G δικτύων όπου οι συσκευές μπορούν να συνεργάζονται μεταξύ τους. Η μπλε και η μαύρη καμπύλη αντιστοιχούν στους χρήστες των οποίων οι συσκευές συνεργάζονται (5G) ενώ η κυανή και η πράσινη στους χρήστες οι οποίοι παρεμβάλλονται ο ένας στον άλλο (4G).

Όπως γίνεται φανερό από το διάγραμμα, στην περίπτωση που τα σήματα μεταδίδονται ανεξάρτητα (4G δίκτυα) και ο λόγος R είναι πολύ μικρός, δηλαδή στην περίπτωση όπου ο ένας χρήστης είναι πολύ κοντά στον σταθμό βάσης σε σχέση με τον άλλο χρήστη, η ποιότητα της επικοινωνίας είναι πολύ χειρότερη από την περίπτωση όπου οι συσκευές συνεργάζονται μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, όταν οι πομποί δεν συνεργάζονται μεταξύ τους στο σήμα προστίθεται πρόσθετος, από αυτόν του καναλιού, θόρυβος, που οφείλεται στην παρεμβολή του ενός σήματος με το άλλο ενώ στην περίπτωση, όπου οι συσκευές συνεργάζονται, τα σήματα δεν παρεμβάλλουν μεταξύ τους, οπότε ο θόρυβος του καναλιού θα είναι μικρότερος από ότι στην προηγούμενη περίπτωση. Όμως, όπως παρατηρείται και από το διάγραμμα, όταν ο λόγος R μεγαλώνει, η επίδραση της παρεμβολής γίνεται μικρότερη και για $R > 6$ το BER γίνεται σχεδόν ίσο με την περίπτωση των συνεργαζόμενων χρηστών.

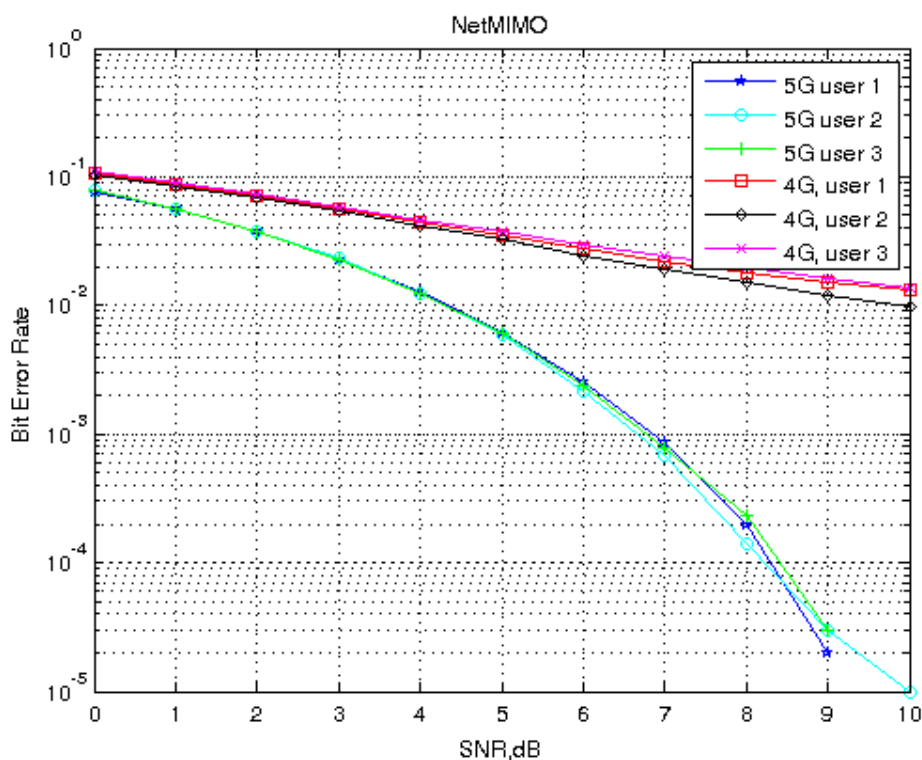


Σχήμα 4.2 - NetMIMO μοντέλο για SNR=5

4.1.2 - Αποτελέσματα NetMIMO-3 χρηστών μοντέλου

Εκτελώντας την προσομοίωση του μοντέλου NetMIMO για τρεις χρήστες, χρησιμοποιώντας τις τιμές παραμέτρων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, παράγεται το διάγραμμα του παρακάτω σχήματος (σχήμα 4.3). Στο διάγραμμα αυτό, εμφανίζονται 6 καμπύλες BER-SNR, μία για κάθε χρήστη για την περίπτωση των 4G δικτύων, χωρίς την δυνατότητα συνεργασίας των συσκευών τους, και μία για κάθε χρήστη για την περίπτωση των 5G δικτύων όπου οι συσκευές μπορούν να συνεργάζονται μεταξύ τους. Οι μπλε, κυανή και πράσινη καμπύλες αντιστοιχούν στους χρήστες των οποίων οι συσκευές συνεργάζονται (5G) ενώ οι κόκκινη, μαύρη και ροζ στους χρήστες οι οποίοι παρεμβάλλονται ο ένας στον άλλο (4G). Όπως γίνεται φανερό και από αυτό το διάγραμμα, στην περίπτωση που τα σήματα μεταδίδονται ανεξάρτητα (4G δίκτυα) η ποιότητα της επικοινωνίας είναι πολύ χειρότερη από την περίπτωση όπου οι συσκευές

