



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ  
ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Μελέτη της δομής και λειτουργίας των LTE (Long Term Evolution) δικτύων κινητών επικοινωνιών και των επεκτάσεών τους με χρήση Femtocells.

**Η Διπλωματική Εργασία**

παρουσιάστηκε ενώπιον  
του Διδακτικού Προσωπικού του  
Πανεπιστημίου Αιγαίου

---

**Σε Μερική Εκπλήρωση**

των Απαιτήσεων για το Δίπλωμα του  
Μηχανικού Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

---

των

Μειδάνη Χαράλαμπου  
Σαπουνά Εμμανουήλ

Ιούνιος 2011

Η ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΩΝ ΕΓΚΡΙΝΕΙ

ΤΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΩΝ Μειδάνη Χαράλαμπου και Σαπουνά Εμμανουήλ:

---

Σκιάνης Χαράλαμπος, Επιβλέπων

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και  
Επικοινωνιακών Συστημάτων

---

Βουγιούκας Δημοσθένης, Μέλος

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και  
Επικοινωνιακών Συστημάτων

---

Μαραγκουδάκης Εμμανουήλ, Μέλος

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και  
Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ  
ΕΑΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2011

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική αυτή εργασία εξετάζει τα ασύρματα δίκτυα LTE, τις τεχνολογίες μετάδοσης και την εφαρμογή τους στα ασύρματα οικιακά δίκτυα (Femtocells). Αρχικά αναλύεται η δομή και η αρχιτεκτονική του δικτύου και οι τροποποιήσεις που απαιτούνται στις συσκευές των χρηστών ώστε να μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις νέες τεχνολογίες των δικτύων αυτών. Γίνεται μια εκτενής αναφορά του τρόπου λειτουργίας τους μέσα από την μελέτη των επιπέδων και των πρωτοκόλλων που διαθέτουν και παρουσιάζονται οι ασύρματες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν, OFDMA και SC-FDMA.

Στη συνέχεια γίνεται μια αναλυτική περιγραφή των δικτύων Femtocell, τόσο της δομής και της λειτουργίας τους όσο και της προσαρμογής τους στην τεχνολογία LTE αλλά και μία γενική μελέτη για τα ζητήματα που ανακύπτουν από τη χρήση των νέων αυτών τεχνολογιών. Τέλος παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι και οι τεχνικές διαχείρισης πόρων που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα LTE και LTE Femtocells.

Μεϊδάνης Χαράλαμπος

Σαπουνάς Εμμανουήλ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

Πανεπιστήμιο Αιγαίου

## **ABSTRACT**

This diploma thesis examines the LTE wireless networks, the transmission technologies they use, and their implementation on home used wireless networks (femtocells). The structure and the network architecture are analyzed in the beginning as also the modifications needed to be done on the user equipment in order for it to be able to use the new technologies and features of these networks. An extensive reference is made on their way of operation through the study of their protocol layers and the transmission technologies they use, OFDMA and SC-FDMA.

Thereafter, there is an extensive description of the Femtocell networks, of their way of operation, their adaptation on LTE networks and the issues that occur from the use of these new technologies. In the end we present the algorithms and techniques of resource management used on both LTE and Femtocell networks.

Meidanis Charalampos

Sapounas Emmanouil

Department of Information and Communication Systems Engineering

University of the Aegean

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ - ΑΦΙΕΡΩΣΕΙΣ**

Η παρούσα εργασία αποτελεί την Διπλωματική μας εργασία στα πλαίσια των σπουδών μας στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Αρχικά, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή κ. Σκιάνη Χαράλαμπο για την ανάθεση της εργασίας αυτής και τη συμβολή του στην περάτωσή της. Ιδιαίτερα θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον διδάσκοντα κ. Σκούτα Δημήτριο για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη που μας παρείχε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μας. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας, τους φίλους μας και γενικά όσους μας στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια στη φοιτητική μας ζωή.

Σάμος, Ιούνιος 2011

## Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	iii
ABSTRACT.....	iv
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ - ΑΦΙΕΡΩΣΕΙΣ.....	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΟΝΥΜΙΩΝ.....	xi
Εισαγωγή.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Δίκτυα LTE .....	22
1.1 Εισαγωγή.....	22
1.2 Αρχιτεκτονική 3G .....	24
1.3 Αρχιτεκτονική LTE.....	27
1.3.1 Μονάδα Διαχείρισης Κινητικότητας (Mobility Management Entity-MME) ..	28
1.3.2 System Architecture Evolution Gateway (SAE GW).....	30
1.3.3 Εξωτερικά δίκτυα και υπηρεσίες ( External networks and Services).....	34
1.3.4 Μονάδα Πολιτικής και Χρεώσεων (Policy and Charging Resource Function-PCRF) .....	34
1.3.5 Τοπικός Server συνδρομητών (Home Subscription Server - HSS).....	35
1.3.6 Σταθμός Βάσης (eNodeB) .....	36
1.3.7 Συσκευή Χρήστη (UE) .....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Πρωτόκολλα δικτύων LTE και διασύνδεση.....	39
2.1 Εισαγωγή.....	39
2.2 Διασύνδεση δικτύων .....	39
2.3 Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων.....	42
2.3.1 Πρωτόκολλο διαχείρισης ασύρματων πόρων (Radio Resource Control - RRC) .....	47
2.3.2 Πρωτόκολλο μετατροπής πακέτων δεδομένων (Packet Data Convergence Protocol - PDCP).....	50
2.3.3 Πρωτόκολλο ελέγχου ασύρματων συνδέσεων (Radio Link Control - RLC) ..	52
2.3.4 Επίπεδο MAC (Medium Access Control) .....	54
2.3.5 Φυσικό επίπεδο (Physical Layer) .....	59
2.3.6 Τεχνολογίες μετάδοσης .....	59
2.3.7 Πρωτόκολλα διεπαφής X2 (X2 Interface Protocols).....	72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Femtocells.....	78
3.1 Εισαγωγή.....	78
3.2 Αρχιτεκτονική Femtocells.....	79
3.2.1 Οικιακός Σταθμός Βάσης (Home eNodeB – HeNB) .....	80
3.2.2 Femtocell Gateway .....	80
3.3 Πρωτόκολλα Femtocell.....	82
3.4 Ζητήματα που ανακύπτουν από την χρήση των Femtocells .....	83
3.4.1 Ζητήματα ασφάλειας .....	83
3.4.2 Ζητήματα υγείας.....	86
3.4.3 Ρυθμιστικά ζητήματα.....	88
3.4.4 Ζητήματα παρεμβολών.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Διαχείριση πόρων σε δίκτυα LTE και LTE Femtocells .....	92
4.1 Εισαγωγή.....	92
4.2 Περίληψη των αλγορίθμων διαχείρισης ασύρματων πόρων.....	92
4.3 Παράμετροι Ελέγχου Αποδοχής και Ποιότητας Υπηρεσιών .....	93
4.4 Δυναμική δρομολόγηση και προσαρμογή σύνδεσης στην κατερχόμενη ζεύξη (Downlink) .....	95
4.4.1 Δρομολόγηση δεύτερου επιπέδου και πλαίσιο προσαρμογής σύνδεσης.....	95
4.4.2 Δρομολόγηση πακέτων στο πεδίο της συχνότητας .....	96
4.4.3 Αλγόριθμοι συνδυασμένης δρομολόγησης στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας .....	98
4.4.4 Δρομολόγηση πακέτων με MIMO (Multiple Input – Multiple Output).....	100
4.5 Δυναμική δρομολόγηση και προσαρμογή σύνδεσης στην ανερχόμενη ζεύξη (Uplink).....	101
4.5.1 Μηνύματα σηματοδότησης για την υποστήριξη των λειτουργιών προσαρμογής σύνδεσης και δρομολόγησης πακέτων στην ανερχόμενη ζεύξη .....	102
4.5.2 Προσαρμογή σύνδεσης στην ανερχόμενη ζεύξη.....	106
4.5.3 Δρομολόγηση πακέτων στην ανερχόμενη ζεύξη.....	106
4.6 Διαχείριση ασύρματων πόρων σε δίκτυα Femtocell.....	107
4.6.1 Εκτιμήσεις και σκέψεις για τον σχεδιασμό των Femtocells.....	108
4.6.2 Ποια είναι τα πιθανά σενάρια διάταξης;.....	108
4.6.3 Ποιες είναι οι προβλεπόμενες εφαρμογές στην χρήση των Femtocells και ποια θα είναι τα πρότυπα χρήσης τους; .....	109

