



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ
ΓΕΝΕΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ



Του φοιτητή
Κωτσιάνη Κωνσταντίνου
Αρ. Μητρώου: 05/2907

Επιβλέπων
Αμανατιάδης Δημήτριος

Ημερομηνία: Μάιος 2024

Τίτλος Π.Ε.: Συγκριτική μελέτη των διαφορετικών γενεών δικτύων κινητής τηλεφωνίας

Κωδικός Π.Ε. 23308

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Κωτσιάνης Κωνσταντίνος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Αμανατιάδης Δημήτριος

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε.: 01/11/2023

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε.: 25/05/2024

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Κωτσιάνη Κωνσταντίνου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Ο λόγος επιλογής της παρούσας εργασίας είναι η ενασχόληση και το ενδιαφέρον του φοιτητή-συγγραφέα με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας τους, καθώς και της εξέλιξής τους με το πέρασμα των ετών. Το όφελος που αποκομίσθηκε είναι η κατανόηση των νέων τεχνολογιών που έχουν αλλάξει εκ βάθρων τόσο τον κόσμο των επιχειρήσεων και της βιομηχανίας, όσο και την προσωπική επικοινωνία και έχουν επιτρέψει τη δημιουργία και χρήση νέων τύπων εφαρμογών, οι οποίες εξυπηρετούν πολλές πτυχές της προσωπικής και της επαγγελματικής ζωής.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στους διαφορετικούς τύπους ψηφιακών κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Ξεκινάει με μία συνοπτική ιστορική αναδρομή, η οποία αφορά τις ασύρματες επικοινωνίες γενικότερα, καθώς και τη γέννησή τους με τη δημιουργία των αναλογικών δικτύων πρώτης γενιάς, τα οποία υπήρξαν ο προπομπός όλων των σημερινών ψηφιακών δικτύων. Προκειμένου να καταστούν κατανοητές οι διάφορες έννοιες που συζητούνται στη συνέχεια, παρέχεται μία σύντομη περιγραφή πολλών βασικών εννοιών και ορολογιών, οι οποίες αφορούν τα δίκτυα γενικότερα και τα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα δίκτυα δεύτερης, τρίτης, τέταρτης και πέμπτης γενιάς, τα οποία βρίσκονται σήμερα σε πλήρη λειτουργία και στο τέλος παρουσιάζεται μία συνοπτική αναφορά στα νεότερα δίκτυα έκτης γενιάς, η προτυποποίηση των οποίων βρίσκεται σε εξέλιξη.

COMPARATIVE STUDY OF DIFFERENT GENERATION OF MOBILE NETWORKS

KOTSIANIS KONSTANTINOS

Abstract

This thesis refers to the different types of digital cellular mobile networks. It begins with a brief historical overview of wireless communications in general, as well as its birth with the creation of first-generation analog networks, which were the forerunners of all today's digital networks. In order to make the various concepts discussed below understandable, a brief description of several key concepts and terminologies is provided, which are relevant to networks in general and to mobile wireless networks. Next, the second, third, fourth and fifth generation networks are presented, which are currently in full operation, and finally a brief reference is presented to the newer sixth generation networks, the standardization of which is underway.

Ευχαριστίες

Κατά πρώτον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αμανατιάδη Δημήτριο για τις εύστοχες παρατηρήσεις του όσον αφορά τις διορθώσεις ώστε να καταστεί κατανοητό το κείμενο από μία μεγάλη μερίδα ανθρώπων οι οποίοι δεν διαθέτουν τις απαιτούμενες τεχνικές γνώσεις, αλλά ενδιαφέρονται να ενημερωθούν για το παρόν θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την συμπαράσταση και για την κατανόησή τους κατά την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, και τον συνέταιρό μου κ. Κουτούπη Ιωάννη για την αμέριστη συμπαράσταση και υπομονή του όσον αφορά τις ώρες που απουσίαζα από την επιχείρησή μας προκειμένου να κάνω βιβλιογραφική έρευνα και να συγγράψω την παρούσα εργασία.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	II
Περίληψη	III
Abstract.....	IV
Ευχαριστίες.....	V
Περιεχόμενα	VI
Κατάλογος Σχημάτων	IX
Κατάλογος Πινάκων	X
Συνομογραφίες	XI
Κεφάλαιο 1: Ιστορική αναδρομή	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών	1
1.3 Ανάπτυξη της πρώτης γενιάς κινητών επικοινωνιών	2
1.4 Εξέλιξη της ψηφιακής κινητής τηλεφωνίας	3
1.5 Επίλογος	4
Κεφάλαιο 2: Βασικές αρχές λειτουργίας δικτύων κινητής τηλεφωνίας.....	5
2.1 Εισαγωγή	5
2.2 Βασικές γνώσεις ασύρματων επικοινωνιών.....	5
2.2.1 Πρότυπο μοντέλο OSI	5
2.2.2 Μέσα μετάδοσης.....	6
2.2.3 Φάσμα συχνοτήτων λειτουργίας.....	8
2.2.4 Περιοχή τερματικών συσκευών.....	8
2.2.5 Μέθοδοι προσπέλασης καναλιού.....	8
2.2.6 Δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος και δίκτυα μεταγωγής πακέτου.....	10
2.2.7 RAT (Radio Access Technology).....	11
2.2.8 RAN (Radio Access Network).....	11
2.3 Τρόποι λειτουργίας και ορολογία κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας.....	12
2.3.1 Μακροκυψέλες (Macro cells).....	13
2.3.2 Μικροκυψέλες (Micro cells).....	14
2.3.3 Picocells.....	15
2.3.4 Femtocells.....	15
2.4 Βασικά υποσυστήματα κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας	16
2.4.1 Σταθμοί βάσης	16
2.4.2 Υποσύστημα μεταγωγής δικτύου (Network Switching Subsystem - NSS)	20

2.5	<i>Επίλογος</i>	22
Κεφάλαιο 3: Δίκτυα δεύτερης γενιάς		23
3.1	<i>Εισαγωγή</i>	23
3.2	<i>Διαδικασία πρόσβασης στο δίκτυο δεύτερης γενιάς</i>	23
3.3	<i>HLLR (Home Location Register)</i>	24
3.4	<i>VLLR (Visitor Location Register)</i>	25
3.5	<i>Πλαίσια, χρονοθυρίδες και κωδικοποίηση φωνής</i>	26
3.6	<i>Τεχνολογίες μετάδοσης δεδομένων GSM δικτύων</i>	26
3.6.1	<i>CSD (Circuit Switched Data – 2G)</i>	26
3.6.2	<i>HSCSD (High Speed Circuit Switched Data – 2G)</i>	27
3.6.3	<i>GPRS (General Packet Radio Service – 2.5G)</i>	28
3.6.4	<i>EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution – 2.75G)</i>	30
3.7	<i>SMS (Short Message Service)</i>	31
3.7.1	<i>SMSC (Short Message Service Center)</i>	31
3.8	<i>MMS (Multimedia Messaging Service)</i>	33
3.9	<i>Επίλογος</i>	35
Κεφάλαιο 4: Δίκτυα τρίτης γενιάς		36
4.1	<i>Εισαγωγή</i>	36
4.2	<i>Γενικές πληροφορίες σχετικά με τα δίκτυα τρίτης γενιάς</i>	36
4.3	<i>Βασικά συστατικά στοιχεία δικτύων τρίτης γενιάς</i>	37
4.3.1	<i>UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network)</i>	37
4.3.2	<i>UE (User Equipment)</i>	39
4.4	<i>HSPA (High Speed Packet Access – 3.5G)</i>	41
4.4.1	<i>HSDPA (High Speed Downlink Packet Access)</i>	43
4.4.2	<i>HSUPA (High Speed Uplink Packet Access)</i>	43
4.5	<i>HSPA Plus (Evolved High Speed Packet Access – 3.75G)</i>	44
4.6	<i>Κωδικοποίηση φωνής και AMR</i>	45
4.7	<i>LTE (Long Term Evolution – 3.95G)</i>	46
4.7.1	<i>Νέα ή τροποποιημένα στοιχεία LTE δικτύων</i>	47
4.7.2	<i>Διαδικασία σύνδεσης στα LTE δίκτυα με έναν σταθμό βάσης</i>	47
4.7.3	<i>Τεχνικές μετάδοσης δεδομένων των δικτύων LTE</i>	48
4.7.4	<i>Μετάδοση φωνής στα LTE δίκτυα και VoLTE (Voice over LTE)</i>	48
4.7.5	<i>Διάταξη μετάδοσης OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)</i>	48
4.8	<i>Επίλογος</i>	49
Κεφάλαιο 5: Δίκτυα τέταρτης γενιάς		50
5.1	<i>Εισαγωγή</i>	50
5.2	<i>Προδιαγραφές του προτύπου IMT Advanced</i>	50

5.3	<i>LTE Advanced (4G)</i>	51
5.4	<i>E-UTRA (Evolved UMTS Radio Terrestrial Access)</i>	51
5.4.1	eNodeB.....	52
5.5	<i>LTE Advanced Pro (4.5G)</i>	53
5.5.1	LLA (License Assisted Access).....	53
5.6	<i>Επίλογος</i>	54
Κεφάλαιο 6: Δίκτυα πέμπτης γενιάς		56
6.1	<i>Εισαγωγή</i>	56
6.3	<i>5G NR (New Radio)</i>	57
6.3.1	5G-SA (Stand-Alone) και 5G-NSA (Non Stand-Alone).....	58
6.3.2	Ζώνες συχνοτήτων λειτουργίας.....	58
6.4	<i>Τεχνολογίες δικτύων πέμπτης γενιάς</i>	60
6.4.1	Massive MIMO.....	60
6.4.2	Spatial filtering (Χωρικό φιλτράρισμα – Beamforming).....	61
6.4.3	DSS (Dynamic Spectrum Sharing).....	61
6.5	<i>Σταθερή ασύρματη 5G πρόσβαση (FWA – Fixed Wireless Access)</i>	62
6.6	<i>RedCap 5G (Reduced Capability 5G)</i>	62
6.7	<i>5G Advanced (5.5G)</i>	63
6.8	<i>Επίλογος</i>	64
Κεφάλαιο 7: Δίκτυα έκκτης γενιάς και μελλοντικές εξελίξεις		65
7.1	<i>Εισαγωγή</i>	65
7.2	<i>Πιθανοί στόχοι των δικτύων έκκτης γενιάς</i>	65
7.3	<i>Πιθανά χαρακτηριστικά και σενάρια χρήσης της έκκτης γενιάς</i>	65
7.4	<i>Επίλογος</i>	67
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα		68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		69

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Πρότυπο μοντέλο OSI	6
Σχήμα 2: Συνεστραμμένο ζεύγος χάλκινων καλωδίων	6
Σχήμα 3: Ομοαξονικό καλώδιο	7
Σχήμα 4: Οπτικές ίνες.....	7
Σχήμα 5:Επίγεια ραδιοζεύξη	7
Σχήμα 6: Μέθοδοι προσπέλασης καναλιού FDMA, CDMA και TDMA	9
Σχήμα 7: Μέθοδος προσπέλασης καναλιού OFDMA.....	10
Σχήμα 8: Μεταγωγή κυκλώματος έναντι μεταγωγής πακέτου.....	11
Σχήμα 9: Σχηματική αναπαράσταση των κυψελών και των συνδρομητών ανά κυψέλη.....	13
Σχήμα 10: Μακροκυψέλη (από σταθμό βάσης).....	13
Σχήμα 11: Μικροκυψέλη (από κεραίες micro)	14
Σχήμα 12:Pico cell.....	15
Σχήμα 13: Femto cell.....	16
Σχήμα 14: Σταθμοί βάσης κινητής τηλεφωνίας	16
Σχήμα 15: Οριζόντια τοποθέτηση και κάθετη τοποθέτηση	17
Σχήμα 16: Διαχωρισμός κεραιών (antenna diversity).....	18
Σχήμα 17: Οριζόντια τοποθέτηση έναντι κάθετης τοποθέτησης	18
Σχήμα 18: Base Station Controller.....	19
Σχήμα 19: Network Switching Subsystem	20
Σχήμα 20: Λογότυπο του GSM Association	23
Σχήμα 21: Γενική δομή ενός GSM δικτύου	23
Σχήμα 22: Βασική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας	26
Σχήμα 23: Μετάδοση δεδομένων μέσω της τεχνολογίας HSCSD.....	27
Σχήμα 24: Δομή πυρήνα ενός δικτύου που υποστηρίζει την υπηρεσία GPRS	29
Σχήμα 25: Σχηματική αναπαράσταση αποστολής SMS.....	32
Σχήμα 26: Σχηματική αναπαράσταση λήψης SMS.....	32
Σχήμα 27: Αρχιτεκτονική και διεπαφές υπηρεσίας MMS	34
Σχήμα 28: Δομή ενός UMTS δικτύου	37
Σχήμα 29: EUTRAN και Evolved Packet Core	38
Σχήμα 30: Διεπαφές υπηρεσίας HSUPA.....	44
Σχήμα 31: eNodeB	52
Σχήμα 32: Λογότυπο LTE Advanced Pro	53
Σχήμα 33: License Assisted Access	54
Σχήμα 34: Λογότυπο της 3GPP για το 5G	56
Σχήμα 35: Περιπτώσεις χρήσης του 5G	57
Σχήμα 36: Legacy κεραίες έναντι κεραιών massive MIMO	60
Σχήμα 37: Τοποθέτηση RedCap 5G μεταξύ των περιπτώσεων χρήσης των δικτύων 5G.....	63

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των QPSK και 16QAM.....	42
---	----

Συντομογραφίες

16-QAM	Quadrature Amplitude Modulation
3GPP	3 rd Generation Partnership Project
5G NR	5G New Radio
5G-NSA	5G Non Stand-Alone
5G-SA	5G Stand-Alone
ACM	Adaptive Coding and Modulation
AI	Artificial Intelligence
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AMR	Adaptive Multi-Rate
A-MSC	Anchor MSC
AR	Augmented Reality
ARQ	Automatic Repeat Request
AuC	Authentication Center
BER	Bit Error Rate
BRU	Baseband Receiver Unit
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station
CSD	Circuit Switched Data
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
DynaTAC	Dynamic Adaptive Total Area Coverage
E-DCH	Enhanced Dedicated Channel
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
eNodeB	E-UTRAN Node B
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved UMTS Radio Terrestrial Access NodeB
FCC	Federal Communications Commission
FCFS	First-Come First-Served
FDD	Frequency Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction

FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
FWA	Fixed Wireless Access
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GMSC	Gateway Mobile Switching Center
G-MSC	Gateway MSC
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
HARQ	Hybrid Automatic Repeat request
HDTV	High Definition TV
HLR	Home Location Register
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access)
HSPA Plus	Evolved High Speed Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IMT – 2000	International Mobile Telecommunications – 2000
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunication Union
IW-MSC	Interworking MSC
LAC	Location Area Code
LBT	Listen Before Talk
LLA	License Assisted Access
LSI	Large Scale Integration
LTE – FDD	Long Term Evolution – Frequency Division Duplexing
LTE – TDD	Long Term Evolution – Time Division Duplexing
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MBSFN	Multicast – Broadcast Single Frequency Network)
MIME	Multipurpose Internet Mail Extensions

MIMO	Multiple Input Multiple Output
ML	Machine Learning
MMS	Multimedia Messaging Service
MMSC	Multimedia Messaging Service Center
MOS	Metal-Oxide-Semiconductor
MSC	Mobile Switching Center
MSCS	Mobile Switching Center Server
MSISDN	Mobile Station International Subscriber Directory Number
MTA	MobilTelefonisystem A
MU-MIMO	Multiple User-MIMO
Nb – IoT	Narrowband – Internet of Things
NGN	Next Generation Network
NMT	Nordic Mobile Telephone
non-MBSFN	non-Multicast – Broadcast Single Frequency Network
NSS	Network Switching Subsystem
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMA	Open Mobile Alliance
OSI	Open Systems Interconnection
PCU	Packet Control Unit
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDP	Packet Data Protocol
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTT	Push To Talk
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
R-ALOHA	Reservation Aloha
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RedCap 5G	Reduced Capability 5G
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controllers
RNS	Radio Network Subsystem

RRC	Radio Resource Control
SGSN	Serving GPRS Support Node
SIM	Subscriber Identity Module
SIR	Signal-to-Interference Ratio
SMS	Short Message Service
SMSC	Short Message Service Center
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TD-SCDMA	Time-Division Synchronous Code-Division Multiple Access
T-MSC	Target MSC
TTI	Transmission Time Interval
UDR	Unified Data Registry
UDM	Unified Data Management
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URL	Uniform Resource Locator
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VLR	Visitor Location Register
V-MSC	Visited MSC
VoIP	Voice over IP
VoLTE	Voice over LTE
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
XR	eXtended Reality

Κεφάλαιο 1: Ιστορική αναδρομή

1.1 Εισαγωγή

Η δυνατότητα της επικοινωνίας μεταξύ απομακρυσμένων οντοτήτων είναι ένα μείζον θέμα, το οποίο απασχολούσε τους ανθρώπους πολύ έντονα ήδη από τις αρχές του εικοστού αιώνα. Καθώς η ενσύρματη επικοινωνία είχε καταστεί εφικτή αρκετά χρόνια πιο πριν, οι εταιρίες τηλεπικοινωνιών, καθώς και διάφοροι επιστήμονες, αναζητούσαν συνεχώς τρόπους να ξεπεραστεί το εμπόδιο της απόστασης μεταξύ των διαφόρων επικοινωνουσών οντοτήτων.

1.2 Εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών

Σύμφωνα με ενδοεταιρικά σημειώματα, η AT&T ήδη από το 1915 αναζητούσε τρόπους ανάπτυξης ενός ασύρματου τηλεφώνου. Ωστόσο, ένας από τους βασικούς λόγους για τον οποίο ένα τέτοιο εγχείρημα δεν μπορούσε να καταστεί άμεσα εφικτό, εκτός από τον προφανή λόγο ότι μία τέτοια τεχνολογία θεωρούνταν ασύλληπτη για εκείνη την εποχή, ήταν η σκέψη ότι η ανάπτυξη ενός συστήματος ασύρματης, κινητής επικοινωνίας θα μπορούσε να «κοντράρει» το σύστημα επίγειων, ενσύρματων επικοινωνιών της ίδιας εταιρίας.

Στα χρόνια που πέρασαν έως και τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο (αλλά και κατά τη διάρκειά του) έγιναν πολλές προσπάθειες ανάπτυξης ενός συστήματος ασύρματων επικοινωνιών. Η εμπειρία που συσσωρεύτηκε από τις πειραματικές μελέτες, αλλά και η καλύτερη κατανόηση των διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας των ασύρματων, κινητών δικτύων που επηρεάζουν την ανάπτυξή τους, είχαν αποτελέσει πολύ σημαντικά βήματα προς την προσπάθεια εγκαθίδρυσης διαφόρων τρόπων ασύρματης επικοινωνίας.

Το 1947, προτάθηκε από τα εργαστήρια Bell ένα σύστημα ασύρματης, κυψελωτής τηλεφωνίας. Για τη δόμησή του υιοθετήθηκε η χρήση κεραιών, μέσω των οποίων θα δημιουργούνταν μικρές «κυψέλες». Η φιλοσοφία λειτουργίας του ήταν η εξής: κάθε κεραία καλύπτει μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, ακαθόριστου σχήματος, η οποία ονομάζεται κυψέλη. Προκειμένου να επιτευχθεί συνεχής κάλυψη μεγάλης γεωγραφικής περιοχής, ώστε να μην υπάρχουν διακοπές στην επικοινωνία, έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ένα πλήθος κεραιών. Το σύνολο αυτών των κεραιών θα σχημάτιζε ένα σύνολο αλληλοκαλυπτόμενων κυψελών και θα «παρακολουθούνταν» ο κάθε χρήστης, κατά την κίνησή του, ώστε το δίκτυο να γνωρίζει από ποια κυψέλη θα εξυπηρετηθεί ανά πάσα χρονική στιγμή. Αυτή η αρχή λειτουργίας των σημερινών, κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας δεν έχει αλλάξει στο παραμικρό, όπως θα αναφερθεί σε επόμενες ενότητες.

Το 1956 παρουσιάστηκε στην Σουηδία το σύστημα **MTA (MobilTelefonisystem A)**. Ωστόσο, δύο κύριοι προβληματισμοί ήταν η ταυτόχρονη χρήση του ασύρματου δικτύου από πολλούς χρήστες (καθώς οι διαθέσιμοι πόροι ήταν περιορισμένοι) και η απρόσκοπτη επικοινωνία κατά τη μετακίνηση των χρηστών. Τα παραπάνω ζητήματα προσπάθησε να αντιμετωπίσει ο Amos Joel, εργαζόμενος των εργαστηρίων Bell και, μάλιστα, επιχείρησε να πατεντάρει τις ιδέες του. Ωστόσο, κατόπιν έρευνας που πραγματοποιήθηκε από ανεξάρτητη συμβουλευτική εταιρία, ο αριθμός των εν δυνάμει χρηστών κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως, υπολογίστηκε σε 200.000 περίπου, με αποτέλεσμα, προσωρινά, να εγκαταλειφθεί η ιδέα διάθεσης πόρων (χρηματοδότηση, ανθρώπινο δυναμικό) για την ανάπτυξη

δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Στην απόφαση αυτή συνέβαλε και το δυσθεώρητο κόστος ανάπτυξης των τηλεφωνικών κέντρων και των σταθμών βάσης.

Με το πέρασμα των χρόνων, αναπτύχθηκε η τεχνολογία των ενσωματωμένων κυκλωμάτων και, στα μέσα της δεκαετίας του 1970, εμφανίστηκαν τα πρώτα κυκλώματα MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) τεχνολογίας LSI (Large Scale Integration), όπου σε ένα και μόνο chip συγκεντρωνόντουσαν δεκάδες χιλιάδων transistors. Επιπλέον, αναπτύχθηκε περαιτέρω ο τομέας της Θεωρίας των Πληροφοριών, ο οποίος αναφέρεται στους τρόπους ποσοτικοποίησης, αποθήκευσης και επικοινωνίας των πληροφοριών, από μία μαθηματική σκοπιά. Παράλληλα, άρχισε να αναπτύσσεται και ο τομέας των ασύρματων, κυψελωτών δικτύων. Όλα αυτά συνέτειναν στην ολοένα και μεγαλύτερη ενασχόληση εταιριών τηλεπικοινωνιών και κατασκευαστών τηλεφώνων με την ανάπτυξη της ασύρματης επικοινωνίας.

1.3 Ανάπτυξη της πρώτης γενιάς κινητών επικοινωνιών

Στις 3 Απριλίου του 1973, ο Martin Cooper, μηχανικός της Motorola, περπατώντας στην 6η λεωφόρο της Νέας Υόρκης, πραγματοποίησε την πρώτη κλήση από ένα κινητό τηλέφωνο, του οποίου η λειτουργία βασιζόταν στην αναλογική, ασύρματη, κυψελωτή επικοινωνία. Στην άλλη πλευρά του ακουστικού, βρισκόταν ο Joel Engel, διευθυντής των εργαστηρίων Bell (τα οποία ανταγωνιζόντουσαν με την Motorola σχετικά με το ποιος θα το κατάφερνε πρώτος), στον οποίο ανέφερε: « Σε καλώ από ένα κυψελωτό τηλέφωνο. Από ένα αληθινό, κυψελωτό τηλέφωνο, ένα προσωπικό, φορητό κυψελωτό τηλέφωνο, που κρατάω στο χέρι». Φυσικά, το μέγεθος αυτού του «κινητού» τηλεφώνου ήταν όσο ένα τούβλο και ζύγισε 1,5 κιλό. Ωστόσο, η αρχή είχε ήδη γίνει.

Ακολούθησαν διαβουλεύσεις του Martin Cooper με την **FCC (Federal Communications Commission)**, τη ρυθμιστική αρχή των επικοινωνιών των Η.Π.Α, σχετικά με τον διαμοιρασμό των ραδιοκαναλιών του φάσματος συχνοτήτων λειτουργίας του δικτύου, καθώς για διάφορα άλλα θέματα.

Πρέπει να σημειωθεί, επίσης, ότι πειραματικά είχαν αναπτυχθεί ασύρματα, αναλογικά δίκτυα από τα εργαστήρια Bell στις περιοχές του Σικάγο και του Ντάλας στις Η.Π.Α ήδη από το 1978, αλλά εξυπηρετούσαν μόνον σκοπούς έρευνας και ανάπτυξης και δεν διατίθενταν εμπορικά, προς το παρόν.

Φυσικά, τα εύσημα για τη δημιουργία του πρώτου, εμπορικά διαθέσιμου, δικτύου ασύρματης, κυψελωτής τηλεφωνίας θα πρέπει να αποδοθούν στην ιαπωνική NTT DoCoMo, η οποία λανσάρισε το, πρώτης γενιάς, αναλογικό της δίκτυο στην μητροπολιτική περιοχή του Τόκιο, το 1979. Κατέστη, μάλιστα, ο πρώτος πάροχος, ο οποίος διέθεσε εμπορικά το δίκτυό του πανεθνικά.

Τον Οκτώβριο του 1983, ακολούθησε στις Η.Π.Α η έναρξη του πρώτου **AMPS (Advanced Mobile Phone System)** δικτύου για εμπορικούς σκοπούς, το οποίο ουσιαστικά είχε αναπτυχθεί από τα εργαστήρια Bell και η χρήση του αδειοδοτήθηκε στην AT&T από την FCC το 1982.

Παράλληλα, ένα αντίστοιχο δίκτυο ξεκίνησε να αναπτύσσεται από την Motorola στην περιοχή της Βαλτιμόρης από το καλοκαίρι του 1982 και έγινε εμπορικά διαθέσιμο προς τα τέλη του ίδιου έτους.

Ωστόσο, το πρώτο, πλήρως αυτοματοποιημένο κυψελωτό σύστημα αναλογικής κινητής τηλεφωνίας ήταν το **NMT (Nordic Mobile Telephone)** και παρουσιάστηκε ταυτόχρονα το 1981 στην Δανία, στην Νορβηγία, στην Σουηδία και στην Φινλανδία. Το κύριο χαρακτηριστικό του ήταν η διεθνής περιαγωγή (δηλαδή, η δυνατότητα εξυπηρέτησης χρηστών μεταξύ διαφορετικών χωρών). Αυτό υπήρξε, άλλωστε, και το όραμα του Σουηδού μηχανικού Östen Mäkitalo, ο οποίος θεωρείται ως ο «πατέρας» του NMT.

Το 1983, το πρώτο, εμπορικά διαθέσιμο, κινητό τηλέφωνο ήταν γεγονός. Το Motorola **DynaTAC**

(Dynamic Adaptive Total Area Coverage) είχε ύψος 23 εκατοστών, ζύγιζε 1.1 κιλά και κόστιζε \$3900.

1.4 Εξέλιξη της ψηφιακής κινητής τηλεφωνίας

Με την πάροδο των ετών και με την περαιτέρω εξέλιξη της τεχνολογίας MOSFET, μέσω της οποίας παρήχθησαν ολοκληρωμένα κυκλώματα πολύ μεγάλης κλίμακας (VLSI) ξεκίνησε η ανάπτυξη μίας δεύτερης γενιάς κυψελωτών δικτύων. Η βασική τους διαφορά, έναντι των αναλογικών δικτύων πρώτης γενιάς ήταν η ψηφιακή μετάδοση της φωνής, εν αντιθέσει με την αναλογική μετάδοσή της που πετύγγαναν τα ασύρματα, κυψελωτά δίκτυα πρώτης γενιάς. Επί της ουσίας, η ανάπτυξη της δεύτερης γενιάς της ασύρματης, κυψελωτής τηλεφωνίας εισήγαγε τα ασύρματα, κινητά δίκτυα στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων και κατέστησε εφικτές τις ποικίλες εφαρμογές που διατίθενται σήμερα στον τελικό χρήστη.

Όσον αφορά την Ευρώπη, η επιλεγόμενη τεχνολογία των κυψελωτών δικτύων δεύτερης γενιάς προήλθε από το **ETSI (European Telecommunications Standards Institute)** και ονομάστηκε **GSM (Global System for Mobile communications)**. Το πρώτο, εμπορικά διαθέσιμο, GSM δίκτυο διατέθηκε στην Φινλανδία από την Radiolinja, την 1^η Ιουλίου 1991.

Όσον αφορά την Ελλάδα, το πρώτο GSM δίκτυο ξεκίνησε τη λειτουργία του στις 29 Ιουνίου 1993, από την εταιρία Teletet (η οποία κατόπιν εξαγοράστηκε από την Wind και στη συνέχεια από την NOVA) [13]. Ακολούθησε 2 ημέρες αργότερα, η έναρξη λειτουργίας της εταιρίας Panafon (η οποία κατόπιν εξαγοράστηκε από την Vodafone) και τον Απρίλιο του 1999 ξεκίνησε η εμπορική λειτουργία της εταιρίας Cosmote. Τον Νοέμβριο του 2002, τέλος, ξεκίνησε τη λειτουργία της η εταιρία Q, η οποία εν συνεχεία εξαγοράστηκε από την εταιρία Wind και κατόπιν από την εταιρία NOVA και λειτουργεί ως εικονικός πάροχος υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας (MVNO – Mobile Virtual Network Operator). Ένας MVNO παρέχει υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας με τη χρήση των υποδομών ενός υπάρχοντος δικτύου κινητής τηλεφωνίας, καθώς δεν διαθέτει τις δικές του υποδομές.

Ωστόσο, η ολοένα αυξανόμενη χρήση και διεξόδυση των κινητών τηλεφώνων σε κάθε λογής χρήστες όλων των ηλικιών, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μίας τρίτης γενιάς (**3G**) ασύρματης, κυψελωτής τηλεφωνίας, υπό την οποία λειτουργούν διάφοροι τύποι δικτύων. Ο κύριος σκοπός ανάπτυξής της ήταν η προσφορά μεγαλύτερων ταχυτήτων ασύρματης πρόσβασης στο Διαδίκτυο και η καλύτερη ποιότητα μετάδοσης φωνής.

Το πρώτο παγκοσμίως διαθέσιμο δίκτυο τρίτης γενιάς κινητής τηλεφωνίας ανήκει στην NTT DoCoMo, ενώ στην Ευρώπη ο νορβηγικός πάροχος Telenor ξεκίνησε τη λειτουργία του πρώτου **UMTS (Universal Mobile Telephony System)** δικτύου το 2004. Όσον αφορά την Ελλάδα, εν όψει των Ολυμπιακών Αγώνων του 2004, ξεκίνησε τη λειτουργία του το UMTS δίκτυο της εταιρίας Cosmote και με πολύ μικρή χρονική διαφορά ακολούθησε το εμπορικό λανσάρισμα του UMTS δικτύου της εταιρίας Wind (νυν NOVA) και, κατόπιν, της εταιρίας Vodafone Greece.

Φυσικά, η περαιτέρω τεχνολογική εξέλιξη και οι αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών, έφεραν σταδιακά στο προσκήνιο μία τέταρτη γενιά δικτύων ασύρματης, κυψελωτής τηλεφωνίας. Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (**4G**) γενικά χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες πρόσβασης στο Διαδίκτυο, από χαμηλή καθυστέρηση – προκειμένου να υπάρχει μεγαλύτερη αποκρισιμότητα, από καλύτερη ποιότητα σήματος – λόγω των βελτιωμένων τεχνικών αποστολής και λήψης σήματος, από βελτιωμένη διαχείριση του ραδιοφάσματος και από βελτιωμένη χωρητικότητα. Ωστόσο, το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η all-IP αρχιτεκτονική τους, γεγονός που τα καθιστά αρκετά διαφορετικά, σε σύγκριση με τις

προηγούμενες γενιές δικτύων, όσον αφορά τη φιλοσοφία μετάδοσης τόσο της φωνής όσο και των δεδομένων.

Βέβαια, καθώς η οποιαδήποτε εξέλιξη ποτέ δεν είναι αρκετή, το 2016 εισήχθησαν τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (**5G**). Όσον αφορά τον χρήστη, το άμεσο πλεονέκτημα είναι οι υψηλότερες ταχύτητες πρόσβασης στο Διαδίκτυο που προσφέρουν, οι οποίες είναι της τάξης των Gbps (Gigabits Per Second - δισεκατομμυρίων bits ανά δευτερόλεπτο). Πρακτικά, όμως, η φιλοσοφία ανάπτυξής τους βασίστηκε στην ανάγκη σύνδεσης κάθε είδους συσκευής με δυνατότητα πρόσβασης στο Διαδίκτυο (βασικό κομμάτι της υποδομής του **IoT - Internet of Things**), στην ανάγκη βελτίωσης της χωρητικότητας των δικτύων σε περιοχές με πολύ υψηλή συγκέντρωση υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας και στη δυνατότητα χρήσης τους ως εναλλακτική λύση έναντι των παρόχων σταθερής τηλεφωνίας για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης στο Διαδίκτυο, τόσο στο σπίτι όσο και στην επιχείρηση. Στη χώρα μας και οι τρεις πάροχοι (Cosmote, Vodafone, NOVA) παρέχουν υπηρεσίες πέμπτης γενιάς[15][16][17].

Την χρονική στιγμή συγγραφής της παρούσας εργασίας, υπάρχουν ήδη υπό εξέλιξη σχέδια για την ανάπτυξη μίας έκτης γενιάς δικτύων κινητής τηλεφωνίας, τα οποία αναμένεται να ξεκινήσουν την εμπορική τους λειτουργία κατά τα τέλη του 2030. Η χρήση τους θα επεκταθεί πέραν των κλασικών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας, ώστε να υποστηρίξουν αποτελεσματικό διαμοιρασμό του ραδιοφάσματος και των υποδομών, υπηρεσίες τεχνητής νοημοσύνης, πανταχού παρούσες στιγμιαίες επικοινωνίες και φυσικά ακόμη υψηλότερες ταχύτητες πρόσβασης στο Διαδίκτυο.

1.5 Επίλογος

Με την πάροδο των ετών, υπήρξαν ταχύτερες εξελίξεις αναφορικά με την τεχνολογία της ασύρματης κυψελωτής τηλεφωνίας. Τις τελευταίες δεκαετίες δε, η ανάπτυξη αυτή είναι ραγδαία και εξαιρετικά συναρπαστική. Στις επόμενες ενότητες θα πραγματοποιηθεί ανάλυση των βασικών αρχών λειτουργίας όλων των γενεών των δικτύων κινητής τηλεφωνίας με έναν εύληπτο τρόπο, ώστε να γίνουν απόλυτα κατανοητές οι βελτιώσεις που έχουν επιφέρει ορισμένες αλλαγές στον τρόπο λειτουργίας τους και στη δόμησή τους.

Κεφάλαιο 2: Βασικές αρχές λειτουργίας δικτύων κινητής τηλεφωνίας

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα επιχειρηθεί μία βασική επεξήγηση διαφόρων ορολογιών και τεχνολογιών, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε όλους τους τύπους δικτύων (ενσύρματα και ασύρματα).