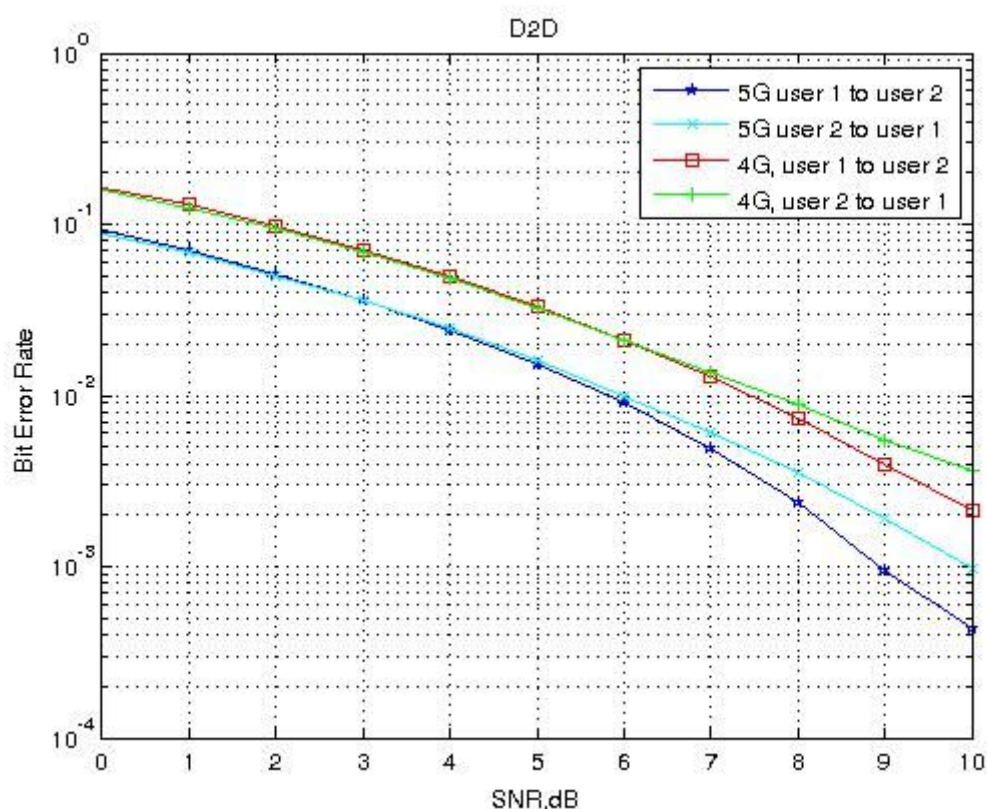
συνεργάζονται μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, στην πρώτη περίπτωση, στο σήμα προστίθεται πρόσθετος, από αυτόν του καναλιού, θόρυβος, που οφείλεται στην παρεμβολή του ενός σήματος με το άλλο ενώ στην δεύτερη περίπτωση, όπου οι συσκευές συνεργάζονται, τα σήματα δεν παρεμβάλλουν μεταξύ τους, οπότε ο θόρυβος του καναλιού θα είναι μικρότερος από ότι στην προηγούμενη περίπτωση. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ανάλογα με αυτά που εξάγονται από την εκτέλεση της προσομοίωσης για 2 χρήστες, με τις αποκλείσεις από την παραπάνω περίπτωση να οφείλονται στην μεγαλύτερη πολυπλοκότητα του μοντέλου καθώς και στον τρόπο παραγωγής των δεδομένων και της μοντελοποίησης του καναλιού. Όμως, αν και υπολογίζεται τιμή BER μικρότερη από την περίπτωση των 2 χρηστών, άρα καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας, η υπεροχή της συνεργασίας των χρηστών μεταξύ τους είναι αδιαμφισβήτητη.