4.6.4 Πώς να διανείμουμε τους πόρους έτσι ώστε να ικανοποιήσουμε τις απαιτήσεις των εφαρμογών;.....	109
4.6.5 Πώς να επιβεβαιώσουμε ότι μια συσκευή χρήστη δέχεται παρεμβολές; .....	111
4.6.6 Πώς να αναγνωρίσουμε ποια συσκευή παρεμβάλλεται στη συσκευή του χρήστη; .....	111
4.6.7 Πώς να διαπραγματευτούμε τους πόρους έτσι ώστε να μειώσουμε και να αποφύγουμε τις παρεμβολές;.....	112
4.6.8 Περιγραφή του Αλγορίθμου Αντίληψης (Cognitive Radio Resource Management – CRRM) .....	115
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Βιβλιογραφία .....	117



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1.1 Εμπορική ανάπτυξη τεχνολογιών μετάδοσης.....	19
1.2 Χρήστες 3G ανά τον κόσμο ως το 2013 .....	20
1.3 Εξέλιξη δικτύων 3G τα τελευταία 10 χρόνια.....	20
Σχήμα 1.1 Αρχιτεκτονική δικτύου 3G.....	24
Σχήμα 1.2 Σύνδεση του RNC με τον GGSN παρακάμπτοντας τον κόμβο SGSN.....	27
Σχήμα 1.3 Ο RNC και οι λειτουργίες του ενσωματώνονται στον NodeB ως αποτέλεσμα της εξέλιξης της αρχιτεκτονικής του δικτύου 3G.....	27
Σχήμα 1.4 Εξέλιξη της αρχιτεκτονικής 3G – αρχιτεκτονική δικτύου LTE.....	28
Σχήμα 1.5 Αρχιτεκτονική δικτύου LTE.....	30
Σχήμα 2.1 Διασύνδεση μεταξύ LTE και UMTS δικτύων.....	40
Σχήμα 2.2 Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων LTE.....	42
Σχήμα 2.3 Διασύνδεση κόμβων ενός LTE δικτύου στο τμήμα E-UTRAN.....	44
Σχήμα 2.4 Πρωτόκολλα διασύνδεσης E-UTRAN-MME στο επίπεδο ελέγχου (CP).....	44
Σχήμα 2.5 Πρωτόκολλα διασύνδεσης MME με τις πύλες S-GW, P-GW στο επίπεδο ελέγχου (CP).....	45
Σχήμα 2.6 Πρωτόκολλα διασύνδεσης για GTP υπηρεσίες στο επίπεδο χρήστη (UP).....	47
Σχήμα 2.7 Φορητότητα ανάμεσα σε διαφορετικά δίκτυα.....	49
Σχήμα 2.8 Λειτουργίες RRC και PDCP.....	51
Σχήμα 2.9 Κανάλια σηματοδότησης και μεταφοράς στο επίπεδο MAC.....	54
Σχήμα 2.10 Κανάλια μεταφοράς στο επίπεδο MAC.....	55
Σχήμα 2.11 Πλαίσιο MAC.....	57
Σχήμα 2.12 Πλαίσιο MAC στην περίπτωση διαδικασίας RACH.....	58
Σχήμα 2.13 Αρχή λειτουργίας FDMA.....	60
Σχήμα 2.14 Αρχή λειτουργίας πολλαπλών φερόντων.....	61
Σχήμα 2.15 Διατήρηση ορθογωνικότητας μονού φέροντος.....	62
Σχήμα 2.16 Μετασχηματισμός Fourier διαφορετικών κυματομορφών.....	63
Σχήμα 2.17 OFDMA πομπός και δέκτης.....	65
Σχήμα 2.18 Δημιουργία OFDM συμβόλου.....	66
Σχήμα 2.19 Πομπός OFDMA με χρήση windowing.....	67
Σχήμα 2.20 Κατανομή πόρων στην τεχνολογία OFDMA.....	68
Σχήμα 2.21 Πομπός και δέκτης SC-FDMA.....	69

Σχήμα 2.22 Προσαρμογή μετάδοσης δεδομένων σε σύστημα SC-FDMA.....	70
Σχήμα 2.23 Κατανομή πόρων για πολλαπλή πρόσβαση στο πεδίο των συχνοτήτων (SC-FDMA).....	71
Σχήμα 2.24 Διασύνδεση πρωτοκόλλων ανάμεσα σε eNodeBs.....	73
Σχήμα 2.25 Handover μεταξύ eNodeBs.....	75
Σχήμα 2.26 Έλεγχος Παρεμβολών.....	77
Σχήμα 3.1 Τεχνολογίες μετάδοσης στα Femtocell.....	79
Σχήμα 3.2 Αρχιτεκτονική Femtocell.....	80
Σχήμα 3.3 Διασύνδεση ανάμεσα στον HeNB και στην S-GW στο επίπεδο χρήστη (UP).....	82
Σχήμα 3.4 Διασύνδεση ανάμεσα στον HeNB και στην MME στο επίπεδο ελέγχου (CP).....	83
Σχήμα 4.1 Στοίβα πρωτοκόλλων σε επίπεδο χρήστη και επίπεδο ελέγχου.....	92
Σχήμα 4.2 Παράδειγμα του QCI αλλά και των παραμέτρων που εμπεριέχει.....	94
Σχήμα 4.3 Λειτουργία και διασυνδέσεις του δυναμικού χρονοπρογραμματιστή πακέτων.....	96
Σχήμα 4.4 Η βασική αρχή της FDPS.....	97
Σχήμα 4.5 Αποτελέσματα στην απόδοση ενός συστήματος macrocell σε σχέση με την ταχύτητα της συσκευής του χρήστη.....	97
Σχήμα 4.6 Δρομολόγηση πακέτων σε τρία βήματα.....	99
Σχήμα 4.7 Πλαίσιο δρομολόγησης στο πεδίο της συχνότητας.....	100
Σχήμα 4.8 Γενική εικόνα των λειτουργικών μονάδων της διαχείρισης πόρων.....	102
Σχήμα 4.9 Η λειτουργία της προσαρμογής σύνδεσης στην ανερχόμενη ζεύξη.....	106
Σχήμα 4.10 Μοντέλο συστήματος LTE με macrocell και femtocell.....	115