2.2 Βασικές γνώσεις ασύρματων επικοινωνιών

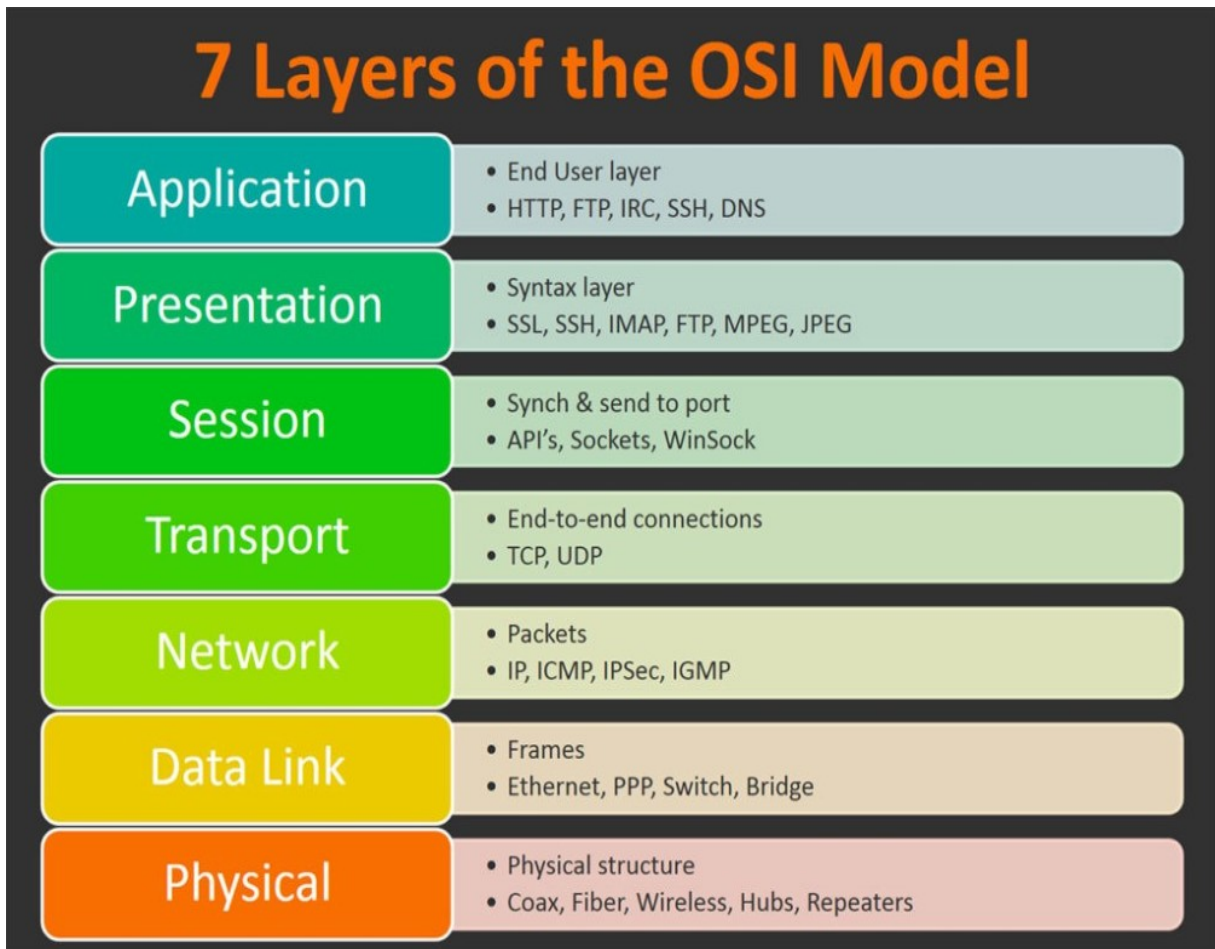
2.2.1 Πρότυπο μοντέλο OSI

Δεδομένης της μεγάλης πολυπλοκότητας των δικτύων και προκειμένου να μελετηθεί με πιο απλό και κατανοητό τρόπο η δομή τους, έχει θεσπιστεί από την επιτροπή **ISO (International Organization for Standardization)** ένα πρότυπο μοντέλο οργάνωσης των διαφόρων τύπων δικτύων σε επίπεδα. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, που ονομάζεται **OSI (Open Systems Interconnection)**, ένα δίκτυο μπορεί να χωριστεί σε επτά επίπεδα, τα οποία είναι τα εξής: **Φυσικό επίπεδο** (πρώτο), **επίπεδο ζεύξης δεδομένων** (δεύτερο), **επίπεδο δικτύου** (τρίτο), **επίπεδο μεταφοράς** (τέταρτο), **επίπεδο συνόδου** (πέμπτο), **επίπεδο παρουσίασης** (έκτο) και **επίπεδο εφαρμογής** (έβδομο). Σε κάθε ένα εξ' αυτών των επιπέδων (εξαιρουμένου του πρώτου) εκτελούνται διάφορα πρωτόκολλα, τα οποία ορίζουν κανόνες επικοινωνίας μεταξύ των επιπέδων.

Ως πρωτόκολλο ορίζεται *«ένα σύνολο κανόνων επικοινωνίας μεταξύ δύο ή περισσότερων επικοινωνουσών οντοτήτων, που ορίζει τη μορφή των ανταλλασσόμενων μηνυμάτων, καθώς και τη σειρά τους»*.

Στο παρόν πόνημα, θα υπάρξει αναφορά όπου χρειάζεται σε πρωτόκολλα του φυσικού επιπέδου, του επιπέδου ζεύξης δεδομένων και του επιπέδου δικτύου, κατά κύριο λόγο. Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό πως κάθε δικτυακό επίπεδο παρέχει ένα σύνολο υπηρεσιών, βασιζόμενο στο επίπεδο που υπάρχει ακριβώς από κάτω του. Επίσης, το πιο κοντινό επίπεδο σε έναν απλό χρήστη είναι το επίπεδο εφαρμογής.

Έτσι, για παράδειγμα, μία παρεχόμενη προς τον χρήστη υπηρεσία βρίσκεται πάντα στο επίπεδο εφαρμογής (7), το οποίο χρησιμοποιεί το επίπεδο παρουσίασης (6) για τον μετασχηματισμό των μεταδιδόμενων προς τον χρήστη δεδομένων, σε μία μορφή που να είναι κατάλληλη για την εν λόγω εφαρμογή. Το επίπεδο παρουσίασης με τη σειρά του χρησιμοποιεί υπηρεσίες του επιπέδου συνόδου (5), προκειμένου να εκκινήσει τη σύνδεση του χρήστη με μία απομακρυσμένη εφαρμογή, ώστε μέσω αυτής της σύνδεσης να παρουσιαστούν τα δεδομένα της εφαρμογής στον χρήστη μέσω του επιπέδου παρουσίασης και κατόπιν τερματίζει αυτήν τη σύνδεση. Τα δεδομένα του χρήστη στα σύγχρονα δίκτυα, όπως είναι το **Διαδίκτυο (Internet)**, διακινούνται υπό τη μορφή πακέτων. Τα πακέτα αποτελούν ομάδες δεδομένων και η μορφή τους καθορίζεται από το επίπεδο μεταφοράς (4), το οποίο βρίσκεται κάτω από το επίπεδο συνόδου. Το επίπεδο μεταφοράς παραδίδει τα πακέτα στο επίπεδο δικτύου (3), το οποίο καθορίζει διάφορους τρόπους δρομολόγησής τους μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη. Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (2), που βρίσκεται κάτω από το επίπεδο δικτύου, αναλαμβάνει την αποστολή και λήψη των bits των μεταδιδόμενων μηνυμάτων μέσω ενός μέσου μετάδοσης, το οποίο μπορεί να είναι ενσύρματο ή ασύρματο (όπως είναι τα παραδοσιακά τηλεφωνικά καλώδια ή οι ραδιοσυχνότητες των δικτύων κινητής τηλεφωνίας). Τα μέσα μετάδοσης καθορίζονται στο φυσικό επίπεδο (1).



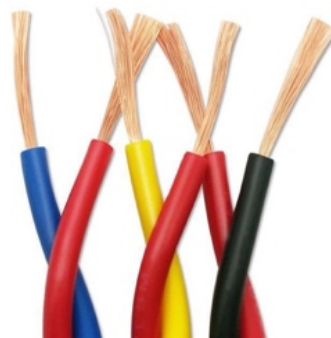
Σχήμα 1: Πρότυπο μοντέλο OSI

2.2.2 Μέσα μετάδοσης

Για την επικοινωνία μεταξύ δύο ή και περισσότερων τερματικών συσκευών μέσω ενός οποιουδήποτε δικτύου, απαιτείται ένα μέσο μετάδοσης.

Τα μέσα μετάδοσης διακρίνονται σε **ενσύρματα** και σε **ασύρματα**.

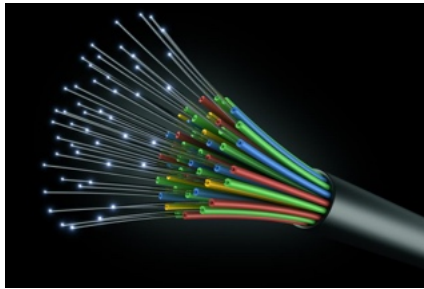
Στα ενσύρματα μέσα μετάδοσης περιλαμβάνονται το συνεστραμμένο χάλκινο ζεύγος καλωδίων, το ομοαξονικό καλώδιο και η οπτική ίνα.



Σχήμα 2: Συνεστραμμένο ζεύγος χάλκινων καλωδίων

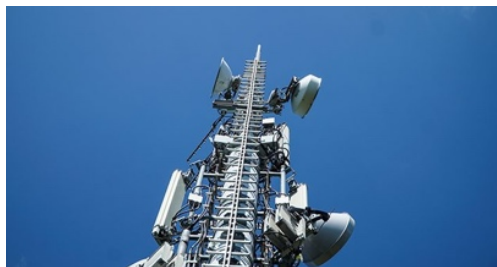


Σχήμα 3: Ομοαξονικό καλώδιο



Σχήμα 4: Οπτικές ίνες

Στα ασύρματα μέσα μετάδοσης περιλαμβάνονται οι επίγειες και οι δορυφορικές ζεύξεις.



Σχήμα 5: Επίγεια ραδιοζεύξη

Περαιτέρω, τόσο τα ενσύρματα όσο και τα ασύρματα μέσα μετάδοσης διαιρούνται σε 2 υποκατηγορίες: στα **οδηγούμενα μέσα (guided media)** και στα **μη οδηγούμενα μέσα (unguided media)**.

Στα οδηγούμενα μέσα μετάδοσης ένα σήμα ταξιδεύει κατά μήκος ενός στερεού φυσικού μέσου μετάδοσης και σε αυτά ανήκουν το συνεστραμμένο χάλκινο ζεύγος καλωδίων, το ομοαξονικό καλώδιο και η οπτική ίνα ενώ στα μη οδηγούμενα μέσα μετάδοσης ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα ταξιδεύει διαμέσου του αέρα και σε αυτά ανήκουν το επίγειο και το δορυφορικό ραδιοφάσμα.

Στα ψηφιακά κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, χρησιμοποιείται ένα σύνολο επίγειων ραδιοσυχνοτήτων για την επικοινωνία τόσο των κεραιών κινητής τηλεφωνίας με τις τερματικές συσκευές όσο και των συστατικών μερών των δικτύων (υπό προϋποθέσεις).

2.2.3 Φάσμα συχνοτήτων λειτουργίας

Το φάσμα συχνοτήτων αποτελεί εθνικό πόρο της εκάστοτε χώρας, εκχωρείται για ορισμένο χρονικό διάστημα σε όσους παρόχους εκδηλώσουν ενδιαφέρον έναντι ενός συγκεκριμένου χρηματικού αντιτίμου και είναι πεπερασμένο. Συνεπώς, είναι αναγκαία η όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερη αξιοποίηση και επαναχρησιμοποίησή του.

Στην Ελλάδα αρχικά, ανατέθηκαν τμήματα του φάσματος συχνοτήτων των 900 MHz στις εταιρίες Telestet και Panafon. Αργότερα, ανατέθηκε ένα τμήμα του φάσματος συχνοτήτων των 1800 MHz στην εταιρία Cosmote. Ταυτόχρονα, ανατέθηκε και ένα ακόμη τμήμα της ζώνης συχνοτήτων των 1800 MHz στις εταιρίες Telestet και Panafon. Μεταγενέστερα, ακόμη ένα τμήμα στη ζώνη συχνοτήτων των 1800 MHz ανατέθηκε στην εταιρία Q-Telecom και κατόπιν της εξαγοράς της από την εταιρία Wind (πρώην Telestet) αυτό το τμήμα συχνοτήτων ενσωματώθηκε στο ήδη υπάρχον φάσμα συχνοτήτων της εταιρίας Wind.

Με την έλευση των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς (3G) δημοπρατήθηκαν τμήματα του φάσματος συχνοτήτων στην περιοχή των 2100 MHz στους 3 παρόχους κινητής τηλεφωνίας (Cosmote, Vodafone Greece και Wind).

Κατόπιν, με την έναρξη των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς (4G) δημοπρατήθηκαν τμήματα του διαθέσιμου φάσματος στις ζώνες συχνοτήτων των 800 MHz και των 2600 MHz.

Πιο πρόσφατα, προ της έλευσης των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς (5G) δημοπρατήθηκαν τμήματα του διαθέσιμου φάσματος στις ζώνες συχνοτήτων των 700 MHz, των 3400 - 3800 MHz και των 26 GHz.

2.2.4 Περιαγωγή τερματικών συσκευών

Οι συσκευές των δικτύων κινητής τηλεφωνίας (κινητά τηλέφωνα, ασύρματα modems - routers κ.λ.π), μετακινούνται συνεχώς. Συνεπώς, γίνεται πολύ συχνά μετάβαση μεταξύ διαφορετικών περιοχών κάλυψης από τις κεραιές κινητής τηλεφωνίας, οι οποίες ονομάζονται κυψέλες ή κελιά. Ως εκ τούτου, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πρέπει να περιλαμβάνουν μηχανισμούς, οι οποίοι θα παρακολουθούν την κίνηση των τερματικών συσκευών και θα αποφασίζουν για τη μετάβαση των χρηστών μεταξύ των κελιών, εκκινώντας τις απαιτούμενες διαδικασίες και εξασφαλίζοντας ότι η μετάβαση (handover) θα είναι ομαλή χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας, στο μέτρο του δυνατού.

2.2.5 Μέθοδοι προσπέλασης καναλιού

Όταν πρόκειται να γίνει διαμοιρασμός ενός μέσου μετάδοσης δεδομένων μεταξύ πολλών χρηστών (όπως είναι το ραδιοφάσμα που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων και φωνής στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας), απαιτείται ένας τρόπος ελέγχου της προσπέλασης του μέσου μετάδοσης από διαφορετικές συσκευές.

Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς GSM χρησιμοποιούν την τεχνική **TDMA (Time Division Multiple Access)** για τη διεκπεραίωση των φωνητικών κλήσεων και της διακίνησης δεδομένων και την τεχνική **FDMA (Frequency Division Multiple Access)** για τον διαχωρισμό των κελιών μεταξύ τους.

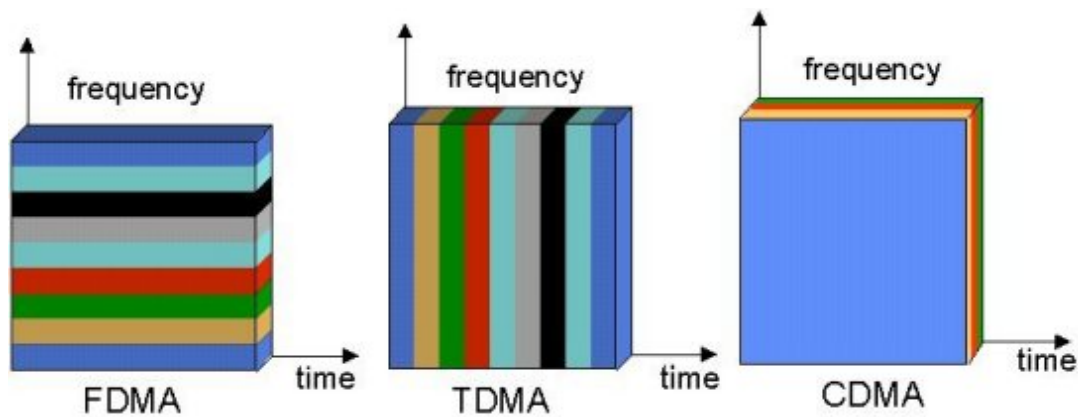
Με την τεχνική TDMA, το εύρος ζώνης (ή αλλιώς, η χωρητικότητα μεταφοράς πληροφοριών) του μέσου μετάδοσης διαιρείται σε χρονικά πλαίσια και κάθε χρονικό πλαίσιο διαιρείται σε χρονοθυρίδες. Κάθε συσκευή καταλαμβάνει μία χρονοθυρίδα ανά πλαίσιο για τη μετάδοση δεδομένων. Συνεπώς, κάθε συσκευή μεταδίδει δεδομένα σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, με έναν συγκεκριμένο ρυθμό.

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς UMTS χρησιμοποιούν την τεχνική **W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access)**.

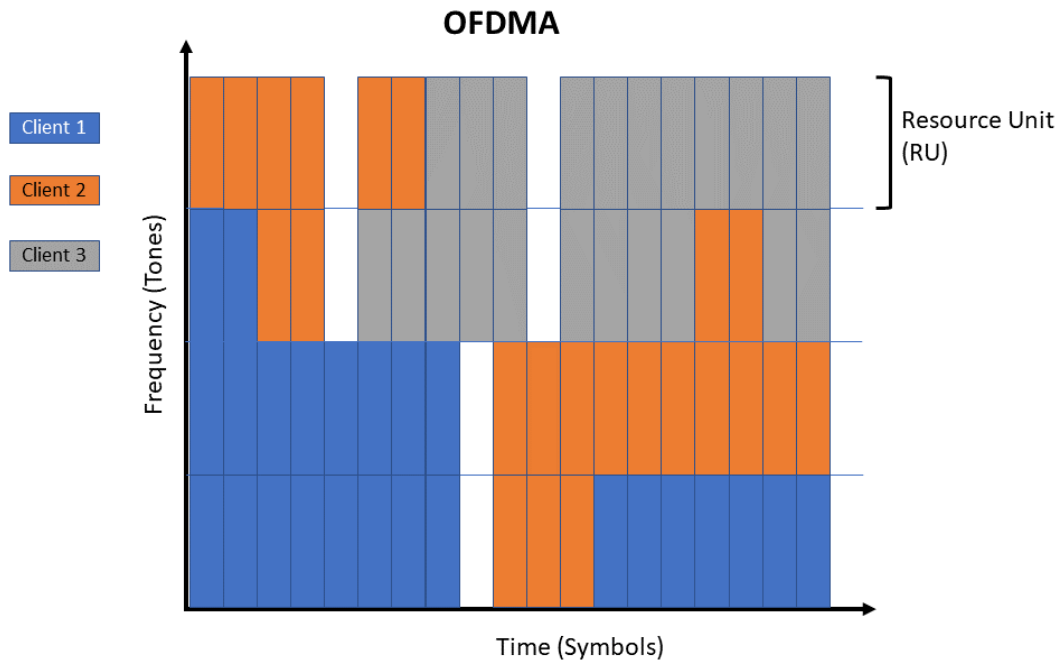
Με την τεχνική W-CDMA, όλο το φάσμα συχνοτήτων διατίθεται προς χρήση σε όλους και κάθε χρήστης χρησιμοποιεί έναν διαφορετικό κώδικα για τη διαμόρφωση του σήματός του. Κατά τη διαδικασία διαμόρφωσης, η πληροφορία μετατρέπεται σε αναλογική ή σε ψηφιακή κυματομορφή, κατάλληλη για μετάδοση.

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς LTE (Long Term Evolution), τα δίκτυα τέταρτης γενιάς 4G και τα δίκτυα πέμπτης γενιάς 5G-NR χρησιμοποιούν την τεχνική **OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)** [31].

Με την τεχνική OFDMA, τα προς αποστολή δεδομένα διαιρούνται σε πολλαπλά ρεύματα και κάθε συχνότητα διαιρείται σε ένα πλήθος υπο-συχνοτήτων. Συνεπώς, επιτρέπεται η εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών την ίδια χρονική στιγμή.



Σχήμα 6: Μέθοδοι προσπέλασης καναλιού FDMA, CDMA και TDMA



Σχήμα 7: Μέθοδος προσπέλασης καναλιού OFDMA

2.2.6 Δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος και δίκτυα μεταγωγής πακέτου

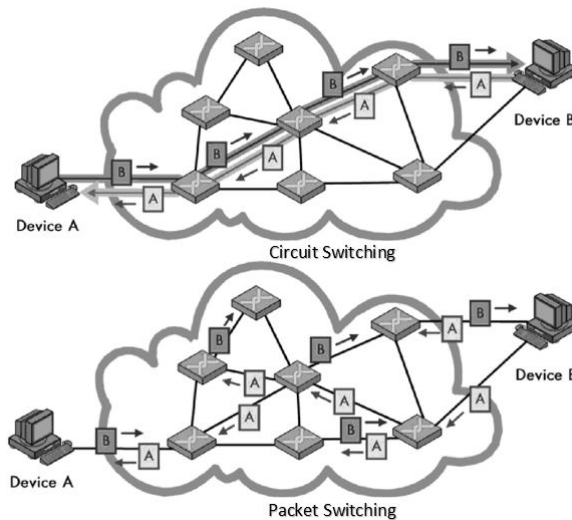
Στις τηλεπικοινωνίες παρέχονται δύο τύποι δικτύου: τα δίκτυα μεταγωγής πακέτου και τα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος. Αμφότεροι οι τύποι δικτύου εξυπηρετούν τη μετάδοση της πληροφορίας από έναν πομπό προς έναν δέκτη. Ωστόσο, διαφέρουν ως προς την τεχνική επίτευξης αυτού του σκοπού.

Στα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος, πριν από την έναρξη της επικοινωνίας μεταξύ δύο τερματικών συσκευών απαιτείται η αποκατάσταση μίας αποκλειστικής σύνδεσης, που είναι γνωστή ως κύκλωμα. Αυτό το κύκλωμα δεσμεύεται καθ' όλη τη διάρκεια επικοινωνίας και παραμένει ενεργό εξυπηρετώντας αποκλειστικά αυτές τις δύο τερματικές συσκευές.

Στα δίκτυα μεταγωγής πακέτου δεν δεσμεύεται κατ' αποκλειστικότητα μια γραμμή επικοινωνίας. Αντιθέτως, τα μεταδιδόμενα δεδομένα διασπώνται σε μικρότερα τμήματα, τα οποία ονομάζονται πακέτα. Κάθε πακέτο ταξιδεύει ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα έως ότου φτάσει στον προορισμό του, ακολουθώντας πολύ συχνά διαφορετικές διαδρομές.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των δικτύων μεταγωγής κυκλώματος είναι η δέσμευση ενός καναλιού επικοινωνίας, ακόμη και στην περίπτωση όπου δεν πραγματοποιείται κίνηση δεδομένων μέσω αυτού. Έτσι, στη σημερινή εποχή προτιμώνται τα δίκτυα μεταγωγής πακέτου, καθώς είθισται να γίνεται πιο αποτελεσματική χρήση του μέσου μετάδοσης, η οποία οδηγεί στην αποδοτικότερη λειτουργία του.

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς βασίζονται στη μεταγωγή κυκλώματος για τη διακίνηση των δεδομένων και της φωνής, τα δίκτυα τρίτης γενιάς βασίζονται στη μεταγωγή κυκλώματος για τη διεκπεραίωση των φωνητικών κλήσεων και στη μεταγωγή πακέτου για τη διακίνηση των δεδομένων, ενώ τα δίκτυα τέταρτης και πέμπτης γενιάς (και πιθανώς και τα ακόμη νεότερα δίκτυα που θα προκύψουν μελλοντικά) βασίζονται στη λειτουργία τους στη μεταγωγή πακέτου.



Σχήμα 8: Μεταγωγή κυκλώματος έναντι μεταγωγής πακέτου

2.2.7 RAT (Radio Access Technology)

Ως τεχνολογία πρόσβασης ραδιοδικτύου (Radio Access Technology - RAT) ορίζεται η υποκείμενη μέθοδος φυσικής σύνδεσης ενός ραδιοδικτύου. Μεταξύ άλλων, παραδείγματα RAT είναι οι εξής τεχνολογίες:

- Bluetooth (όπου η εμβέλεια σύνδεσης περιορίζεται στα 10 μέτρα το πολύ, σε ανοιχτούς χώρους και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μικροσκοπικών ασύρματων δικτύων - piconets).
- Wi-Fi (όπου η εμβέλεια σύνδεσης περιορίζεται σε έως μερικές δεκάδες μέτρα το πολύ, τόσο σε ανοιχτούς όσο και σε εσωτερικούς χώρους και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ασύρματων δικτύων μέσης εμβέλειας).
- GSM, UMTS, 4G, 5G NR (όπου η εμβέλεια σύνδεσης περιορίζεται σε έως μερικές δεκάδες μέτρα έως μερικές δεκάδες χιλιόμετρα, αναλόγως του τύπου κεραιών και της διάταξής τους και χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ασύρματων δικτύων ευρείας περιοχής).

Οι τερματικές συσκευές, όπως είναι τα έξυπνα τηλέφωνα, μπορούν να υλοποιούν αρκετές RAT ταυτόχρονα (όπως για παράδειγμα όλες τις προαναφερθείσες RAT). Μεταξύ ορισμένων RAT, μάλιστα, είναι εφικτή η ενδομετάβαση (**inter-RAT handover**). Αυτή η μετάβαση μπορεί να πραγματοποιείται, για παράδειγμα, μεταξύ των διαφόρων τύπων δικτύων κινητής τηλεφωνίας ή ακόμη και μεταξύ ενός τύπου δικτύου κινητής τηλεφωνίας και μίας άλλης RAT (για παράδειγμα, όταν είναι οριακή η κάλυψη ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας μπορεί να γίνεται μετάβαση σε ένα δίκτυο Wi-Fi για να εξασφαλιστεί η συνέχιση της επικοινωνίας).

2.2.8 RAN (Radio Access Network)

Ως δίκτυο ραδιοπρόσβασης (ή απλά, ραδιοδίκτυο - **Radio Access Network - RAN**) ορίζεται ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, το οποίο υλοποιεί μία τεχνολογία πρόσβασης ραδιοδικτύου (RAT).

Ουσιαστικά, το RAN είναι ο «μεσάζων» μεταξύ των τερματικών συσκευών και του πυρήνα του δικτύου και, στα ασύρματα δίκτυα, ισοδυναμεί με τις κεραιοδιατάξεις που επιτρέπουν την επικοινωνία των τερματικών συσκευών με το δίκτυο αυτό καθ' εαυτό, καθώς και με τις φυσικούς και λογικούς τρόπους σύνδεσης των κεραιοδιατάξεων και του εξοπλισμού τους με τον πυρήνα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Ορισμένοι τύποι RAN στην κυψελοειδή τηλεφωνία είναι οι εξής:

- **GRAN (GSM Radio Access Network** - αφορά τα δίκτυα δεύτερης γενιάς κινητής τηλεφωνίας).
- **GERAN (GSM EDGE Radio Access Network** - αφορά τα δίκτυα δεύτερης γενιάς κινητής τηλεφωνίας και προσθέτει υποστήριξη για την υλοποίηση του πρωτοκόλλου EDGE).
- **UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network** - αφορά τα δίκτυα τρίτης γενιάς).
- **E-UTRA (Evolved Universal Radio Access** - αφορά τα εξελιγμένα δίκτυα τρίτης γενιάς).

2.3 Τρόποι λειτουργίας και ορολογία κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας

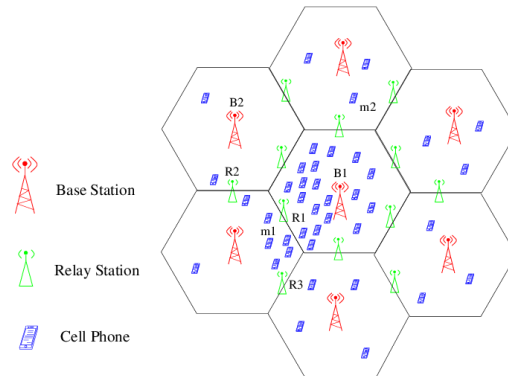
Όλα τα κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας χαρακτηρίζονται από ορισμένες βασικές αρχές σχεδίασης και λειτουργίας.

Αρχικά, η λειτουργία ενός κυψελωτού δικτύου κινητής τηλεφωνίας εξαρτάται από ένα σύνολο κεραιών, οι οποίες τοποθετούνται επάνω σε έναν σταθμό βάσης. Οι σταθμοί βάσης είναι ψηλές κατασκευές συνήθως, οι οποίες τοποθετούνται σε κτίρια ή σε διάφορα σημεία του εδάφους με μεγάλο υψόμετρο και χρησιμοποιούνται για τη φιλοξενία των κεραιών, καθώς και του εξοπλισμού λειτουργίας τους. Κάθε κεραία εξυπηρετεί μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Σε ένα κυψελωτό σύστημα τηλεφωνίας, μία γεωγραφική περιοχή διαιρείται σε «κυψέλες» ή «κελιά». Στα GSM δίκτυα, κάθε κυψέλη εξυπηρετείται από μία κεραία. Ο τρόπος διαίρεσης μίας περιοχής σε κυψέλες εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, με κυριότερους εξ' αυτών τη δόμηση της περιοχής, τη μορφολογία της, το αναμενόμενο πλήθος των συνδρομητών αλλά και τις παρεχόμενες υπηρεσίες που επιθυμεί να προσφέρει ο πάροχος ανά κυψέλη.

Ο όρος «κυψέλη» προέκυψε με το σκεπτικό πως είναι βολικότερο να θεωρείται ότι μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή έχει εξαγωνικό σχήμα. Παρ' όλα αυτά, το «σχήμα» της εκάστοτε κυψέλης δεν είναι σε καμία περίπτωση εξαγωνικό. Σε κάθε κυψέλη ανατίθενται από τον πάροχο μία ή περισσότερες συχνότητες του ενοικιαζόμενου ραδιοφάσματος για την εξυπηρέτηση των συνδρομητών. Οι κυψέλες αλληλεπικαλύπτονται, προκειμένου να υπάρξει συνεχής κάλυψη δικτύου, όπου είναι εφικτό αυτό. Γειτονικές κυψέλες δεν δύναται να εξυπηρετούνται από την ίδια συχνότητα, προκειμένου να μην υφίστανται παρεμβολές που θα καθιστούν προβληματική την παροχή των υπηρεσιών. Συνεπώς, οι ίδιες συχνότητες μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, αρκεί να μην ανατίθενται σε αλληλεπικαλυπτόμενες κυψέλες.

Τα μεγέθη των κυψελών (ή απλά, η εμβέλειά τους) ποικίλουν από μερικές δεκάδες μέτρα έως και αρκετά δεκάδες χιλιόμετρα και καθορίζονται κατά κύριο λόγο από το είδος των παρεχόμενων υπηρεσιών και της κάλυψης που επιθυμεί να προσφέρει ο πάροχος. Για την κάλυψη αυτών των διαφορετικών αναγκών χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι κεραιών, οι οποίοι συλλειτουργούν σε ποικίλες διαμορφώσεις. Επίσης, πολλές φορές η εμβέλεια μίας κεραίας ενδέχεται να περιορίζεται τεχνητά από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο, για λόγους διατήρησης μίας καλής ποιότητας ως προς την απόδοση των παρεχόμενων υπηρεσιών. Εντός της εκάστοτε κυψέλης βρίσκεται ένας συγκεκριμένος αριθμός συνδρομητών, ο οποίος δύναται να εξυπηρετείται ανά χρονική στιγμή. Προφανώς, το πλήθος

των συνδρομητών ανά κυψέλη ανά πάσα χρονική στιγμή δεν είναι σταθερό, λόγω της μετακίνησης των συνδρομητών.



Σχήμα 9: Σχηματική αναπαράσταση των κυψελών και των συνδρομητών ανά κυψέλη

2.3.1 Μακροκυψέλες (Macro cells)

Ως μακροκυψέλες ορίζονται οι κυψέλες που δημιουργούνται με τη χρήση κεραιών, οι οποίες είναι τοποθετημένες σε ψηλά σημεία (σε πολύ υψηλούς ιστούς ή πάνω σε ψηλά κτίρια), έχουν εμβέλεια αρκετών χιλιομέτρων και η ισχύς εξόδου των κεραιών είναι της τάξης των μερικών δεκάδων Watts. Οι μακροκυψέλες χρησιμοποιούνται κυρίως για την ευρεία κάλυψη αγροτικών, θαλάσσιων ή απομακρυσμένων περιοχών. Το ύψος των σταθμών βάσης, στους οποίους τοποθετούνται οι κεραίες, τους δίνουν τη δυνατότητα υπέρβασης των φυσικών ή τεχνητών εμποδίων.



Σχήμα 10: Μακροκυψέλη (από σταθμό βάσης)

2.3.2 Μικροκυψέλες (Micro cells)

Ως μικροκυψέλες ορίζονται οι κυψέλες που δημιουργούνται από κεραιές για την κάλυψη μικρών περιοχών, οι οποίες είναι είτε δύσκολες από πλευράς κάλυψης των μακροκυψελών (όπως είναι οι υπόγειοι χώροι) ή βρίσκονται σε περιοχές με πολύ υψηλή δικτυακή κίνηση, οπότε είναι αναγκαία η προσθήκη τους για τοπική αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Συνήθως, έχουν εμβέλεια μερικών εκατοντάδων μέτρων. Οι κεραιές που σχηματίζουν τις μικροκυψέλες τοποθετούνται συνήθως σε προσόψεις κτιρίων για την τοπική κάλυψη εσωτερικών χώρων ή οδών σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές με πολύ ψηλά κτίρια. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια σημαντικών γεγονότων όπου αναμένεται μεγάλη αύξηση του πλήθους των συνδρομητών τοπικά (αθλητικοί αγώνες, συναυλίες, ομιλίες κ.ά) και προκειμένου να συνεχιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου, μικροκυψέλες δημιουργούνται και με τη χρήση κεραιών οι οποίες τοποθετούνται εντός υπηρεσιακών οχημάτων των παρόχων κινητής τηλεφωνίας, για την προσωρινή κάλυψη αυτών των γεγονότων. Λειτουργούν συμπληρωματικά με τις μακροκυψέλες, ενισχύοντας τοπικά την ποιότητα κάλυψης και τη χωρητικότητα του δικτύου. Η ισχύς εκπομπής τους περιορίζεται με τεχνητό τρόπο, ώστε να μη δημιουργούνται παρεμβολές με τις ήδη υπάρχουσες μακροκυψέλες. Η χωρητικότητα του δικτύου αυξάνεται τοπικά, καθώς με την αύξηση του πλήθους των κυψελών, μειώνεται το πλήθος των εξυπηρετούμενων συνδρομητών ανά κυψέλη. Κατά συνέπεια, μπορούν είτε να εξυπηρετηθούν περισσότεροι συνδρομητές ή οι υπάρχοντες συνδρομητές να λάβουν υψηλότερη ποιότητα υπηρεσιών.