Σχήμα 4.3 - NetMIMO-3 χρηστών μοντέλο για R=1

4.1.3 – Αποτελέσματα D2D μοντέλου

Στην περίπτωση του μοντέλου αυτού, η λήψη δεδομένων και ο έλεγχος της ακρίβειας τους επαναλαμβάνεται 100 φορές, και όλη αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορες τιμές του SNR, από 0 μέχρι 10 για βήμα 1. Ο υπολογισμός του BER γίνεται για κάθε τιμή του SNR και για κάθε τέτοια περίπτωση εξάγεται ο μέσος όρος από τις 100 επαναλήψεις, ο οποίος είναι η τιμή που θα χρησιμοποιηθεί για την σύγκριση των δύο περιπτώσεις δικτύου. Εκτελώντας λοιπόν την προσομοίωση λαμβάνεται το παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 4.4). Στο διάγραμμα αυτό εμφανίζονται τέσσερις φαίνεται ότι με την χρήση της D2D επικοινωνίας από τα 5G δίκτυα, το BER είναι μικρότερο για όλες τις εξεταζόμενες τιμές SNR. Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στην αποστολή δεδομένων από τον χρήστη 1 στον χρήστη 2, απευθείας, και η κυανή καμπύλη αντιστοιχεί στην αποστολή δεδομένων από τον χρήστη 2 στον χρήστη 1 (5G). Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στην αποστολή δεδομένων από τον χρήστη 1 στον χρήστη 2 μέσω του σταθμού βάσης και η πράσινη στην αποστολή δεδομένων από τον χρήστη 2 στον χρήστη 1 μέσω του σταθμού βάσης (4G). Από τις καμπύλες αυτές γίνεται φανερό η καλύτερη απόδοση του δικτύου στο οποίο εφαρμόζεται η D2D επικοινωνία. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι με την απευθείας επικοινωνία μεταξύ των χρηστών το σήμα μεταδίδεται απευθείας από τον έναν χρήστη στον άλλο, γεγονός που μειώνει τον θόρυβο ο οποίος προστίθεται στο σήμα. Επιπροσθέτως, όταν χρησιμοποιείται η D2D επικοινωνία παράγεται μικρότερο πλήθος σημάτων μιας και, για δύο χρήστες, με χρήση D2D επικοινωνίας, για την αμφίδρομη επικοινωνία τους απαιτούνται δύο σήματα ενώ για την αμφίδρομη επικοινωνία του μέσω του σταθμού βάσης απαιτούνται 4 σήματα. Το γεγονός ότι παράγονται λιγότερα σήματα σε ένα δίκτυο αυτομάτως μειώνει τον θόρυβο που προστίθεται σε κάθε σήμα λόγω παρεμβολής των υπολοίπων.



Σχήμα 4.4 – D2D μοντέλο

Συμπεράσματα

Η μεγάλη διάδοση που έχουν τα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας καθώς και ο συνεχώς αυξανόμενος όγκος δεδομένων που αυτά καλούνται να διαχειριστούν επιτάσσουν την εξέλιξη τους ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα τους, ο υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων καθώς και η ποιότητα της επικοινωνίας των χρηστών μεταξύ τους. Για τον λόγο αυτό, τα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας συνεχώς εξελίσσονται με, έναν μέσο όρο 10 χρόνια να είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ του οποίου δημιουργείται μία νέα γενιά δικτύων. Η τελευταία γενιά που χρησιμοποιείται είναι η τέταρτη (4G), η οποία όμως δεν έχει αντικαταστήσει τα παλαιότερων γενεών δίκτυα. Η επόμενη γενιά θα είναι η πέμπτη (5G) η οποία αναμένεται να ολοκληρωθεί η προτυποποίηση της μέχρι το 2020, χρονιά που αναμένεται και η πρώτη εμπορική υλοποίηση ενός 5G δικτύου.

Στόχοι της γενιάς αυτής είναι, εκτός της αύξησης της χωρητικότητας και των υποστηριζόμενων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων των δικτύων αυτών, συγκριτικά με τα παλαιότερα δίκτυα, η υλοποίηση ενός δικτύου το οποίο να μπορεί να ενοποιήσει όλες τις υπάρχουσες τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών και δικτύωσης, όπως το GSM, το HSPA, το WiFi, στο WiMAX για παράδειγμα. Για τον λόγο αυτό μελετώνται και προτείνονται πολλές τεχνικές και μέθοδοι επικοινωνίας, όπως είναι η επικοινωνία D2D, η οποία είναι μία πολλά υποσχόμενη μέθοδος επικοινωνίας. Με χρήση της μεθόδου αυτής θα είναι δυνατόν να υλοποιηθεί η ενσωμάτωση του IoT, που αναφέρθηκε παραπάνω, στα 5G δίκτυα.

Εκτός αυτού όμως, η υλοποίηση της D2D θα προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στα κύρια χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών, όπως είναι η χωρητικότητα τους, ο υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αλλά και η αξιοπιστία των λαμβανόμενων δεδομένων. Για την ανάδειξη των παραπάνω πλεονεκτημάτων της υλοποίησης της D2D, κάτι που αποτελεί κύριο θέμα της εργασίας αυτής, στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκαν δύο μοντέλα δικτύων και εκτελέστηκε η προσομοίωση του. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών αναδεικνύουν την ανωτερότητα των 5G δικτύων με την χρήση της D2D. Για την υλοποίηση των δύο μοντέλων θεωρήθηκε ότι το σήμα θα έχει την απλούστερη ψηφιακή κωδικοποίηση και θα αποτελείται από μόνο δύο χρήστες. Οπότε, σε πραγματικές συνθήκες όπου στα 5G δίκτυα θα χρησιμοποιούνται διαμορφώσεις σήματος με πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά από αυτές των 4G δικτύων, όπως αναφέρθηκε και στο δεύτερο κεφάλαιο όπου έγινε περιγραφή των 4G και των 5G δικτύων, και οι χρήστες θα είναι πολλοί περισσότεροι, άρα ο θόρυβος λόγω παρεμβολών θα είναι πολύ μεγαλύτερος, οι διαφορές απόδοσης που παρατηρήθηκαν θα είναι ακόμα μεγαλύτερες.