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΟΝΥΜΙΩΝ

AMPS	Advanced Mobile Phone Service
AM	Aknowlegded Mode
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AN	Access Network
ARP	Allocation Retention Priority
ARQ	Automatic Repeat Request
ASN.1	Abstract Syntax Notation One
AuC	Authentication Center
BCH	Broadcast Channel
BCCH	Broadcast Control Channel
BM-SC	Broadcast/Multicast Service Center
BSR	Buffer Status Reports
CCCH	Common Control Channel
CDMA	Code Division Multiple Access
CDPD	Cellular Digital Packet Data
CN	Core Network
CNT/DST	Concentration/Distribution
CP	Control Plane
CPICH	Common Pilot Channel
CQI	Channel Quality Indicator
C-RNTI	Contention resolution procedure information
CRRM	Cognitive Radio Resource Management
DCCH	Dedicated Control Channel
DCH	Dedicated Channel
DFT	Discrete Fourier Transform
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DRX	Discontinuous Reception

DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DTCH	Dedicated Traffic Channel
DTX	Discontinuous Transmition
EAP	Extensible Authentication Protocol
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution
EMM	EPS Mobility Management
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ESM	EPS Session Management
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frequency Division Duplex
FDPS	Frequency Domain Packet Scheduling
FFT	Fast Fourier Transform
FTP	File Transfer Protocol
GBR	Guaranteed Bit Rate
GERAN	GSM EDGE Radio AN
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPRS	General Packet Radio Service
GRE	Generic Routing Encapsulation
GSM	Global System of Mobile Communication
GTP	GPRS Tunneling Protocol
GTP-C	GPRS Tunneling Protocol, Control Plane
GTP-U	GPRS Tunneling Protocol , User Plane
GUTI	Globally Unique Temporary Identity
HARQ	Hybrid Adaptive Repeat and Request
HeNB	Home eNodeB
HeNB-GW	Home eNodeB Gateway
HFN	Hyper Frame Number

HLR	Home Location Register
HNB	Home NodeB
HNBAP	Home NodeB Application Part
HSS	Home Subscription Server
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radio Protection
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMS	IP Multimedia Subsystem
IP	Internet Protocol
IPsec	IP security
LCID	Logical Channel Identification
LTE	Long Term Evolution
L1	Layer 1
L2	Layer 2
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MCCH	Multicast Control Channel
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIB	Master Information Block
MIMO	Multiple Input – Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MTCH	Multicast Traffic Channel
NAS	Non-Access Stratum
NMT	Nordic Mobile Telephone
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OLLA	Outer-Loop Link Adaptation
PAR	Peak to Average Ratio
PBR	Prioritized Bit Rate
PC	Power Control
PCC	Policy and Charging Control
PCCH	Paging Control Chanel
PCEF	Policy and Charging Enforcement Function
PCH	Paging Channel
PCRF	Policy and Charging Resource Function
PDA	Personal Digital Assistant
PDC	Personal Digital Cellular
PDCCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCCP	Packet Data Convergence Protocol
PDP	Packet Data Protocol
PDU	Payload Data Unit
P-GW	Packet Data Network Gateway
PHR	Power Headroom Reports
PMIP	Proxy Mobile IP
PRACH	Physical Random Access Channel
PRB	Physical Resource Block
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QCI	QoS Class Identifier
QoS	Quality of Service
RACH	Random Access Channel
RB	Resource Blocks
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RNTP	Relative Narrowband Tx Power
ROHC	Robust Header Compression

RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
SAE GW	System Architecture Evolution Gateway
S1AP	S1 Application Protocol
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SDU	Service Data Unit
SeGW	Security Gateway
SGSN	Serving GPRS Support Node
S-GW	Serving Gateway
SIB	System Information Blocks
SINR	Signal to Interference-plus-Noise Ratio
SN	Sequence number
SR	Scheduling Request
SRB	Signaling Radio Bearer
SRS	Sounding Reference Signals
TAU	Tracking Area Updating
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TE	Terminal Equipment
TM	Transparent Mode
TTI	Transmission Time Interval
UDP	Unit Data Protocol
UE	User Equipment
UICC	Universal Integrated Circuit Card
UL-SCH	Uplink Shared Channel
UM	Unacknowledged Mode
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UP	User Plane

USIM	Universal Subscriber Identity Module
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VoIP	Voice over IP
X2AP	X2 Application Protocol
W-CDMA	Wideband CDMA
WEP	Wired Equivalent Privacy
WHO	World Health Organisation
WLAN	Wireless Local Area Network
1G	1 <sup>st</sup> Generation
2G	2 <sup>nd</sup> Generation
3G	3 <sup>rd</sup> Generation
3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project
4G	4 <sup>th</sup> Generation



## Εισαγωγή

Η τηλεπικοινωνιακή επανάσταση που πραγματοποιείται στις μέρες μας έχει ως αποτέλεσμα την χρησιμοποίηση νέων μεθόδων επικοινωνίας. Η ευκολία πρόσβασης και χρήσης και η καλή ποιότητα υπηρεσιών έχει ωθήσει ένα ευρύ κοινό να στραφεί στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες.

Από τα αρχαία ακόμη χρόνια είχε δημιουργηθεί στον άνθρωπο η ανάγκη για επικοινωνία με τους συνανθρώπους του. Τότε η επικοινωνία και η επαφή γίνονταν με τη βοήθεια του ταχυδρομείου και αργότερα του τηλεγράφου κυρίως σε μέρη με μεγάλη συγκέντρωση ανθρώπων (πόλεις, χωριά). Στις αρχές του 1900 στην Αμερική αρχίζουν να πραγματοποιούνται οι πρώτες ραδιοφωνικές μεταδόσεις όπου μέχρι το 1930 και με την εφεύρεση του ραδιοφώνου είχαν γνωρίσει πολύ μεγάλη διάδοση και εφαρμογή. Αυτές ήταν οι πρώτες προσπάθειες για ασύρματη μετάδοση. Ο δεύτερος παγκόσμιος πόλεμος επιταχύνει ακόμα περισσότερο τις εξελίξεις. Ο ανταγωνισμός των δύο υπερδυνάμεων βοήθησε στην εξέλιξη και στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών στον τομέα αυτό. Η εκτόξευση του δορυφόρου sputnik το 1957 από την σοβιετική ένωση μπορεί να χαρακτηριστεί σταθμός στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών.

Στις ΗΠΑ τη δεκαετία του 1970 αρχίζουν να εμφανίζονται τα πρώτα ασύρματα αναλογικά τηλέφωνα με περιορισμένες δυνατότητες αρχικά, όπως την χαμηλή ποιότητα υπηρεσιών και την αδυναμία περιαγωγής κλήσεων μεταξύ των δικτύων. Η εξέλιξη των αναλογικών αυτών συστημάτων δημιούργησε τα κυψελωτά συστήματα, στα οποία ο γεωγραφικός χώρος κάλυψης διαιρείται σε κελιά (κυψέλες) περιορισμένης ακτίνας επιτρέποντας την περιαγωγή των κλήσεων μεταξύ των κελιών. Το πρώτο σύστημα αυτού του τύπου αναπτύχθηκε στο Σικάγο το 1979 με το όνομα AMPS (Advanced Mobile Phone Service).