Σχήμα 11: Μικροκυψέλη (από κεραιές micro)

2.3.3 Picocells

Τα picocells εξυπηρετούν τον ίδιο σκοπό με τα microcells, με τη διαφορά πως η εμβέλειά τους ορίζεται σε μερικές δεκάδες μέτρα. Οι διαστάσεις των κεραιών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία picocells δεν υπερβαίνουν αυτές μίας κόλλας Α4. Η σύνδεσή τους με τον κορμό του δικτύου πραγματοποιείται με καλώδιο Ethernet. Πολλές φορές, συνδέονται με το δίκτυο κορμού του τηλεπικοινωνιακού παρόχου, μέσω ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) ή VDSL (Very-high-bitrate Digital Subscriber Line) δικτύων, εφόσον υπάρχει διαθέσιμη υποδομή. Έναν τέτοιο τρόπο διασύνδεσης επιλέγουν και οι Ελληνικοί τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι, οι οποίοι διασυνδέουν τις κεραιές αυτές με τα κατά τόπους δικά τους DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer), μέσω των οποίων παρέχουν ήδη τις ADSL ή VDSL υπηρεσίες σταθερής τηλεφωνίας ή ακόμη και με τα ιδιωτικά τους δίκτυα οπτικών ινών μέσω των οποίων παρέχουν υπηρεσίες FTTH (Fiber To The Home) ή FTTB (Fiber To The Business) . Με τον τρόπο αυτό, δεν απαιτείται η ανάπτυξη ξεχωριστής δικτυακής υποδομής ή η μίσθωση δικτύων οπτικών ινών τρίτων παρόχων, οι οποίες είναι πιο κοστοβόρες λύσεις.



Σχήμα 12: Picocell

2.3.4 Femtocells

Τα femtocells χρησιμοποιούνται για την κάλυψη πολύ μικρών εσωτερικών χώρων, όπως είναι τα μικρά γραφεία και οι οικίες. Δημιουργούνται από συσκευές οι οποίες ομοιάζουν με τους δρομολογητές των παρόχων σταθερής τηλεφωνίας και συνδέονται μέσω καλωδίου Ethernet με αυτούς (εφόσον ένα γραφείο ή μία οικία διαθέτει ευρυζωνική υπηρεσία παροχής Internet, όπως ADSL ή VDSL). Τυπικά, υποστηρίζουν από 4 έως και 8 ταυτόχρονους χρήστες και ο σκοπός τους είναι η βελτίωση της κάλυψης του δικτύου κινητής τηλεφωνίας σε χώρους όπου δεν υπάρχει σήμα κινητής τηλεφωνίας. Κατόπιν της απόκτησης ενός femtocell από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο, απαιτείται η δήλωση των τηλεφωνικών αριθμών, οι οποίοι θα εξυπηρετούνται από αυτό. Πέραν της παροχής άριστης κάλυψης, ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η βελτίωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας των τερματικών συσκευών, καθώς όταν μία τερματική συσκευή βρίσκεται εντός πολύ περιορισμένης κάλυψης αυξάνει την ισχύ του πομποδέκτη της, σε μια προσπάθεια διατήρησης της σύνδεσης με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, ενώ ακόμη χειρότερη είναι η μη παροχή δικτυακής κάλυψης, με αποτέλεσμα η τερματική συσκευή να αναζητά συνεχώς τρόπο σύνδεσης με το δίκτυο.



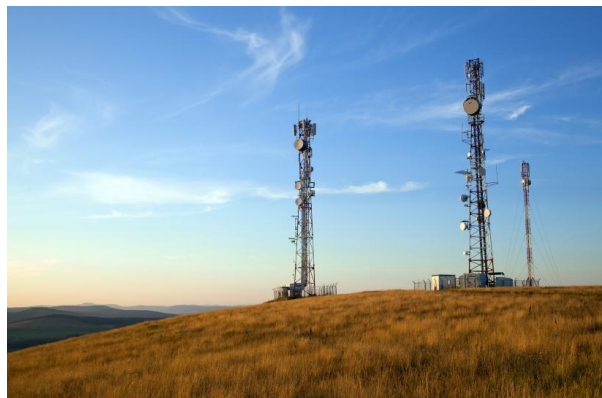
Σχήμα 13: Femtocell

2.4 Βασικά υποσυστήματα κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας

Τα κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας απαρτίζονται από ένα πολυπληθές σύνολο υποσυστημάτων και πρόκειται για αρκετά περίπλοκα τεχνολογικά συστήματα. Παρακάτω αναφέρεται ένα σύνολο βασικών υποσυστημάτων.

2.4.1 Σταθμοί βάσης

Το βασικότερο κομμάτι ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας είναι το **BSS (Base Station Subsystem)**. Το BSS είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση της σύνδεσης μίας τερματικής συσκευής (κινητό τηλέφωνο, modem, ηλεκτρονικός υπολογιστής, διάφορες συσκευές IoT) με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας και βρίσκεται στην περιφέρεια του δικτύου. Στις αρμοδιότητές του περιλαμβάνονται η αποστολή δεδομένων προς τις τερματικές συσκευές, η λήψη δεδομένων από τις τερματικές συσκευές, η εκχώρηση συχνοτήτων στις τερματικές συσκευές για τη σύνδεσή τους με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, η αυθεντικοποίηση των συσκευών, η κατανομή των δικτυακών πόρων στο ραδιοδίκτυο και η κωδικοποίηση φωνής και δεδομένων.



Σχήμα 14: Σταθμοί βάσης κινητής τηλεφωνίας

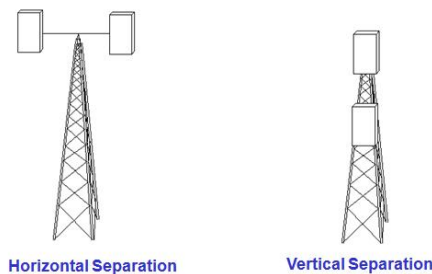
Το BSS απαρτίζεται από δύο κύρια υποσυστήματα: από τον **BTS (Base Transceiver Station)** και από τον **BSC (Base Station Controller)**. Με την πάροδο των ετών, προστέθηκε σε αυτά τα δύο υποσυστήματα και ένα ακόμη, η **PCU (Packet Control Unit)**.

- **BTS (Base Transceiver Station)**

Ένας BTS απαρτίζεται, συνήθως, από τα ακόλουθα βασικά συστήματα:

- Ο **πομποδέκτης** είναι αρμόδιος για τη μετάδοση του σήματος μεταξύ των τερματικών συσκευών.
- Ο **combiner** είναι αρμόδιος για τη «συνένωση» του σήματος πολλαπλών πομποδεκτών, προκειμένου να μειωθεί το πλήθος των απαιτούμενων κεραιών για την αποστολή και τη λήψη του σήματος.
- Ο **ενισχυτής ισχύος σήματος (power amplifier)** είναι αρμόδιος για την ενίσχυση του σήματος του πομποδέκτη και στις τωρινές κατασκευές κεραιών ενσωματώνεται σε αυτόν.
- Ο **πολυπλέκτης (multiplexer)** είναι αρμόδιος για το διαχωρισμό των σημάτων αποστολής και λήψης από την ίδια κεραία.
- Ο **ελεγκτής λειτουργίας (control function)** είναι αρμόδιος για τον έλεγχο και για τη διαχείριση των διαφόρων μονάδων του BTS, καθώς και του λογισμικού του.
- Η **BRU (Baseband Receiver Unit)** είναι αρμόδια για την ψηφιακή επεξεργασία σήματος και για τη μετάδοση σήματος σύμφωνα με την τεχνική frequency hopping.
- Η **κεραία** περιέχει τα προαναφερθέντα στοιχεία.

Οι κεραίες διαχωρίζονται σε κεραίες αποστολής και λήψης. Ορισμένες κεραίες ορίζονται ως αποκλειστικά αποστολής, άλλες ως αποκλειστικά λήψης, ενώ άλλες επιτελούν λειτουργίες αποστολής και λήψης. Η τοποθέτηση των κεραιών γίνεται κάθετα ή οριζόντια ως προς το έδαφος.

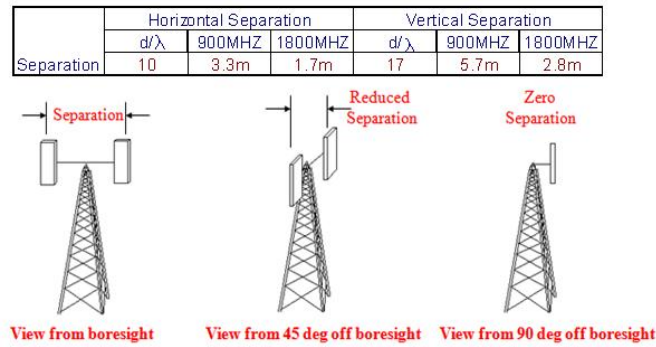


Σχήμα 15: Οριζόντια τοποθέτηση και κάθετη τοποθέτηση

Προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος, έναντι των εξασθενήσεων που προκαλούνται λόγω των αποστάσεων ή/και των φυσικών ή τεχνητών εμποδίων που προκαλούν ανάκλαση ή/και διάθλαση του σήματος, δύνανται να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές όπως είναι, για παράδειγμα, η τεχνική διαχωρισμού κεραιών (**antenna diversity**).

Με βάση αυτήν την τεχνική, πραγματοποιείται φυσικός διαχωρισμός των κεραιών λήψης. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση των κεραιών, τόσο περισσότερο ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες λήψης των, συσχετιζόμενων μεταξύ τους, σημάτων. Συνεπώς, είναι επιθυμητή η λήψη σημάτων από κάθε κεραία, τα οποία είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους. Ο τρόπος τοποθέτησης των κεραιών στον σταθμό βάσης, καθώς και η απόστασή τους εξαρτάται τόσο από φυσικούς παράγοντες (για παράδειγμα, η περιοχή κάλυψης ή τα φυσικά εμπόδια) όσο και από παράγοντες σχεδιασμού του δικτύου. Όσον αφορά

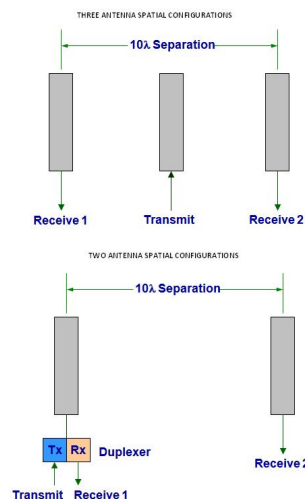
για παράδειγμα τη συχνότητα των 900 MHz, η απόσταση αυτή ορίζεται να είναι ίση με 3,3 μέτρα, εφόσον οι κεραιές λήψης τοποθετούνται οριζόντια.



Σχήμα 16: Διαχωρισμός κεραιών (antenna diversity)

- **Οριζόντια έναντι κάθετης τοποθέτησης**

Στην οριζόντια τοποθέτηση επιτυγχάνεται πιο συμμετρική διαμόρφωση και, κατ' επέκταση, χαρακτηρίζεται από μία πιο ισορροπημένη λήψη σήματος. Οι κεραιές λήψης μπορούν να βρίσκονται σε αρκετά κοντινή απόσταση. Αντιθέτως, για την επίτευξη αυτής της εξισορρόπησης στην κάθετη τοποθέτηση, απαιτείται η αρκετά απομακρυσμένη τοποθέτηση των κεραιών λήψης. Η κάθετη τοποθέτηση χαρακτηρίζεται από πιο αξιόπιστη κατασκευή, δεδομένου ότι απαιτείται μικρότερο μήκος βραχίονα συγκράτησης της κεραιάς. Ένα βασικό πλεονέκτημα της κάθετης τοποθέτησης είναι ο μικρότερος βαθμός συσχέτισης της όσον αφορά τη γωνία λήψης. Όσο πιο κοντά σε γωνία 90 μοιρών βρίσκεται ένα τερματικό, σε σχέση με την κεραιά λήψης, τόσο μικρότερος είναι ο διαχωρισμός των σημάτων λήψης, με αποτέλεσμα τη χειροτέρευση της ποιότητας λήψης. Σε γωνία 90 μοιρών σε σχέση με τις κεραιές λήψης, υπάρχει σχεδόν μηδενικός διαχωρισμός σημάτων λήψης, όσον αφορά την οριζόντια τοποθέτηση.



Σχήμα 17: Οριζόντια τοποθέτηση έναντι κάθετης τοποθέτησης

Οι τυπικές διατάξεις κεραιών στους σταθμούς βάσης αποτελούνται από 3 κατευθυντικές κεραιές, όπου έκαστος καλύπτει μία γωνία 120 μοιρών. Αρκετά συνηθισμένες είναι και οι διατάξεις 2 κεραιών, όπου

έκαστος καλύπτει μία γωνία 180 μοιρών. Τέλος, χρησιμοποιούνταν αρκετά εκτεταμένα (τουλάχιστον στα δίκτυα δεύτερης γενιάς) και ιδίως σε αγροτικές, επίπεδες περιοχές και κεραιές ομπι (πανκατευθυντικές), οι οποίες προσέφεραν κάλυψη 360 μοιρών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στα δίκτυα τρίτης γενιάς ο BTS αναφέρεται ως **node B**, για τα δίκτυα τέταρτης γενιάς LTE χρησιμοποιείται η συντόμηση **eNodeB (E-UTRA Node B)** και για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς χρησιμοποιείται ο όρος **GNodeB (next Generation Node B)**.

- **BSC (Base Station Controller)**

Ουσιαστικά, ένας BSC διαχειρίζεται δεκάδες ή ακόμη και εκατοντάδες BTS. Ο BSS λαμβάνει μετρήσεις από τις, συνδεδεμένες στο δίκτυο, συσκευές, χειρίζεται τη μεταπομπή από έναν BTS σε έναν άλλον BTS και διαχειρίζεται την κατανομή των συχνοτήτων μεταξύ των διαφόρων κυψελών.

Επίσης, σε περίπτωση όπου υπάρχει ένα σύνολο πολλών, χαμηλής χωρητικότητας, συνδέσεων προς BTS, καθίσταται εφικτή η συγκέντρωσή τους από τον BSC σε μεγαλύτερα «πακέτα», τα οποία κατευθύνονται προς το MSC (Mobile Switching Center).

Στους BSC αποθηκεύονται διάφορες βάσεις δεδομένων. Αυτές οι βάσεις δεδομένων αποθηκεύουν τις συχνότητες εξυπηρέτησης των διαφόρων γειτονικών κελιών, τα επίπεδα λήψης των συνδεδεμένων συσκευών προκειμένου να πραγματοποιείται σωστά η περιαγωγή τους μεταξύ των διαφόρων κελιών, καθώς και πίνακες που περιέχουν κατευθύνσεις για την πραγματοποίηση της λειτουργίας **frequency hopping**. Μέσω της συγκεκριμένης λειτουργίας επιτρέπεται η γρήγορη εναλλαγή από μία συχνότητα σε ένα σύνολο άλλων συχνοτήτων για την καλύτερη εξυπηρέτηση μίας σύνδεσης και για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών.

Στη σύγχρονη μορφή τους, οι BSC βασίζονται σε μια κατανομημένη υπολογιστική αρχιτεκτονική, η οποία εξασφαλίζει ανθεκτικότητα σε περιπτώσεις βλαβών.

Στους BSC εκτελείται, επίσης, η λειτουργία κωδικοποίησης της φωνής. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται η μετατροπή από την κωδικοποίηση, την οποία χρησιμοποιεί το εκάστοτε δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, προς την κωδικοποίηση, την οποία χρησιμοποιεί το **Δημόσιο Τηλεφωνικό Δίκτυο (Public Switched Telephone Network - PSTN)**.



Σχήμα 18: Base Station Controller

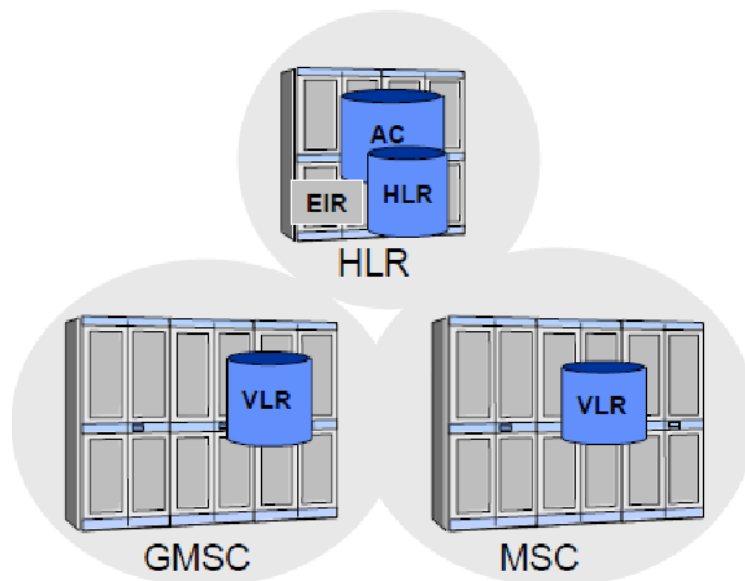
- **PCU (Packet Control Unit)**

Η PCU προστέθηκε μεταγενέστερα στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς, με την έλευση της τεχνολογίας **GPRS (General Packet Radio Service)** και εκτελεί τις εργασίες ενός BSC, οι οποίες προσανατολίζονται στη διαχείριση των πακέτων.

Ουσιαστικά, ο σταθμός βάσης διαχωρίζει τη φωνή από τα δεδομένα και αναθέτει την εξυπηρέτηση καθενός εξ' αυτών είτε στον BSC ή στην PCU. Η PCU μπορεί να αποτελεί μία αυτόνομη μονάδα ή να ενσωματώνεται στην BTU ή ακόμη και στον BSC.

2.4.2 Υποσύστημα μεταγωγής δικτύου (Network Switching Subsystem - NSS)

Το NSS αποτελεί τον πυρήνα του δικτύου. Για τον λόγο αυτό, ονομάζεται πιο απλά core network. Εκτελεί τις απαιτούμενες διαδικασίες σύνδεσης των τερματικών συσκευών με το κυρίως δίκτυο και είναι υπεύθυνο για την περιαγωγή τους μεταξύ των σταθμών βάσης. Διασυνδέει τα δίκτυα των παρόχων τόσο μεταξύ τους όσο και με το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο. Σε γενικές γραμμές, ο σκοπός του δεν διαφέρει συγκριτικά με τον σκοπό των σταθερών τηλεφωνικών δικτύων, ωστόσο παρέχει εξειδικευμένες λειτουργίες που αφορούν τη διαχείριση κινητών συσκευών. Αρχικά, επρόκειτο για ένα δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος, ενώ στην πορεία εμπλουτίστηκε με τη δυνατότητα μεταγωγής πακέτων και «μετονομάστηκε» σε GPRS core network.



Σχήμα 19: Network Switching Subsystem

- **MSC (Mobile Switching Center)**

Το MSC «τοποθετείται» μεταξύ των σταθμών βάσης και του δημοσίου τηλεφωνικού δικτύου και είναι υπεύθυνο για τη δρομολόγηση των τηλεφωνικών κλήσεων, των σύντομων γραπτών μηνυμάτων και για τη διακίνηση δεδομένων. Ο βασικός λόγος της ύπαρξής του είναι η εγκαθίδρυση μίας από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης μεταξύ του δικτύου και των κινητών συσκευών, η διαχείριση της κινητότητας των

τερματικών συσκευών και η «παρακολούθηση» της χρέωσης του συνδρομητή. Επιπλέον, το MSC είναι υπεύθυνο για το handover μεταξύ σταθμών βάσης που ανήκουν στο ίδιο (inter-BSC handover). Όταν μία κινητή τερματική συσκευή προσεγγίζει τα όρια του κελιού το οποίο την εξυπηρετεί, ενημερώνεται το MSC και πραγματοποιεί τη μετάβαση από το τρέχον κελί σε ένα άλλο, το οποίο είναι καταλληλότερο. Επίσης, το MSC συνεργάζεται και με την HLR (όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια), προκειμένου να είναι εφικτή η δρομολόγηση των κλήσεων, βάσει των πληροφοριών τοποθεσίας που αποθηκεύει η HLR (μεταξύ αρκετών ακόμη πληροφοριών). Τέλος, ένα MSC διασυνδέεται και με άλλα MSC. Το MSC είναι ένας γενικός όρος και ουσιαστικά, διακρίνεται σε διάφορες «εκδόσεις», αναλόγως της εργασίας που διεκπεραιώνει. Πρέπει να επισημανθεί ιδιαίτερα ότι δεν υφίσταται ένα μοναδικό MSC, αλλά πολλά MSCs σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, τα οποία όπως προαναφέρθηκε, διασυνδέονται.

- **G-MSC (Gateway MSC)**

Το G-MSC εκτελεί την πολύ βασική λειτουργία της διεκπεραίωσης φωνητικών κλήσεων. Όλες οι κλήσεις που πραγματοποιούνται είτε μεταξύ κινητών συσκευών ή μεταξύ κινητών και σταθερών συσκευών διεκπεραιώνονται από το G-MSC. Το G-MSC παρέχει στο δίκτυο πληροφορία σχετικά με το V-MSC στο οποίο είναι συνδεδεμένος ένας συνδρομητής μία δεδομένη χρονική στιγμή.

- **V-MSC (Visited MSC)**

Το V-MSC υποδηλώνει το MSC στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο εκάστοτε συνδρομητής. Οι πληροφορίες για τον συνδρομητή αποθηκεύονται στην VLR, η οποία συσχετίζεται με το αντίστοιχο V-MSC και η λειτουργία της αναφέρεται παρακάτω.

- **A-MSC (Anchor MSC) και T-MSC (Target MSC)**

Το Anchor MSC υποδηλώνει το MSC από το οποίο ξεκινά η μετάβαση ενός συνδρομητή από ένα κελί σε ένα άλλο, ενώ το Target MSC υποδηλώνει το MSC προορισμού.

- **MSCS (Mobile Switching Center Server)**

Ο MSCS διαχειρίζεται τα στοιχεία του NSS και, επί της ουσίας, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα καταναμημένος μεταγωγέας επιπέδου ζεύξης. Για την επικοινωνία του με τα υπόλοιπα στοιχεία του NSS χρησιμοποιεί ανοιχτά πρωτόκολλα που θεσμοθετούνται από οργανισμούς όπως είναι ο ETSI (European Telecommunications Standards Institute), η ITU (International Telecommunication Union), η GSMA (GSM Association) και η 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Ο MSCS υποστηρίζει επιπροσθέτως και τις διάφορες απαιτήσεις που θέτουν οι ρυθμιστικές αρχές (όπως είναι η νόμιμη συνακρόαση, η φορητότητα αριθμών κ.ά.).

- **AuC (Authentication Center)**

Το κέντρο αυθεντικοποίησης (AuC) είναι αρμόδιο για την αυθεντικοποίηση κάθε κάρτας SIM (αρτικόλεξο), η οποία επιχειρεί να συνδεθεί στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Μετά από την επιτυχή αυθεντικοποίηση μίας κάρτας SIM είναι εφικτή για την HLR η διαχείριση της κάρτας SIM και παράγεται ένα κλειδί κρυπτογράφησης, το οποίο χρησιμοποιείται για όλων των τύπων τις παρεχόμενες

υπηρεσίες (φωνητικές κλήσεις, κίνηση δεδομένων, σύντομα γραπτά μηνύματα κ.ά.). Όπως γίνεται αντιληπτό, η αποτυχία της αυθεντικοποίησης μίας κάρτας SIM έχει ως αποτέλεσμα την απαγόρευση λειτουργίας της στο δίκτυο του παρόχου.

Ο τρόπος υλοποίησης της αυθεντικοποίησης διαδραματίζει βασικό ρόλο όσον αφορά την αποφυγή της κλωνοποίησης SIM καρτών. Κατά την κατασκευή μίας κάρτας SIM, ένα κλειδί συμμετρικής κρυπτογράφησης, που καλείται K_i αποθηκεύεται σε αυτήν. Αυτό το κλειδί είναι επίσης γνωστό στο AuC. Αυτό το κλειδί κρυπτογράφησης δεν μεταδίδεται ποτέ μεταξύ του AuC και της κάρτας SIM. Χρησιμοποιεί, ωστόσο, συνδυαστικά με τον IMSI για τη δημιουργία ενός ελέγχου ταυτότητας πρόκλησης-απόκρισης (challenge-response authentication) με το AuC και ενός κλειδιού κρυπτογράφησης της επικοινωνίας του χρήστη, το οποίο καλείται K_c .

2.5 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο εξηγήθηκαν ορισμένες βασικές έννοιες και ορολογίες των δικτύων γενικότερα, αλλά και των δικτύων ασύρματης επικοινωνίας ειδικότερα. Μεταξύ άλλων, παρουσιάστηκε μία συνοπτική επισκόπηση του τρόπου οργάνωσης ενός δικτύου σε επίπεδα, αναφέρθηκαν οι μέθοδοι προσπέλασης του ραδιοφάσματος που χρησιμοποιείται από τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών, τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν ένα δίκτυο ψηφιακής κυψελωτής τηλεφωνίας, καθώς και οι διάφοροι τύποι κυψελών που μπορούν να δημιουργηθούν με τη χρήση διαφόρων τύπων κεραιών, προκειμένου να επιτευχθεί η γεωγραφική κάλυψη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η επόμενη ενότητα ξεκινάει τη μελέτη των δικτύων ψηφιακής κυψελωτής τηλεφωνίας, τα οποία εισήχθησαν στην Ελλάδα (αλλά και στην Ευρώπη γενικότερα) με τον τύπο δικτύου GSM.

Κεφάλαιο 3: Δίκτυα δεύτερης γενιάς

3.1 Εισαγωγή

Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς αποτελούν τον πρώτο τύπο δικτύου ψηφιακής κινητής τηλεφωνίας. Με τον όρο «ψηφιακή κινητή τηλεφωνία» εννοείται η ψηφιακή επικοινωνία μεταξύ του δικτύου και των τερματικών συσκευών (καθώς, ακόμη και στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πρώτης γενιάς, η επικοινωνία μεταξύ του πυρήνα του δικτύου και των τερματικών συσκευών ήταν ψηφιακή, επίσης).

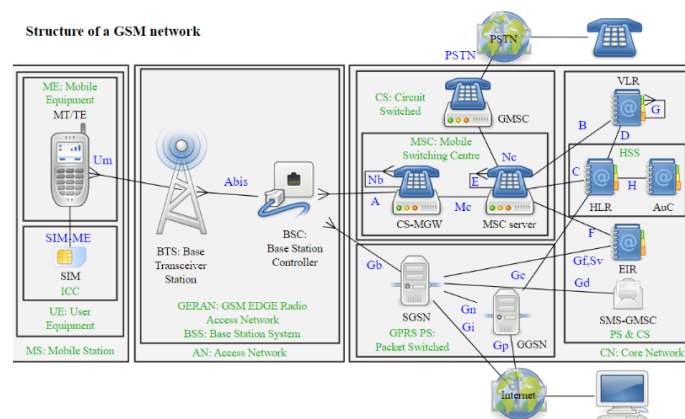
3.2 Διαδικασία πρόσβασης στο δίκτυο δεύτερης γενιάς

Τον Δεκέμβριο του 1991, προτάθηκε από το ETSI η δημιουργία του προτύπου **GSM (Global System for Mobile Communications)** για τη λειτουργία των ψηφιακών δικτύων κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς στην Ευρώπη.



Σχήμα 20: Λογότυπο του GSM Association

Αρχικά, το πρότυπο GSM περιέγραφε όλα τα πρωτόκολλα για την υλοποίηση ενός ψηφιακού δικτύου κινητής τηλεφωνίας μεταγωγής κυκλώματος, σχεδιασμένου για την αμφίδρομη (full duplex) μετάδοση φωνής. Στην πορεία, προστέθηκε η δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων, αρχικά μέσω μεταγωγής κυκλώματος και στην πορεία μέσω της τεχνικής μεταγωγής πακέτου, με την προσθήκη της υπηρεσίας **GPRS (General Packet Radio Service)** και, μεταγενέστερα, με την προσθήκη της υπηρεσίας **EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution)** [7].



Σχήμα 21: Γενική δομή ενός GSM δικτύου

Για την πρόσβαση σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας γενικότερα (και κατ' επέκταση σε ένα δίκτυο δεύτερης γενιάς), υφίστανται ορισμένες προϋποθέσεις: Αρχικά, πρέπει να συναφθεί ένα συμβόλαιο παροχής υπηρεσιών μεταξύ του συνδρομητή και του παρόχου κινητής τηλεφωνίας.

Στη συνέχεια, παραδίδεται η κάρτα **SIM (Subscriber Identity Module)** στον συνδρομητή. Η κάρτα SIM προγραμματίζεται με τον τηλεφωνικό αριθμό του συνδρομητή και είναι απαραίτητη για την πρόσβαση στο δίκτυο. Ο τηλεφωνικός αριθμός αναφέρεται ως **MSISDN (Mobile Station International Subscriber Directory Number)**. Σήμερα πλέον, η κάρτα SIM δύναται να είναι και σε ηλεκτρονική μορφή, ενσωματωμένη στη συσκευή του συνδρομητή (**eSIM**).

Φυσικά, πρέπει να είναι διαθέσιμη και μία συσκευή κινητού τηλεφώνου, συμβατή με τον πάροχο στον οποίο επιθυμεί να συνδεθεί ο συνδρομητής. Σήμερα, πλέον, όλες οι συσκευές δύναται να λειτουργούν σε πολλαπλές συχνότητες και σε πολλαπλούς τύπους δικτύων, οπότε δεν τίθεται κάποιο ιδιαίτερα σοβαρό θέμα, αναφορικά με τη συμβατότητα του τύπου δικτύου ή/και του παρόχου.

Κατόπιν της ενεργοποίησης του συνδρομητή στο δίκτυο και αφού ενεργοποιηθεί η συσκευή όπου τοποθετήθηκε η κάρτα SIM, ξεκινά η διαδικασία εγγραφής στο δίκτυο. Όλες οι πληροφορίες αναφορικά με την ταυτότητα του εκάστοτε συνδρομητή, καθώς και με τις παρεχόμενες υπηρεσίες, είναι αποθηκευμένες σε μία βάση δεδομένων, η οποία ονομάζεται **HLR (Home Location Register)**. Κάθε κάρτα SIM φέρει έναν μοναδικό κωδικό, με την ονομασία **IMSI (International Mobile Subscriber Identity)**. Ο εν λόγω κωδικός χρησιμοποιείται ως το κύριο κλειδί για την καταχώριση του συνδρομητή στην HLR. Θα μπορούσε να ειπωθεί πως ο IMSI είναι κάτι ανάλογο της διεύθυνσης MAC των καρτών δικτύου, καθώς προσδιορίζει μοναδικά τον εκάστοτε συνδρομητή στο παγκόσμιο σύστημα δικτύων των παρόχων της ψηφιακής κινητής τηλεφωνίας. Επίσης, ο κάθε MSISDN αποτελεί ένα μοναδικό κλειδί, το οποίο χρησιμοποιείται συνδυαστικά με τον IMSI, προκειμένου να καταχωρείται ο κάθε μοναδικός συνδρομητής στην HLR.

Με την ενεργοποίηση της τηλεφωνικής συσκευής, γίνεται αναζήτηση για τον κοντινότερο σταθμό βάσης του παρόχου. Εφόσον βρεθεί σταθμός βάσης, επιχειρείται η σύνδεση του κινητού τηλεφώνου του πελάτη με αυτόν. Μόλις ολοκληρωθεί επιτυχώς η διαδικασία σύνδεσης, θεωρείται πως υπάρχει κάλυψη παρόχου στη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή [6].

3.3 HLR (Home Location Register)

Η κύρια λειτουργία της HLR είναι η διαχείριση της «κινητότητας» των συνδρομητών, πέραν της καταχώρησής τους. [6]

Κάθε οριζόμενη γεωγραφική περιοχή χαρακτηρίζεται από έναν κωδικό περιοχής (**Location Area Code - LAC**). Καθώς ο συνδρομητής μετακινείται μεταξύ των κυψελών, η HLR ενημερώνεται από την VLR (η λειτουργία της οποίας εξηγείται στη συνέχεια) σχετικά με τη θέση του συνδρομητή, του αναθέτει έναν νέο LAC και ενημερώνει την προηγούμενη καταχώριση. Είναι σημαντικό να τονιστεί το γεγονός πως η HLR δεν περιορίζεται μόνο στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς, αλλά υφίσταται και σε όλες τις επόμενες γενεές δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Ωστόσο, στα δίκτυα τέταρτης γενιάς αποθηκεύει πιο «στατικές πληροφορίες» αναφορικά με τον συνδρομητή και η διαχείριση των πιο δυναμικών πληροφοριών που αφορούν τη μετακίνηση ανάμεσα σε διαφορετικές κυψέλες ανατίθεται σε έναν εξυπηρέτη ο οποίος ονομάζεται **HSS (Home Subscriber Server)**. Τέλος, όσον αφορά τα δίκτυα πέμπτης γενιάς, η HLR μετονομάζεται σε **UDR (Unified Data Registry)** και ο HSS μετονομάζεται σε **UDM (Unified Data Management)**.

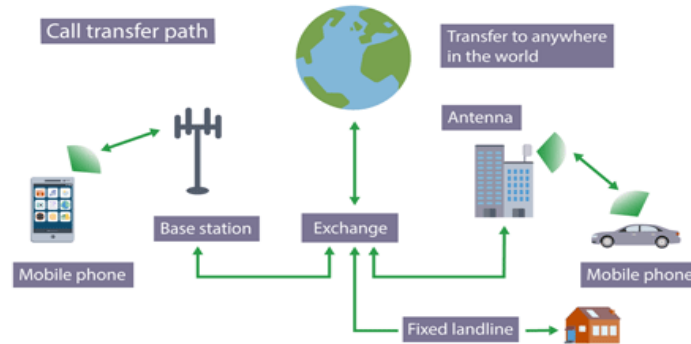
Η HLR συνδέεται, εκτός της VLR, και με άλλα συστατικά του δικτύου, τα οποία είναι τα εξής:

- Το **GMSC (Gateway Mobile Switching Center)**, το οποίο διαχειρίζεται τις εισερχόμενες κλήσεις.
- Το **SMSC (Short Message Service Center)**, το οποίο διαχειρίζεται τα εισερχόμενα μηνύματα (SMS).
- Το λογισμικό του αυτόματου τηλεφωνητή, το οποίο διαχειρίζεται την παράδοση των φωνητικών μηνυμάτων.
- Το **AuC (Authentication Center)**, το οποίο είναι αρμόδιο για την αυθεντικοποίηση του συνδρομητή, καθώς και για την κρυπτογράφηση και την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του πελάτη και του δικτύου.

3.4 VLR (Visitor Location Register)

Καθώς αναφερόμαστε σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, καθίσταται σαφές πως δεν θα είναι σταθερό το πλήθος των πελατών σε μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή (κυψέλη), αλλά μπορεί να μεταβάλλεται ανά πάσα χρονική στιγμή. Για τον λόγο αυτόν, λοιπόν, όλες οι πληροφορίες αναφορικά με τους συνδεδεμένους πελάτες εντός μίας κυψέλης αποθηκεύονται σε μία άλλη βάση δεδομένων, η οποία ονομάζεται VLR (Visitor Location Register) [6]. Τα περιεχόμενα της VLR είναι δυναμικώς μεταβαλλόμενα. Κάθε φορά όπου ένας πελάτης εισέρχεται εντός μίας κυψέλης, η VLR επικοινωνεί με την HLR, προκειμένου να λάβει όλες τις απαιτούμενες, για τον πελάτη, πληροφορίες. Κάθε VLR αποθηκεύει επιπροσθέτως (εκτός του IMSI και του MSISDN), πληροφορίες αυθεντικοποίησης, μία λίστα των υπηρεσιών στις οποίες έχει πρόσβαση ο πελάτης και την διεύθυνση του συνδρομητή στην HLR.