Μικρότερο θορυβώδες περιβάλλον από τα ήδη υπάρχοντα 4G δίκτυα δημιουργεί, εκτός της υλοποίησης της D2D μεθόδου, όπως έγινε φανερό και από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και συγκεκριμένα του NetMIMO μοντέλου, και η χρήση της μεθόδου NetMIMO. Και η NetMIMO μέθοδος έχει την δυνατότητα να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων στα οποία θα υλοποιηθεί, αλλά οι επιδόσεις της δεν θα καταφέρουν να φθάσουν τις επιδόσεις της D2D μεθόδου. Ο λόγος για αυτό είναι ότι στην NetMIMO μέθοδο απαιτείται η μεσολάβηση του σταθμού βάσης ενώ στην D2D η επικοινωνία γίνεται άμεσα, μεταξύ των συσκευών. Έτσι, η D2D μπορεί να προσφέρει πολύ μεγαλύτερη αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, μιας και ο όγκος των δεδομένων και το πλήθος των χρηστών που

καλείται να διαχειριστεί ο σταθμός βάσης μειώνεται πολύ, κάτι που δεν προσφέρει η NetMIMO. Εκτός αυτού, ακόμα και αν υποστηρίζεται ο ίδιος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και για τις δύο περιπτώσεις, η επικοινωνία με την μέθοδο NetMIMO θα είναι σαφώς πιο αργή γιατί το σήμα θα πρέπει να διέλθει και από τον σταθμό βάσης, ο οποίος στην συνέχεια θα το προωθήσει στον παραλήπτη, ενώ στην D2D επικοινωνία το στάδιο αυτό παραλείπεται. Έτσι, το σήμα δεν θα έχει την καθυστέρηση που θα προκαλέσει η λήψη του, η επεξεργασία του και η αποστολή του από τον σταθμό βάσης και ο χρόνος διεκπεραίωσης των επικοινωνιών μεταξύ των χρηστών θα είναι αρκετά μειωμένος, συγκριτικά με την NetMIMO μέθοδο.

Εν κατακλείδι, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας της επόμενης γενιάς σχεδιάζονται έτσι ώστε, αφενός μεν να βελτιώσουν πολύ τα χαρακτηριστικά και τις επιδόσεις των ήδη υπαρχόντων δικτύων, τα οποία είναι κυρίως 3G και 4G δίκτυα, και αφετέρου να υλοποιήσουν τον στόχο που είχε τεθεί και για τα 4G δίκτυα, δηλαδή την δημιουργία ενός δικτύου το οποίο να μπορεί να ενσωματώσει όλες τις υπάρχουσες τεχνολογίες δικτύωσης. Οι τεχνολογίες αυτές δεν είναι μόνο οι τεχνολογίες δικτύων κινητής τηλεφωνίας αλλά και οι τεχνολογίες δικτύωσης υπολογιστών αλλά και το νέο δίκτυο, το IoT. Έχουν οπότε ως απώτερο σκοπό την δημιουργία ενός παγκόσμιου ετερογενούς δικτύου στο οποίο να μπορεί να συνδεθεί οποιαδήποτε συσκευή με τον κατάλληλο εξοπλισμό. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, μεγάλο ρόλο θα παίζει η ενσωμάτωση της μεθόδου επικοινωνίας συσκευής σε συσκευή (D2D), η οποία θα δώσει την δυνατότητα της άμεσης επικοινωνίας διαφόρων συσκευών μεταξύ τους, χωρίς την απαραίτητη, για τα ήδη υλοποιημένα δίκτυα, επικοινωνία μέσω του σταθμού βάσης. Και εκτός αυτού, θα μπορεί να παρέχει καλύτερες συνθήκες επικοινωνίας στα δίκτυα στα οποία θα είναι υλοποιημένη, όπως δείχθηκε και από τα δύο μοντέλα προσομοίωσης που σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν για την εργασία αυτή από τον συντάκτη της.