Στην Ευρώπη η πρώτη προσπάθεια για ασύρματη κινητή τηλεφωνία ξεκινάει το 1958 από τη Γερμανία με το αναλογικό δίκτυο A-Netz χρησιμοποιώντας τη συχνότητα των 160MHz. Μέχρι το 1970 το σύστημα αυτό κάλυπτε γεωγραφικά το 80% εξυπηρετώντας περίπου 11000 χρήστες. Το 1972 το παραπάνω σύστημα εξελίχθηκε στο B-Netz και υιοθετήθηκε και από άλλες χώρες της κεντρικής Ευρώπης (Ολλανδία, Λουξεμβούργο, Αυστρία). Το ίδιο διάστημα στις βόρειες ευρωπαϊκές χώρες Σουηδία, Φινλανδία, Δανία και Νορβηγία αναπτύχθηκε ένα παρόμοιο αναλογικό δίκτυο, το NMT (Nordic Mobile Telephone) χρησιμοποιώντας τη συχνότητα των 450MHz. Μέχρι το 1980 είχαν αναπτυχθεί αρκετά ακόμη παρόμοια αναλογικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας τα οποία

όμως χρησιμοποιούσαν τελείως διαφορετικά και ασύμβατα πρότυπα μεταξύ τους. Τα παραπάνω συστήματα είναι γνωστά ως η 1<sup>η</sup> γενιά κινητών επικοινωνιών ή 1G.

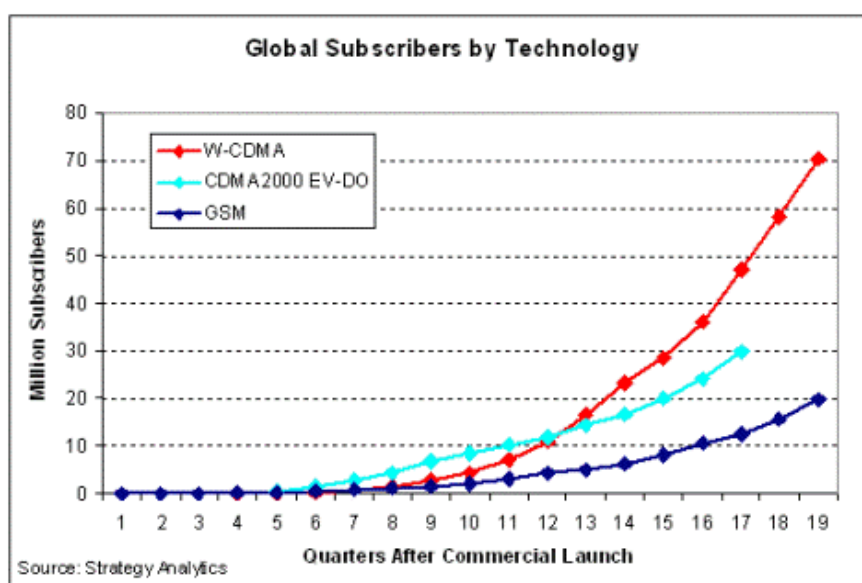
Μετά το 1980 στην Ευρώπη γίνεται συμφωνία ώστε όλες οι ευρωπαϊκές χώρες να αναπτύξουν ένα πανευρωπαϊκό σύστημα ή πρότυπο κινητής τηλεφωνίας ώστε να υπάρχει συμβατότητα ανάμεσα στα δίκτυα κάθε χώρας αλλά και η δυνατότητα περιαγωγής κλήσεων μεταξύ των ευρωπαϊκών χωρών. Το νέο αυτό σύστημα ήταν πλήρως ψηφιακό σε αντίθεση με τα αναλογικά συστήματα της πρώτης γενιάς και χρησιμοποιούσε το φάσμα συχνοτήτων των 900MHz. Παράλληλα μετά το 1990 εκτός από τις υπηρεσίες φωνής αρχίζει η ανάπτυξη και η διάδοση διαφόρων υπηρεσιών δεδομένων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης όπως τα μηνύματα τηλεειδοποίησης και τα μηνύματα κειμένου (SMS). Εκείνο το διάστημα εντάσσεται και το TCP/IP based δίκτυο στο χώρο των ασύρματων δικτύων δεδομένων αρχικά με την ονομασία CDPD (Cellular Digital Packet Data) με ρυθμούς μετάδοσης γύρω στα 19Kbps. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως δεύτερη γενιά κινητών επικοινωνιών ή 2G. Βασίζονται κυρίως στην τεχνολογία TDMA (Time Division Multiple Access) και λειτουργούν στις συχνότητες των 900 και 1800MHz. Τέτοια συστήματα είναι το GSM (Global System of Mobile Communication) που αποτελεί το γνωστό σύστημα της κινητής τηλεφωνίας, το D-AMPS στις ΗΠΑ, το PDC (Personal Digital Cellular) στην Ιαπωνία και άλλα.

Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά τους ήταν η ψηφιοποίηση των υπηρεσιών επιτρέποντας έτσι καλύτερη μετάδοση με λιγότερες παρεμβολές, η καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος συχνοτήτων μεγιστοποιώντας την χωρητικότητα χρηστών ανά δίκτυο και οι υπηρεσίες μετάδοσης δεδομένων. Τα συστήματα 2G έγιναν ευρέως γνωστά αποκτώντας μεγάλο αριθμό συνδρομητών λόγω της καλής ποιότητας υπηρεσιών, του χαμηλού σχετικά κόστους υπηρεσίας και της δυνατότητας περιαγωγής κλήσεων σε όλο τον πλανήτη.

Η εξέλιξη των συστημάτων 2G δημιούργησε τα συστήματα 2.5G και 2.75G. Η προσπάθεια για ασύρματη μετάδοση δεδομένων σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης μέσω της υπηρεσίας GPRS (General Packet Radio Service) εξελίσσει τα συστήματα 2G σε 2.5G. Οι νέοι ρυθμοί μετάδοσης της υπηρεσίας GPRS φτάνουν θεωρητικά τα 140Kbps περίπου. Η εξέλιξη του συστήματος αυτού δημιουργεί το E-GPRS ή EDGE (Enhanced Data rates for Global Evolution) το οποίο βασίζεται σε νέα εξελιγμένα σχήματα κωδικοποίησης παρέχοντας ακόμη υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως και 180Kbps. Τα συστήματα EDGE συχνά αναφέρονται και ως συστήματα 2.75G.

Μετά το 1990 η Ευρωπαϊκή Ένωση συμφώνησε στην ανάπτυξη ενός συστήματος 3<sup>ης</sup> γενιάς με το όνομα UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Στόχος της προσπάθειας αυτής είναι η εξέλιξη των δικτύων ασύρματων επικοινωνιών ώστε να βασίζονται αποκλειστικά στο πρωτόκολλο IP. Τα συστήματα 3G αναπτύσσονται και προτυποποιούνται από δύο μη κερδοσκοπικούς οργανισμούς γνωστούς ως 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) και 3GPP2. Ο πρώτος οργανισμός ασχολείται με την εξέλιξη των συστημάτων GSM ως προς την μετάδοση και την αρχιτεκτονική των δικτύων και ο δεύτερος με την εξέλιξη του συστήματος CDMA2000 που βασίζεται στην τεχνολογία CDMA (Code Division Multiple Access) των δικτύων 3G. Βασικός στόχος της δημιουργίας των συστημάτων 3G είναι να διατηρηθεί όσο είναι δυνατόν η συμβατότητα με τα συστήματα 2<sup>ης</sup> γενιάς. Τα 3G δίκτυα λειτουργούν στο φάσμα συχνοτήτων 1885-2025MHz και 2110-2200 MHz και βασίζονται στην τεχνολογία W-CDMA (Wideband CDMA).