Η VLR ενημερώνει την HLR για την «είσοδο» ενός πελάτη εντός της εμβέλειας της κυψέλης, την οποία εξυπηρετεί. Καθ' όλη τη διάρκεια παραμονής του πελάτη εντός της τρέχουσας κυψέλης, παρακολουθεί τη θέση του, παρέχει τις ζητούμενες – από τον πελάτη - υπηρεσίες και, σε περίπτωση όπου ένας πελάτης μετακινηθεί σε άλλη κυψέλη, η εγγραφή που διατηρείται για αυτόν, διαγράφεται. Θα πρέπει να διευκρινιστεί πως ο πελάτης δεν θεωρείται ενεργός για όσο παραμένει εντός της εμβέλειας μίας κυψέλης. Μετά από την παραμονή ενός χρονικού διαστήματος και εφόσον δεν πραγματοποιείται κάποια «κίνηση» από πλευράς πελάτη (όπως είναι η πραγματοποίηση ή η λήψη κλήσεων ή μηνυμάτων ή η μεταφορά δεδομένων), ο πελάτης θεωρείται ανενεργός και ενημερώνεται η HLR από την VLR. Πρέπει να σημειωθεί πως ένας πελάτης θεωρείται ανενεργός, ακόμη και όταν απενεργοποιήσει τη συσκευή του ή αν μετακινηθεί σε περιοχή εκτός κάλυψης. Στις περιπτώσεις όπου ένας πελάτης θεωρείται ανενεργός, δεν διατηρείται η εγγραφή του στην VLR, αλλά αποσύρεται από την HLR [7]. Κατ' αντιστοιχία με την HLR, η VLR υφίσταται και σε όλους τους νεότερους τύπους δικτύων κινητής τηλεφωνίας (τρίτης, τέταρτης και πέμπτης γενιάς).



Σχήμα 22: Βασική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας

3.5 Πλαίσια, χρονοθυρίδες και κωδικοποίηση φωνής

Για την επικοινωνία των χρηστών μέσω ενός GSM δικτύου, χρησιμοποιείται ανά συχνότητα ένα πλήθος πλαισίων (frames). [4][5] Κάθε πλαίσιο διαιρείται σε χρονοθυρίδες. Το πρότυπο GSM οργανώνει τα πλαίσια και τις χρονοθυρίδες τους με έναν λογικό τρόπο. Υπό κανονικές συνθήκες, κάθε πλαίσιο διαιρείται σε 8 χρονοθυρίδες, αν και είναι εφικτή η διαίρεσή του σε 16 χρονοθυρίδες, ούτως ώστε να εξυπηρετηθεί μεγαλύτερος αριθμός χρηστών ταυτόχρονα, με μειωμένη απόδοση της παρεχόμενης υπηρεσίας. Η χρήση 16 χρονοθυρίδων ανά πλαίσιο γίνεται σε συνθήκες συμφόρησης (congestion) ή αλλιώς, μειωμένης χωρητικότητας της κυψέλης. Η θεμελιώδης μονάδα χρόνου στο πρότυπο GSM καλείται **burst** και η διάρκειά της ανέρχεται σε 0,577 ms. Ένα πλαίσιο σχηματίζεται από 8 bursts και η συνολική χρονική διάρκεια του ανέρχεται σε 4,615 ms. Το πλήθος χρονοθυρίδων ανά πλαίσιο ανέρχεται σε 8 (όταν χρησιμοποιείται κωδικοποίηση φωνής πλήρους ρυθμού - **full rate**) και σε 16 (όταν χρησιμοποιείται κωδικοποίηση φωνής μισού ρυθμού - **half rate**). Είναι σαφές πως η full rate κωδικοποίηση παρέχει υψηλότερη ποιότητα φωνής, καθώς ο ρυθμός μετάδοσης των φωνητικών δεδομένων ανέρχεται σε 13 kbits/sec, ενώ στην half rate κωδικοποίηση ο ρυθμός μετάδοσης ανέρχεται σε 6,5 kbits/sec.

3.6 Τεχνολογίες μετάδοσης δεδομένων GSM δικτύων

Αρχικά, το πρότυπο GSM υποστήριζε υπηρεσίες φωνής αμφίδρομης μετάδοσης (full-duplex). Με την πάροδο των ετών προστέθηκε η δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων. Αρχικά, η μετάδοση δεδομένων πραγματοποιούνταν μέσω της τεχνικής μεταγωγής κυκλώματος με την υπηρεσία **CSD (Circuit Switched Data)** και κατόπιν με την προσθήκη της υπηρεσίας **HSCSD (High Speed Circuit Switched Data)**. Στη συνέχεια, η μετάδοση δεδομένων άρχισε να πραγματοποιείται μέσω της τεχνικής μεταγωγής πακέτων, με την υπηρεσία **GPRS (General Packet Radio Service)** και κατόπιν μέσω της τεχνολογίας **EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution)**.

3.6.1 CSD (Circuit Switched Data – 2G)

Με την τεχνολογία CSD αφιερώνεται μία χρονοθυρίδα του κυκλώματος για τη μετάδοση δεδομένων στην ταχύτητα των 9,6 kbps [8][9]. Μέσω αυτής της χρονοθυρίδας πραγματοποιείται επικοινωνία της τερματικής συσκευής και του σταθμού βάσης. Η δέσμευση του κυκλώματος γίνεται με τον ίδιο τρόπο με τη δέσμευση για φωνητικές κλήσεις. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι δεν διακινούνται φωνητικά

δεδομένα. Ο σταθμός βάσης επικοινωνεί με τη σειρά του με τον κωδικοποιητή (transcoder) μέσω μίας «υπο-χρονοθυρίδας» με ρυθμό 16 kbps και τέλος, ο κωδικοποιητής επικοινωνεί με το MSC μέσω μίας άλλης χρονοθυρίδας με ρυθμό 64 kbps.

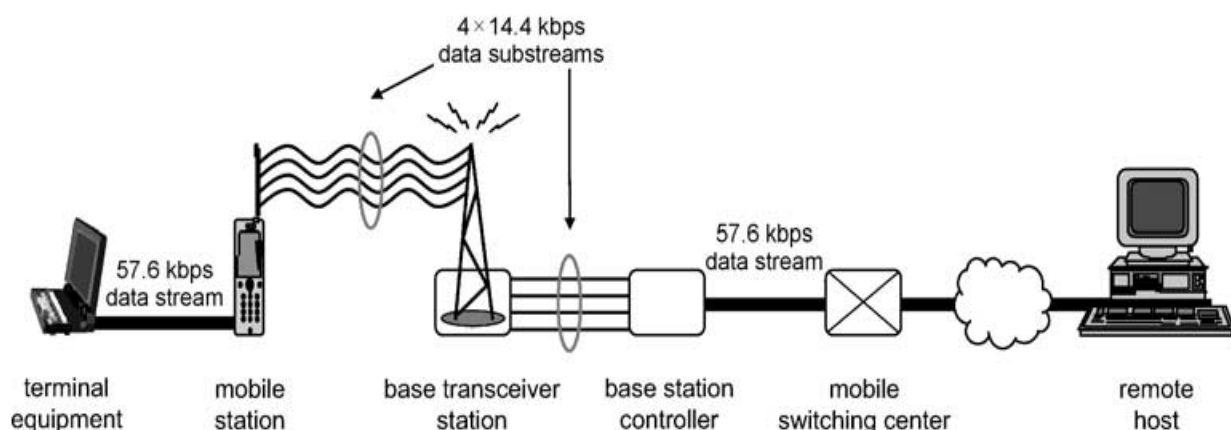
3.6.2 HSCSD (High Speed Circuit Switched Data – 2G)

Η τροποποίηση της υπηρεσίας CSD με τη γέννηση της υπηρεσίας HSCSD, κατάφερε τη μετάδοση δεδομένων με πολλαπλάσιους ρυθμούς μετάδοσης. Οι υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης έγιναν πραγματικότητα, συνδυάζοντας πολλαπλές χρονοθυρίδες ανά χρήστη. Συνήθως, συνδυάζονται 4 χρονοθυρίδες, με ρυθμό μετάδοσης 14.4 kbps, επιτυγχάνοντας έτσι συνολική μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης 57.6 kbps. Ωστόσο, ορισμένοι πάροχοι έχουν καταφέρει να αναθέσουν αποκλειστικά σε έναν χρήστη μέχρι και 8 χρονοθυρίδες, με αποτέλεσμα την επίτευξη ακόμη υψηλότερης θεωρητικής ταχύτητας, της τάξης των 115.2 kbps [8][9].

Ωστόσο, το γεγονός της επίτευξης υψηλότερης ταχύτητας μέσω της υπηρεσίας HSCSD οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στη χρήση διαφορετικών τεχνικών διαχείρισης σφαλμάτων μετάδοσης και διόρθωσής τους. Η τεχνολογία GSM έχει αρκετούς αλγορίθμους διόρθωσης σφαλμάτων μετάδοσης οι οποίοι, ωστόσο, έχουν σχεδιαστεί με γνώμονα τη χειρότερη δυνατή απόδοση ενός δικτύου. Ως εκ τούτου, μεγάλο μέρος του καναλιού μετάδοσης καταλαμβάνεται από τα δεδομένα αυτών των αλγορίθμων διόρθωσης και διαχείρισης σφαλμάτων, με άμεση συνέπεια τη μείωση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Το HSCSD όμως, χρησιμοποιεί διαφοροποιημένους αλγορίθμους διόρθωσης σφαλμάτων μετάδοσης, αναλόγως των συνθηκών μετάδοσης. Συνεπώς, είναι πιο πιθανή η μετάδοση δεδομένων με υψηλότερο ρυθμό, σε σχέση με την υπηρεσία CSD, με μία μέγιστη τιμή 14.4 kbps ανά χρονοθυρίδα.

Όσον αφορά το μοντέλο χρέωσης, αμφότερες οι υπηρεσίες CSD και HSCSD εφαρμόζουν χρονοχρέωση, για όσο χρονικό διάστημα παραμένει απασχολημένο το κύκλωμα του εκάστοτε χρήστη. Στην υπηρεσία HSCSD ενδέχεται η εφαρμογή υψηλότερης, από την υπηρεσία CSD, χρέωσης λόγω της δέσμευσης πολλαπλών καναλιών επικοινωνίας.

Τέλος, οι υπηρεσίες CSD και HSCSD παρουσιάζουν το πλεονέκτημα χαμηλότερης χρονοκαθυστέρησης (**latency**), συγκριτικά με τις μεταγενέστερες υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων, καθώς κάθε κύκλωμα δεσμεύεται κατ' αποκλειστικότητα για έναν χρήστη, οπότε η διακίνηση των δεδομένων πραγματοποιείται άμεσα και όχι με την «καλύτερη δυνατή προσπάθεια» (best-effort).



Σχήμα 23: Μετάδοση δεδομένων μέσω της τεχνολογίας HSCSD

3.6.3 GPRS (General Packet Radio Service – 2.5G)

Με την προσθήκη της υπηρεσίας GPRS, κατέστη εφικτή η μετάδοση δεδομένων μέσω της τεχνικής μεταγωγής πακέτων, έναντι της τεχνικής μεταγωγής κυκλώματος, η οποία αποτελούσε τον προκαθορισμένο τρόπο διαμεταγωγής δεδομένων στην πρώτη μορφή των δικτύων δεύτερης γενιάς [1] [2].

Το GPRS πρόκειται για υπηρεσία best-effort. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει εγγυημένη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, αλλά αναλόγως των επικρατούσων συνθηκών στο δίκτυο, ο εκάστοτε χρήστης λαμβάνει την καλύτερη δυνατή υπηρεσία που είναι διαθέσιμη. Οι τυπικές ταχύτητες διαμεταγωγής δεδομένων σε δίκτυα δεύτερης γενιάς, με χρήση του GPRS σε πραγματικές συνθήκες, κυμαίνονται μεταξύ των 56 kbps έως και των 114 kbps. Για την επίτευξη των μεγαλύτερων ταχυτήτων, το GPRS συνδυάζει αχρησιμοποίητα κανάλια του GSM δικτύου, σύμφωνα με έναν τρόπο διαμοιρασμού, ο οποίος ορίζεται από τον εκάστοτε πάροχο. Σημαντικό ρόλο, επίσης, στην ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων έχει το είδος της κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται, καθώς και οι δυνατότητες του modem της εκάστοτε τερματικής συσκευής.

Με το GPRS είναι εφικτή η μόνιμη πρόσβαση στο Διαδίκτυο (always-on Internet access) και η παροχή υπηρεσιών όπως τα **MMS (Multimedia Messaging Service)**, τα άμεσα μηνύματα (instant messaging) και το PTT (Push To Talk).

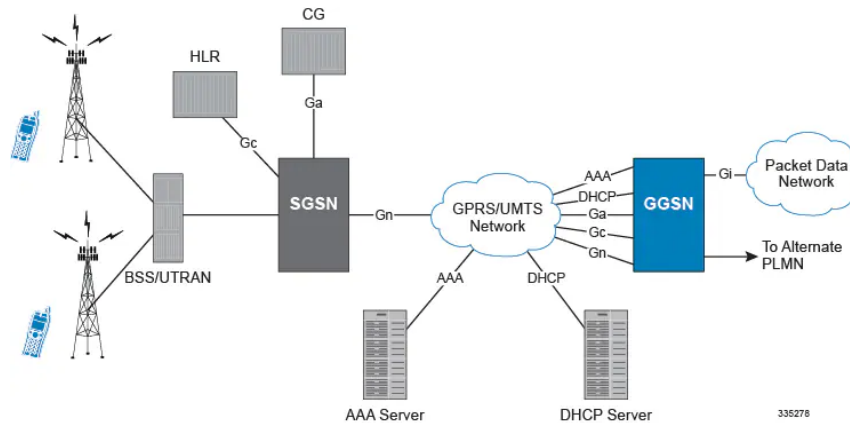
Όσον αφορά τις συχνότητες λειτουργίας, χρησιμοποιούνται οι ήδη υπάρχουσες συχνότητες των δικτύων GSM και υποστηρίζει το πρωτόκολλο IP (Internet Protocol).

Το GPRS βασίζεται για τη λειτουργία του σε μία μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης ενός καναλιού μετάδοσης και λήψης. Ουσιαστικά, δύο ή περισσότερες τερματικές συσκευές μπορούν να συνδεθούν ταυτόχρονα στο ίδιο φυσικό μέσο και να διαμοιραστούν τη χωρητικότητά του. Επομένως, όπως γίνεται αντιληπτό, πρέπει να χρησιμοποιηθεί πολυπλεξία. Κατά τη διάρκεια μίας συνόδου δεδομένων, λοιπόν, σε κάθε χρήστη ανατίθεται ένα ζεύγος συχνοτήτων αποστολής και λήψης. Τα πακέτα που διακινούνται απαρτίζονται από ένα σταθερό πλήθος bytes, που είναι ισοδύναμο μίας χρονοθυρίδας (time-slot) στο GSM. Για τη λήψη των δεδομένων, το κανάλι λήψης χρησιμοποιεί την τεχνική FCFS (First-Come First-Served), ενώ για την αποστολή των δεδομένων, το κανάλι αποστολής χρησιμοποιεί μία τεχνική βασιζόμενη στην τεχνική R-ALOHA (Reservation Aloha).

- **GPRS core network**

Για την υλοποίηση της υπηρεσίας GPRS απαιτείται η προσθήκη εξαρτημάτων στα υπάρχοντα συστατικά ενός GSM δικτύου. Με τον τρόπο αυτόν, επιτυγχάνεται η μετάδοση IP πακέτων μέσω του δικτύου GSM. Ο πυρήνας του δικτύου της υπηρεσίας GPRS παρέχει τη δυνατότητα μεταφοράς και διαχείρισης IP πακέτων, διαχείρισης της συνδρομής κάθε χρήστη, αλλά και υλοποίηση επιπρόσθετων λειτουργιών, όπως είναι η νόμιμη συνακρόαση, μεταξύ άλλων.

Οι δύο κύριες μονάδες του πυρήνα ενός GPRS δικτύου ονομάζονται **GGSN (Gateway GPRS Support Node)** και **SGSN (Serving GPRS Support Node)**.



Σχήμα 24: Δομή πυρήνα ενός δικτύου που υποστηρίζει την υπηρεσία GPRS

Πρέπει να σημειωθεί πως όταν είναι επιθυμητή η εκκίνηση μίας GPRS συνόδου, πρέπει αρχικά να δημιουργηθεί μία δομή δεδομένων, η διαχείριση της οποίας πραγματοποιείται από το πρωτόκολλο **PDP (Packet Data Protocol)**. Αυτή η δομή δεδομένων είναι γνωστή τόσο στον GGSN όσο και στον SGSN και περιέχει τις πληροφορίες της τρέχουσας GPRS συνόδου του χρήστη. Αφού δημιουργηθεί αυτή η δομή δεδομένων ενεργοποιείται και διαγράφεται με τον τερματισμό της τρέχουσας GPRS συνόδου. Ορισμένες παρεχόμενες πληροφορίες αυτής της δομής δεδομένων είναι: η διεύθυνση IP του χρήστη, ο IMSI του χρήστη και ένας κωδικός (ID) που αφορά τη σύνδεση του χρήστη τόσο με τον GGSN όσο και με τον SGSN.

Το βασικό πρωτόκολλο του πυρήνα ενός GPRS δικτύου ονομάζεται **GPRS Tunnelling Protocol**. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο βασισμένο στο IP το οποίο επιτρέπει την αδιάλειπτη μετάδοση και λήψη δεδομένων κατά τη μετακίνηση των χρηστών.

- **SGSN (Serving GPRS Support Node)**

Ο SGSN είναι αρμόδιος για την εξυπηρέτηση των συνδρομητών. Γνωρίζει την τοποθεσία όπου ευρίσκεται κάθε συνδρομητής και είναι επιφορτισμένος με λειτουργίες ασφάλειας και ελέγχου πρόσβασης του συνδρομητή στο GPRS δίκτυο. Ο SGSN συνδέεται στο ραδιοδίκτυο και είναι υπεύθυνος για τη διακίνηση των πακέτων δεδομένων, εντός της γεωγραφικής περιοχής της εκάστοτε κυψέλης. Πιο συγκεκριμένα, εκτελεί δρομολόγηση και μεταφορά πακέτων δεδομένων, διαχειρίζεται την περιαγωγή του χρήστη, εκτελεί διαχείριση των λογικών συνδέσεων και αυθεντικοποίηση των συνδρομητών και διαχειρίζεται πληροφορίες σχετικές με τη χρέωση του συνδρομητή. Σε κάθε SGSN είναι εγγεγραμμένο ένα σύνολο συνδρομητών ανά πάσα χρονική στιγμή και για κάθε συνδρομητή υπάρχει καταγεγραμμένη η VLR και το τρέχον κελί που τον εξυπηρετεί, καθώς και ο IMSI του.

- **GGSN (Gateway GPRS Support Node)**

Ο GGSN, συνδυαστικά με τον SGSN, διαχειρίζεται τη μετάδοση πακέτων τόσο ενδοδικτυακά (δηλ. εντός του GPRS δικτύου) όσο και διαδικτυακά (δηλ. μεταξύ δικτύων, όπως για παράδειγμα μεταξύ του GPRS δικτύου και του Internet).

Ο GGSN κρύβει την υποδομή ενός GPRS δικτύου από οποιοδήποτε άλλο εξωτερικό δίκτυο και, ουσιαστικά, μπορεί να θεωρηθεί ως ένας δρομολογητής μέσω του οποίου γίνεται η επικοινωνία του

GPRS δικτύου και ενός άλλου δικτύου. Όταν ο GGSN λαμβάνει δεδομένα προς μετάδοση, ελέγχει αρχικά εάν ο χρήστης προς τον οποίο προορίζονται αυτά τα πακέτα έχει μία ενεργή GPRS σύνοδο. Στην περίπτωση αυτή, τα πακέτα των δεδομένων προωθούνται προς τον SGSN, προκειμένου να γίνει η παράδοσή τους στον συνδρομητή. Διαφορετικά, πραγματοποιείται καταστροφή αυτών των πακέτων. Από την άλλη πλευρά, εφόσον πρέπει να πραγματοποιηθεί παράδοση πακέτων από το GPRS δίκτυο προς ένα άλλο, εξωτερικό δίκτυο, αυτά τα πακέτα προωθούνται προς αυτό το εξωτερικό δίκτυο διαμέσου του GGSN.

3.6.4 EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution – 2.75G)

Η τεχνολογία EDGE έρχεται ως προσθήκη στην ήδη υπάρχουσα τεχνολογία GPRS [1][2][10][11]. Πρόκειται για μία, σχετικά, οικονομική προσθήκη για την παροχή ακόμη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Η κύρια απαίτηση για την υποστήριξή της είναι η αναβάθμιση των σταθμών βάσης με την προσθήκη των κατάλληλων πομποδεκτών. Κατόπιν, η ενεργοποίηση της λειτουργίας γίνεται μέσω λογισμικού από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο.

Όπως συμβαίνει και με τις τεχνολογίες CSD και HSCSD, οι διαφορετικοί τρόποι διαμόρφωσης και μετάδοσης των δεδομένων επιτρέπουν την ακόμη υψηλότερη ταχύτητα διαμεταγωγής τους.

Στις τηλεπικοινωνίες, η διαμόρφωση ενός σήματος ορίζεται ως η διαδικασία μεταβολής ενός περιοδικού και, συνήθως, υψηλής συχνότητας σήματος, προκειμένου να επιτευχθεί η μεταφορά, επάνω σε αυτό, ενός σήματος χαμηλής συχνότητας, το οποίο μεταφέρει τη μεταδιδόμενη πληροφορία.

Για την τεχνολογία EDGE χρησιμοποιείται η τεχνική διαμόρφωσης του ψηφιακού σήματος 8-PSK, συνήθως. Σύμφωνα με αυτήν την τεχνική, το ψηφιακό σήμα περνά από 8 φάσεις διαμόρφωσής του. Για τα 5 τελευταία σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησής του, χρησιμοποιείται η τεχνική 8-PSK, με αποτέλεσμα την παραγωγή μίας λέξης μήκους 3 bits. Κατ' επέκταση, τριπλασιάζεται ο διαθέσιμος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Και εδώ, χρησιμοποιείται ένα πλήθος έξυπνων αλγορίθμων διόρθωσης σφαλμάτων του μεταδιδόμενου σήματος, όπως συμβαίνει και με τις τεχνολογίες HSCSD και GPRS, το οποίο συμβάλλει στους υψηλότερους ρυθμούς διαμεταγωγής δεδομένων.

Από πλευράς πρωτοκόλλων διόρθωσης σφαλμάτων, η τεχνολογία EDGE εισάγει το πρωτόκολλο

HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest). Με το εν λόγω πρωτόκολλο, τα πακέτα κωδικοποιούνται μέσω ενός κώδικα **FEC (Forward Error Correction)**. Ουσιαστικά, προστίθενται πλεονάζοντα bits στα bits του κάθε πακέτου. Bits ισοτιμίας αποστέλλονται κατόπιν, είτε μαζί με το κωδικοποιημένο πακέτο ή μόνον αν ζητηθούν από τον παραλήπτη, στην περίπτωση καταστροφής του πακέτου. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται η πιθανότητα επαναποστολής πακέτων που περιέχουν λάθη. Άρα το ίδιο χρονικό διάστημα πραγματοποιείται μετάδοση περισσότερων “πραγματικών” δεδομένων, κάτι που οδηγεί σε αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης.

Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ανά χρονοθυρίδα ανέρχεται σε 59,4 kbps. Τυπικά, αφιερώνονται 4 χρονοθυρίδες ανά χρήστη, με αποτέλεσμα ο μέγιστος θεωρητικός ρυθμός μετάδοσης να ανέρχεται σε 197,6 kbps. Σε ορισμένες σπάνιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται έως και 8 χρονοθυρίδες ανά χρήστη, επιτυγχάνοντας ένα θεωρητικό μέγιστο ρυθμού μετάδοσης 395,2 kbps.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνολογία EDGE θεωρείται πρόγονος των δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς, σύμφωνα με τα όσα ορίζει η ITU για τις ελάχιστες προδιαγραφές τις οποίες πρέπει να φέρει μία τεχνολογία, ώστε να θεωρηθεί ότι ανήκει στην “ομπρέλα” τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, η ITU ορίζει πως ένα δίκτυο πρέπει να παρέχει έναν ελάχιστο ρυθμό λήψης δεδομένων της τάξης των 144 kbps, ώστε να θεωρηθεί πως ανήκει στα δίκτυα τρίτης γενιάς.

3.7 SMS (Short Message Service)

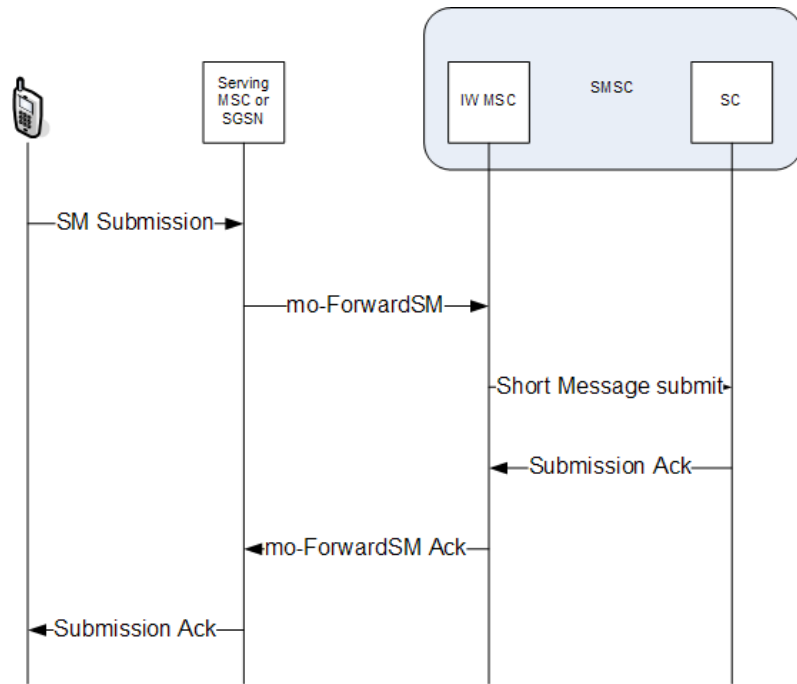
Με την προσθήκη της υπηρεσίας SMS [65] στα δίκτυα δεύτερης γενιάς, κατέστη δυνατή η αποστολή σύντομων γραπτών μηνυμάτων έως και 160 χαρακτήρων, αρχικά. Η βασική ιδέα περιελάμβανε την αξιοποίηση αδρανών πόρων του δικτύου, για την αποστολή σύντομων μηνυμάτων μεταξύ των συνδρομητών, το μέγεθος των οποίων θα ανέρχεται στα 160 bytes (ή, σε 160 χαρακτήρες, αν θεωρηθεί ότι ένας χαρακτήρας του συνόλου χαρακτήρων ASCII καταλαμβάνει 1 byte).

Το **ASCII (American Standard Code for Information Interchange)** είναι το βασικό σύνολο χαρακτήρων ενός κινητού τηλεφώνου, το οποίο περιλαμβάνει τα κεφαλαία και τα πεζά γράμματα A – Z, τα ψηφία 0 – 9 και ένα σύνολο ειδικών χαρακτήρων και σημείων στίξης, που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση των μηνυμάτων. Φυσικά, σε γλώσσες όπως είναι η Ελληνική, η οποία περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, και χαρακτήρες πέραν των χαρακτήρων της αγγλικής αλφαβήτου, χρησιμοποιούνται άλλα σύνολα χαρακτήρων, όπως είναι το σύνολο χαρακτήρων Unicode. Ωστόσο, στο σύνολο χαρακτήρων Unicode είθισται ένας χαρακτήρας να αναπαρίσταται από περισσότερα του 1 bytes. Συνεπώς, κατά τη χρήση χαρακτήρων από σύνολα χαρακτήρων διαφορετικών του συνόλου χαρακτήρων ASCII ενδέχεται να μειώνεται η διαθεσιμότητα των 160 χαρακτήρων ανά γραπτό μήνυμα. Εάν, για παράδειγμα, ένας χαρακτήρας του συνόλου χαρακτήρων Unicode χρησιμοποιεί 2 bytes για την αναπαράστασή του, το μέγιστο πλήθος των διαθέσιμων χαρακτήρων ανά γραπτό μήνυμα ανέρχεται σε 80. Για τον λόγο αυτό, όταν χρησιμοποιείται άλλο σύνολο χαρακτήρων, εκτός του ASCII, είναι συνήθης η επέκταση ενός γραπτού μηνύματος σε δύο ή και σε περισσότερα γραπτά μηνύματα, τα οποία αποστέλλονται όλα μαζί και κατόπιν συνενώνονται και παρουσιάζονται υπό τη μορφή ενός ενιαίου γραπτού μηνύματος στον παραλήπτη. Ωστόσο, εφαρμόζεται χρέωση από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο, η οποία αντιστοιχεί στο συνολικό πλήθος των απεσταλμένων μηνυμάτων.

Η υπηρεσία SMS τυποποιήθηκε από την 3GPP στην προδιαγραφή TS 23.040 και πρόκειται για ένα ακαταστασιακό (stateless) πρωτόκολλο υπό την έννοια ότι κάθε σύντομο γραπτό μήνυμα πρόκειται για μία ανεξάρτητη οντότητα. Επίσης, αποτελεί μία υπηρεσία best-effort. Αυτό σημαίνει πως η παράδοση των μηνυμάτων δεν είναι εγγυημένη πάντα, αν και πρακτικά το ποσοστό των μηνυμάτων που δεν φτάνουν ποτέ στον παραλήπτη ή που φτάνουν με αλλοιωμένο περιεχόμενο είναι σχεδόν μηδαμινό.

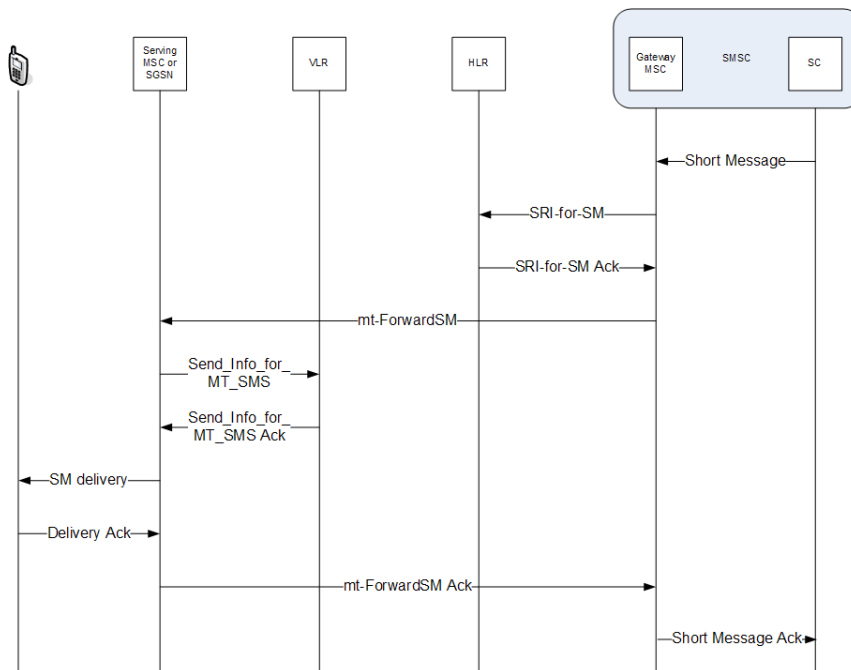
3.7.1 SMSC (Short Message Service Center)

Πρόκειται για την μονάδα διαχείρισης της υπηρεσίας των σύντομων γραπτών μηνυμάτων, η οποία προστίθεται στον υπάρχοντα δικτυακό εξοπλισμό. Όταν ένας χρήστης επιθυμεί να αποστείλει ένα SMS, αυτό κατευθύνεται προς το V-MSC ή προς το SGSN (αναλόγως εάν ένα δίκτυο υποστηρίζει ή όχι την υπηρεσία GPRS). Παράλληλα με το κείμενο του μηνύματος αποστέλλονται συνοδευτικά η διεύθυνση προορισμού (δηλ. ο τηλεφωνικός αριθμός του παραλήπτη), καθώς και η διεύθυνση του SMSC (δηλ. ο τηλεφωνικός αριθμός του κέντρου μηνυμάτων προς τον οποίο γίνεται η αποστολή του μηνύματος), η οποία ανακαλείται από την κάρτα SIM του συνδρομητή. Το γραπτό μήνυμα προωθείται αρχικά στο IW-MSC (Interworking MSC) που ανήκει στο V-MSC και η διεύθυνση του οποίου δηλώνεται από την κάρτα SIM του χρήστη. Στη συνέχεια, από το IW-MSC προωθείται προς το δίκτυο κορμού, προκειμένου να προωθηθεί ακολούθως προς το V-MSC στο οποίο συνδέεται ο παραλήπτης τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.



Σχήμα 25: Σχηματική αναπαράσταση αποστολής SMS

Όταν η V-MSC του παραλήπτη ανιχνεύσει ότι έχει μήνυμα προς αποστολή, το ενθυλακώνει σε ένα πακέτο, μαζί με τον αριθμό τηλεφώνου του παραλήπτη και με διάφορες άλλες πληροφορίες για το G-MSC, ώστε να πραγματοποιηθεί η παράδοσή του στον παραλήπτη. Το G-MSC επικοινωνεί εν συνεχεία με την HLR, προκειμένου να εντοπιστεί η τοποθεσία του παραλήπτη. Η HLR επιστρέφει στο G-MSC την τοποθεσία του παραλήπτη και, κατόπιν επιχειρείται η παράδοση του μηνύματος στον παραλήπτη από το G-MSC.



Σχήμα 26: Σχηματική αναπαράσταση λήψης SMS

3.8 MMS (Multimedia Messaging Service)

Με την έλευση της τεχνολογίας GPRS, ξεκίνησε η έναρξη της υπηρεσίας αποστολής μηνυμάτων πολυμέσων (MMS), [66] μέσω της οποίας οι χρήστες μπορούν να ανταλλάξουν μηνύματα που περιέχουν κείμενο, εικόνες, ήχους και videos. Η ανάπτυξη της υπηρεσίας MMS ξεκίνησε από τις ομάδες 3GPP και WAP και σήμερα συντηρείται από την **OMA (Open Mobile Alliance)**.

Ένα μήνυμα πολυμέσων αποστέλλεται ως μήνυμα **MIME (Multipurpose Internet Mail Extensions)**. Το MIME είναι ένα διαδικτυακό πρωτόκολλο, το οποίο χρησιμοποιούνταν αρχικά για την αποστολή και λήψη μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (e-mails), τα οποία μπορούσαν να περιέχουν τόσο στο σώμα όσο και στην κεφαλίδα τους διάφορα αρχεία πολυμέσων, εκτός από κείμενο. Η υπηρεσία MMS, κατά παρόμοιο τρόπο, ορίζει στην προδιαγραφή MMS Message Encapsulation τους τύπους των MIME μηνυμάτων, κατά τους οποίους αποστέλλονται τα MMS μηνύματα αναλόγως των περιεχομένων τους. Τα μηνύματα MMS λαμβάνονται, εν συνεχεία, από το **MMSC (Multimedia Messaging Service Center)**, το οποίο τα προωθεί στον παραλήπτη (εφόσον ο παραλήπτης ανήκει στον ίδιο τηλεπικοινωνιακό πάροχο). Σε διαφορετική περίπτωση, ο MMSC του αποστολέα, προωθεί το μήνυμα MMS στον MMSC του παραλήπτη, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την παράδοσή του στον παραλήπτη. Εφόσον η συσκευή του παραλήπτη είναι συμβατή με την υπηρεσία MMS, το περιεχόμενο του MMS μηνύματος εξάγεται και προωθείται προς έναν εξυπηρέτη αποθήκευσης. Ο εξυπηρέτης παράγει ένα μήνυμα SMS, το οποίο περιέχει ένα URL (Uniform Resource Locator – μία διεύθυνση στην οποία βρίσκεται αποθηκευμένο το περιεχόμενο του MMS μηνύματος) που χρησιμοποιείται από τον Web πλοηγό της τερματικής συσκευής του παραλήπτη, ώστε να ενεργοποιήσει την υπηρεσία λήψης MMS της τερματικής συσκευής του παραλήπτη για την καταφόρτωση του μηνύματος.