Παράρτημα Α - MatLab Κώδικας NetMIMO μοντέλου

```

clear all

close all

dataN = 10^6; %data length
SNR = 0:10;
Transmitters = 2; %number of transmitters
Receivers = 2; %number of receivers
N=100; %times
a=4;
SNR_R=5;
R = 0.1:0.1:7;

data_errors=zeros(1,length(SNR));
data2_errors=zeros(1,length(SNR));
data3_errors=zeros(1,length(SNR));
data4_errors=zeros(1,length(SNR));
R_errors = zeros(1,length(R));
R_errors2 = zeros(1,length(R));
R_errors3 = zeros(1,length(R));
R_errors4 = zeros(1,length(R));

for l=1:N

% Transmitter for BER(SNR)
data = randi(2,1,dataN)-1; % generating the binary data
data_bpsk = 2*data-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1
data2 = randi(2,1,dataN)-1; % generating the binary data
data2_bpsk = 2*data2-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1
data3 = randi(2,1,dataN)-1; % generating the binary data
data3_bpsk = 2*data-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1
data4 = randi(2,1,dataN)-1; % generating the binary data
data4_bpsk = 2*data-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1

Rayleigh_chanel = 1/sqrt(2)*(randn(Receivers,Transmitters) + 1i*randn(Receivers,Transmitters));
Gaussian_noise = 1/sqrt(2)*(randn(Receivers,dataN) + 1i*randn(Receivers,dataN));

Rayleigh_chanel2 = 1/sqrt(2)*(randn(1,dataN,2*Transmitters) + 1i*randn(1,dataN,2*Transmitters));
Gaussian_noise2 = 1/sqrt(2)*(randn(1,dataN,Transmitters) + 1i*randn(1,dataN,Transmitters));

ch_data=[data_bpsk;data2_bpsk];

Transmitted_data = Rayleigh_chanel\ch_data;
Transmitted_data3 = Rayleigh_chanel2(:,1).\data3_bpsk;
Transmitted_data4 = Rayleigh_chanel2(:,2).\data4_bpsk;

% Transmitter for BER(R)
data_R = randi(2,1,dataN)-1;
data_R_bpsk = 2*data_R-1;
data2_R = randi(2,1,dataN)-1;
data2_R_bpsk = 2*data2_R-1;

Rayleigh_chanel2_R = 1/sqrt(2)*(randn(1,dataN,4) + 1i*randn(1,dataN,4)); % Rayleigh channel
Gaussian_noise2_R = 1/sqrt(2)*(randn(1,dataN,2) + 1i*randn(1,dataN,2)); % white gaussian noise, 0dB variance

```

```

data_trasmitted2 = Rayleigh_chanel2_R(:,1).\data_R_bpsk;
data_trasmitted3 = Rayleigh_chanel2_R(:,2).\data2_R_bpsk;

%SNR cases
for i = 1:length(SNR)

% Channel and noise Noise addition
noisy_data = Rayleigh_chanel*Transmitted_data + 10^(-SNR(i)/20)*Gaussian_noise;
noisy_data3 = Rayleigh_chanel2(:,1).*Transmitted_data3 + 10^(-SNR(i)/20)*Gaussian_noise2(:,1)
+Rayleigh_chanel2(:,3).*Transmitted_data4;
noisy_data4 = Rayleigh_chanel2(:,2).*Transmitted_data4 + 10^(-SNR(i)/20)*Gaussian_noise2(:,2)
+Rayleigh_chanel2(:,4).*Transmitted_data3;

% receiver - hard decision decoding
data_recovered = real(noisy_data(1,:))>0;
data2_recovered = real(noisy_data(2,:))>0;
data3_recovered = real(noisy_data3)>0;
data4_recovered = real(noisy_data4)>0;

%checking data
errors=dataN-length(find(data==data_recovered));
errors2=dataN-length(find(data2==data2_recovered));
errors3=dataN-length(find(data3==data3_recovered));
errors4=dataN-length(find(data4==data4_recovered));

% counting the errors
data_errors(i) = data_errors(i) + errors;
data2_errors(i) = data2_errors(i) + errors2;
data3_errors(i) = data3_errors(i) + errors3;
data4_errors(i) = data4_errors(i) + errors4;

end

%R cases
for k=1:length(R)

noisy_data_R = Rayleigh_chanel*Transmitted_data + 10^(-SNR_R/20)*Gaussian_noise;
noisy_data1_R = Rayleigh_chanel2_R(:,1).*data_trasmitted2 + 10^(-SNR_R/20)*Gaussian_noise2_R(:,1) +
(R(k)^(a/2)).*Rayleigh_chanel2_R(:,3).*data_trasmitted3;
noisy_data2_R = Rayleigh_chanel2_R(:,2).*data_trasmitted3 + 10^(-SNR_R/20)*Gaussian_noise2_R(:,2) +
(R(k)^(a/2)).*Rayleigh_chanel2_R(:,4).*data_trasmitted2;

% receiver - hard decision decoding
received_R=real(noisy_data_R(1,:))>0;
received2_R=real(noisy_data_R(2,:))>0;
received3_R = real(noisy_data1_R)>0;
received4_R = real(noisy_data2_R)>0;

% counting the errors
R_errors(k) = size(find((data- received_R)),2);
R_errors2(k) = size(find((data2- received2_R)),2);
R_errors3(k) = size(find((data_R- received3_R)),2);
R_errors4(k) = size(find((data2_R- received4_R)),2);
end

end

```

```

data_errors = data_errors/(N*dataN); %mean of N data_errors
data2_errors = data2_errors/(N*dataN); %mean of N data_errors
data3_errors = data3_errors/(N*dataN); %mean of N data_errors
data4_errors = data4_errors/(N*dataN); %mean of N data_errors

data_errors_R = R_errors/dataN; % simulated ber
data2_errors_R = R_errors/dataN; % simulated ber
data3_errors_R = R_errors3/dataN; % simulated ber
data4_errors_R = R_errors4/dataN; % simulated ber

figure(1)
semilogy(SNR,data_errors,'bp-',SNR,data2_errors,'co-',SNR,data3_errors,'g+-',SNR,data4_errors,'rs-');
grid on
legend('5G user 1','5G user 2','4G, user 1','4G, user 2');
xlabel('SNR,dB');
ylabel('Bit Error Rate');
title('NetMIMO - BER(SNR), R=1');

figure(2)
semilogy(R,data_errors_R,'bp-',R,data2_errors_R,'kp-',R,data3_errors_R,'co-',R,data4_errors_R,'g+-');
grid on
legend('5G user 1','5G user 2','4G, user 1','4G, user 2');
xlabel('R,(D1/D2)');
ylabel('Bit Error Rate');
title('NetMIMO - BER(R), SNR=5');