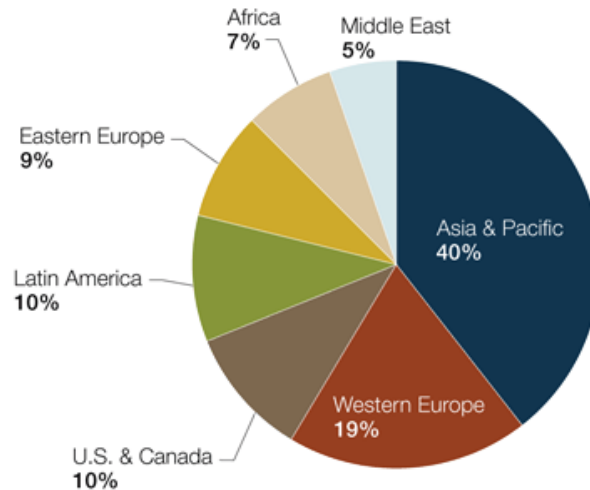
Στα χαρακτηριστικά των UMTS δικτύων ξεχωρίζει ο αυξημένος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, θεωρητικά μέχρι 2Mbps όταν ο χρήστης είναι ακίνητος και έως 384Kbps σε περιπτώσεις κινητικότητας του χρήστη, ενώ συγχρόνως υποστηρίζουν μεγαλύτερο όγκο δεδομένων και φωνής. Το πρώτο εμπορικό UMTS δίκτυο μεγάλης κλίμακας υλοποιήθηκε πρώτα στην Ιαπωνία το 2001 ενώ η λειτουργία τους στην Ευρώπη ξεκίνησε από την Αυστρία το Σεπτέμβριο του 2002. Η τεχνολογία 3G γίνεται ευρέως αποδεκτή από τους συνδρομητές με τον αριθμό των χρηστών να αυξάνεται με αρκετά υψηλό ρυθμό. Χαρακτηριστικά είναι τα παρακάτω στατιστικά.



### 1.1 Εμπορική ανάπτυξη τεχνολογιών μετάδοσης

Παρατηρούμε ότι οι χρήστες της τεχνολογίας W-CDMA, χαρακτηριστική των δικτύων 3G αυξάνονται με ταχύ ρυθμό σε σχέση με τους χρήστες των προηγούμενων τεχνολογιών. Ήδη τον Ιούνιο του 2007 οι συνδέσεις 3G ανά τον κόσμο έφτασαν τα 200 εκατομμύρια ενώ μόνο στη Γερμανία οι συνδρομητές 3G ξεπέρασαν τα 16 εκατομμύρια με τάση αύξησης κοντά στο 40% για το 2009.

**3G Subscribers by Region, 2013**

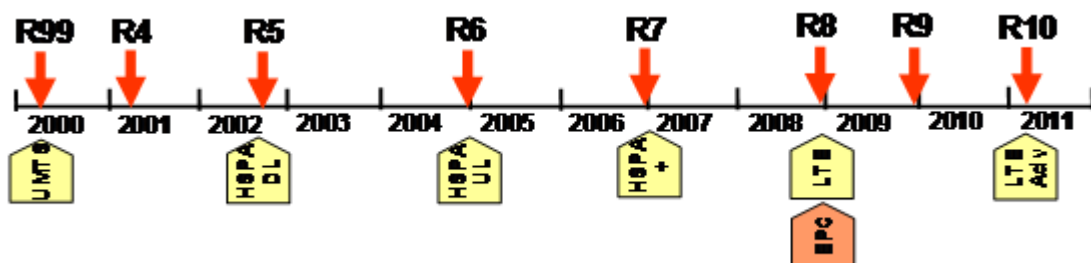


Source: TeleGeography

© 2009 PriMetrica, Inc.

### 1.2 Χρήστες 3G ανά τον κόσμο ως το 2013

Μεγαλύτερη αύξηση των χρηστών 3G παρατηρείται στις ασιατικές και ανατολικές χώρες ενώ ακολουθούν η δυτική Ευρώπη και οι χώρες τις Αμερικής. Η εξέλιξη των δικτύων ασύρματων επικοινωνιών τα τελευταία χρόνια φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (1.3).



### 1.3 Εξέλιξη δικτύων 3G τα τελευταία 10 χρόνια

Ήδη η εξέλιξη των δικτύων 3G βρίσκεται σε στάδια υλοποίησης για την δημιουργία των δικτύων 3.5G στα οποία ο 3GPP έχει θέσει ως πρότυπα δύο νέες τεχνολογίες, το HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) και το HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) με θεωρητικές τιμές έως 14.4Mbps στην κατερχόμενη ζεύξη και 5.8Mbps στην ανερχόμενη.

Η επανάσταση στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών είναι η δημιουργία των δικτύων LTE (Long Term Evolution) τα οποία βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο στις ΗΠΑ που χρησιμοποιώντας τις τεχνολογίες OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) στην κατερχόμενη ζεύξη και SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) στην ανερχόμενη ζεύξη υπόσχονται ταχύτητες έως 100Mbps στο downlink και 50Mbps στο uplink. Τα δίκτυα LTE είναι το τελευταίο στάδιο πριν τη δημιουργία της 4<sup>ης</sup> γενιάς κινητών επικοινωνιών (4G) όπου γίνεται προσπάθεια για την πλήρη ενοποίηση όλων των ασύρματων και ενσύρματων συστημάτων διαφορετικών τεχνολογιών σε ένα κοινό περιβάλλον, με στόχο την παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών στους συνδρομητές ανεξάρτητα από τη γεωγραφική περιοχή που αυτοί θα κινούνται.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Δίκτυα LTE

## 1.1 Εισαγωγή

Η υιοθέτηση της LTE τεχνολογίας από τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας δεν αναμένεται να αρχίσει μαζικά πριν από το δεύτερο μισό της διανύμενης δεκαετίας. Η πολλά υποσχόμενη τεχνολογία 4ης γενιάς θα αργήσει αρκετά να κάνει την εμφάνισή της, ακόμη και στην περίπτωση που οι μεγαλύτεροι πάροχοι προβούν στην αναβάθμιση των δικτύων τους.

Η τεχνολογία HSPA+ θα είναι κυρίαρχη στο χώρο του mobile broadband για τα επόμενα 5 έως 10 χρόνια. Οι πάροχοι θα πρέπει να υιοθετήσουν την LTE τεχνολογία ούτως ώστε να παραμείνουν ανταγωνιστικοί, όμως προς το παρόν το HSPA+ είναι μία ελκυστικότερη λύση η οποία προτιμάται από τους παρόχους κυρίως λόγω μικρότερων χρηματικών επενδύσεων. Παράλληλα, η έρευνα αναφέρει πως εναλλακτικά των τεχνολογιών HSPA+ και LTE, το Wi-MAX θα κεντρίσει το ενδιαφέρον ως πλατφόρμα, αν και οι πάροχοι θα προτιμήσουν την όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση του LTE.