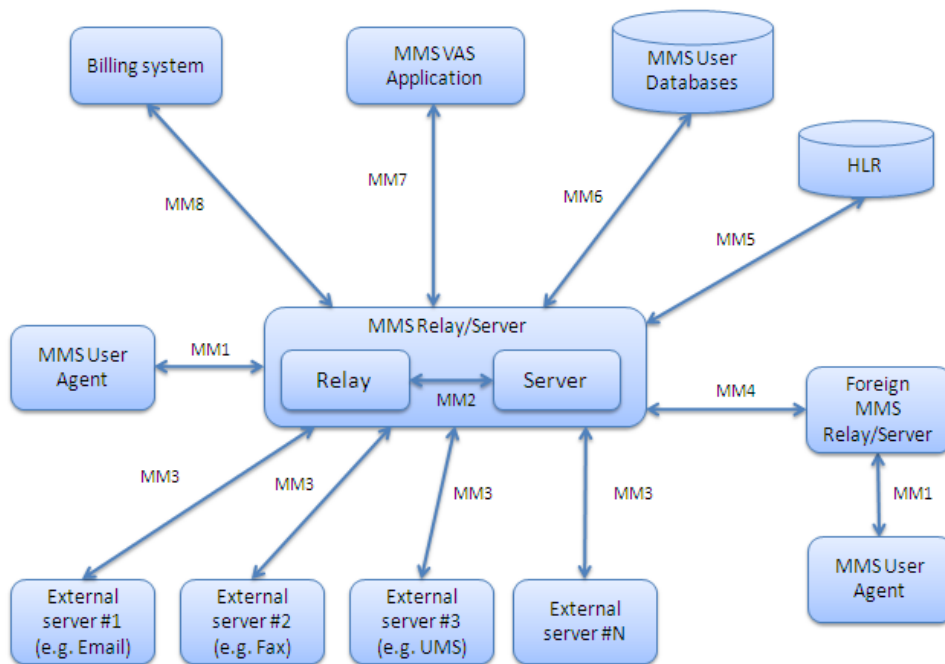
Στην περίπτωση ύπαρξης μη συμβατής, με την υπηρεσία MMS, συσκευής το περιεχόμενο του MMS μηνύματος γίνεται διαθέσιμο μέσω ενός Web εξυπηρέτη και η διεύθυνση URL αποστέλλεται στον παραλήπτη μέσω SMS μηνύματος, προκειμένου ο παραλήπτης να το προσπελάσει μέσω ενός Web πλοηγού.

Αρχιτεκτονική υπηρεσίας MMS

Η υπηρεσία MMS απαρτίζεται από ένα σύνολο διεπαφών επικοινωνίας, οι οποίες έχουν οριστεί από την 3GPP. Μία συνοπτική περιγραφή τους παρέχεται στη συνέχεια:

- Διεπαφή MM1: Η διεπαφή επικοινωνίας της τερματικής συσκευής και του MMSC, η οποία διακινεί πακέτα μέσω του πρωτοκόλλου HTTP (ακρωνύμιο).
- Διεπαφή MM2: Η διεπαφή επικοινωνίας του MMS Relay και του MMS Server. Η MMS Relay μεταφέρει τα μηνύματα πολυμέσων στην τερματική συσκευή και επικοινωνεί με τον MMS Server, ο οποίος παρέχει υπηρεσίες αποθήκευσης των περιεχομένων των μηνυμάτων πολυμέσων.
- Διεπαφή MM3: Η διεπαφή επικοινωνίας του MMSC με άλλα συστήματα επικοινωνίας μέσω μηνυμάτων (όπως είναι e-mail servers, fax servers κ.ά), η οποία χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο SMTP (Simple Mail Transfer Protocol).

- Διεπαφή MM4: Η διεπαφή επικοινωνίας του MMSC με το MMSC άλλων τηλεπικοινωνιακών παρόχων.
- Διεπαφή MM5: Η διεπαφή επικοινωνίας του MMSC με την HLR.
- Διεπαφή MM6: Η διεπαφή επικοινωνίας του MMSC με τη βάση δεδομένων της υπηρεσίας MMS, η οποία διατηρεί πληροφορίες αναφορικά με τους συνδρομητές που είναι εγγεγραμμένοι στην υπηρεσία MMS, καθώς και άλλες πληροφορίες, σχετικές με την υπηρεσία MMS.
- Διεπαφή MM7: Η διεπαφή επικοινωνίας του MMSC με άλλους παρόχους παροχής υπηρεσιών πρόσθετης αξίας (value-added services). Στην τυπική τους μορφή, αυτές οι υπηρεσίες υλοποιούνται ως μηνύματα push στις τερματικές συσκευές των συνδρομητών.
- Διεπαφή MM8: Η διεπαφή επικοινωνίας του MMSC και του συστήματος χρέωσης (billing system) του παρόχου.
- Διεπαφή MM9: Η διεπαφή επικοινωνίας του MMSC με το σύστημα χρέωσης, σε πραγματικό χρόνο, του παρόχου.
- Διεπαφή MM10: Η διεπαφή επικοινωνίας του MMSC με ένα σύστημα ελέγχου λειτουργίας των μηνυμάτων, το οποίο χρησιμοποιείται για την παροχή πρόσθετων υπηρεσιών, όπως είναι η αναφορά παράδοσης των MMS και η ένδειξη ανάγνωσης του μηνύματος.
- Διεπαφή MM11: Η διεπαφή επικοινωνίας του MMSC και εξωτερικών κωδικοποιητών.



Σχήμα 27: Αρχιτεκτονική και διεπαφές υπηρεσίας MMS

3.9 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρθηκαν βασικά υποσυστήματα των δικτύων δεύτερης γενιάς, αλλά και γενικά των ασύρματων δικτύων κυψελοειδούς τηλεφωνίας. Τα κυψελωτά δίκτυα δεύτερης γενιάς έφεραν σε επαφή τον κόσμο με την ασύρματη τηλεφωνία και κατέστησαν εφικτή την παροχή πολύ σημαντικών υπηρεσιών, οι οποίες θα άλλαζαν εκ βάθρου την καθημερινότητα των ανθρώπων στα επόμενα χρόνια. Ουσιαστικά, κανείς δεν ανέμενε την τόσο μεγάλη διεισδυτικότητα της κινητής τηλεφωνίας στις προσωπικές και επαγγελματικές ζωές, ούτε και την τρομερή εξέλιξη των παρεχόμενων υπηρεσιών που ακολούθησαν τα επόμενα χρόνια, με την έλευση των υπηρεσιών τρίτης γενιάς, οι οποίες έδωσαν τεράστια ώθηση στη χρήση του κινητού Διαδικτύου, σε πολύ μεγάλο βαθμό.

Κεφάλαιο 4: Δίκτυα τρίτης γενιάς

4.1 Εισαγωγή

Η τρίτη γενιά (**3G**) κινητής τηλεφωνίας αποτελεί τον απόγονο των τεχνολογιών δεύτερης γενιάς κινητής τηλεφωνίας. Ο όρος 3G αναφέρεται σε νέες δυνατότητες που μπορούν να προσφέρονται από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, όπως είναι η υψηλότερη χωρητικότητα και οι ενισχυμένες δικτυακές δυνατότητες οι οποίες επιτρέπουν τη λειτουργικών πολυμεσικών εφαρμογών και υπηρεσιών.

4.2 Γενικές πληροφορίες σχετικά με τα δίκτυα τρίτης γενιάς

Το παγκόσμιο πρότυπο για τις υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς αναφέρεται ως **IMT – 2000 (International Mobile Telecommunications – 2000)**, κατά την ITU, και ορίζει τη χρήση του φάσματος συχνοτήτων λειτουργίας του δικτύου, καθώς και διάφορα πρότυπα τεχνικής φύσεως [19]. Η τρίτη γενιά κινητής τηλεφωνίας χαρακτηρίζεται, κατά κύριο λόγο, από αισθητά υψηλότερες ταχύτητες πρόσβασης στο Διαδίκτυο και από καλύτερη ποιότητα φωνής. Επίσης, επιτυγχάνει συμμετρική και ασυμμετρική μετάδοση δεδομένων, πιο βελτιωμένη χρήση του φάσματος συχνοτήτων και οικονομίες κλίμακας, αναφορικά με την ανάπτυξη των δικτύων και των υπηρεσιών, καθώς χαρακτηρίζεται από ανοικτά πρότυπα.

Για την κατασκευή των δικτύων τρίτης γενιάς μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία προσέγγιση «από το μηδέν» (from the ground up) ή να τροποποιηθούν τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα δεύτερης γενιάς, ώστε να υποστηρίξουν την τρίτη γενιά κινητής τηλεφωνίας. Στην περίπτωση της πρώτης προσέγγισης, τα κόστη ανάπτυξης είναι υπέρογκα, συγκριτικά με τη δεύτερη προσέγγιση. Συνεπώς, η ανάπτυξη δικτύων τρίτης γενιάς από το μηδέν αφορά μόνον νέους παρόχους.

Όσον αφορά την Ελλάδα, η βασική συχνότητα λειτουργίας των UMTS δικτύων, ορίστηκε να είναι τα 2100 MHz. Πρόκειται για μία συχνότητα με, σχετικά μικρή διαπερατότητα, όσον αφορά εμπόδια, αλλά ικανή για την υποστήριξη υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης. Στην πορεία, προστέθηκε και η δυνατότητα χρήσης της συχνότητας των 900 MHz, για την παροχή υπηρεσιών τρίτης γενιάς, η οποία χαρακτηρίζεται από πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια, ωστόσο οι ταχύτητες μετάδοσης είναι σημαντικά χαμηλότερες.

Αξίζει να σημειωθεί πάντως, πως από το 2019 και έπειτα, ξεκίνησε μία διαδικασία re-farming (ανακατανομή) του φάσματος συχνοτήτων, που είχε ανατεθεί αρχικά στους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους για τις υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς, τόσο στην Ευρώπη, όσο και ειδικότερα στην Ελλάδα. Πιο συγκεκριμένα, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι ξεκίνησαν σταδιακά την απενεργοποίηση των υπηρεσιών τρίτης γενιάς, με την έλευση των υπηρεσιών τέταρτης και πέμπτης γενιάς και όλο το φάσμα συχνοτήτων στα 2100 MHz και στα 900 MHz ανακατανομήθηκε στα δίκτυα 4G και 5G, για την παροχή υπηρεσιών υψηλότερης ποιότητας, καθώς με τον τρόπο αυτόν αυξάνεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Δεν υπήρχε ανάγκη πλέον, άλλωστε, για την υποστήριξη υπηρεσιών τρίτης γενιάς, καθώς τα 4G και 5G κινητά δίκτυα, παρέχουν βελτιωμένο τρόπο λειτουργίας και βελτιωμένες υπηρεσίες. Ωστόσο, λόγω συμβατότητας με πολλές τερματικές συσκευές, αλλά και λόγω της φύσης λειτουργίας του, παρέμεινε εν ενεργεία το 2G κομμάτι των δικτύων όλων των τηλεπικοινωνιακών παρόχων, για την παροχή υπηρεσιών σε απαρχαιωμένες (legacy) συσκευές, οι

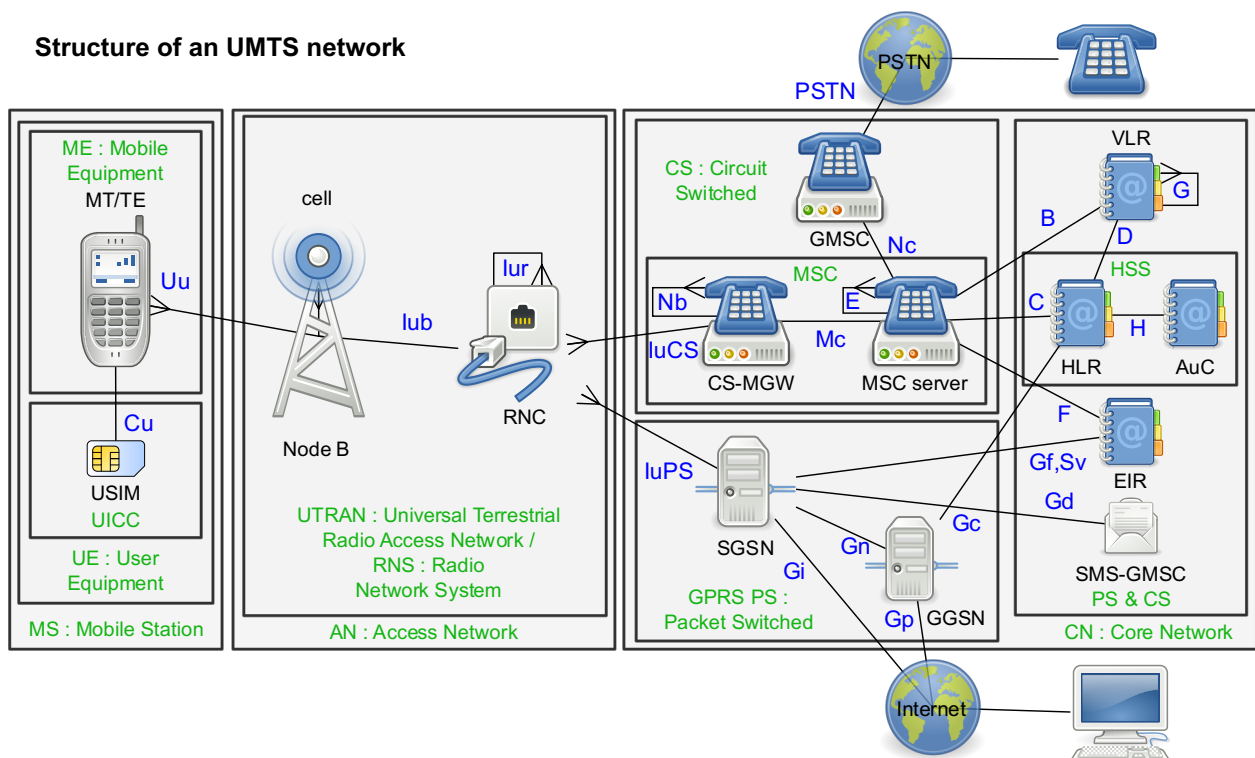
οποίες δεν απαιτούν διακίνηση δεδομένων (ή η ποσότητα των διακινούμενων δεδομένων είναι πολύ μικρή και καλύπτεται από τις προδιαγραφές των 2G δικτύων).

4.3 Βασικά συστατικά στοιχεία δικτύων τρίτης γενιάς

Από την πλευρά της ITU, οι προδιαγραφές τις οποίες έπρεπε, αρχικά, να υποστηρίξει ένα σύστημα, ώστε να θεωρείται τρίτης γενιάς είναι η μέγιστη ταχύτητα των 2 Mbps για τους σταθερούς σταθμούς βάσης και των 144 kbps για τις τερματικές συσκευές, οι οποίες βρίσκονται εν κινήσει.

Η τρίτη γενιά κινητής τηλεφωνίας περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνολογιών, οι οποίες υλοποιούνται με διαφορετικό τρόπο στις διάφορες χώρες και ηπείρους. Στην Ευρώπη, στην Ιαπωνία και στην Κίνα έχει επιλεγθεί η τεχνολογία **UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)**. Στην Ευρώπη χρησιμοποιείται η τεχνική προσπέλασης του μέσου μετάδοσης **W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access)**, ενώ στην Κίνα βρίσκεται σε χρήση η τεχνική προσπέλασης **TD-SCDMA (Time-Division Synchronous Code-Division Multiple Access)**.

Στην βόρεια Αμερική και στην Νότια Κορέα έχει επιλεγθεί η τεχνολογία **CDMA2000**.



Σχήμα 28: Δομή ενός UMTS δικτύου

4.3.1 UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network)

Ο γενικός όρος του δικτύου και του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στα δίκτυα τρίτης γενιάς για τη σύνδεση των κινητών τερματικών συσκευών προς το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο ή προς το Διαδίκτυο είναι **UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network)**. Σε αυτόν τον όρο συμπεριλαμβάνονται οι

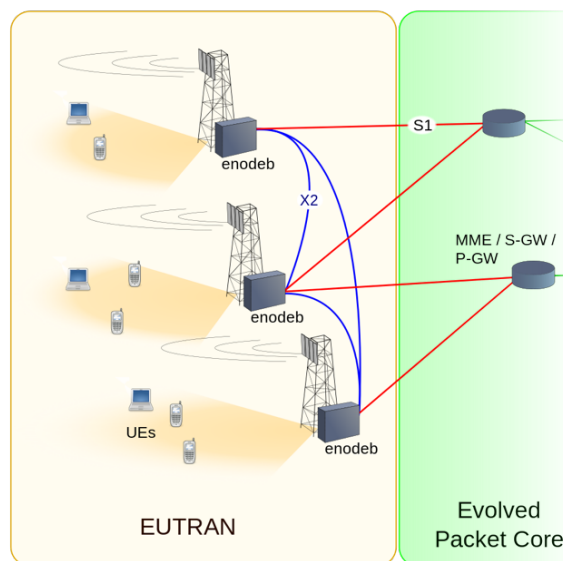
σταθμοί βάσης και οι **RNC (Radio Network Controller)**, από τα οποία απαρτίζεται το ραδιοδίκτυο πρόσβασης UMTS. Ουσιαστικά, ένα δίκτυο UMTS υποστηρίζει τόσο μεταγωγή πακέτου όσο και μεταγωγή κυκλώματος, αναλόγως της κίνησης που πρέπει να πραγματοποιηθεί ανά πάσα χρονική στιγμή (φωνητικές κλήσεις ή ανταλλαγή δεδομένων) [20][21].

Ο σταθμός βάσης σε ένα UMTS δίκτυο καλείται, πλέον, **Node B**. Ο RNC εκτελεί διάφορες λειτουργίες ελέγχου για ένα ή και περισσότερα Node B. Σε ένα UMTS δίκτυο μπορούν να υφίστανται περισσότεροι του ενός RNC. Όσον αφορά τη διάταξη των Node B και των RNC, αυτές οι συσκευές μπορούν να αποτελούν ένα ενιαίο τμήμα ή ένας RNC μπορεί να βρίσκεται σε μία κεντρική τοποθεσία και να εξυπηρετεί ένα ή και περισσότερα Node B. Ωστόσο, ασχέτως της διάταξής τους, επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω μίας διεπαφής, η οποία ονομάζεται IuB. Συγκεντρωτικά, ένα RNC καθώς και όλα τα Node B με τα οποία επικοινωνεί ονομάζονται **RNS (Radio Network Subsystem)**.

Εκτός της εσωτερικής λογικής διεπαφής IuB, μέσω της οποίας επικοινωνούν ένα Node B με το RNC στο οποίο ανήκει, υπάρχουν 3 ακόμη διεπαφές:

- Η εξωτερική λογική διεπαφή Iu διασυνδέει το RNC με τον πυρήνα του δικτύου.
- Η εξωτερική λογική διεπαφή IUu διασυνδέει ένα Node B με τον τερματικό εξοπλισμό.
- Η εσωτερική λογική διεπαφή IUr διασυνδέει δύο Node B και σε ορισμένες δικτυακές αρχιτεκτονικές, ενδέχεται να υλοποιείται εναλλακτικά ως εξωτερική.

Πρέπει να σημειωθεί πως ο πυρήνας ενός δικτύου GSM/EDGE και ενός δικτύου UMTS μπορεί να είναι διαμοιραζόμενος. Αυτό σημαίνει πως σε αυτές τις περιπτώσεις, παρατηρείται αλλαγή μόνο στο **RAN (Radio Access Network)** και το εκάστοτε RAN επικοινωνεί με «διάφανο» τρόπο με τον πυρήνα του δικτύου, μέσω των προκαθορισμένων λογικών και φυσικών διεπαφών. Άλλωστε, το EDGE τμήμα ενός δικτύου GSM/EDGE αποτελεί τμήμα της προδιαγραφής IMT-2000 και αποτελεί τον πρόδρομο των δικτύων τρίτης γενιάς, καθώς εμπίπτει στις ελάχιστες προδιαγραφές που θέτει η ITU για το πρότυπο IMT-2000.



Σχήμα 29: EUTRAN και Evolved Packet Core

4.3.2 UE (User Equipment)

Με τον όρο **UE (user equipment – εξοπλισμός χρήστη)** αναφερόμαστε σε κάθε τερματική συσκευή χρήστη, η οποία επικοινωνεί μέσω ενός UMTS δικτύου [12] [22]. Συνδέεται με τον σταθμό βάσης (Node B) μέσω της εξωτερικής λογικής διεπαφής IUm κάνοντας χρήση των προδιαγραφών **ETSI 125/136-series** και **3GPP 25/36-series**. Ο τερματικός εξοπλισμός είναι υπεύθυνος για τη διεκπεραίωση των φωνητικών κλήσεων και των συνόδων Internet και για τη διαχείριση της κινητότητας του χρήστη και της ταυτότητάς του, ενώ εφαρμόζεται σε αυτόν η πλήρης στοίβα πρωτοκόλλων πέντε επιπέδων του Διαδικτύου (φυσικό, ζεύξης δεδομένων, δικτύου, μεταφοράς, εφαρμογής). Στον τερματικό εξοπλισμό περιλαμβάνονται τα κινητά τηλέφωνα, τα modems κ.ά.

Στο επίπεδο του εξοπλισμού χρήστη υλοποιούνται κατά κύριο λόγο 4 πρωτόκολλα: το πρωτόκολλο **RRC (Radio Resource Control)**, το πρωτόκολλο **PDCP (Packet Data Convergence Protocol)**, το πρωτόκολλο **RLC (Radio Link Control)** και το πρωτόκολλο **MAC (Medium Access Protocol)**.

- **RRC (Radio Resource Control)**

Το πρωτόκολλο RRC υλοποιείται στο τρίτο επίπεδο (επίπεδο δικτύου) του προτύπου OSI και χρησιμοποιείται για την επικοινωνία της τερματικής συσκευής με τον σταθμό βάσης. Για τα δίκτυα τρίτης γενιάς υλοποιείται από την 3GPP με την προδιαγραφή TS 25.331.

Στις βασικές λειτουργίες του πρωτοκόλλου RRC περιλαμβάνονται η εγκαθίδρυση μίας σύνδεσης και ο τερματισμός της, η μετάδοση πληροφοριών που αφορούν τον συνδεδεμένο με το δίκτυο τερματικό εξοπλισμό, ο καθορισμός των ιδιοτήτων που συσχετίζονται με τη μετάδοση των δεδομένων μέσω μίας σύνδεσης και οι αποφάσεις που συσχετίζονται με τη μεταπομπή μεταξύ σταθμών βάσης.

Ένας τερματικός εξοπλισμός μπορεί να βρίσκεται σε διάφορες καταστάσεις και αυτές οι καταστάσεις καθοδηγούν το πρωτόκολλο RRC ως προς την εκτέλεση των λειτουργιών του. Οι διάφορες καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκεται ο εξοπλισμός χρήστη έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή δεδομένων σε διαφορετικές ποσότητες. Αυτές οι διαφορετικές ποσότητες δεδομένων, με τη σειρά τους, επηρεάζουν την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας και, κατ' επέκταση, της κατανάλωσης ενέργειας από τον τερματικό εξοπλισμό. Είναι σημαντική η παροχή αυτών των διαφορετικών καταστάσεων στις οποίες μπορεί να μεταπίπτει ο εξοπλισμός χρήστη, καθώς καθιστούν πιο αποτελεσματική τη διαχείριση των πεπερασμένων πόρων ενός δικτύου.

Οι 3 πιο συνηθισμένες και πιο σημαντικές καταστάσεις στις οποίες ενδέχεται να βρεθεί ο εξοπλισμός χρήστη είναι οι εξής:

- **Κατάσταση IDLE:** Είναι η προκαθορισμένη κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο εξοπλισμός χρήστη όταν ενεργοποιείται. Στην κατάσταση αυτή δεν υφίσταται σύνδεση με τον Node B μέσω του πρωτοκόλλου RRC και, κατ' επέκταση, δεν πραγματοποιείται διακίνηση δεδομένων. Συνεπώς, δεν σπαταλούνται πόροι του ραδιοδικτύου. Η κατανάλωση ενέργειας από την τερματική συσκευή είναι η απειροελάχιστη δυνατή.
- **Κατάσταση CELL_DCH:** Στην κατάσταση αυτή, ο εξοπλισμός χρήστη έχει συνδεθεί με τον Node B, επιτρέπεται η πλήρης αξιοποίηση των πόρων του ραδιοδικτύου και είναι διαθέσιμος για την αποστολή και για τη λήψη δεδομένων. Η κατανάλωση ενέργειας από την τερματική συσκευή κυμαίνεται μεταξύ του 50% και του 100% της κατανάλωσης στην κατάσταση IDLE, εφόσον απαιτηθεί.

- Κατάσταση **CELL_FACH**: Στην κατάσταση αυτή, ο εξοπλισμός χρήστη έχει συνδεθεί με τον Node B, αλλά λόγω εξάντλησης των πόρων του ραδιοδικτύου δεν υπάρχει διαθέσιμο κανάλι επικοινωνίας για την ανταλλαγή δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή, η τερματική συσκευή συνδέεται με δευτερεύοντα κανάλια επικοινωνίας, χαμηλού ρυθμού διαμεταγωγής δεδομένων, ο οποίος δεν υπερβαίνει τα 15 kbps. Η κατάσταση αυτή είναι χρήσιμη για ορισμένες εφαρμογές με πολύ μικρή κίνηση δεδομένων, ιδίως όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι στο δίκτυο. Η καταπάλωση ενέργειας από την τερματική συσκευή είναι σημαντικά χαμηλότερη συγκριτικά με την κατάσταση CELL_DCH.
- **RLC (Radio Link Control)**

Το πρωτόκολλο RLC υλοποιείται στο δεύτερο επίπεδο (επίπεδο ζεύξης δεδομένων) του προτύπου OSI και βρίσκεται κάτω από το πρωτόκολλο RDCP. Στις λειτουργίες του συγκαταλέγονται – μεταξύ άλλων – οι εξής: η κατάτμηση των PDU (δεδομενογραμμάτων) στην πλευρά αποστολής, η ανασύνθεσή τους στην πλευρά λήψης, η μεταφορά των PDU του τρίτου επιπέδου σε τρεις καταστάσεις (**Acknowledged mode – AM, Unacknowledged mode – UM, Transparent mode – TM**), διόρθωση σφαλμάτων μετάδοσης (μόνο για την κατάσταση AM), ανίχνευση διπλότυπων PDU (μόνο για τις καταστάσεις AM και UM) και ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων μετάδοσης αυτού καθ' εαυτού του πρωτοκόλλου, μέσω της χρήσης ενός πρωτοκόλλου ARQ. Για τα δίκτυα τρίτης γενιάς υλοποιείται από την 3GPP με την προδιαγραφή **TS 25.322**.

- **PDCP (Packet Data Convergence Protocol)**

Το πρωτόκολλο PDCP υλοποιείται πάνω από το πρωτόκολλο RLC και κάτω από το πρωτόκολλο IP. Τυποποιείται από την 3GPP στην προδιαγραφή **TS 25.323**. Η βασική λειτουργία του είναι η συμπίεση των κεφαλίδων των IP πακέτων – και για τον λόγο αυτό μεταφράζεται ως Πρωτόκολλο Σύγκλισης Δεδομένων Πακέτου. Ο βασικός σκοπός της συμπίεσης είναι η μείωση του πλήθους των μεταδιδόμενων bits. Το πρωτόκολλο PDCP παρέχει τις υπηρεσίες του στο RRC, καθώς και στο επίπεδο χρήστη. Εφόσον το PDCP ρυθμιστεί ώστε να συμπιέζει τα δεδομένα, προστίθεται σε αυτά μία PDCP κεφαλίδα και, κατόπιν, τα πακέτα αποστέλλονται. Εκτός της συμπίεσης δεδομένων, άλλες λειτουργίες του πρωτοκόλλου PDCP περιλαμβάνουν την κωδικοποίηση δεδομένων, την ασφάλεια της ακεραιότητάς τους από μη εξουσιοδοτημένες παρεμβάσεις, τη μεταφορά των δεδομένων του χρήστη και τη μεταφορά δεδομένων του επιπέδου ελέγχου του πρωτοκόλλου IP.

- **MAC (Medium Access Control)**

Το πρωτόκολλο MAC ελέγχει τον χρονοπρογραμματισμό μετάδοσης, δηλαδή τη διαδικασία που εκκινεί μία τερματική συσκευή για τη σύνδεση με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας και τη χρήση των χρονοθυρίδων μετάδοσης του ραδιοδικτύου. Επίσης, εκτελεί διάφορες λειτουργίες ελέγχου σφαλμάτων και διόρθωσής τους.

4.4 HSPA (High Speed Packet Access – 3.5G)

Η τεχνολογία HSPA επεκτείνει τις δυνατότητες ενός UMTS δικτύου, βελτιώνοντας τις ταχύτητες πρόσβασης όπως και την απόδοσή του. Ουσιαστικά, η τεχνολογία HSPA περικλείει δύο επιμέρους τεχνολογίες: την **HSDPA (High Speed Downlink Packet Access)** και την **HSUPA (High Speed Uplink Packet Access)** και εισήχθη με την Προδιαγραφή 5 (**Release 5**) [30] του 3GPP.

Η αρχική προδιαγραφή της προσθήκης HSPA επιτάσσει μέγιστη θεωρητική ταχύτητα στο συρρευματικό κανάλι έως και 14.4 Mbps και στο αντιρρευματικό κανάλι έως και 5,76 Mbps. Στα πλεονεκτήματα χρήσης του HSPA είναι η μείωση του χρόνου καθυστέρησης (latency) και η αύξηση της χωρητικότητας (έως 5 φορές στο συρρευματικό κανάλι και έως 2 φορές στο αντιρρευματικό κανάλι). Ως εκ τούτου, ένα έμμεσο πλεονέκτημα είναι η ελάττωση του κόστους ανά μεταδιδόμενο bit, κάτι που επιτρέπει την παροχή πιο οικονομικών υπηρεσιών από πλευράς παρόχων. Αμφότερες οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούν ένα διαμοιραζόμενο, από τους χρήστες, κανάλι αποστολής/λήψης.

Τόσο το HSDPA όσο και το HSUPA λειτουργούν με μία τεχνική «προγραμματισμού πακέτων». Βάσει αυτής της τεχνικής, αποφασίζεται ποια πακέτα είναι περισσότερο σημαντικά προς αποστολή ή/και λήψη και η διακίνησή τους τίθεται σε προτεραιότητα. Ωστόσο, είναι δυνατή η διακίνηση πακέτων δεδομένων χωρίς την τεχνική του «προγραμματισμού πακέτων», όπου ο εξοπλισμός χρήστη «ζητάει» άδεια αποστολής δεδομένων από τον χρονοπρογραμματιστή (scheduler) του δικτύου, κατ' εξαίρεση, εφόσον θεωρείται ότι έχει σημαντικά δεδομένα προς αποστολή. Ο scheduler κατόπιν αποφασίζει για την παραχώρηση της άδειας αυτής. Κατά την αποστολή ενός αιτήματος αποστολής δεδομένων, αποστέλλονται προς τον scheduler του δικτύου πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος των δεδομένων που βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής προς αποστολή και για το power margin της συσκευής, το οποίο διατηρεί τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SIR – Signal-to-Interference Ratio) σε αποδεκτά επίπεδα. Η λειτουργία αυτή είναι χρήσιμη, ιδίως στην περίπτωση χρήσης VoIP υπηρεσιών, όπου πρέπει η διακίνηση των πακέτων δεδομένων να είναι όσο το δυνατόν αμεσότερη και με λιγότερα σφάλματα, για την επίτευξη καλής ποιότητας επικοινωνίας.

- **Link adaptation**

Ο όρος link adaptation χρησιμοποιείται για την περιγραφή της δυναμικής προσαρμογής ενός ασύρματου δικτύου, βάσει των δεδομένων συνθηκών μετάδοσης στο φυσικό μέσο και πραγματοποιείται με τη χρήση διαφόρων τεχνικών, όπως είναι το power control στους σταθμούς βάσης και η προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση (**ACM – Adaptive Coding and Modulation**). Για τη δυναμική προσαρμογή αξιοποιούνται διάφορες παράμετροι της ραδιοζεύξης, όπως είναι η εξασθένιση του σήματος (path loss), οι παρεμβολές από γειτονικές κεραιές και η ευαισθησία του δέκτη της τερματικής συσκευής, μεταξύ άλλων. Συνεπώς, λαμβάνεται υπόψη η ποιότητα του μέσου μετάδοσης και βάσει αυτής αποφασίζεται με δυναμικό τρόπο ο τρόπος μετάδοσης του σήματος.

Στα HSPA δίκτυα, η δυναμική προσαρμογή πραγματοποιείται επιλέγοντας δυναμικά τον τύπο διαμόρφωσης και τον ρυθμό του κώδικα FEC.

Κάθε τύπος διαμόρφωσης έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία απεικονίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των QPSK και 16QAM

QPSK	16QAM
Προτιμάται για κανάλια με υψηλό θόρυβο	Προτιμάται για κανάλια με χαμηλό θόρυβο
Πιο εύρωστος τύπος διαμόρφωσης	Πιο ευαίσθητος τύπος διαμόρφωσης
Υψηλότερη ανθεκτικότητα σε παρεμβολές	Χαμηλότερη ανθεκτικότητα σε παρεμβολές
Λιγότερη εκμετάλλευση εύρους ζώνης	Αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση εύρους ζώνης
Ασθενέστερος κώδικας FEC	Ισχυρότερος κώδικας FEC
Περισσότερη χρήσιμη μεταδιδόμενη πληροφορία, λόγω λιγότερων redundant bits	Λιγότερη χρήσιμη μεταδιδόμενη πληροφορία, λόγω επιπρόσθετων redundant bits

Όσον αφορά τον ρυθμό του FEC κώδικα, αυτός εξαρτάται από τις συνθήκες μετάδοσης. Σε πολύ καλές συνθήκες μετάδοσης, μέσω καθαρών καναλιών της ραδιοζεύξης, αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης της χρήσιμης πληροφορίας, καθώς τα redundant bits για τη διόρθωση σφαλμάτων, είναι λιγότερα. Όσο μειώνεται η καθαρότητα του καναλιού μετάδοσης, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μετάδοσης redundant bits, άρα μειώνεται η ταχύτητα μετάδοσης.