```

Παράρτημα Β - MatLab Κώδικας μοντέλου NetMIMO 3 χρηστών

```

clear all

close all

dataN = 10^6; %data length

SNR = 0:10;
Transmitters = 3; %number of transmitters
Receivers = 3; %number of receivers
N=100; %times

data_errors=zeros(1,length(SNR));
data2_errors=zeros(1,length(SNR));
data3_errors=zeros(1,length(SNR));
data4_errors=zeros(1,length(SNR));
data5_errors=zeros(1,length(SNR));
data6_errors=zeros(1,length(SNR));

```

```

for k=1:N

% Transmitter

data = randi(2,1,dataN)-1; % generating the binary data
data_bpsk = 2*data-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1
data2 = randi(2,1,dataN)-1; % generating the binary data
data2_bpsk = 2*data2-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1
data3 = randi(2,1,dataN)-1; % generating the binary data
data3_bpsk = 2*data3-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1

ch_data=[data_bpsk;data2_bpsk;data3_bpsk];

data4 = randi(2,1,dataN)-1; % generating the binary data
data4_bpsk = 2*data4-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1
data5 = randi(2,1,dataN)-1; % generating the binary data
data5_bpsk = 2*data5-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1
data6 = randi(2,1,dataN)-1; % generating the binary data
data6_bpsk = 2*data6-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1

Rayleigh_chanel = 1/sqrt(2)*(randn(Receivers,Transmitters) + 1i*randn(Receivers,Transmitters));
Gaussian_noise = 1/sqrt(2)*(randn(Receivers,dataN) + 1i*randn(Receivers,dataN));

Rayleigh_chanel2 = 1/sqrt(2)*(randn(1,dataN,2*Transmitters) + 1i*randn(1,dataN,2*Transmitters));
Gaussian_noise2 = 1/sqrt(2)*(randn(1,dataN) + 1i*randn(1,dataN));

Transmitted_data = Rayleigh_chanel\ch_data;
Transmitted_data4 = Rayleigh_chanel2(:,1).\data4_bpsk;
Transmitted_data5 = Rayleigh_chanel2(:,2).\data5_bpsk;
Transmitted_data6 = Rayleigh_chanel2(:,3).\data6_bpsk;

for i = 1:length(SNR)

% Channel and noise Noise addition
noisy_data = Rayleigh_chanel*Transmitted_data + 10^(-SNR(i)/20)*Gaussian_noise;
noisy_data4 = Rayleigh_chanel2(:,1).*Transmitted_data4 + 10^(-SNR(i)/20)*Gaussian_noise2+Rayleigh_chanel2(:,5).*Transmitted_data5+Rayleigh_chanel2(:,6).*Transmitted_data6;
noisy_data5 = Rayleigh_chanel2(:,2).*Transmitted_data5 + 10^(-SNR(i)/20)*Gaussian_noise2+Rayleigh_chanel2(:,4).*Transmitted_data4+Rayleigh_chanel2(:,6).*Transmitted_data6;
noisy_data6 = Rayleigh_chanel2(:,3).*Transmitted_data6 + 10^(-SNR(i)/20)*Gaussian_noise2+Rayleigh_chanel2(:,4).*Transmitted_data4+Rayleigh_chanel2(:,5).*Transmitted_data5;

% receiver - hard decision decoding
data_recovered = real(noisy_data(1,:))>0;
data2_recovered = real(noisy_data(2,:))>0;
data3_recovered = real(noisy_data(3,:))>0;
data4_recovered = real(noisy_data4)>0;
data5_recovered = real(noisy_data5)>0;
data6_recovered = real(noisy_data6)>0;
%checking data
errors=dataN-length(find(data==data_recovered));
errors2=dataN-length(find(data2==data2_recovered));
errors3=dataN-length(find(data3==data3_recovered));
errors4=dataN-length(find(data4==data4_recovered));
errors5=dataN-length(find(data5==data5_recovered));
errors6=dataN-length(find(data6==data6_recovered));