Η εργασία πάνω στην ανάπτυξη της τεχνολογίας LTE ξεκίνησε το 2004 όταν και ορίστηκαν οι στόχοι οι οποίοι έπρεπε να επιτευχθούν. Αν και το HSDPA δεν είχε ακόμα εξαπλωθεί ευρέως εκείνη την εποχή, ήταν προφανές ότι η έρευνα για το επόμενο σύστημα ασύρματων επικοινωνιών θα έπρεπε να αρχίσει. Χρειάζονται παραπάνω από πέντε χρόνια από τη στιγμή που θα οριστούν οι στόχοι της νέας τεχνολογίας μέχρι τη στιγμή που αυτή θα είναι έτοιμη να αξιοποιηθεί εμπορικά πράγμα που σημαίνει ότι η προτυποποίηση (standardization) θα πρέπει να αρχίσει αρκετά νωρίς έτσι ώστε η συνολική μελέτη να έχει τελειώσει όταν η τεχνολογία θα χρειαστεί να εφαρμοστεί στην πράξη. Μερικές κινητήριες δυνάμεις που ωθούν την ανάπτυξη της τεχνολογίας LTE είναι οι εξής : η ευρεία δυνατότητα ανάπτυξης των ενσύρματων επικοινωνιών, η αυξημένη ανάγκη για ασύρματα κανάλια μεγαλύτερης χωρητικότητας, η ανάγκη για χαμηλότερου κόστους ασύρματη μεταφορά δεδομένων καθώς και ο ανταγωνισμός από άλλες ασύρματες τεχνολογίες. Καθώς οι ενσύρματες επικοινωνίες συνεχίζουν να βελτιώνονται, μια παράλληλη ανάπτυξη είναι απαραίτητο να γίνεται και στον ασύρματο τομέα έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι όλες οι εφαρμογές θα μπορούν να δουλεύουν χρησιμοποιώντας και ασύρματα μέσα μετάδοσης. Υπάρχουν επίσης άλλες ασύρματες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένου και του IEEE 802.16 που υπόσχονται υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Η τεχνολογία LTE θα πρέπει να ξεπεράσει τον ανταγωνισμό για

να βρει απήχηση στο κοινό. Η μεγαλύτερη χωρητικότητα των ασύρματων καναλιών μετάδοσης είναι απαραίτητη για να εκμεταλλευτούμε στο έπακρο την υπάρχουσα δομή και φάσμα των σταθμών βάσης.

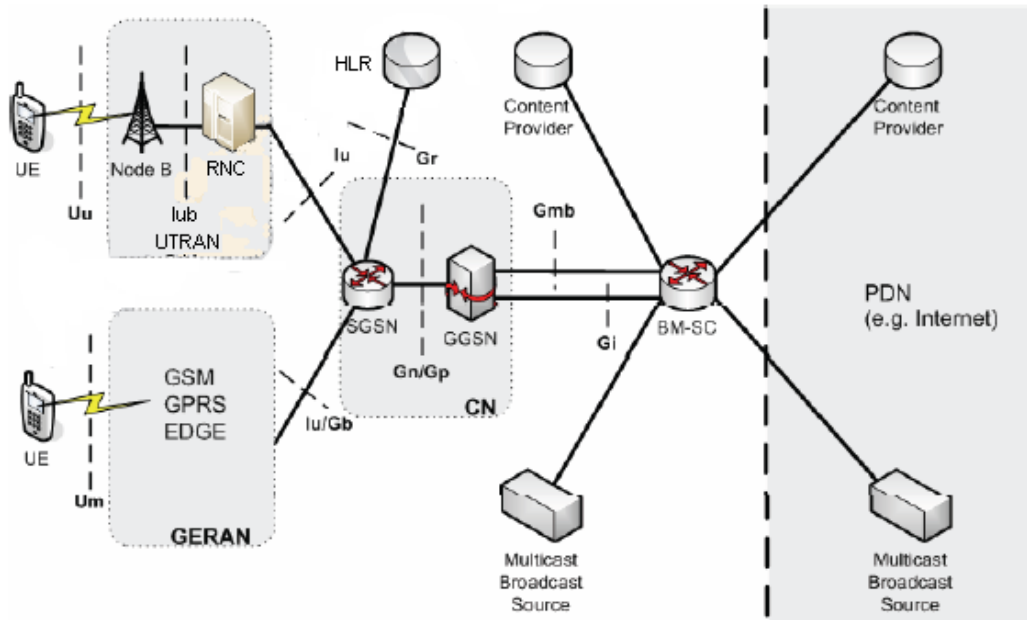
Η LTE θα πρέπει να παρέχει ανώτερη απόδοση σε σύγκριση με το υπάρχων 3GPP δίκτυο που βασίζεται στην τεχνολογία High Speed Packet Access (HSPA). Η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων ανέρχεται στα 100Mbps όσον αφορά την κατερχόμενη ζεύξη (downlink) και 50 Mbps στην ανερχόμενη (uplink), πάντα μιλώντας σε ταχύτητα μετάδοσης ανά χρήστη. Οι αριθμοί αυτοί είναι δέκα φορές μεγαλύτεροι από αυτούς που αναφέρονται στην έκδοση 6 του προτύπου HSPA σύμφωνα με το οποίο καθορίζονται και οι ταχύτητες μετάδοσης των δικτύων 3gpp. Επίσης ο χρόνος αντίδρασης (latency) θα πρέπει να μειωθεί έτσι ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχονται στον τελικό χρήστη. Ακόμη, η κατανάλωση ισχύος των τερματικών συσκευών του χρήστη θα πρέπει να μειωθεί έτσι ώστε να είναι δυνατή η χρήση πολυμεσικών εφαρμογών με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. (1), (2), (3)

Συνοπτικά, οι κύριοι στόχοι που πρέπει να επιτευχθούν από τα LTE δίκτυα είναι οι εξής:

- Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, έως 100Mbps και 50Mbps για την κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη αντίστοιχα
- Χρόνος round trip μικρότερος των 10ms
- Βελτιστοποίηση για packet switched μετάδοση δεδομένων
- Υψηλός βαθμός κινητικότητας και ασφάλειας
- Βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας του τερματικού
- Ευελιξία ως προς την χρησιμοποιούμενη συχνότητα, από 1.5 MHz μέχρι 20MHz

## 1.2 Αρχιτεκτονική 3G

Η αρχιτεκτονική ενός 3G δικτύου απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 1.1 Αρχιτεκτονική δικτύου 3G

**User equipment (UE):** είναι η συσκευή μέσω της οποίας ο χρήστης διεξάγει την επικοινωνία. Μπορεί να είναι ένα κινητό τηλέφωνο, μια συσκευή PDA ή ένας φορητός υπολογιστής (laptop). Η συσκευή αυτή περιέχει την USIM (Universal Subscriber Identity Module) που αποτελεί μια ανεξάρτητη υπομονάδα στον εξοπλισμό του χρήστη, συχνά αποκαλούμενη και TE(Terminal Equipment). Η USIM είναι μια εφαρμογή τοποθετημένη σε μια αποσπώμενη έξυπνη κάρτα, την UICC (Universal Integrated Circuit Card) η οποία βρίσκεται στον εξοπλισμό του χρήστη. Η USIM χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση και αυθεντικοποίηση του χρήστη στο δίκτυο και παρέχει υπηρεσίες ασφάλειας στον συνδρομητή, όπως πρόσβαση στα δημόσια και ιδιωτικά κλειδιά του και δημιουργία ψηφιακών υπογραφών προστατεύοντας την ασύρματη επικοινωνία. Μια UICC μπορεί να περιέχει πολλές USIM εφαρμογές. Συνοπτικά η UE είναι μια φορητή πλατφόρμα που επιτρέπει στον χρήστη να χρησιμοποιήσει τις υπηρεσίες του δικτύου, όπως την έναρξη και τον τερματισμό μιας κλήσης, την ανταλλαγή πακέτων δεδομένων, handover ανάμεσα σε σταθμούς βάσης και τον προσδιορισμό της θέσης του κινητού.