- **TTI (Transmission Time Interval)**

Το χρονικό διάστημα μετάδοσης (TTI - Transmission Time Interval) αναφέρεται στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη μετάδοση ενός πλαισίου του δευτέρου επιπέδου του προτύπου OSI στο φυσικό επίπεδο. Στην τεχνολογία UMTS, η τιμή του είναι κυμαινόμενη, μεταξύ των 10 ms, 20 ms, 40 ms και 80 ms, σύμφωνα με τα όσα ορίζονται στην Προδιαγραφή 99 (**Release 99**). [51]

Καθώς υφίστανται σφάλματα κατά τη μετάδοση πακέτων, τα οποία οφείλονται στην εξασθένηση του σήματος και στις παρεμβολές που δέχεται μία ραδιοζεύξη, τα δεδομένα προς μετάδοση διαχωρίζονται σε τμήματα και κατόπιν, τα bits κάθε τμήματος, κωδικοποιούνται και υφίστανται τη διαδικασία interleaving (η οποία οδηγεί σε αποτελεσματικότερη διόρθωση σφαλμάτων μετάδοσης, όταν αυτά συμβαίνουν κατά ρυπάς, παρά μεμονωμένα). Ο όρος TTI συνεπώς, αναφέρεται σε αυτό το χρονικό διάστημα μετάδοσης κάθε τμήματος. Από την πλευρά του δέκτη, πρέπει να ληφθούν πρώτα όλα τα bits ενός τμήματος και στη συνέχεια, υφίστανται αποκωδικοποίηση και τη διαδικασία του de-interleaving, ώστε να διορθωθούν τυχόντα σφάλματα μετάδοσης. Αφού κωδικοποιηθούν όλα τα bits του αφιχθέντος τμήματος, είναι δυνατός ο υπολογισμός του ρυθμού μετάδοσης σφαλμάτων (**BER – Bit Error Rate**) ανά TTI. Με βάση αυτήν την τιμή, καθώς και με τη χρήση και άλλων παραμέτρων, μπορεί να παρθεί απόφαση σχετικά με την προσαρμογή του καναλιού μετάδοσης (link adaptation). Γίνεται αντιληπτό, πως όσο μικρότερη είναι η τιμή του TTI, τόσο γρηγορότερη είναι η προσαρμογή του καναλιού μετάδοσης στις συνθήκες μετάδοσης, καθώς αξιολογείται γρήγορα το BER, άρα μπορεί να ληφθεί πιο γρήγορα η απόφαση για την προσαρμογή του καναλιού μετάδοσης.

Στην προσθήκη HSPA, το TTI ορίζεται σε μόλις 2 ms με την προδιαγραφή 5 (**Release 5**) [30]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πιθανότητα μετάδοσης «ορθών» δεδομένων πιο γρήγορα, συγκριτικά με την Release 99 του UMTS, καθώς είναι ικανή η ταχύτερη ανίχνευση των σφαλμάτων μετάδοσης και κατ' επέκταση, τα πακέτα επαναποστέλονται γρηγορότερα. Επίσης, ο scheduler του δικτύου μπορεί να ανιχνεύσει, ακόμη πιο γρήγορα, κανάλια μετάδοσης της ραδιοζεύξης, τα οποία είναι καθαρότερα από πλευράς σηματολογικού θορύβου και παρεμβολών και να αποστείλει τα δεδομένα μέσω αυτών των

εναλλακτικών καναλιών. Οι πολύ χαμηλές τιμές του TPI έχουν ως αποτέλεσμα την συνολικά ταχύτερη μετάδοση δεδομένων και ως εκ τούτου, γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της χωρητικότητας της ραδιοζεύξης, με αποτέλεσμα την αύξησή της.

4.4.1 HSDPA (High Speed Downlink Packet Access)

Προκειμένου να επιτευχθούν οι προαναφερθείσες βελτιώσεις, έχουν γίνει τροποποιήσεις τόσο στον τρόπο μετάδοσης του σήματος όσο και προσθήκη νέων τεχνικών στοιχείων.

Αρχικά, πρέπει να τονιστεί το γεγονός πως δεν απαιτείται η τροποποίηση των υπαρχόντων σταθμών βάσης με την προσθήκη εξοπλισμού, αλλά η αναβάθμιση του λογισμικού τους από τον πωλητή.

Όσον αφορά τους τρόπους μετάδοσης του σήματος, στο HSDPA χρησιμοποιείται η διαμόρφωση σήματος **16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)**. Σε αυτού του είδους τη διαμόρφωση ένα φέρον σήμα που ανήκει σε μία σταθερή συχνότητα μπορεί να βρεθεί σε μία από δεκαέξι διαφορετικές καταστάσεις. Κάθε μία κατάσταση καλείται σύμβολο. Σε κάθε σύμβολο μπορούν να περιέχονται έως και 4 bits (0 και 1). Στο πρότυπο W-CDMA, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιείται η διαμόρφωση σήματος **QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying)**, με την οποία κάθε σύμβολο μπορεί να περιέχει έως και 2 bits. Συνεπώς, με την διαμόρφωση 16-QAM μπορεί να επιτευχθεί μετάδοση μεγαλύτερου πλήθους bits την ίδια χρονική στιγμή. Οι σταθμοί βάσης μπορούν να εναλλάξουν τον τρόπο κωδικοποίησης του φέροντος σήματος μεταξύ των διαμορφώσεων QPSK και 16-QAM, αναλόγως της ποιότητας του σήματος. Είναι προφανές πως:

1. όσο πιο «καθαρό» από παρεμβολές είναι ένα κανάλι επικοινωνίας
2. όσο πιο κοντά στο σταθμό βάσης βρίσκεται ένας συνδρομητής και
3. όσο μικρότερη είναι η «κίνηση» της κυψέλης

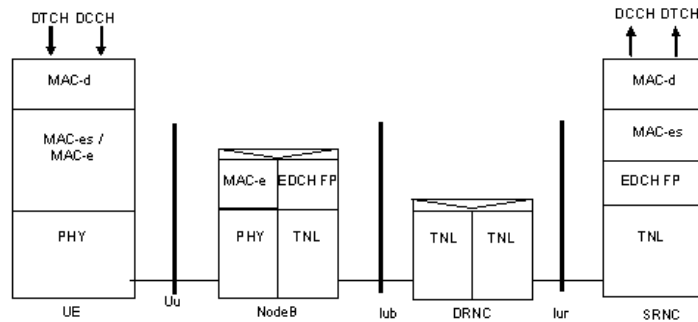
τόσο πιο πιθανή είναι η χρήση της τεχνικής διαμόρφωσης 16-QAM, κάτι που σημαίνει ότι ο χρήστης λαμβάνει την HSDPA υπηρεσία.

Βελτίωση στις παρεχόμενες υπηρεσίες παρέχεται και λόγω βελτιωμένων τεχνικών χρονοδρομολόγησης (scheduling). Εάν ένας συνδρομητής «ζητάει» πρόσβαση σε δεδομένα το ραδιοδίκτυο αφιερώνει περισσότερο χρόνο στην εξυπηρέτησή του, συγκριτικά με άλλους συνδρομητές οι οποίοι δεν ζητούν δεδομένα ή η ζήτησή τους είναι πολύ μικρή.

Ο τρόπος χειρισμού των λαθών που συμβαίνουν κατά την επικοινωνία είναι αλλαγμένος. Ειδικότερα, η τεχνική HARQ συνδυάζει τις τεχνικές FEC και ARQ (Automatic Repeat Request) προκειμένου να πραγματοποιείται σε ταχύ χρόνο η διόρθωση λαθών επικοινωνίας, ιδίως σε συνθήκες κακής λήψης σήματος, καθώς και η επαναμετάδοση των λανθασμένων δεδομένων.

4.4.2 HSUPA (High Speed Uplink Packet Access)

Η τεχνολογία HSUPA εισήχθη με την Προδιαγραφή 6 (**Release 6**) [52] του 3GPP και ο κύριος σκοπός της είναι η αύξηση χωρητικότητας του αντιστρευματικού καναλιού (uplink), καθώς και η αύξηση της ταχύτητάς του σε ένα θεωρητικό μέγιστο στα 5,76 Mbps. Συνδυαστικά με βελτιώσεις που αναφέρονται στη συνέχεια επιτρέπει τη χρήση υπηρεσιών VoIP (Voice over IP), καθώς και την αναφόρτωση (uploading) μεγάλων – σε μέγεθος – αρχείων.



Σχήμα 30: Διεπαφές υπηρεσίας HSUPA

Με την τεχνολογία HSUPA εισάγεται ένα νέο κανάλι μεταφοράς δεδομένων στο πρότυπο W-CDMA, το οποίο ονομάζεται **E-DCH (Enhanced Dedicated Channel)**. [41] Η προσθήκη του E-DCH επιτρέπει γρήγορη μετάδοση δεδομένων, μειώνοντας τις χρονικές καθυστερήσεις. Για την τεχνολογία HSUPA χρησιμοποιείται η τεχνική διαμόρφωσης του φέροντος σήματος BPSK.

Προκειμένου να μεταφερθούν δεδομένα μέσω του E-DCH απαιτείται να πραγματοποιηθούν ορισμένες τροποποιήσεις στο υπάρχον δίκτυο. Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι στην πλευρά του εξοπλισμού χρήστη (UE) υπάρχει το υπόστρωμα MAC, το οποίο ανήκει στο 2^ο επίπεδο του προτύπου OSI και, συνδυαστικά, με το υπόστρωμα LLC, σχηματίζουν το επίπεδο ζεύξης, που είναι αρμόδιο για την επικοινωνία του εξοπλισμού του χρήστη με το φυσικό μέσο μετάδοσης. Αυτό το MAC υπόστρωμα αναφέρεται ως MAC-d. Στην τεχνολογία HSUPA εισάγεται μεταξύ του φυσικού (πρώτου) επιπέδου και του υποστρώματος MAC-d ένα νέο υπόστρωμα που ονομάζεται MAC-e. Αυτό το νέο υπόστρωμα είναι υπεύθυνο για τον χειρισμό των επαναμεταδόσεων μέσω της τεχνικής HARQ, για τον χρονοπρογραμματισμό και για τον χειρισμό της πολυπλεξίας.

Στην πλευρά του σταθμού βάσης εισάγεται επίσης ένα υπόστρωμα τύπου MAC-e για τον χειρισμό των επαναμεταδόσεων μέσω της τεχνικής HARQ, για τον χρονοπρογραμματισμό και για τον χειρισμό της αποπολυπλεξίας.

Τέλος, στην πλευρά του SRNC εισάγεται ένα υπόστρωμα MAC-es για την επαναδιάταξη των, προς αποστολή, δεδομένων. Πρέπει να σημειωθεί ότι ως SRNC ορίζεται η σύνδεση ενός RNC με ένα RRC. Ουσιαστικά, το SRNC είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση μίας κινητής τερματικής συσκευής εντός του UTRAN και αποτελεί το σημείο σύνδεσης με το δίκτυο κορμού.

4.5 HSPA Plus (Evolved High Speed Packet Access – 3.75G)

Η τεχνολογία HSPA+ εισήχθη με την προδιαγραφή 7 (**Release 7**) του 3GPP και βελτιώνει περαιτέρω την τεχνολογία HSPA. Μέσω επιπρόσθετων τεχνικών και υλικού επιτυγχάνει μέγιστες θεωρητικές ταχύτητες 28,8 Mbps στο κανάλι λήψης και 11,5 Mbps στο κανάλι αποστολής δεδομένων, αντίστοιχα. Η πιο πρόσφατη Προδιαγραφή 8 (**Release 8**) [53] του 3GPP επιτρέπει τη λήψη δεδομένων με μέγιστη θεωρητική ταχύτητα 42,2 Mbps (με χρήση της τεχνικής διαμόρφωσης σήματος 64-QAM, συνδυαστικά με την τεχνική MIMO - Multiple Input Multiple Output) και την αποστολή δεδομένων με μέγιστη θεωρητική ταχύτητα 22 Mbps. Για την επίτευξη αυτών των υψηλότερων ταχυτήτων χρησιμοποιείται ένα πλήθος επιπρόσθετων τεχνικών, όπως είναι η τεχνική beamforming και η τεχνική MIMO.

- **Τεχνική επεξεργασίας σήματος beamforming**

Η τεχνική επεξεργασίας σήματος beamforming χρησιμοποιεί μία συστοιχία αισθητήρων για την κατευθυντική μετάδοση ή λήψη σήματος. Η κατευθυντική μετάδοση σήματος επιτυγχάνεται συνδυάζοντας διαφορετικά στοιχεία μίας κεραίας με τέτοιον τρόπο, ώστε να προκαλούνται υπό ορισμένες γωνίες επικοινωνιακές παρεμβολές, ενώ σε άλλες γωνίες θα προκαλούνται καταστροφικές παρεμβολές. Έτσι, με την τεχνική beamforming επιτυγχάνεται χωρική επιλεκτικότητα (spatial selectivity) στις πλευρές αποστολής και λήψης των σημάτων.

- **MIMO (Multiple Input Multiple Output)**

Η χρήση της μεθόδου MIMO [54] [55] έχει ως αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό της χωρητικότητας μίας ραδιοζεύξης, μέσω της χρήσης πολλαπλών κεραιών αποστολής και λήψης σήματος. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η διάδοση των σημάτων αποστολής και λήψης μέσω πολλαπλών διαδρομών. Αυτή η συμπεριφορά σημαίνει πως η κεραία λήψης λαμβάνει σήματα μέσω δύο ή και περισσότερων διαδρομών. Στις ασύρματες τεχνολογίες, όπως στις κινητές τηλεπικοινωνίες, η τεχνική MIMO απαιτεί τη χρήση τουλάχιστον δύο κεραιών στον πομπό και στον δέκτη.

Φυσικά, η χρησιμότητα της τεχνολογίας MIMO δεν περιορίζεται μόνο στην αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης, αλλά επίσης καθιστά δυνατή την πιο αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Για την εκμετάλλευση της τεχνολογίας MIMO χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, με κυριότερη εξ' αυτών την χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing). [55] Μέσω της χωρικής πολυπλεξίας είναι εφικτή η μετάδοση πολλαπλών καναλιών μετάδοσης δεδομένων από το ίδιο μέσο. Πιο συγκεκριμένα, η χωρητικότητα του μέσου μετάδοσης διαιρείται σε λογικά κανάλια, καθένα εξ' αυτών εξυπηρετεί μία ακριβώς επικοινωνία. Η μετάδοση αυτών των καναλιών είναι παράλληλη. Συνεπώς, γίνεται έξυπνη χρήση του εύρους ζώνης του μέσου μετάδοσης, χωρίς σπατάλες, ενώ ταυτόχρονα επωφελομάστε και από πιο βελτιωμένη ενεργειακή συμπεριφορά. Η ταχύτητα μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας τη βασική ταχύτητα του μέσου μετάδοσης επί του ελάχιστου πλήθους των κεραιών αποστολής και λήψης που υφίστανται στον πομπό και στον δέκτη, αντίστοιχα. Συνεπώς, αν κάποια εκ των δύο πλευρών επικοινωνίας έχει μεγαλύτερο πλήθος κεραιών, γίνεται χρήση του μέγιστου πλήθους των κεραιών που διαθέτει η άλλη πλευρά και, ως εκ τούτου, οι επιπρόσθετες κεραίες της μίας πλευράς δεν χρησιμοποιούνται.

4.6 Κωδικοποίηση φωνής και AMR

Για τη μετάδοση φωνής έχει θεσπιστεί ως υποχρεωτική στα UMTS δίκτυα η χρήση της κωδικοποίησης ήχου **AMR (Adaptive Multi-Rate)**. Η τεχνολογία AMR προσαρμόζει την ποιότητα του ήχου αναλόγως των επικρατούσων συνθηκών μετάδοσης και λήψης του δικτύου. Αυτή η προσαρμοστικότητα επιτυγχάνεται εύκολα, καθώς είναι δυνατή η εναλλαγή μεταξύ 8 διαφορετικών modes (τρόπων κωδικοποίησης), για την επίτευξη ρυθμών μετάδοσης που κυμαίνονται μεταξύ 4,75 kbps έως και 12,2 kbps. Σε περίπτωση κακών συνθηκών μετάδοσης, μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης των φωνητικών δεδομένων και αυξάνεται το επίπεδο διόρθωσης λαθών μετάδοσης, ούτως ώστε να καταστεί εφικτή η επικοινωνία, έστω και με μειωμένη ποιότητα.

4.7 LTE (Long Term Evolution – 3.95G)

Τα LTE δίκτυα βελτιώνουν τη χωρητικότητα και τις ταχύτητες μετάδοσης των προηγούμενων τύπων δικτύων δεύτερης και τρίτης γενιάς, με την εισαγωγή νέων τρόπων προσπέλασης της ραδιοζεύξης και με ουσιαστικές βελτιώσεις στον πυρήνα του δικτύου και, ουσιαστικά, αποτελούν τον πρόγονο των δικτύων τέταρτης γενιάς. Για τον λόγο αυτό, αναφέρονται συχνά ως pre-4G δίκτυα, ενώ από αρκετούς παρόχους λανσαρίστηκαν εμπορικά ως 4G. Παρόλα αυτά, δεν καλύπτουν (και δεν είναι υποχρεωμένα να καλύπτουν) τις ελάχιστες προδιαγραφές που τέθηκαν από την ITU και εξειδικεύτηκαν από την 3GPP για τον χαρακτηρισμό τους ως τέταρτης γενιάς. Η ανάπτυξη των προδιαγραφών των LTE δικτύων ξεκίνησε από την ITU τον Νοέμβριο του 2008, με την εισαγωγή της Προδιαγραφής 8 (**Release 8**) [53] και συνεχίστηκε με την εμφάνιση της Προδιαγραφής 9 (**Release 9**) το 2009. Εκτός από την ανάπτυξη νέων προδιαγραφών όσον αφορά τις διατάξεις ραδιοπρόσβασης, αναπτύχθηκε επιπροσθέτως ένας νέος πυρήνας δικτύου, γνωστός ως **EPC (Evolved Packet Core –** δίκτυο εξελιγμένου πυρήνα πακέτων). [58] Μία εκ των βασικών απαιτήσεων που τέθηκε επί τάπητος εξαρχής ήταν η παροχή ευελιξίας όσον αφορά το φάσμα λειτουργίας των δικτύων. Για την επίτευξη αυτής της ευελιξίας αποφασίστηκε η ταυτόχρονη χρήση των τεχνολογιών πολύπλεξης TDD και FDD με τη χρήση ενός κοινού σχεδιασμού. Ο βασικός λόγος ανάπτυξης της τεχνολογίας LTE ήταν η αύξηση της ταχύτητας καταφόρτωσης και αναφόρτωσης των δεδομένων, καθώς και της χωρητικότητας των υπάρχοντων GSM και UMTS δικτύων, μέσω της χρήσης νέων τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας και διαμόρφωσης του σήματος.

- **Βασικά χαρακτηριστικά των LTE δικτύων**

- Θεωρητική μέγιστη ταχύτητα καταφόρτωσης 300 Mbps και θεωρητική μέγιστη ταχύτητα αναφόρτωσης 75 Mbps.
- Δυνατότητα χρήσης κλιμακούμενου εύρους ζώνης στο φέρον σήμα, το οποίο εύρος ζώνης κυμαίνεται από 1,4 MHz έως 20 MHz.
- Υποστήριξη FDD (Frequency Division Duplexing) και TDD (Time Division Duplexing).
- Επιλογή ποιότητας παρεχόμενης υπηρεσίας (QoS – Quality of Service).
- Μειωμένη χρονοκαθυστέρηση (latency) της τάξεως έως και 5 ms κατ' ελάχιστο.
- Πλήρης διαλειτουργικότητα με τα υπάρχοντα GSM και UMTS δίκτυα.
- Απλούστερη αρχιτεκτονική, με αποτέλεσμα την πιο οικονομική επεκτασιμότητα του δικτύου.
- Υποστήριξη συσκευών εν κινήσει με πολύ γρήγορες ταχύτητες κίνησης, της τάξης των 350 km/h.
- Υποστήριξη πολλών τύπων κελιών, η εμβέλεια των οποίων μπορεί να κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα έως και 100 χιλιόμετρα.
- Ταυτόχρονη υποστήριξη 200 ενεργών χρηστών με εύρος ζώνης ανά κελί 5 MHz.

4.7.1 Νέα ή τροποποιημένα στοιχεία LTE δικτύων

- **HSS (Home Subscriber Server)**

Ο HSS [56] πρόκειται για μία βάση δεδομένων, η οποία αποθηκεύει πληροφορίες σχετικές με τις τερματικές συσκευές που συνδέονται στο ραδιοδίκτυο. Επί της ουσίας, πρόκειται για ένα συστατικό ανάλογο με την HLR στα LTE δίκτυα. Ωστόσο, σε αντίθεση με την HLR, ο HSS δεν διαχειρίζεται απλά τους συνδεδεμένους συνδρομητές, αλλά τους παρέχει και την πρόσβαση στις διάφορες υπηρεσίες πολυμέσων, ενώ επιπροσθέτως συνεργάζεται με την MME (Mobility Management Entity) για την αυθεντικοποίηση των συσκευών που επιθυμούν να συνδεθούν στο δίκτυο. Σε κάθε HSS συνδέονται αρκετοί σταθμοί βάσης. Συνεπώς, υπάρχει η έννοια της τοπικότητας σε κάθε HSS, υπό την έννοια πως ένα σύνολο σταθμών βάσης σε μία περιοχή συνδέονται σε έναν (τοπικό) HSS.

- **MME (Mobility Management Entity)**

Η MME [57] συνεργάζεται με τον HSS για την παροχή αυθεντικοποίησης των συσκευών που επιθυμούν να συνδεθούν στο δίκτυο του παρόχου. Ουσιαστικά, η MME αποτελεί έναν μεσάζοντα στη σύνδεση μίας τερματικής συσκευής με τον HSS. Μία ακόμη σημαντική λειτουργία της είναι η διαμόρφωση των γραμμών επικοινωνίας των τερματικών συσκευών με την PDN πύλη, η οποία αποτελεί το τελευταίο συστατικό στοιχείο ενός LTE δικτύου μεταξύ των συσκευών και του Διαδικτύου.

4.7.2 Διαδικασία σύνδεσης στα LTE δίκτυα με έναν σταθμό βάσης

Όταν μια τερματική συσκευή επιθυμεί να συνδεθεί στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας εκκινεί μια αρχική διεργασία επικοινωνίας προκειμένου να πληροφορηθεί για τον σταθμό βάσης ο οποίος είναι διαθέσιμος, ώστε να την εξυπηρετήσει. Αξίζει να σημειωθεί πως δεν πρόκειται πάντα για τον κοντινότερο, σε απόσταση, σταθμό βάσης. Κάθε σταθμός βάσης εκπέμπει περιοδικά ανά 5 ms ένα πρωτεύον σήμα συγχρονισμού σε όλα τα κανάλια όσων συχνοτήτων εκπέμπει. Επιπροσθέτως, εκπέμπει και ένα δευτερεύον σήμα συγχρονισμού, το οποίο παρέχει αρκετές επιπρόσθετες πληροφορίες αναφορικά με το εύρος ζώνης των καναλιών και με τις διαμορφώσεις τους, καθώς και με τον ίδιο. Οι τερματικές συσκευές αφουγκράζονται για την ανίχνευση του πρωτεύοντος σήματος και όταν το ανιχνεύσουν προσπαθούν να εντοπίσουν το δευτερεύον σήμα συγχρονισμού, προκειμένου να συνδεθούν με τον συγκεκριμένο σταθμό βάσης, εφόσον το επιθυμούν, εγκαθιδρύοντας ένα κανάλι επικοινωνίας με τον σταθμό βάσης, ώστε να συνεχιστεί η διαδικασία σύνδεσης με το δίκτυο.

Στη συνέχεια διενεργείται η διαδικασία αυθεντικοποίησης της τερματικής συσκευής με το δίκτυο. Σε αυτό το στάδιο, η MME επικοινωνεί με τον HSS και του ζητάει την επιστροφή κρυπτογραφημένων πληροφοριών, ώστε να είναι σίγουρη πως ο εν λόγω HSS προσπαθεί να εκτελέσει αυθεντικοποίηση της συγκεκριμένης τερματικής συσκευής. Επίσης, επικοινωνεί και με την τερματική συσκευή, ζητώντας της να αποδείξει πράγματι πως αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο IMSI, με το οποίο επιχειρείται η τρέχουσα λειτουργία αυθεντικοποίησης του HSS.

Πρέπει να σημειωθεί πως, σε αυτήν τη διαδικασία αυθεντικοποίησης, εάν μία τερματική συσκευή τελεί υπό καθεστώς περιαγωγής, πρέπει η MME του δικτύου περιαγωγής να έρθει σε επαφή με έναν HSS, ο οποίος ανήκει στο οικείο δίκτυο του συνδρομητή.

4.7.3 Τεχνικές μετάδοσης δεδομένων των δικτύων LTE

- **LTE – TDD (Long Term Evolution – Time Division Duplexing)**

Η τεχνολογία LTE – TDD αναπτύχθηκε με τη συνεργασία κορυφαίων εταιριών του χώρου των τηλεπικοινωνιών, όπως οι: China Mobile, ZTE, Qualcomm, Huawei, Samsung, Nokia Solutions and Networks και Ericsson. Με την τεχνολογία LTE – TDD χρησιμοποιείται μία μοναδική συχνότητα για την αναφόρτωση και για την καταφόρτωση των δεδομένων και ανά μία συγκεκριμένη χρονική μονάδα γίνεται εναλλαγή μεταξύ των καναλιών αναφόρτωσης και καταφόρτωσης. Ο λόγος των αναφορτωμένων έναντι των καταφορτωμένων δεδομένων (download/upload ratio) ρυθμίζεται δυναμικά, αναλόγως των αναγκών του συνδρομητή και/ή του δικτύου. Το φάσμα συχνοτήτων λειτουργίας του LTE – TDD κυμαίνεται από τα 1850 MHz έως τα 3800 MHz, καθότι η τεχνολογία LTE – TDD λειτουργεί αποδοτικότερα σε υψηλότερο εύρος ζώνης συχνοτήτων, συγκριτικά με την τεχνολογία LTE – FDD.

- **LTE – FDD (Long Term Evolution – Frequency Division Duplexing)**

Με την τεχνολογία LTE – FDD χρησιμοποιείται ένα ζεύγος συχνοτήτων για τη μετάδοση δεδομένων: η μία συχνότητα χρησιμοποιείται για την καταφόρτωση δεδομένων και η άλλη για την αναφόρτωση δεδομένων. Το φάσμα συχνοτήτων λειτουργίας του LTE – FDD κυμαίνεται από 734 MHz έως 2170 MHz, καθότι η τεχνολογία LTE – FDD λειτουργεί αποδοτικότερα σε χαμηλότερο εύρος ζώνης συχνοτήτων από ότι η τεχνολογία LTE – TDD.

4.7.4 Μετάδοση φωνής στα LTE δίκτυα και VoLTE (Voice over LTE)

Λόγω του γεγονότος ότι τα LTE δίκτυα βασίζονται σε μία all-IP αρχιτεκτονική, η μετάδοση των φωνητικών δεδομένων πραγματοποιείται με την τεχνική μεταγωγής πακέτου. Η πλέον χρησιμοποιούμενη τεχνολογία μετάδοσης φωνής στα δίκτυα LTE είναι το VoLTE (Voice over LTE). Η τεχνολογία VoLTE επιτρέπει τη μετάδοση έως και 3 φορές περισσότερων φωνητικών δεδομένων, συγκριτικά με την τεχνολογία AMR των, προγενέστερων τεχνολογιών, δικτύων τρίτης γενιάς και έως και 6 φορές περισσότερων φωνητικών δεδομένων, συγκριτικά με την τεχνολογία EFR των δικτύων δεύτερης γενιάς. Προκειμένου να επιτραπεί η μετάδοση φωνής μέσω του VoLTE απαιτείται η υποστήριξη του τόσο από τον πάροχο κινητής τηλεφωνίας όσο και από το λογισμικό της συσκευής. Είθισται ο κάθε τηλεπικοινωνιακός πάροχος να διατηρεί μία λίστα με τις επιτρεπόμενες συσκευές, ούτως ώστε να υπάρχει η βεβαιότητα πως η υπηρεσία VoLTE θα λειτουργεί απρόσκοπτα. Αυτό σημαίνει πως ακόμη και εάν το λογισμικό μίας συσκευής υποστηρίζει την τεχνολογία VoLTE δεν θα είναι δυνατή η χρήση της, εάν το συγκεκριμένο μοντέλο συσκευής δεν έχει πιστοποιηθεί από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο.

4.7.5 Διάταξη μετάδοσης OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

Η βασική διάταξη μετάδοσης των LTE δικτύων ονομάζεται **OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)**. Πρόκειται για μία τεχνική αρκετά ευέλικτη, καθώς εκμεταλλεύεται τόσο το πεδίο του

χρόνου όσο και το πεδίο της συχνότητας. Παράλληλα, δεν είναι εξαιρετικά πολύπλοκη όσον αφορά το κομμάτι υλοποίησής της από την πλευρά του δέκτη, τόσο από πλευράς υλικού όσο και από πλευράς λογισμικού. Ένα ακόμη, πολύ βασικό, πλεονέκτημά της είναι η δυνατότητα χρήσης της τεχνολογίας MIMO.

Όσον αφορά το πεδίο του χρόνου, το LTE οργανώνει μία μετάδοση σε παράθυρα των 10 ms έκαστος. Κάθε ένα εξ' αυτών των παραθύρων, αποτελείται από 10 υπο-παράθυρα του 1 ms. Αυτή η χρονική διάρκεια του 1 ms αποτελεί τη μικρότερη προγραμματιζόμενη μονάδα των LTE δικτύων.

4.8 Επίλογος

Στον παρόν κεφάλαιο εξεξηγήθηκαν βασικά συστατικά των δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς και ορισμένες βασικές νέες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν για τη βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών. Τα δίκτυα τρίτης γενιάς επέφεραν μία πραγματική επανάσταση όσον αφορά τη δυνατότητα πρόσβασης στο Διαδίκτυο. Κατέστησαν εφικτή την ασύρματη προσπέλαση σχεδόν όπως συνέβαινε με τα ενσύρματα δίκτυα και το ασύρματο Internet απέκτησε ουσιαστική υπόσταση. Λίγο πριν από την έναρξη των υπηρεσιών τέταρτης γενιάς πραγματοποιήθηκε επανάσταση και στην ποιότητα ήχου των φωνητικών κλήσεων και όλες αυτές οι βελτιώσεις ήταν μόνο η αρχή για να ξεκινήσει το πέρασμα σε μία πραγματικά νέα εποχή, αυτή των δικτύων τέταρτης γενιάς.

Κεφάλαιο 5: Δίκτυα τέταρτης γενιάς

5.1 Εισαγωγή

Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς αποτελούν το φυσικό επακόλουθο των δικτύων τρίτης γενιάς. Για τον χαρακτηρισμό ενός δικτύου ως τέταρτης γενιάς πρέπει να πληρούνται οι προϋποθέσεις της προδιαγραφής **IMT Advanced** της ITU. Η μεγαλύτερη διαφορά, συγκριτικά με τις προηγούμενες γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας είναι η μετάβαση των δικτύων αυτών σε μία all-IP αρχιτεκτονική.

5.2 Προδιαγραφές του προτύπου IMT Advanced

Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς χαρακτηρίζονται ως **NGN (Next Generation Network)**. Ο χαρακτηρισμός αυτός μπορεί να αποδοθεί σε κάθε τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, το οποίο είναι προσανατολισμένο εξ' ολοκλήρου σε all-IP αρχιτεκτονική. Το κύριο χαρακτηριστικό των NGN είναι η διαχείριση όλης της κίνησης που διέρχεται από αυτά, υπό τη μορφή πακέτων και χρησιμοποιείται ο όρος all-IP για την αρχιτεκτονική τους, ώστε να τα διαχωρίσει από τα «παραδοσιακά» δίκτυα που χρησιμοποιούν μεταγωγή κυκλώματος εξ' ολοκλήρου ή σε κάποιο τμήμα της λειτουργίας τους. Κύρια πλεονεκτήματα των NGN είναι:

1. Η χρήση πολλαπλών μεθόδων και τεχνολογιών μετάδοσης και προσπέλασης του μέσου επικοινωνίας
2. Η εισαγωγή τεχνολογιών για διαχείριση της ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας, αναλόγως της χρησιμοποιούμενης εφαρμογής και της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου (QoS – Quality of Service)
3. Η παροχή νέων υπηρεσιών, όπως είναι η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV – High Definition TV) και
4. Η αποδοτικότερη χρήση του φάσματος συχνοτήτων του δικτύου.

Λόγω των πολλαπλών βελτιώσεων που επιτυγχάνονται ως προς τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου, είναι αναμενόμενος ο πολλαπλασιασμός των ταχυτήτων προσπέλασης και της χωρητικότητας των δικτύων και αποτελεί έναν από τους κύριους στόχους της προδιαγραφής IMT Advanced.

Για τον χαρακτηρισμό ενός δικτύου ως τέταρτης γενιάς, είναι επιθυμητή η υιοθέτηση των ακόλουθων προτεινόμενων προϋποθέσεων της ITU:

- Βασιζόμενο σε all-IP αρχιτεκτονική δίκτυο.
- Διαλειτουργικότητα με τα υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (δεύτερης και τρίτης γενιάς).
- Κλιμακούμενο εύρος ζώνης του καναλιού μετάδοσης, μεταξύ 5 και 20 MHz, με προαιρετική υποστήριξη εύρους ζώνης έως και 40 MHz.
- Παγκόσμια υποστήριξη περιαγωγής.
- Ομαλά handovers (μεταβάσεις από κυψέλη σε κυψέλη), χωρίς διακοπή της τρέχουσας συνόδου επικοινωνίας.
- Δυναμική εκχώρηση και διαχείριση δικτυακών πόρων, αναλόγως των συνθηκών μετάδοσης.
- Θεωρητική ταχύτητα 100 Mbps στο συρρευματικό κανάλι για μετακινούμενους χρήστες.
- Θεωρητική ταχύτητα 1 Gbps στο συρρευματικό κανάλι για σταθερούς χρήστες.

- Μέγιστη αποδοτικότητα εύρους ζώνης 15 bits/s/Hz στο συρρευματικό κανάλι και 6.75 bits/s/Hz στο αντιρρευματικό κανάλι.

Όσον αφορά το φυσικό επίπεδο του δικτύου, προτείνεται η υποστήριξη των ακόλουθων απαιτήσεων:

- Υποστήριξη της τεχνολογίας MIMO.
- Υποστήριξη τεχνολογιών κωδικοποίησης όπως είναι η OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) στο συρρευματικό κανάλι.
- Υποστήριξη τεχνολογιών κωδικοποίησης όπως είναι η OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) στο αντιρρευματικό κανάλι.
- Χρήση τεχνολογιών FEC υψηλής απόδοσης, για μείωση του σηματολογικού θορύβου.
- Δυναμική διαχείριση καναλιών μετάδοσης και λήψης του μέσου επικοινωνίας.
- Υποστήριξη link adaptation.
- Υποστήριξη συνεργατικού MIMO.

5.3 LTE Advanced (4G)

Πρόκειται για το πρώτο «πραγματικό» 4G πρότυπο, το οποίο υιοθετεί τις προτεινόμενες, από την ITU, προδιαγραφές, ώστε να χαρακτηριστεί ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας ως τέταρτης γενιάς και τυποποιήθηκε από την 3GPP στην Προδιαγραφή 10 (**Release 10**) τον Μάρτιο του 2011 [23][26].