```

```
% counting the errors
```

```
data_errors(i) = data_errors(i) + errors;
data2_errors(i) = data2_errors(i) + errors2;
data3_errors(i) = data3_errors(i) + errors3;
data4_errors(i) = data4_errors(i) + errors4;
data5_errors(i) = data5_errors(i) + errors5;
data6_errors(i) = data6_errors(i) + errors6;
```

```
end
end
```

```
data_errors = data_errors/(N*dataN); %mean of N data_errors
data2_errors = data2_errors/(N*dataN); %mean of N data_errors
data3_errors = data3_errors/(N*dataN); %mean of N data_errors
data4_errors = data4_errors/(N*dataN); %mean of N data_errors
data5_errors = data5_errors/(N*dataN); %mean of N data_errors
data6_errors = data6_errors/(N*dataN);
```

```
figure(1)
semilogy(SNR,data_errors,'bp-',SNR,data2_errors,'co-',SNR,data3_errors,'g+-',SNR,data4_errors,'rs-',
'SNR,data5_errors,'kd-',SNR,data6_errors,'mx-');
grid on
legend('5G user 1','5G user 2','5G user 3','4G, user 1','4G, user 2','4G, user 3');
xlabel('SNR,dB');
ylabel('Bit Error Rate');
title('NetMIMO 3x3');
```

Παράρτημα Γ - MatLab Κώδικας D2D μοντέλου

```
clear all
```

```
close all
```

```
dataN = 10^3; %data length
```

```
SNR = 0:10;
N=100; %times of data tranfering
```

```
data_errors=zeros(1,length(SNR));
data2_errors=zeros(1,length(SNR));
data_errors2=zeros(1,length(SNR));
data2_errors2=zeros(1,length(SNR));
```

```
for k=1:N
```

% Transmitter

```

data = randi(2,1,dataN)-1; % generating the binary data
data_bpsk = 2*data-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1

data2 = randi(2,1,dataN)-1; % generating the binary data
data2_bpsk = 2*data2-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1

Rayleigh_chanel = 1/sqrt(2)*(randn(1,dataN,4) + 1i*randn(1,dataN,4));
Gaussian_noise = 1/sqrt(2)*(randn(1,dataN) + 1i*randn(1,dataN));

Rayleigh_chanel2 = 1/sqrt(2)*(randn(1,dataN,4) + 1i*randn(1,dataN,4));
Gaussian_noise2 = 1/sqrt(2)*(randn(1,dataN) + 1i*randn(1,dataN));

Transmitted_data = Rayleigh_chanel(:,1).\data_bpsk;
Transmitted_data2 = Rayleigh_chanel(:,2).\data2_bpsk;

```

```

for i = 1:length(SNR)

```

% Channel and noise Noise addition from users to BS

```

noisy_data = Rayleigh_chanel(:,1).*Transmitted_data + 10^(-
SNR(i)/20)*Gaussian_noise+Rayleigh_chanel(:,3).*Transmitted_data;
noisy_data2 = Rayleigh_chanel(:,2).*Transmitted_data2 + 10^(-
SNR(i)/20)*Gaussian_noise+Rayleigh_chanel(:,4).*Transmitted_data2;

```

% receiver - hard decision decoding

```

data_recovered = real(noisy_data)>0;
data2_recovered = real(noisy_data2)>0;

```

```

data_recovered_bpsk = 2*data_recovered-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1
data2_recovered_bpsk = 2*data2_recovered-1; % BPSK modulation where "0" -> -1 and "1" -> 1

```

```

Transmitted2_data = Rayleigh_chanel2(:,1).\data_recovered_bpsk;
Transmitted2_data2 = Rayleigh_chanel2(:,2).\data2_recovered_bpsk;

```

% Channel and noise Noise addition from BS to users

```

noisy2_data = Rayleigh_chanel2(:,1).*Transmitted2_data + 10^(-
SNR(i)/20)*Gaussian_noise2+Rayleigh_chanel2(:,3).*Transmitted2_data;
noisy2_data2 = Rayleigh_chanel2(:,2).*Transmitted2_data2 + 10^(-
SNR(i)/20)*Gaussian_noise2+Rayleigh_chanel2(:,4).*Transmitted2_data2;

```

% receiver - hard decision decoding

```

data_recovered2 = real(noisy2_data)>0;
data2_recovered2 = real(noisy2_data2)>0;

```

%checking data

```

errors=dataN-length(find(data==data_recovered));
errors2=dataN-length(find(data2==data2_recovered));

```

```

errors3=dataN-length(find(data==data_recovered2));
errors4=dataN-length(find(data2==data2_recovered2));

% counting the errors
data_errors(i) = data_errors(i) + errors;
data2_errors(i) = data2_errors(i) + errors2;
data_errors2(i) = data_errors2(i) + errors3;
data2_errors2(i) = data2_errors2(i) + errors4;

end

end

data_errors = data_errors/(N*dataN); %mean of N data_errors
data2_errors = data2_errors/(N*dataN); %mean of N data_errors
data_errors2 = data_errors2/(N*dataN); %mean of N data_errors
data2_errors2 = data2_errors2/(N*dataN); %mean of N data_errors

figure(1)
semilogy(SNR,data_errors,'bp-',SNR,data2_errors,'cx-',SNR,data_errors2,'rs-','SNR,data2_errors2','g+-');
grid on
legend('5G user 1 to user 2','5G user 2 to user 1','4G, user 1 to user 2','4G, user 2 to user 1');
xlabel('SNR,dB');
ylabel('Bit Error Rate');
title('D2D');