**NodeB:** είναι ο σταθμός βάσης που παρέχει ασύρματη κάλυψη στο αντίστοιχο κελί και εκτελεί όλες τις ασύρματες λειτουργίες του δικτύου. Ο NodeB λειτουργεί ως γέφυρα ανάμεσα στο UE και στο ενσύρματο δίκτυο κορμού (Core Network, CN) και χρησιμοποιώντας κανάλια συχνοτήτων ελέγχει την ασύρματη λειτουργία και την αναμετάδοση δεδομένων ανάμεσα στο UE και στο δίκτυο κορμού. Στο NodeB εκτελούνται επίσης η κρυπτογράφηση/αποκρυπτογράφηση και η συμπίεση/αποσυμπίεση των δεδομένων κατά την επικοινωνία με την UE.

**Radio Network Controller (RNC):** είναι ο ελεγκτής του ασύρματου δικτύου και ελέγχει τα κελιά των σταθμών βάσεων που είναι συνδεδεμένοι σ' αυτόν. Έχει τη δικαιοδοσία και τον έλεγχο των ασύρματων πόρων της περιοχής του (των NodeB που συνδέονται μ' αυτόν), είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο συμφόρησης στα αντίστοιχα κελιά και επίσης εκτελεί έλεγχο εισόδου και κατανομής εύρους ζώνης για κάθε νέο κανάλι μετάδοσης που δημιουργείται. Ο RNC και ο NodeB αποτελούν το UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network).

**Serving GPRS Support Node (SGSN):** είναι υπεύθυνο για την μεταφορά πακέτων δεδομένων από και προς τη συσκευή του χρήστη. Ασχολείται με την δρομολόγηση και την αποστολή των πακέτων, τη διαχείριση κινητικότητας των χρηστών και την διατήρηση της ποιότητας της υπηρεσίας σε περιπτώσεις handover. Εκεί γίνεται η αυθεντικοποίηση και η χρέωση των συνδρομητών και αποθηκεύονται πληροφορίες σχετικά με τη θέση και τα χαρακτηριστικά τους. Συνδέεται με το UTRAN μέσω της διεπαφής Iu.

**Gateway GPRS Support Node (GGSN):** αποτελεί πύλη εξόδου προς IP δίκτυα. Αποτελεί έναν δρομολογητή που αποκρύβει την υποδομή του GPRS δικτύου από το τελικό δίκτυο που συνδέεται. Όποτε λαμβάνει δεδομένα που πρέπει να προωθηθούν σε κάποιον χρήστη ελέγχει αν αυτός είναι ενεργός. Αν είναι προωθεί τα δεδομένα μέσω του SGSN στον συγκεκριμένο χρήστη, ενώ αν ο χρήστης είναι ανενεργός τα πακέτα απορρίπτονται. Αντίστροφα τα δεδομένα που στέλνονται από τον χρήστη προωθούνται μέσω του GGSN στο κατάλληλο δίκτυο. Το GGSN είναι ένα σταθερό τμήμα του δικτύου που επιτρέπει την κινητικότητα του χρήστη στα δίκτυα GPRS/UMTS. Μετατρέπει τα πακέτα του χρήστη που δέχεται μέσω του SGSN με τη χρήση του πρωτοκόλλου PDP

(Packet Data Protocol) στο κατάλληλο format (IP ή X.25) ενώ τις PDA διευθύνσεις των πακέτων που προορίζονται για τον χρήστη τις μετατρέπει στις αντίστοιχες GSM διευθύνσεις που αφορούν το τερματικό του χρήστη. Στο GGSN περιέχονται επίσης λειτουργίες αυθεντικοποίησης και χρέωσης των συνδρομητών. Μαζί με το SGSN αποτελούν το δίκτυο κορμού (CN).

**Home Location Register (HLR):** αποτελείται από βάσεις δεδομένων των παρόχων που αποθηκεύει τα στοιχεία των συνδρομητών που χρησιμοποιούν το δίκτυο. Περιέχει πληροφορίες για τις υπηρεσίες που χρησιμοποιούν και την θέση που βρίσκονται (μέσω της USIM). Εκτός των στοιχείων αυτών διαθέτει λειτουργίες αυθεντικοποίησης των χρηστών και κατ' επέκταση τον έλεγχο πρόσβασης στο δίκτυο. Γ' αυτούς τους λόγους το HLR αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο του δικτύου σχετικά με την ασφάλεια της 3GPP αρχιτεκτονικής.

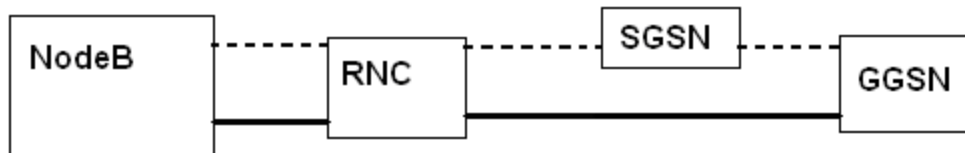
**Broadcast/Multicast Service Center (BM-SC):** αποτελεί το σημείο διασύνδεσης για την παραλαβή δεδομένων και χρήση υπηρεσιών από τις διάφορες εσωτερικές πηγές (content providers).

**GERAN (GSM EDGE Radio AN):** αποτελεί την εξελιγμένη έκδοση του δικτύου GSM (2G) το οποίο συνδέεται επίσης στο δίκτυο κορμού ενός δικτύου 3G. Αποτελείται από τον σταθμό βάσης τον ελεγκτή του σταθμού ανάμεσα στους οποίους υπάρχουν όλες οι λειτουργίες για την ασύρματη μετάδοση. Το τμήμα GERAN συνδέεται πάντα στον κόμβο SGSN και μέσω της σύνδεσης αυτής εκτελούνται όλες οι εσωτερικές λειτουργίες ( ταυτοποίηση χρηστών, σήματα ελέγχου και δεδομένων κλπ). Επίσης η επικοινωνία στο ασύρματο τμήμα του GERAN ακολουθεί παρόμοια λογική μ' αυτή του UTRAN αν και διαφέρουν οι τεχνολογίες μετάδοσης και οι τρόποι αυθεντικοποίησης. (4), (5), (6), (7)