Το LTE Advanced αποτελεί μία αναβάθμιση της υπάρχουσας LTE τεχνολογίας. Οι τερματικές συσκευές που υποστηρίζουν το πρότυπο LTE Advanced πρέπει να είναι συμβατές με το πρότυπο LTE. Επίσης, τέθηκε ως στόχος η δυνατότητα χρήσης των συχνοτήτων λειτουργίας του προτύπου LTE. Κατ' επέκταση, το πρότυπο LTE Advanced δεν διαφέρει ριζικά σε σχέση με το πρότυπο LTE. Συνεπώς, είναι εφικτή η εύκολη αναβάθμιση ενός LTE δικτύου για υποστήριξη του προτύπου LTE Advanced. Το πρότυπο LTE Advanced σχεδιάστηκε έχοντας υπόψη τη δυνατότητα χρήσης νέων και εξελιγμένων τοπολογιών δικτύου, όπως είναι τα ετερογενή δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να κάνει έξυπνη χρήση των macro-cells (δηλαδή, των κελιών που δημιουργούνται από μεγάλους σταθμούς βάσης και έχουν εμβέλεια χιλιομέτρων) συνδυαστικά με τα micro-cells (που δημιουργούνται από επιτοίχιους σταθμούς βάσης και έχουν εμβέλεια το πολύ έως μερικά εκατοντάδες μέτρα, αν και δύνανται να διαπερνάνε μικρά φυσικά εμπόδια σε τοπικό επίπεδο) και με τα pico-cells (η εμβέλεια των οποίων δεν ξεπερνά τα μερικές δεκάδες μέτρα και χρησιμοποιούνται για πολύ τοπική κάλυψη, κυρίως σε μέρη με εξαιρετικά υψηλή δικτυακή κίνηση, όπως είναι τα στάδια ή τα εμπορικά κέντρα). Ορισμένα ακόμη πλεονεκτήματα του προτύπου LTE Advanced είναι ο δικαιότερος διαμοιρασμός του εύρους ζώνης του δικτύου μεταξύ πολλαπλών χρηστών, η χρήση νεότερων τεχνικών για τη διόρθωση σφαλμάτων μετάδοσης, η καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος συχνοτήτων και η δυνατότητα κλιμακωτής χρήσης εύρους ζώνης συχνοτήτων έως και 100 MHz.

5.4 E-UTRA (Evolved UMTS Radio Terrestrial Access)

Πρόκειται για τη **διεπαφή αέρα (air interface)** των δικτύων τέταρτης γενιάς διαμέσου της οποίας πραγματοποιείται η επικοινωνία των τερματικών συσκευών με τον πυρήνα του δικτύου και εμπλέκει το πρώτο (φυσικό) και το δεύτερο (ζεύξης δεδομένων) επίπεδο του προτύπου μοντέλου OSI [24]. Αξίζει να διευκρινιστεί πως ο E-UTRAN, αντικαθιστά τις λογικές διεπαφές που συναντώνται σε όλους τους προηγούμενους τύπους δικτύων και δεν είναι συμβατός προς τα πίσω (backwards-compatible) με

αυτούς, αλλά έχει επανασχεδιαστεί εξ' ολοκλήρου, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι πλέον η αρχιτεκτονική των δικτύων τέταρτης γενιάς είναι all-IP. Συνεπώς, είναι ειδικά σχεδιασμένος για την όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερη μεταφορά πακέτων δεδομένων, σε υψηλές ταχύτητες και με πολύ μικρή χρονοκαθυστέρηση. Όσον αφορά τις μεθόδους προσπέλασης, για το συρρευματικό κανάλι χρησιμοποιείται η OFDMA και για το αντιρρευματικό κανάλι χρησιμοποιείται η SC-FDMA.

Όσον αφορά τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, αυτές εξαρτώνται από το πλήθος των χρησιμοποιούμενων κεραιών, από το διαθέσιμο εύρος ζώνης, από το πλήθος των συχνοτήτων που συνδυάζονται (carrier aggregation) και από τη χρήση της τεχνολογίας MIMO, η οποία διαδραματίζει κεντρικό ρόλο.

Ενδεικτικές μέγιστες θεωρητικές τιμές ταχυτήτων στο συρρευματικό κανάλι είναι τα 150,8 Mbps όταν γίνεται χρήση 2 * 2 κεραιών μέσω της τεχνολογίας MIMO και τα 299,6 Mbps όταν γίνεται χρήση 4 * 4 κεραιών, για εύρος ζώνης συχνοτήτων της τάξεως των 20 MHz. Αξίζει να σημειωθεί πως όταν γίνεται χρήση 8 * 8 κεραιών, ο μέγιστος θεωρητικός ρυθμός καταφόρτωσης ανέρχεται σε 2998,6 Mbps, για εύρος ζώνης συχνοτήτων της τάξεως των 100 MHz.

Ενδεικτικές μέγιστες θεωρητικές τιμές ταχυτήτων στο αντιρρευματικό κανάλι είναι τα 75,4 Mbps για ένα κανάλι εύρους ζώνης συχνοτήτων της τάξεως των 20 MHz και τα 1497,8 Mbps για ένα κανάλι εύρους ζώνης συχνοτήτων των 100 MHz.

5.4.1 eNodeB

Πρόκειται για εκείνο το στοιχείο δικτύου, το οποίο επικοινωνεί ασύρματα με την τερματική συσκευή, μέσω της εξωτερικής λογικής διεπαφής Uu. Πιο απλοποιημένα, πρόκειται για την κεραία ενός σταθμού βάσης. [50] Ωστόσο, εν αντιθέσει με τα UMTS δίκτυα, στα οποία το αντίστοιχο κομμάτι, ο NodeB, ελέγχεται από τον RNC, στα δίκτυα τέταρτης γενιάς, ο RNC είναι ενσωματωμένος στον eNodeB. Κατ' αυτόν τον τρόπο απλοποιείται σε πολύ μεγάλο βαθμό η αρχιτεκτονική των δικτύων τέταρτης γενιάς και μειώνεται η χρονοκαθυστέρηση όσον αφορά την επικοινωνία μεταξύ των συστατικών μερών του πυρήνα του δικτύου.



Σχήμα 31: eNodeB

5.5 LTE Advanced Pro (4.5G)



Σχήμα 32: Λογότυπο LTE Advanced Pro

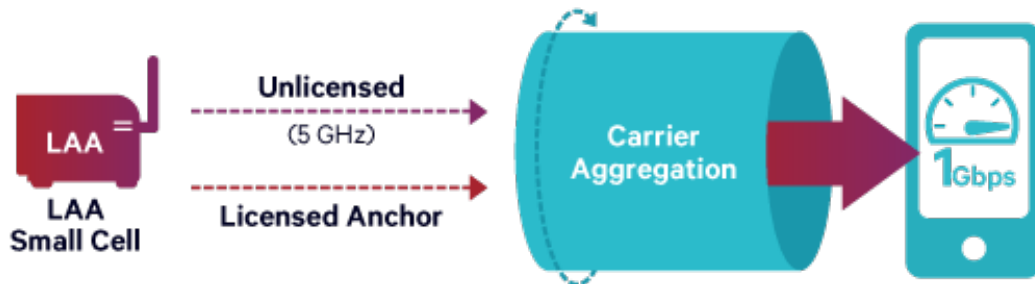
Το πρότυπο LTE Advanced Pro ορίζεται στις προδιαγραφές 13 και 14 του 3GPP (**Release 13** και **Release 14**) και πρόκειται για αναβάθμιση των δικτύων τέταρτης γενιάς, η οποία ορίζεται ως ο πρόγονος του 5G (pre-5G) [29]. Ουσιαστικά, μοιράζεται στοιχεία των δικτύων πέμπτης γενιάς, ωστόσο δεν καλύπτει πλήρως τις προδιαγραφές της ITU για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Η ανάπτυξη της Release 13 [29] ξεκίνησε τον Σεπτέμβριο του 2012 και ολοκληρώθηκε τον Μάρτιο του 2016. Η ανάπτυξη της Release 14 [45] ξεκίνησε τον Σεπτέμβριο του 2014 και ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2017. Η Release 14, ουσιαστικά κινήθηκε στις ιδέες, στις περιπτώσεις χρήσης και στις λειτουργίες που υιοθετήθηκαν από την Release 13 και τις ανέπτυξε περαιτέρω προσαρμόζοντάς τις στις νεότερες ανάγκες χρήσης.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό του είναι η **LLA (License Assisted Access)**, [48] για τη δυνατότητα χρήσης μη εκχωρημένου φάσματος συχνοτήτων για τις υπηρεσίες των δικτύων τέταρτης γενιάς. Όσον αφορά τις ταχύτητες μετάδοσης στο συρρευματικό κανάλι, μπορούν σε ιδανικές συνθήκες μετάδοσης να αγγίξουν το θεωρητικό μέγιστο των 3 Gbps, κάνοντας χρήση συνένωσης (aggregation) έως και 32 συχνοτήτων. Εφόσον βέβαια θεωρείται ο πρόγονος των δικτύων πέμπτης γενιάς, υποστηρίζει κάποιες εκ των υπηρεσιών που αναπτύχθηκαν για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς, όπως είναι το Nb-IoT (Narrowband Internet of Things) και το massive MIMO.

5.5.1 LLA (License Assisted Access)

Αρχικά, τα πρότυπο LTE σχεδιάστηκε προς χρήση του πάνω από αδειοδοτημένο φάσμα. Αυτό σημαίνει πως κάθε τηλεπικοινωνιακός πάροχος φέρει αποκλειστική άδεια χρήσης ενός συγκεκριμένου φάσματος συχνοτήτων για τη λειτουργία του LTE δικτύου του. Η λειτουργία του δικτύου εντός ενός προκαθορισμένου φάσματος συχνοτήτων ανά τηλεπικοινωνιακό πάροχο έχει το πλεονέκτημα της σχεδίασης του δικτύου σύμφωνα με τις μοναδικές απαιτήσεις του παρόχου και του επιτρέπει να έχει καλύτερο έλεγχο επί των παρεμβολών που ενδέχεται να προκύψουν, καθώς μπορεί να ρυθμίσει καλύτερα το δίκτυο, ώστε να τις αντιμετωπίζει. Ένα βασικό μειονέκτημα, όμως, είναι το πολύ υψηλό κόστος απόκτησης της άδειας ενοικίασης του φάσματος συχνοτήτων. Ωστόσο, η προσθήκη του LLA [48][49] μέσω της Release 13 επιτρέπει το συνδυασμό χρήσης μη αδειοδοτημένου και αδειοδοτημένου φάσματος, για την παροχή υπηρεσιών τέταρτης γενιάς στο συρρευματικό κανάλι. Πιο συγκεκριμένα, συναθροίζει (μέσω carrier aggregation) συχνότητες που ανήκουν στο φάσμα των 5 GHz, το οποίο είναι μη αδειοδοτημένο, με συχνότητες που έχουν ανατεθεί στον τηλεπικοινωνιακό πάροχο, για το

συρρευματικό κανάλι [40]. Η λογική εισαγωγής του LLA υπαγορεύει τη μετάδοση λιγότερο σημαντικών υπηρεσιών μέσω του μη αδειοδοτημένου φάσματος και τη χρήση υπηρεσιών κρίσιμης σηματοδότησης αλλά και υπηρεσιών που απαιτούν υψηλή ποιότητα ανταπόκρισης μέσω του αδειοδοτημένου φάσματος, λόγω του καλύτερου ελέγχου που φέρει επ' αυτού ο τηλεπικοινωνιακός πάροχος. Με την έκδοση της Release 14 προστέθηκε και η δυνατότητα χρήσης του LLA στο αντισυρρευματικό κανάλι.



Σχήμα 33: License Assisted Access

Ωστόσο, καθώς στη ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz εκπέμπουν και πολλά, πλέον, δίκτυα Wi-Fi πρέπει να υπάρξει ένας συντονισμός ως προς τη μετάδοση. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιείται η τεχνική **LBT (Listen Before Talk)**, ούτως ώστε το δίκτυο να «αφουγκράζεται» πριν από την εκπομπή του. Εφόσον δεν υπάρχει την ίδια χρονική στιγμή κάποια άλλη μετάδοση, μπορεί να ξεκινήσει τη δική του μετάδοση. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγονται οι παρεμβολές.

Τα πλεονεκτήματα του LLA είναι αρκετά. Αρχικά, αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για τους χρήστες και την χωρητικότητα των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, καθώς μέρος της δικτυακής κίνησης μετατοπίζεται από το αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων στο μη αδειοδοτημένο. Επίσης, επειδή ταυτόχρονα χρησιμοποιείται και το μη αδειοδοτημένο φάσμα, αυξάνονται σημαντικά οι ταχύτητες του συρρευματικού καναλιού. Ορισμένοι πάροχοι, μάλιστα, μπορούν να ξεπεράσουν ακόμη τις μέγιστες θεωρητικές ταχύτητες του προτύπου LTE Advanced Pro, με αποτέλεσμα οι ταχύτητες καταφόρτωσης να βρίσκονται αρκετά κοντά στο 1 Gbps, χωρίς καν την ύπαρξη δικτύων 5G. Πλεονεκτήματα, ωστόσο, παρέχονται και στα δίκτυα Wi-Fi, καθώς το φάσμα συχνοτήτων μοιράζεται δικαιότερα μεταξύ των χρηστών τους.

5.6 Επίλογος

Στο τρέχον κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα δίκτυα τέταρτης γενιάς, που εισήχθησαν με την τεχνολογία LTE Advanced. Εν συνεχεία, έγινε παρουσίαση του προτύπου LTE Advanced Pro, το οποίο αυξάνει σε εντυπωσιακό βαθμό τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, μέσω τεχνολογιών οι οποίες χρησιμοποιούνται έως ένα βαθμό και από τα δίκτυα πέμπτης γενιάς, όπως είναι η LLA και το massive MIMO.

Σχεδόν ταυτόχρονα με την εμφάνιση του προτύπου LTE Advanced Pro ξεκίνησε η ανάπτυξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς, τα οποία απετέλεσαν μία πραγματική επανάσταση, όχι

μόνο όσον αφορά την εξαιρετικά γρήγορη μετάδοση δεδομένων, αλλά και όσον αφορά τα ποικίλα σενάρια χρήσης τους, σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων. Εκτός από την ταχύτερη μετάδοση δεδομένων, τα δίκτυα πέμπτης γενιάς επικεντρώνονται στο Internet of Things, επιτρέποντας την ανάπτυξη και χρήση νέων τύπων εφαρμογών και σεναρίων χρήσης.

Κεφάλαιο 6: Δίκτυα πέμπτης γενιάς

6.1 Εισαγωγή

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς αποτελούν τη φυσική εξέλιξη των δικτύων τέταρτης γενιάς, η οποία υπαγορεύτηκε από τις νέες, αυξημένες ανάγκες δικτύωσης. Οι πρώτες συζητήσεις για τη δημιουργία μίας πέμπτης γενιάς δικτύων κινητών επικοινωνιών ξεκίνησαν το 2012. Οι τεχνικές εργασίες ξεκίνησαν την άνοιξη του 2016 και είχαν ως αποτέλεσμα την έκδοση της Προδιαγραφής 14 (**Release 14**), [45] η οποία ωστόσο δεν ήταν διαθέσιμη προς υιοθέτηση από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους και από τους κατασκευαστές δικτυακού εξοπλισμού και συσκευών αλλά απετέλεσε μία πρώτη μελέτη των νέων απαιτήσεων που τέθηκαν εξαρχής. Στη συνέχεια, ξεκίνησε η ανάπτυξη της Προδιαγραφής 15 (**Release 15**), [46] η οποία είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας προ-έκδοσης (draft) πριν από την οριστικοποίησή της στα μέσα του 2018.

6.2 Περιπτώσεις χρήσης του 5G

Πέραν των αναμενόμενων εξελίξεων της μεγαλύτερης ταχύτητας στο συρρευματικό και στο αντιρρευματικό κανάλι και της βελτίωσης της χωρητικότητας (ιδίως σε μέρη με πολύ αυξημένη δικτυακή κίνηση), τα δίκτυα πέμπτης γενιάς είναι η κινητήριος δύναμη για την ανάπτυξη νέων τύπων εφαρμογών, ενώ η επέκτασή τους δεν βασίζεται πλέον μόνο στην ανάγκη των τηλεπικοινωνιακών παρόχων για την παροχή υπηρεσιών υψηλότερων ταχυτήτων, αλλά αναπτύσσονται κατά περιοχή σύμφωνα με τις ανάγκες που υπάρχουν για την υποστήριξη νέων τύπων εφαρμογών, όπως οι εφαρμογές που βασίζονται στο IoT ή οι εφαρμογές επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο. [41]



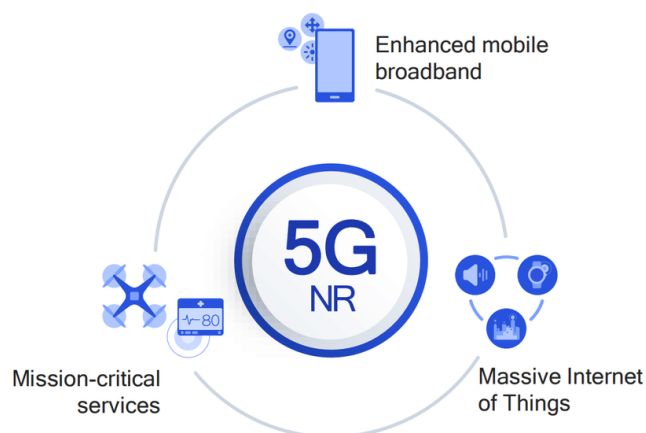
Σχήμα 34: Λογότυπο της 3GPP για το 5G

Οι σχεδιαστές των δικτύων κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς οραματίζονται τρεις διαφορετικές κύριες περιπτώσεις χρήσης τους, οι οποίες είναι οι εξής:

- **eMBB (enhanced Mobile BroadBand – βελτιωμένη ευρυζωνική κινητή επικοινωνία):** με την παροχή ακόμη υψηλότερων ρυθμών διαμεταγωγής δεδομένων αναβαθμίζεται η εμπειρία του χρήστη, ο οποίος κατ' επέκταση οδηγείται στη χρήση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων

- **mMTC (massive Machine-Type Communication** – μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής): τα δίκτυα πέμπτης γενιάς εμπλέκουν τη χρήση διαφόρων συσκευών, εκτός των τυπικών συσκευών smartphones και 5G δρομολογητών, όπως είναι οι διάφοροι αισθητήρες και οι μικροσυσκευές του Διαδικτύου Πραγμάτων (Internet of Things – IoT). Αυτές οι συσκευές χαρακτηρίζονται από ευκαιριακή κίνηση (αποστολή ή/και λήψη) δεδομένων – συνήθως με πολύ χαμηλό ρυθμό διαμεταγωγής, από πολύ χαμηλό κόστος και λειτουργούν πολλές φορές με μπαταρία, η οποία ενδέχεται να έχει αυτονομία που μπορεί να επεκτείνεται ακόμη και σε χρονικό διάστημα αρκετών ετών. Αξίζει να σημειωθεί παρ' όλα αυτά πως η συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης καλύπτεται κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό και από τα υπάρχοντα δίκτυα τέταρτης γενιάς, ιδίως στις πιο πρόσφατες προδιαγραφές της 3GPP.
- **URLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communication** – επικοινωνία εξαιρετικά μεγάλης αξιοπιστίας και χαμηλής χρονοκαθυστέρησης): Ορισμένες εφαρμογές των δικτύων κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς, όπως είναι οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες παραγωγής σε εργοστάσια, πρέπει να λαμβάνουν χώρα με εξαιρετικά μεγάλη αξιοπιστία και με πολύ χαμηλή χρονοκαθυστέρηση.

Θα πρέπει βέβαια να ληφθεί υπόψη ότι οι προαναφερθείσες κατηγορίες περιπτώσεων χρήσης δημιουργήθηκαν για να οργανωθούν καλύτερα οι διάφορες υπηρεσίες που πρέπει να παρέχονται από τα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Υπάρχουν περιπτώσεις χρήσης οι οποίες δεν εμπίπτουν απαραίτητα σε μία εκ των παραπάνω κατηγοριών. Για παράδειγμα, ενδέχεται μία υπηρεσία να απαιτεί μεν εξαιρετικά μεγάλη αξιοπιστία κατά τη μεταφορά δεδομένων, αλλά να μην είναι ευαίσθητη στον χρόνο.



Σχήμα 35: Περιπτώσεις χρήσης του 5G

6.3 5G NR (New Radio)

Σύμφωνα με την 3GPP, ως 5G καθορίζεται κάθε σύστημα, το οποίο χρησιμοποιεί λογισμικό **5G NR (New Radio)**.

Η ανάπτυξη του 5G NR χωρίστηκε σε φάσεις. Η πρώτη φάση ανάπτυξης αναφέρεται στην Προδιαγραφή 15 (**Release 15**) του 3GPP, η οποία ολοκληρώθηκε το 2018. Θα πρέπει να σημειωθεί πως

η προ-έκδοση της Προδιαγραφής 15 ορίζει τη λειτουργία των 5G συσκευών πάνω από τα υπάρχοντα δίκτυα τέταρτης γενιάς, αν και η τελική μορφή της αναφέρεται στη χρήση 5G συσκευών και πάνω από τα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Επίσης, η Προδιαγραφή 15 εστίασε κατά κύριο λόγο στην περίπτωση χρήσης eMBB και σε έναν μικρότερο βαθμό στην περίπτωση χρήσης URRLC. Η δεύτερη φάση ανάπτυξης αναφέρεται στην προδιαγραφή 16 (**Release 16**) του 3GPP, η οποία ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2020. Η τρίτη φάση ανάπτυξης αναφέρεται στην Προδιαγραφή 17 (**Release 17**) του 3GPP, η οποία ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2022. Την παρούσα χρονική στιγμή βρίσκεται σε εξέλιξη η Προδιαγραφή 18 (**Release 18**) του 3GPP, η οποία θα επιτρέψει την περαιτέρω ανάπτυξη του 5G NR, γνωστότερου και ως 5G NR Advanced, ενώ ταυτόχρονα έχει ήδη ξεκινήσει και η ανάπτυξη της Προδιαγραφής 19 (**Release 19**), μέσω της οποίας θα επιχειρείται σύγκλιση με τα δίκτυα έκτης γενιάς (6G) και θα αποτελεί ένα μεταβατικό στάδιο προς αυτά.

6.3.1 5G-SA (Stand-Alone) και 5G-NSA (Non Stand-Alone)

Επί του παρόντος, η λειτουργία των 5G δικτύων βασίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό στο δίκτυο κορμού και στις τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν για τα δίκτυα τέταρτης γενιάς. Το 3GPP ανέπτυξε μεν έναν νέο πυρήνα δικτύου που αφορά την πέμπτη γενιά (5G) επικοινωνιών, αλλά παρόλα αυτά είναι δυνατή η διασύνδεση των δικτύων 5G-NR με τον υπάρχοντα πυρήνα των δικτύων LTE, που είναι γνωστός ως EPC. Με αυτού του είδους τη διασύνδεση, επιτρέπεται αφενός στο ραδιοδίκτυο 5G NR να ενισχύει τις ταχύτητες διαμεταγωγής των δεδομένων και τη χωρητικότητα των δικτύων 5G και στον EPC να εκτελεί όλες τις βασικές υπηρεσίες που μπορεί να παρέχει ο πυρήνας του δικτύου. Μπορεί να ειπωθεί, συνεπώς, ότι τα 5G δίκτυα παρέχουν τις υπηρεσίες τους σε λειτουργία «συμβατότητας» και χαρακτηρίζονται ως **5G-NSA (Non Stand-alone)**. [59] Ο απλούστερος λόγος ύπαρξης αυτού του «συμβατού» τρόπου λειτουργίας των δικτύων 5G είναι το γεγονός πως οι ήδη έτοιμες υποδομές των δικτύων τέταρτης γενιάς είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν, εν μέρει, στις υψηλότερες απαιτήσεις που θέτουν τα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Επιπλέον, ένας πολύ μεγάλος αριθμός χρηστών δεν θα είναι σε θέση απόκτησης νέων συσκευών, οι οποίες θα εκμεταλλεύονται τις νέες δυνατότητες των δικτύων, συνεπώς θα πρέπει οι υπάρχουσες συσκευές να παραμένουν συμβατές και λειτουργικές με τα υπάρχοντα δίκτυα (τουλάχιστον για αρκετά χρόνια). Επίσης, καθώς οι υποδομές των δικτύων τέταρτης γενιάς έχουν ήδη ολοκληρωθεί εδώ και αρκετά χρόνια, ελαχιστοποιείται το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την έναρξη των υπηρεσιών πέμπτης γενιάς κινητής τηλεφωνίας από την πλευρά των τηλεπικοινωνιακών παρόχων. Οι επενδύσεις των παρόχων άλλωστε, για την παροχή «πραγματικών» 5G υπηρεσιών είναι αρκετά δαπανηρές και η επέκταση των 5G δικτύων στις διάφορες περιοχές θα πρέπει να τεκμηριώνεται επαρκώς. Μάλιστα, η ζήτηση, καθώς και ο τύπος των δικτυακών εφαρμογών που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στις διάφορες γεωγραφικές περιοχές, αποτελούν κινητήριο δύναμη για την ανάπτυξη και επέκταση των «πραγματικών» 5G δικτύων, τα οποία χαρακτηρίζονται ως **5G-SA (Stand-Alone)**. [59] Ένα ακόμη κριτήριο, που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι και ο προσεκτικός καταμερισμός του φάσματος συχνοτήτων των 5G-SA δικτύων, πριν από την έναρξη της εξάπλωσής τους, προκειμένου να καταστεί ουσιαστική η ύπαρξη και η λειτουργία τους και να μην ταλαιπωρούνται οι χρήστες από κακή απόδοση, εξαιτίας λανθασμένων ρυθμίσεων από πλευράς των τηλεπικοινωνιακών παρόχων.

6.3.2 Ζώνες συχνοτήτων λειτουργίας

Για τη λειτουργία των 5G δικτύων χρησιμοποιούνται 2 ζώνες συχνοτήτων: [60]

- Η πρώτη περιοχή συχνοτήτων ονομάζεται **FR1 (Frequency Range 1)** και βρίσκεται στο εύρος από 410 MHz έως και 7125 MHz.
- Η δεύτερη περιοχή συχνοτήτων ονομάζεται **FR2 (Frequency Range 2)** και βρίσκεται στο εύρος από 24250 MHz έως και 71000 MHz.

Πρέπει να σημειωθεί πως οι προαναφερθείσες ζώνες συχνοτήτων δεν ανατίθενται κατ' αποκλειστικότητα στα 5G NR δίκτυα, αλλά ενδέχεται να χρησιμοποιούνται και από άλλες τεχνολογίες, ορισμένες φορές συνδυαστικά. Στην περίπτωση αυτή, τα 5G NR δίκτυα χρησιμοποιούν ένα κλάσμα της περιοχής συχνοτήτων [38].

Όσον αφορά την FR1, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο η περιοχή συχνοτήτων από 3.3 GHz έως και 4.2 GHz, με κύριο εκπρόσωπο τη συχνότητα των 3.5 GHz (τουλάχιστον από τα Ευρωπαϊκά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας). Ωστόσο, λόγω του γεγονότος ότι οι συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και πάνω από αυτές επικοινωνεί μία πληθώρα συσκευών, δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη η εξεύρεση συνεχόμενου φάσματος. Συνεπώς, έχει προταθεί η χρήση έως και 100 MHz ως εύρος ζώνης σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων. Έχει καθιερωθεί η χρήση του όρου **mid-band** για αυτήν την περιοχή συχνοτήτων. Η συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων θεωρείται ιδανική όταν υπάρχει οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης, καθώς συνδυάζει υψηλή κατευθυντικότητα και υψηλές ταχύτητες, της τάξης των 1 – 2 Gbps, υπό ιδανικές συνθήκες. Στην πράξη, ακόμη και σε περιοχές με υψηλή δικτυακή κίνηση και χρήση δεδομένων, οι μέσες ταχύτητες (προς το παρόν) και συνδυαστικά με χρήση carrier aggregation αγγίζουν μία μέση τιμή από 600 Mbps και πάνω.

Όσον αφορά την FR2, διατίθεται προς χρήση η περιοχή συχνοτήτων από 24 GHz έως και 71 GHz. Λόγω του πολύ μικρού μήκους κύματος των συχνοτήτων αυτής της περιοχής, η εμβέλεια των κελιών δεν δύναται να ξεπερνά τα μερικές δεκάδες μέτρα [38]. Μπορούν, μάλιστα, να παρεμποδιστούν ακόμη και από δέντρα ή και από το ανθρώπινο σώμα, καθώς η διαπερατότητά τους είναι εξαιρετικά μικρή. Συνεπώς, η χρήση τους θα εφαρμοστεί σε τοποθεσίες, όπως είναι τα εμπορικά κέντρα (και, ιδίως, σε επίπεδο ορόφων), τα συνεδριακά κέντρα, τα γραφεία και οι δημόσιοι πολυπληθείς χώροι (όπως είναι οι πλατείες, οι κινηματογράφοι ή τα στάδια). Στον αντίποδα βρίσκονται οι πολύ υψηλότερες επιτεύξιμες ταχύτητες, συγκριτικά με τις άλλες περιοχές συχνοτήτων. Λόγω των ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζουν οι πολύ υψηλές συχνότητες διαμεταγωγής δεδομένων στην FR2, έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνικές μετάδοσης, οι οποίες αναφέρονται σε μια επόμενη ενότητα. Έχει καθιερωθεί η χρήση του όρου **high-band** για αυτήν την περιοχή συχνοτήτων. Αν και στην πράξη δεν χρησιμοποιούνται ακόμη ενεργά, οι συχνότητες αυτές μπορούν να προσφέρουν ταχύτητες των δεκάδων Gbps και οι επιδόσεις τους μπορούν να αγγίξουν πρακτικά αυτές των οπτικών ινών.

Τέλος, πρέπει να διευκρινιστεί ότι για τις συχνότητες από 410 MHz έως 1 GHz, που αποτελούν τμήμα της FR1, έχει καθιερωθεί η χρήση του όρου **low-band**. Αυτή η περιοχή συχνοτήτων είναι ιδανική για την παροχή 5G υπηρεσιών σε μορφολογικά δύσκολες περιοχές, καθώς και για την κάλυψη θαλασσών (εντός μίας λογικής χιλιομετρικής απόστασης από τις ακτές). Η εμβέλειά της ομοιάζει με αυτήν των δικτύων δεύτερης και τέταρτης γενιάς και στην Ελλάδα υλοποιείται (προς το παρόν) στη συχνότητα των 700 MHz. Οι μέγιστες ταχύτητες καταφόρτωσης, υπό ιδανικές συνθήκες, μπορούν να φτάσουν ακόμη και τα 250 Mbps, αν και στην πράξη είναι σημαντικά μικρότερες. Ωστόσο, αποτελεί ιδανική

επιλογή για απομακρυσμένες περιοχές, όπου η ύπαρξη κάλυψης για πρόσβαση στο Διαδίκτυο και για επικοινωνία μέσω φωνητικών κλήσεων είναι σημαντικότερη συγκριτικά με τις εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες.

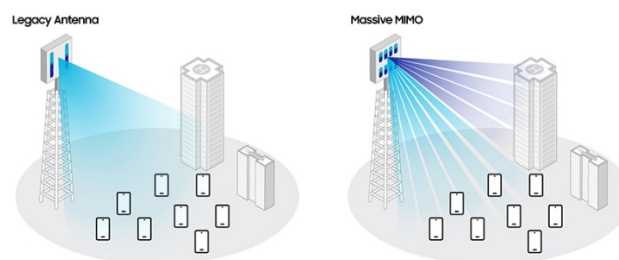
Όσον αφορά την Ελλάδα, μέχρι τη στιγμή συγγραφής της παρούσας μελέτης, για τη λειτουργία των 5G-NSA δικτύων χρησιμοποιούνται οι συχνότητες των 700 MHz και των 3,5 GHz. Η πρώτη παρέχει πολύ μεγάλη εμβέλεια και η δεύτερη αρκετά υψηλές ταχύτητες. Ωστόσο, είναι δυνατή η χρήση και των συχνοτήτων, οι οποίες έχουν ανατεθεί παραδοσιακά σε προγενέστερους τύπους δικτύων. Συνεπώς, μπορούν να αξιοποιηθούν επιπροσθέτως οι συχνότητες των 800 MHz, των 900 MHz, των 1800 MHz, των 2100 MHz και των 2600 MHz, μεμονωμένα ή, ως επί το πλείστον, συνδυαστικά μέσω carrier aggregation.

6.4 Τεχνολογίες δικτύων πέμπτης γενιάς

6.4.1 Massive MIMO

Με την τεχνολογία **Massive MIMO**, ένα σύνολο πολλών τερματικών τα οποία περιέχουν μία ή περισσότερες κεραιές επικοινωνούν με αντίστοιχα τερματικά, τα οποία περιέχουν επίσης μία ή περισσότερες κεραιές [34]. Η τεχνολογία Massive MIMO είναι ένα παράδειγμα εφαρμογής του **MU-MIMO (Multiple User-MIMO)**. Με το MU-MIMO ένας δέκτης αποστέλλει την ίδια χρονική στιγμή πολλαπλές ροές δεδομένων σε διαφορετικούς χρήστες. Με τη χρήση επιπρόσθετων κεραιών, αυξάνεται η απόδοση του χρησιμοποιούμενου φάσματος συχνοτήτων και η χωρητικότητα του δικτύου, με αποτέλεσμα τη μέγιστη αξιοποίηση των δικτυακών πόρων. Ως εκ τούτου, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι μπορούν να αξιοποιήσουν στο έπακρο το φάσμα συχνοτήτων που τους έχει ανατεθεί. Ωστόσο, η προσθήκη επιπλέον κεραιών πρέπει να πραγματοποιείται με φειδώ, καθώς από ένα σημείο και έπειτα αυξάνονται οι παρεμβολές μεταξύ των χρηστών, καθώς και η κατανάλωση ενέργειας από τις τερματικές συσκευές. Ως εκ τούτου, μειώνεται η απόδοση και εξανεμίζονται τα όποια πλεονεκτήματα του MU-MIMO.

Αξίζει να σημειωθεί πως η 3GPP ορίζει στην Release 15 τη χρήση 32 κεραιών αποστολής και λήψης ($32 * 32$), καθώς στα 5G NR δίκτυα το μήκος κύματος πολλών συχνοτήτων ενδέχεται να είναι εξαιρετικά μικρό, ενώ σε μελλοντικές προδιαγραφές θα υποστηρίζεται η χρήση από 64 κεραιές και άνω. Για τον λόγο αυτό προέκυψε και ο χαρακτηρισμός της τεχνικής MIMO των LTE και 4G δικτύων ως Massive MIMO στα 5G NR δίκτυα.



Σχήμα 36: Legacy κεραιές έναντι κεραιών massive MIMO

6.4.2 Spatial filtering (Χωρικό φιλτράρισμα – Beamforming)

Με την τεχνική beamforming [55] μπορεί να βελτιωθεί η χωρητικότητα ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας, κάτι που αποτελεί έναν πολύ σημαντικό σκοπό για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς [35]. Η τεχνική αυτή έχει δύο μορφές: ψηφιακή και αναλογική.

Με το αναλογικό χωρικό φιλτράρισμα, ορισμένες κεραιές διατάσσονται κατά τέτοιον τρόπο ώστε τα σήματα που εκπέμπουν να υφίστανται καταστροφική παρεμβολή, ενώ τα σήματα άλλων κεραιών υφίστανται δομική παρεμβολή.

Με το ψηφιακό χωρικό φιλτράρισμα, τα δεδομένα αποστέλλονται σε πολλαπλές ροές.

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς συνδυάζουν αμφότερες αυτές τις μορφές beamforming, έχοντας ως σκοπό τη βελτίωση της απόδοσής τους.