```

Βιβλιογραφία

- John G. Proakis – Masound Salehi, Μετάφραση-Επιμέλεια: Κ.Καρούμπαλος-Ε.Ζέρβας-Σ.Καραμπογιάς-Ε.Σαγκριώτης (2002) “Συστήματα Τηλεπικοινωνιών”, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- Herbert Taub – Donald L. Schilling, Αποδοση: Γ.Κ.Τσιρης- Σ.Σ.Κουκουρλής, Μετάφραση: Σ.Σ.Κουκουρλής (2003) “Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα”, Εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε. Θεσσαλονίκη

- Rodriguez (2015) “Fundamentals of 5G Mobile Networks”, John Wiley & Sons, Ltd.
- Annabel Z. Dodd (2012) “The Essential Guide to Telecommunications - Fifth Edition”, Prentice Hall, United States.
- G. Wunder, "5GNOW: Intermediate frame structure and transceiver concepts", *Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 565-570, 2014
- Aditi Chakraborty (2013) “A Study on Third Generation Mobile Technology (3G) and Comparison among All Generations of Mobile Communication”, *International Journal of Innovative Technology & Adaptive Management (IJITAM)* ISSN: 2347-3622, Volume-1, Issue-2, Νοέμβριος 2013
- K. Kumaravel (2011) “Comparative Study of 3G and 4G in Mobile Technology”, *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, Vol. 8, Issue 5, No 3, pp 256-263, Σεπτέμβριος 2011
- “Transition to 4G: 3GPP Broadband Evolution to IMT-Advanced”, Rysavy Research/3G Americas, Σεπτέμβριος 2010
- Pankaj Sharma (2013) “Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network”, *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, Vol. 2, Issue. 8, pp.47–53, Αύγουστος 2013
- M. Junaid Arshad, Amjad Farooq, Abad Shah (2010). “Evolution Toward 4G Mobile Communication Systems”, *Journal of American Science*, pp63-68, 2010.
- C. Hoymann, D. Larsson, H. Koorapaty, and Jung-Fu (Thomas) Cheng, Ericsson (2013) “A Lean Carrier for LTE”, *IEEE Communications Magazine*, pp74-80, Φεβρουάριος 2013
- Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R. et al. (2013) “Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!”, *IEEE Access*, 1, 335–349.
- Qualcomm (2013a) “1000x: More Spectrum – Especially for Small Cells”, Διαθέσιμο

στο σύνδεσμο: <https://www.qualcomm.com/documents/1000x-more-spectrum-especially-small-cells>

- F. Schaich and T. Wild, “Waveform contenders for 5G - OFDM vs. FBMC vs. UFMC,” in Proc. Int. Symp. Commun., Control Signal Process. , Αθήνα, Ελλάδα, Μάιος 2014, pp. 457–460.
- Schaich, “Filterbank based multi carrier transmission (FBMC) - evolving OFDM: FBMC in the context of WiMAX,” in Proc. European Wireless Conf. , Lucca, Ιταλία, Απρίλιος. 2010, pp. 1051–1058.
- B. D. Tensubam, N. L. Chanu. S. Singh, [2014] “Comparative Analysis of FBMC and OFDM Multicarrier Techniques for Wireless Communication Networks”, International Journal of Computer Applications (0975 - 8887) , Volume 100- No.19, Αύγουστος 2014
- H. Rahul , S. Kumar , D. Katabi, “MegaMIMO: Scaling Wireless Capacity with User Demands”, Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: <http://people.csail.mit.edu/rahul/papers/megamimo-sigcomm2012.pdf> (Τελευταία πρόσβαση: 27/05/2016)

Ιστοσελίδες

- Η Ιστορία των Τηλεπικοινωνιών. [Online] Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: <http://cgi.di.uoa.gr/~std03134/telcomhist/telcomhist.htm> (Τελευταία πρόσβαση: 20/02/2016)
- Telecommunications & computing timeline. [Online] Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: <http://www.wordworx.co.nz/Globaltimeline.htm> (Τελευταία πρόσβαση: 20/02/2016)
- Wikipedia - Cellular network. [Online] Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_network (Τελευταία πρόσβαση: 20/02/2016)

- Wikipedia - GSM. [Online] Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: <https://en.wikipedia.org/wiki/GSM> (Τελευταία πρόσβαση: 24/02/2016)
- Wikipedia - 1G. [Online] Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: <https://en.wikipedia.org/wiki/1G> (Τελευταία πρόσβαση: 24/02/2016)
- Wikipedia - 2G. [Online] Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: <https://en.wikipedia.org/wiki/2G> (Τελευταία πρόσβαση: 27/02/2016)
- Wikipedia - 3G. [Online] Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: <https://en.wikipedia.org/wiki/3G> (Τελευταία πρόσβαση: 27/02/2016)
- Wikipedia - LTE. [Online] Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: [https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_\(telecommunication\)](https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_(telecommunication)) (Τελευταία πρόσβαση: 27/04/2016)
- LTE. [Online] Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte> (Τελευταία πρόσβαση: 27/04/2016)
- Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015-2020 White Paper-Cisco [Online] Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html> (Τελευταία πρόσβαση: 28/04/2016)
- 5G Vision -The 5G Infrastructure Public Private Partnership: the next generation of communication networks and services [Online]. Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2015/02/5G-Vision-Brochure-v1.pdf> (Τελευταία πρόσβαση: 27/05/2016)