6.4.3 DSS (Dynamic Spectrum Sharing)

Με την τεχνολογία δυναμικού διαμοιρασμού φάσματος (DSS), [61] οι κεραιές μπορούν να κάνουν χρήση της ίδιας ζώνης συχνοτήτων για την παροχή 4G και 5G υπηρεσιών, έχοντας παράλληλα τη δυνατότητα να κάνουν δυναμική εκχώρηση του φάσματος συχνοτήτων, αναλόγως των αναγκών και των σεναρίων χρήσης του δικτύου. Αυτό που επιτυγχάνεται, επί της ουσίας, είναι η παροχή υπηρεσιών πέμπτης γενιάς σε μια αρχική φάση, με χρήση του ήδη υπάρχοντος κεραιοεξοπλισμού, χωρίς να απαιτείται η άμεση αναβάθμιση του ραδιοεξοπλισμού του δικτύου από τον πάροχο. Φυσικά, η αναβάθμιση του ραδιοδικτύου για την υποστήριξη πραγματικών υπηρεσιών πέμπτης γενιάς είναι αναπόφευκτη, αλλά με την τεχνολογία DSS μπορούν να παρασχεθούν υπηρεσίες υψηλότερης ποιότητας συγκριτικά με τις προηγούμενες γενιές κινητής τηλεφωνίας συνήθως μόνον με αναβάθμιση λογισμικού του δικτύου.

Προκειμένου να συγχρονιστεί η λειτουργία των δικτύων τέταρτης και πέμπτης γενιάς στην ίδια συχνότητα, απαιτείται η χρήση δύο τεχνικών. Πρόκειται για τις τεχνικές **MBSFN (Multicast – Broadcast Single Frequency Network)** [62] και **non-MBSFN (non-Multicast – Broadcast Single Frequency Network)**.

Με την τεχνική **MBSFN** μπορεί να γίνει εκπομπή δεδομένων είτε προς όλους τους χρήστες που βρίσκονται στην εμβέλεια μίας κυψέλης (broadcast εκπομπή) ή προς ένα συγκεκριμένο πλήθος χρηστών (multicast εκπομπή). Με τη χρήση αυτής της τεχνικής ενημερώνονται οι τερματικές συσκευές τέταρτης γενιάς ότι ορισμένα μεταδιδόμενα αναξιοποίητα πλαίσια που αφορούν το δίκτυο τέταρτης γενιάς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να μεταδοθούν πλαίσια του δικτύου πέμπτης γενιάς.

Με την τεχνική **non-MBSFN** μπορεί να γίνει εκπομπή πλαισίων του δικτύου πέμπτης γενιάς εντός των μεταδιδόμενων πλαισίων τέταρτης γενιάς.

Ουσιαστικά, με τη χρήση της τεχνικής DSS το φάσμα συχνοτήτων στο οποίο παρέχονται ήδη υπηρεσίες τέταρτης γενιάς μπορεί να αξιοποιηθεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό, μιας και δεν υπάρχουν περίοδοι «σιγής», κατά τις οποίες δικτυακοί πόροι παραμένουν αχρησιμοποίητοι. Καθώς πραγματοποιείται δυναμική κατανομή των συχνοτήτων, αυξάνεται η διαθεσιμότητα και οι ταχύτητες πρόσβασης στο Διαδίκτυο για τους χρήστες τέταρτης γενιάς και, παράλληλα, παρέχονται υπηρεσίες πέμπτης γενιάς με αρκετά καλή κάλυψη και ποιότητα, χωρίς να μεταβληθεί σημαντικά το ήδη υπάρχον ραδιοδίκτυο.

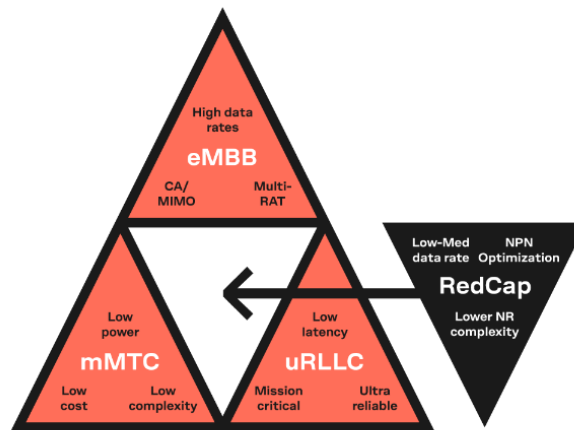
Φυσικά, υπάρχουν και μειονεκτήματα από τη χρήση της τεχνικής DSS. Αρχικά, οι παλαιότερες LTE συσκευές δεν δύνανται να αναγνωρίσουν αυτήν την τεχνολογία και, συνεπώς, δεν μπορούν να την εκμεταλλευτούν, ώστε να απολαύσουν τα πλεονεκτήματά της. Επίσης, παρατηρείται μία ελαφριά πτώση της απόδοσης τόσο για το κομμάτι της παροχής υπηρεσιών τέταρτης γενιάς όσο και για το κομμάτι της παροχής υπηρεσιών πέμπτης γενιάς, συγκριτικά με τα μεμονωμένα δίκτυα τέταρτης και πέμπτης γενιάς. Παρόλα αυτά, τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα θεωρούνται ελάχιστονης σημασίας, συγκριτικά με τα πλεονεκτήματα.

6.5 Σταθερή ασύρματη 5G πρόσβαση (FWA – Fixed Wireless Access)

Δεδομένων των πολύ υψηλών ταχυτήτων καταφόρτωσης και αναφόρτωσης που επιτυγχάνει η τεχνολογία 5G NR, στο σύντομο μέλλον θα αρχίσει η παροχή υπηρεσιών σταθερής ασύρματης τηλεφωνίας και πρόσβασης στο Διαδίκτυο. [63] Επί του παρόντος, δεν παρέχεται κάποια τέτοιου είδους υπηρεσία, καθώς η «πραγματική» (SA) λειτουργία των δικτύων πέμπτης γενιάς αναμένεται να ξεκινήσει εντός του 2024, σε περιορισμένο αριθμό περιοχών, τόσο στην Ελλάδα, όσο και σε άλλες χώρες εντός και εκτός Ευρώπης. Ωστόσο, η σταθερή ασύρματη 5G πρόσβαση είναι πολλά υποσχόμενη σε απομακρυσμένες περιοχές μη εμπορικού ενδιαφέροντος, όπου η πρόσβαση μέσω δικτύου οπτικών ινών ή ακόμη και μέσω των τεχνολογιών VDSL και ADSL είναι αδύνατη, καθώς μπορεί να παρέχει ταχύτητες της τάξεως των εκατοντάδων Mbps ή ακόμη και αρκετών Gbps και, μάλιστα, χωρίς να απαιτείται η εκτέλεση πολύμηνων έργων για την επέκταση δικτύου οπτικών ινών. Εκτιμάται ότι με την παροχή ασύρματης σταθερής 5G πρόσβασης θα συμβεί μείωση του μέσου κόστους επέκτασης ενός δικτύου οπτικών ινών που θα ανέρχεται σε ένα ποσοστό έως και 40%.

6.6 RedCap 5G (Reduced Capability 5G)

Το πρότυπο **RedCap 5G** (ή αλλιώς, **5G-NR Light**) [64] αναπτύχθηκε με σκοπό την υποστήριξη διαφόρων IoT συσκευών, οι οποίες είναι χαμηλού κόστους και έχουν χαμηλή κατασκευαστική πολυπλοκότητα, αλλά παράλληλα πρέπει να απολαμβάνουν τα προνόμια των 5G-NR δικτύων. Δεν πρόκειται για ένα εντελώς διαφορετικό πρότυπο από το 5G-NR, αλλά για μία τροποποίηση του υπάρχοντος 5G-NR προτύπου. Το 5G-NR Light εστιάζει περισσότερο στις πιο μικρές και οικονομικές IoT συσκευές, όπως είναι οι αισθητήρες διαφόρων τύπων. Για τον λόγο αυτό, δίνει έμφαση στην καλή αυτονομία όσων συσκευών λειτουργούν με μπαταρία ή στη μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα για όσες συσκευές λειτουργούν με ηλεκτρικό ρεύμα. Επίσης, καθώς οι συσκευές για τις οποίες αναπτύχθηκε κυρίως δεν έχουν πολύ υψηλές απαιτήσεις όσον αφορά τη μετάδοση δεδομένων, μπορεί να αφιερώσει έως και 20 MHz από το εύρος ζώνης συχνοτήτων, σε αντιδιαστολή με το μέγιστο των 100 MHz που αφιερώνεται στην τεχνολογία 5G-NR.



Σχήμα 37: Τοποθέτηση RedCap 5G μεταξύ των περιπτώσεων χρήσης των δικτύων 5G

6.7 5G Advanced (5.5G)

Όπως είναι αναμενόμενο, λίγο καιρό αφότου τέθηκαν οι προδιαγραφές των 5G NR δικτύων, η 3GPP ξεκίνησε εργασίες για την Προδιαγραφή 18 (**Release 18**), η οποία θα είναι ευρύτερα γνωστή ως 5G Advanced. Η Release 18 αναμένεται να ολοκληρωθεί και να τυποποιηθεί εντός του 2024 [37].

Το 5G Advanced επικεντρώνεται ως προς την υλοποίηση νέων τύπων εφαρμογών, οι περισσότερες εκ των οποίων θα είναι πραγματικού χρόνου. Συνεπώς, ένας πολύ βασικός στόχος θα είναι η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση της χρονοκαθυστέρησης (latency). Επίσης, θα γίνει χρήση νέων τεχνικών για τη γενικότερη βελτιστοποίηση του δικτύου. Ορισμένες εφαρμογές αναφέρονται στη συνέχεια:

- **XR (eXtended Reality)**

Οι υπηρεσίες XR αποτελούν ένα τμήμα των υπηρεσιών επαυξημένης πραγματικότητας (**AR – Augmented Reality**). Το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι οι υψηλές απαιτήσεις σε ταχύτητες μετάδοσης και η σχεδόν μηδενική χρονοκαθυστέρηση. Στη σημερινή εποχή αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό η χρήση τους. Απτά παραδείγματα αποτελούν οι συνεργατικές δραστηριότητες σε κοινόχρηστους εικονικούς χώρους εργασίας και η εκπαίδευση εργαζομένων απομακρυσμένα μέσω συσκευών εικονικής πραγματικότητας.

- **Τεχνητή νοημοσύνη (AI – Artificial Intelligence) και μηχανική μάθηση (ML – Machine Learning)**

Η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση μπορούν να αξιοποιηθούν προκειμένου να πραγματοποιηθεί πιο βελτιωμένη διαχείριση των δικτυακών πόρων και της ενεργειακής αποδοτικότητας των δικτύων. Αυτά θα έχουν ως αποτέλεσμα το χαμηλότερο ενεργειακό αποτύπωμα του δικτυακού εξοπλισμού, την αποδοτικότερη αξιοποίηση των επενδύσεων των παρόχων όσον αφορά τη σχεδίαση του δικτύου και τη βελτιωμένη απόδοση των πολύπλοκων κεραιοδιατάξεων που θα χρησιμοποιούνται.

- **Βελτιωμένος γεωγραφικός εντοπισμός**

Με τη χρήση του beamforming και νέων μεθόδων μέτρησης του χρόνου, αναμένεται ο γεωγραφικός εντοπισμός αντικειμένων και ανθρώπων να πραγματοποιείται με ακρίβεια μικρότερη των 10 εκατοστών, ακόμη και σε εσωτερικό χώρο, χωρίς την ανάγκη χρήσης δορυφορικών υπηρεσιών, όπως είναι το GPS. Μπορούν να βελτιωθούν, συνεπώς, οι υπηρεσίες μεταφοράς αντικειμένων και η πλοήγηση.

- **Βελτίωση της κινητικότητας**

Τα δίκτυα 5G Advanced θα χαρακτηρίζονται από ακόμη πιο βελτιωμένη κάλυψη, η οποία δεν θα οφείλεται τόσο στις συχνότητες λειτουργίας τους, όσο στο συνδυασμό χρήσης των υπάρχοντων συχνοτήτων λειτουργίας με νέες τεχνικές και τεχνολογίες, οι οποίες θα καθιστούν την κάλυψη πιο σταθερή. Περαιτέρω, υπάρχει μία τάση σύγκλισης πολλών τεχνολογιών κάτω από την ομπρέλα του 5G, όπως είναι το Wi-Fi.

6.8 Επίλογος

Στο τρέχον κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα δίκτυα πέμπτης γενιάς, τα οποία βασίζονται στην προδιαγραφή 5G-NR και διακρίνονται σε 5G-SA (stand-alone) και σε 5G-NSA (non-stand-alone). Επιπλέον, γίνεται αναφορά στο πρότυπο 5G Advanced, το οποίο θα παρέχει τη δυνατότητα μαζικής χρήσης νέων υπηρεσιών, όπως είναι οι υπηρεσίες xR και οι υπηρεσίες AI και παρουσιάζει την κατεύθυνση προς τις υπηρεσίες έκτης γενιάς κινητής τηλεφωνίας.

Κατά την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, η ανάπτυξη των 5G-NR δικτύων βρίσκεται σε εξέλιξη και η ανάπτυξη των «πραγματικών» 5G δικτύων αναμένεται να ξεκινήσει σε σημαντικό βαθμό εντός του 2024. Παρόλα αυτά, η έκτη γενιά (6G) δικτύων κινητής τηλεφωνίας βρίσκεται ήδη υπό εξέλιξη και αναμένεται να αλλάξει ριζικά την καθημερινότητα.

Κεφάλαιο 7: Δίκτυα έκτης γενιάς και μελλοντικές εξελίξεις

7.1 Εισαγωγή

Ο όρος έκτη γενιά (6G) κινητής τηλεφωνίας εισήχθη για την περιγραφή των κυψελωτών δικτύων της επόμενης γενιάς, η εμφάνιση των οποίων αναμένεται από τα τέλη του 2030 και έπειτα. Επί του παρόντος, δοκιμάζονται ορισμένες νέες τεχνικές και τεχνολογίες, κυρίως όσον αφορά τη μετάδοση δεδομένων, τον τρόπο διαμόρφωσης των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων και τις συχνότητες λειτουργίας των δικτύων έκτης γενιάς. Ωστόσο, τίποτα δεν έχει οριστικοποιηθεί έως τη χρονική στιγμή ολοκλήρωσης της παρούσας εργασίας, ενώ δεν έχει υπάρξει έστω ένα πρότυπο (draft) από κάποιον αρμόδιο οργανισμό τυποποίησης [39][47].

7.2 Πιθανοί στόχοι των δικτύων έκτης γενιάς

Προκειμένου να έχει νόημα η ύπαρξη των δικτύων έκτης γενιάς αναμένεται η επίτευξη τουλάχιστον αυτών των στόχων:

- Διαθεσιμότητα δικτύου άνω του 99,99%
- Μέγιστη επιτεύξιμη ταχύτητα 1 TB/s
- Εξαιρετικά μειωμένο ενεργειακό αποτύπωμα
- Υποστήριξη συσκευών εν κινήσει με ταχύτητα τουλάχιστον 1000 km/h ώστε να καταστεί εφικτή η χρήση εντός αεροπλάνου
- Από 5% - 10% πιο αποτελεσματική διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων συγκριτικά με τα δίκτυα πέμπτης γενιάς
- Πολύ χαμηλή χρονοκαθυστέρηση της τάξης των 10 – 100 μsec, ώστε να καταστεί εφικτή η χρήση υπηρεσιών πραγματικού χρόνου
- Εξυπηρέτηση τεράστιου πλήθους χρηστών (έως 10^7 συσκευές ανά km^2)

Η έκτη γενιά κινητής τηλεφωνίας αναπτύσσεται από ένα σύνολο τεχνολογικών κολοσσών (όπως είναι η Ericsson, η Samsung, η Apple, η Huawei, η NTT Docomo, η Nokia, η Xiaomi κ.ά.), από διάφορα ερευνητικά ινστιτούτα (όπως είναι το Interuniversity Microelectronics Center) και από ένα σύνολο χωρών (όπως οι Η.Π.Α, η Ινδία, η Νότια Κορέα, η Κίνα και διάφορες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης).

7.3 Πιθανά χαρακτηριστικά και σενάρια χρήσης της έκτης γενιάς

- **Ταχύτητες πρόσβασης στο Διαδίκτυο**

Ορισμένοι επιστημονικοί φορείς διατείνονται πως οι ταχύτητες πρόσβασης στο Διαδίκτυο θα μπορέσουν να αγγίξουν ακόμη και το 1 Tbps, υπό ιδανικές συνθήκες. Αυτή η ταχύτητα καταφόρτωσης δεδομένων φαντάζει εξωπραγματική, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, ωστόσο πάντα ο στόχος είναι η παροχή όσο το δυνατόν υψηλότερων ταχυτήτων πρόσβασης. Σε θεωρητικό επίπεδο, με τα δίκτυα 6G οι ταχύτητες καταφόρτωσης θα έχουν ως ελάχιστες, τιμές της τάξης των μερικών Gbps. Επί του παρόντος, σύμφωνα με πειραματική δοκιμή της LG είναι εφικτή η ταχύτητα του 1 Tbps στο

συρρευματικό κανάλι για μικρά χρονικά διαστήματα και για κοντινές αποστάσεις. Πιο συγκεκριμένα, η LG επέτυχε τον προαναφερθέντα ρυθμό μετάδοσης βασιζόμενη σε τεχνολογίες δικτύων πέμπτης γενιάς, στο Fraunhofer Heinrich Hertz Institute του Βερολίνου, σε μια απόσταση 320 μέτρων σε εξωτερικό χώρο, στη ζώνη συχνοτήτων 155 – 175 GHz [38] [67].

- **Νέες συχνότητες λειτουργίας**

Το **IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)** πρότεινε να χρησιμοποιηθεί το φάσμα συχνοτήτων 100 GHz – 3 THz, καθώς είναι προς το παρόν «ανεξερεύνητο» και δεν υπάρχουν πολλές εφαρμογές χρήσης του [38]. Γενικώς, υπάρχουν σκέψεις τα δίκτυα έκκτης γενιάς να λειτουργούν στο φάσμα των 30 GHz – 300 GHz, ενώ η FCC απελευθέρωσε και το φάσμα συχνοτήτων 95 GHz – 3 THz για δοκιμές εταιριών [18]. Όπως γίνεται αντιληπτό βέβαια, αυτό το φάσμα συχνοτήτων έχει εξαιρετικά μικρό μήκος κύματος, κάτι που δεν συνάδει με τον χαρακτήρα των κινητών επικοινωνιών, όπου απαιτείται συνεχής κάλυψη κατά τη μετακίνηση των τερματικών συσκευών. Ωστόσο, εάν αξιοποιηθεί θα είναι εφικτή η καταφόρτωση και η αναφόρτωση δεδομένων με εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες. Πιθανότατα, άλλωστε, να γίνει συμπληρωματική χρήση του σε εξειδικευμένες περιπτώσεις χρήσης, παράλληλα με άλλες συχνότητες, οι οποίες θα μπορούν να παρέχουν κάλυψη χωρίς οπτική επαφή και από πιο μεγάλες αποστάσεις.

- **Σενάρια χρήσης**

Οι πάροχοι τηλεπικοινωνιών, οι κατασκευαστικές εταιρίες υλικού και τα ερευνητικά ινστιτούτα, οραματίζονται την αξιοποίηση των υπηρεσιών έκκτης γενιάς για την παροχή νέων, καινοτόμων υπηρεσιών, κεντρικός πυρήνας των οποίων αναμένεται να είναι η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση. Μάλιστα, στόχος είναι η εισαγωγή της ΑΙ στον πυρήνα λειτουργίας του δικτύου, ώστε η ρύθμιση των δικτύων να πραγματοποιείται «έξυπνα» αναλόγως των σεναρίων χρήσης και της ζήτησης δικτυακών πόρων. Βάσει αυτών των βλέψεων, ενδέχεται μέσω τεχνητής νοημοσύνης να λαμβάνεται απόφαση σχετικά με το πού θα πραγματοποιούνται οι διάφορες εργασίες (στις τερματικές συσκευές, στο cloud κλπ), ενώ ενδέχεται να πραγματοποιείται ακόμη και η ανασχεδίαση ενός δικτύου κατά τόπους, η δημιουργία νέων πρωτοκόλλων κ.ά.

- **Σχεδόν μηδενική χρονοκαθυστέρηση (latency)**

Καθώς οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν την τεχνητή νοημοσύνη και την μηχανική μάθηση απαιτούν πολλές φορές περίπλοκους υπολογισμούς «στο σύννεφο», είναι απαραίτητη η ύπαρξη δικτύων με σχεδόν μηδενική χρονοκαθυστέρηση, ώστε οι αιτήσεις και οι αντίστοιχες αποκρίσεις να διεκπεραιώνονται σχεδόν στιγμιαία και χωρίς διακοπή. Ένας πολύ φιλόδοξος στόχος είναι η χρονοκαθυστέρηση να μειωθεί έως και το 1μs (microsecond). Κάτι τέτοιο θα επέτρεπε σενάρια χρήσης, όπως είναι οι ιατρικές επεμβάσεις εξ' απόστασεως, οι οποίες απαιτούν στιγμιαία απόκριση. Φυσικά, κάτι τέτοιο δεν απαιτεί έξυπνη σχεδίαση μόνο των δικτυακών υποδομών, αλλά και τερματικές συσκευές οι οποίες να μπορούν να υποστηρίξουν τόσο μικρούς χρόνους latency με το κατάλληλο hardware.

- **Νέες τεχνικές και τεχνολογίες λειτουργίας συσκευών και δικτύων**

Λόγω της χρήσης των δικτύων έκτης γενιάς από μία τεράστια ποικιλία τερματικών συσκευών, αλλά και λόγω της λειτουργίας των δικτύων σε μία τεράστια ποικιλία φάσματος συχνοτήτων, αναμένεται η ύπαρξη ενός μηχανισμού μέτρησης της απορροφητικότητας των ραδιοσυχνοτήτων από διάφορα αντικείμενα, ώστε να επιλέγεται η κατάλληλη, κατά περίπτωση, συχνότητα λειτουργίας. Αυτή η διαδικασία θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, ιδίως στις εξαιρετικές υψηλές ζώνες συχνοτήτων, όπου ακόμη και ένα φύλλο χαρτιού θα μπορούσε να εμποδίσει τη μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων.

7.4 Επίλογος

Τα δίκτυα έκτης γενιάς αναμένεται να αποτελέσουν μία κυριολεκτική επανάσταση στην ιστορία της κινητής τηλεφωνίας, πολύ μεγαλύτερη από αυτήν των δικτύων τρίτης, τέταρτης και πέμπτης γενιάς και ισάξια με την επανάσταση που επέφεραν τα δίκτυα δεύτερης γενιάς. Όπως ακριβώς τα δίκτυα δεύτερης γενιάς εισήγαγαν την ανθρωπότητα βαθιά στην χρήση της κινητής τηλεφωνίας και έδωσαν τη δυνατότητα χρήσης υπηρεσιών τηλεφωνίας σχεδόν σε κάθε γωνιά του πλανήτη, έτσι και τα δίκτυα έκτης γενιάς, βασιζόμενα στις τεχνολογικές εξελίξεις που εισήχθησαν με τις τεχνολογίες δικτύων τρίτης, τέταρτης και πέμπτης γενιάς, θα εισάγουν την ανθρωπότητα σε δραστηριότητες οι οποίες ήταν, φαινομενικά, ασύλληπτες τα προηγούμενα χρόνια.

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

Μέσα σε λίγο περισσότερο από 30 χρόνια από την έναρξη των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς, η εξέλιξη της κινητής τηλεφωνίας υπήρξε απίστευτα ραγδαία. Από τις φωνητικές κλήσεις «στη μέση του πουθενά» και από την «επανάσταση» των σύντομων γραπτών μηνυμάτων, η κινητή τηλεφωνία χρησιμοποιείται πλέον για βιντεοδιασκέψεις, για τη διακίνηση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων εν κινήσει, για τον απομακρυσμένο έλεγχο επιχειρήσεων και, πολύ σύντομα, θα ξεκινήσει η ολοένα και πιο εκτεταμένη χρήση της σε εργασία εξαιρετικά ζωτικής σημασίας, όπως είναι οι λεπτές χειρουργικές επεμβάσεις εξ' αποστάσεως σε πραγματικό χρόνο.

Ωστόσο, οι εξελίξεις δεν σταματούν εδώ και μέσα στην επόμενη δεκαετία αναμένεται να δούμε την επέκταση της χρήσης της, μέσω των δικτύων έκκτης γενιάς, σε υπηρεσίες οι οποίες φαινομενικά θεωρούνται πολύ δύσκολο να παρασχεθούν τη δεδομένη χρονική στιγμή.

Ακόμη πιο μετά από την εμφάνιση των δικτύων έκκτης γενιάς αναμένεται η εμφάνιση των δικτύων έβδομης γενιάς, μέσω των οποίων αναμένεται η σύγκλιση όλων των διαθέσιμων προτύπων επικοινωνίας (WLAN, GPS, GLONASS, κινητή τηλεφωνία κοκ), ώστε να καταστεί διαθέσιμη η επικοινωνία από οποιοδήποτε σημείο του κόσμου, χωρίς να ενδιαφέρει τους χρήστες ο τύπος δικτύου ο οποίος χρησιμοποιείται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] 3rd Generation Partnership Project, “*Technical Specifications and Technical Reports for a GERAN-based 3GPP system*”, 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 41.101, 2003. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2642>
- [2] 3rd Generation Partnership Project, “*GSM/EDGE Physical layer on the radio path; General description*”, 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 45.001, 2000. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2705>
- [3] 3rd Generation Partnership Project, “*GSM/EDGE Multiplexing and multiple access on the radio path*”, 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 45.002, 2000. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2706>
- [4] 3rd Generation Partnership Project, “*GSM/EDGE Channel coding*”, 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 45.003, 2001. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2707>
- [5] 3rd Generation Partnership Project, “*GSM/EDGE Modulation*”, 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 45.004, 2001. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2708>
- [6] 3rd Generation Partnership Project, “*GSM/EDGE Radio transmission and reception*”, 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 45.005, 2000. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2709>
- [7] 3rd Generation Partnership Project, “*Network architecture*”, 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 23.002, 1999. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=728>
- [8] 3rd Generation Partnership Project, “*High Speed Circuit Switched Data (HSCSD); Stage 1*”, 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 22.034, 1999. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=573>
- [9] 3rd Generation Partnership Project, “*High Speed Circuit Switched Data (HSCSD); Stage 1*”, 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 23.034, 1999. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=743>
- [10] 3rd Generation Partnership Project, “*Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE); Project scheduling and open issues for EDGE*”, 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 50.059, 2001. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2783>
- [11] 3rd Generation Partnership Project, “*Project scheduling and open issues for EDGE*”, 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 10.59, 2000. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=399>
- [12] 3rd Generation Partnership Project, “*UE Radio Access capabilities*”, 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 25.306, 2000. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=1169>
- [13], Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων, Available: <https://www.eett.gr/>
- [14], Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων, “*Φάσμα ραδιοσυχνότητων*”, Available: <https://www.eett.gr/parochoi/fasma-radiosychnotiton/>
- [15], Ο.Τ.Ε Όμιλος Εταιριών, Available: www.cosmote.gr
- [16] Vodafone Group, Available: www.vodafone.gr
- [17] NOVA TELECOMMUNICATIONS & MEDIA MONOΠΡΟΣΩΠΗ Α.Ε., Available: www.nova.gr
- [18] Federal Communications Commission, “*Auction 102 - 24 GHz*”, Available: <https://auctiondata.fcc.gov/public/projects/auction102>

- [19] International Telecommunication Union, “*Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)*”, TU-R M.2410-0 (11/2017), Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2410-2017-PDF-E.pdf
- [20] Kreher and Ruedebusch, *UMTS Signaling: UMTS Interfaces, Protocols, Message Flows and Procedures Analyzed and Explained*, Wiley, 2007.
- [21] Laiho, Wacker and Novosad, *Radio Network Planning and Optimization for UMTS*, Wiley, 2002.
- [22] James F. Kurose, Keith W. Ross, *Δικτύωση υπολογιστών, Προσέγγιση από πάνω προς τα κάτω*, 8^η έκδοση, Γκιούρδας, 2022.
- [23] Sajal Kumar Das, *Mobile Terminal Receiver Design: LTE and LTE-Advanced*, Wiley, 2016.
- [24] European Telecommunications Standards Institute, “*LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification*”, 3GPP TS 36.322 version 8.8.0 Release 8, 07-2010. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136322/08.08.00_60/ts_136322v080800p.pdf
- [25] 3rd Generation Partnership Project, “*Overview of 3GPP Release 9 V0.3.4 (2014-09)*”, Available: https://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Rel-09_description_20140924.zip
- [26] 3rd Generation Partnership Project, “*Overview of 3GPP Release 10 V0.2.1 (2014-06)*”, Available: https://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Rel-10_description_20140630.zip
- [27] 3rd Generation Partnership Project, “*Overview of 3GPP Release 11 V0.2.0 (2014-09)*”, Available: https://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Rel-11_description_20140924.zip
- [28] 3rd Generation Partnership Project, “*Overview of 3GPP Release 12 V0.2.0 (2015-09)*”, Available: https://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Rel-12_description_20150909.zip
- [29] 3rd Generation Partnership Project, “*Release 13 analytical view version Sept. 9th 2015*”, Available: https://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Rel-13_description_20150917.zip
- [30] 3rd Generation Partnership Project, “*Overview of 3GPP Release 5*”, Available: https://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Rel-05_description_20160107.zip
- [31] Qualcomm, “*LTE – An Optimized OFDMA Solution for Wider Bandwidth Spectrum*”, Available: <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/lte-an-optimized-ofdma-solution-for-wider-bandwidth-spectrum.pdf>
- [32] Qualcomm, “*Leading the global adoption of mobile broadband*”, Available: <https://www.qualcomm.com/research/5g/4g>
- [33] Global mobile Suppliers Association, “*NR-U Transforming 5G – Qualcomm Presentation*”, Available: <https://gsacom.com/paper/nr-u-transforming-5g-qualcomm-presentation/>
- [34] Nokia, “*Dual-band Massive MIMO radio combines high performance with deployment flexibility*”, Available: <https://www.nokia.com/blog/dual-band-massive-mimo-radio-combines-high-performance-with-deployment-flexibility/>
- [35] Verizon, “*What is 5G beamforming?*”, Available: <https://www.verizon.com/business/resources/articles/5g-beamforming-massive-mimo/>
- [36] Qualcomm, “*3GPP commits to 5G NR in unlicensed spectrum in its next release*”, Available: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2018/12/3gpp-commits-5g-nr-unlicensed-spectrum-its-next-release>
- [37] Ericsson, “*5G Advanced: Evolution towards 6G*”, Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/5g-advanced-evolution-towards-6g>
- [38] E.J. Violette, R.H. Espeland, R.O. DeBolt, F.K. Schwering, “*Millimeter-wave propagation at street level in an urban environment*”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (Volume: 26, Issue: 3, May 1988).
- [39] Walid Saad, Mehdi Bennis, and Mingzhe Chen, “*A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems*”, IEEE.

- [40] Mina Labib, Vuk Marojevic, Jeffrey H. Reed, Amir I. Zaghoul, “Extending LTE into the Unlicensed Spectrum: Technical Analysis of the Proposed Variants”, IEEE Communications Standards Supplement Magazine, September 2017.
- [41] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, *5G NR Ασυρματικά Δίκτυα Επικοινωνιών Πέμπτης Γενιάς*, Φούντας, 2020.
- [42] Srikanth Kamath, Somilya Anand, Suyash Buchke, Kaushikee Agnihotri, “A Review of Recent Developments in 6G Communications Systems”, Department of Electronics and Communication Engineering, Manipal Institute of Technology, Manipal Academy of Higher Education, Manipal 576104, Karnataka, India, 17 Ιανουαρίου 2024, <https://www.mdpi.com/2673-4591/59/1/167>
- [43] Cybersecurity and Information Systems Information Analysis Center, “6G and Its Advancements Over 5G Networks”, Available: <https://csiac.org/technical-inquiries/notable/6g-and-its-advancements-over-5g-networks/>
- [44] <https://www.britannica.com/biography/Martin-Cooper>
- [45] 3rd Generation Partnership Project, “Release 14 Description; Summary of Rel-14 Work Items”, Specification 21.914. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3179>
- [46] 3rd Generation Partnership Project, “Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items”, Specification 21.915. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3389>
- [47] 3rd Generation Partnership Project, “3GPP Commits to Develop 6G Specifications”. Available: <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/partner-pr-6g>
- [48] What is LTE License Assisted Access (LAA)? Available: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-lte-license-assisted-access>
- [49] What is LAA? Available: <https://www.androidpolice.com/what-is-license-assisted-access-laa/>
- [50] 3rd Generation Partnership Project, “Service requirements for Home Node B (HNB) and Home eNode B (HeNB)”, Specification: 22.220. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=626>
- [51] 3rd Generation Partnership Project, “Summary of all Release 99 Features document”, Available: https://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Rel-99_description_20160701.zip
- [52] 3rd Generation Partnership Project, “*Technical Specifications and Technical Reports for a GERAN-based 3GPP system*”, Specification: 41.101. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2642>
- [53] 3rd Generation Partnership Project, “*Technical Specifications and Technical Reports for a UTRAN-based 3GPP system*”, Specification: 21.101. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=544>
- [54] What is MIMO (multiple input, multiple output)? Available: <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/MIMO>
- [55] Multiple Input Multiple Output (MIMO), Available: <https://www.linkedin.com/pulse/multiple-input-output-mimo-dr-swamynathan-s-m-nhicc>
- [56] Understanding the Home Subscriber Server (HSS) Sh interface, Available: <https://www.oracle.com/technical-resources/articles/enterprise-architecture/home-subscriber-server-part1.html>
- [57] MME (Mobility Management Entity). Available: https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_MME.html
- [58] Evolved Packet Core. Available: https://www.3g4g.co.uk/Lte/LTE_WP_0903_AlcatelLucent.pdf
- [59] 5G standalone. Available: <https://www.ericsson.com/en/5g/5g-sa>
- [60] 5G NR Frequency Bandwidth: Everything You Need to Know, Available: <https://www.linkedin.com/pulse/5g-nr-frequency-bandwidth-everything-you-need-know-myapekshatelecom>
- [61] Sudeep Bhattarai, Jung-Min Jerry Park, Bo Gao, Kaigui Bian, William Lehr, “An Overview of Dynamic Spectrum Sharing: Ongoing Initiatives, Challenges, and a Roadmap for Future Research”, IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking (Volume: 2, Issue: 2, June 2016)

- [62] Multicast broadcast single frequency network (MBSFN) transmission architecture in Long-Term Evolution-Advanced system. Available: https://www.researchgate.net/figure/Multicast-broadcast-single-frequency-network-MBSFN-transmission-architecture-in_fig1_327862444
- [63] 5G Fixed Wireless Access unlocks a world of opportunities, Available: https://www.ericsson.com/en/fixed-wireless-access?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw0ruyBhDuARIsANSZ3wp0eK3val5DI6Vaufs1FMonfGsWRBaCLxAKVqqVkr3aM9VljQmQ4saAkjOEALw_wcB&gclsrc=aw.ds
- [64] RedCap - expanding the 5G device ecosystem for consumers and industries. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/redcap-expanding-the-5g-device-ecosystem-for-consumers-and-industries>
- [65] What is SMS (Short Message Service)? Available: <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/Short-Message-Service>
- [66] What is Multimedia Messaging Service (MMS)? Available: <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/Multimedia-Messaging-Service>
- [67] LG Innovation: Working Together Toward the Arrival of 6G Technology, Available: https://www.lg.com/ca_en/lg-innovation-stories/6g-technology/