### 1.3 Αρχιτεκτονική LTE

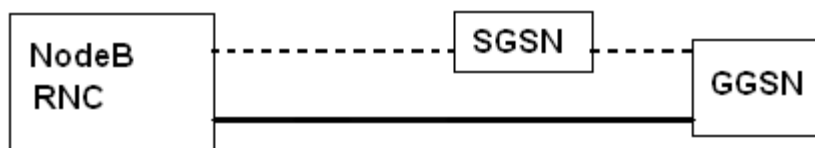
Εκτός των νέων τεχνολογιών μετάδοσης και της καλύτερης εκμετάλλευσης των διαθέσιμων συχνοτήτων που χρησιμοποιούν τα LTE δίκτυα ήταν απαραίτητη και η βελτίωση της αρχιτεκτονικής του υπάρχον 3G δικτύου για την μεγιστοποίηση της απόδοσής τους. Τα δίκτυα LTE σε σχέση με τα 3G παρέχουν βελτιστοποιημένες λειτουργίες υπηρεσιών δεδομένων και καλύτερη διεκπεραιωτική ικανότητα καναλιού με αποτέλεσμα υψηλότερο εύρος ζώνης μετάδοσης. Επίσης ήταν απαραίτητη η αναβάθμιση του ήδη υπάρχοντος δικτύου ώστε να εξαλειφθούν οι καθυστερήσεις απόκρισης κομιστή και αποστολής πακέτων κάνοντας το δίκτυο πιο ευέλικτο. Σ' όλο αυτό θα έπρεπε να ληφθεί υπ' όψη και η όσο το δυνατόν 'απλοποίηση' του δικτύου ώστε να διατηρείται η συμβατότητα με τα ήδη υπάρχοντα κυψελωτά δίκτυα τόσο του 3GPP όσο και των άλλων ασύρματων δικτύων.

Η εξέλιξη του 3G δικτύου γίνεται σταδιακά με σκοπό την απλοποίηση της αρχιτεκτονικής και τη συμμετοχή όσο το δυνατόν μικρότερου αριθμού εμπλεκόμενων κόμβων στην διεξαγωγή της επικοινωνίας. Αρχικά η διασύνδεση παρακάμπτει τον κόμβο SGSN και γίνεται απευθείας από τον RNC στον GGSN

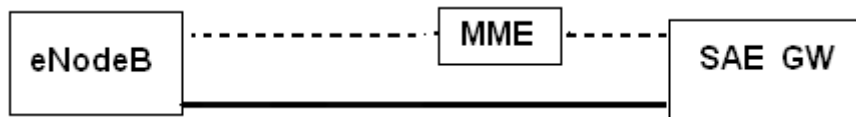


**Σχήμα 1.2** Σύνδεση του RNC με τον GGSN παρακάμπτοντας τον κόμβο SGSN

ενώ στη συνέχεια ο RNC και οι διαδικασίες του ενσωματώνονται στον NodeB. Τέλος η αρχιτεκτονική παίρνει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 1.4.



**Σχήμα 1.3** Ο RNC και οι λειτουργίες του ενσωματώνονται στον NodeB ως αποτέλεσμα της εξέλιξης της αρχιτεκτονικής του δικτύου 3G



**Σχήμα 1.4** Εξέλιξη της αρχιτεκτονικής 3G – αρχιτεκτονική δικτύου LTE

Η εικόνα του σχήματος 1.4 αναφέρεται πλέον στην αρχιτεκτονική των δικτύων LTE. (8)

### 1.3.1 Μονάδα Διαχείρισης Κινητικότητας (Mobility Management Entity-MME)

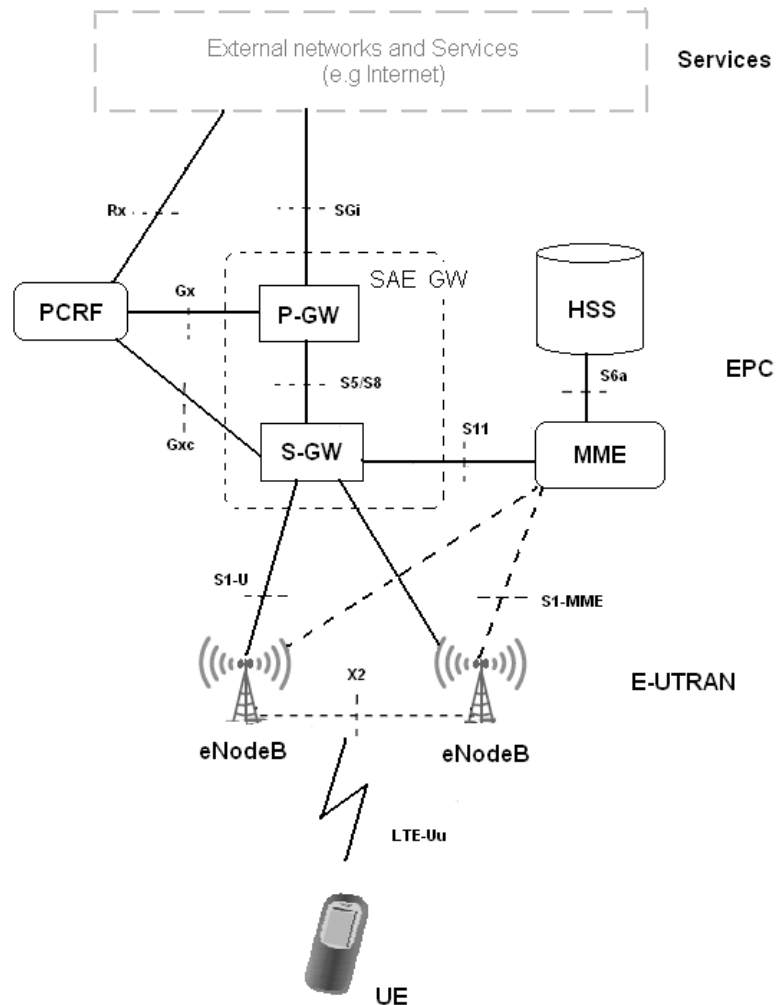
Η Mobility Management Entity (MME) αποτελεί το βασικό στοιχείο ελέγχου στο δίκτυο κορμού ενός συστήματος LTE. Μπορεί να αποτελείται από κάποιο server του παρόχου τοποθετημένο σε κάποιο ασφαλές σημείο. Οι κύριες διαδικασίες που εκτελεί είναι:

- Ασφάλεια και αυθεντικοποίηση. Κατά τη σύνδεση κάποιου συνδρομητή στο δίκτυο για πρώτη φορά η MME αναλαμβάνει την αυθεντικοποίησή του εκτελώντας τις βασικές λειτουργίες αυθεντικοποίησης. Βρίσκει την ταυτότητα της συσκευής του χρήστη είτε από προηγούμενη είσοδό του στο σύστημα είτε μέσω της USIM της συσκευής αναζητώντας από τον Home Subscription Server (HSS) τα διανύσματα αυθεντικοποίησης της συγκεκριμένης συσκευής και τα συγκρίνει μ' αυτά που έχει λάβει κατά την προσπάθεια αυθεντικοποίησης της συγκεκριμένης συσκευής στο δίκτυο. Μ' αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώνει ότι ο χρήστης που ζητάει πρόσβαση στο δίκτυο είναι αυτός που έχει την εξουσιοδότηση να το χρησιμοποιεί. Η MME μπορεί να επαναλαμβάνει τις διαδικασίες αυθεντικοποίησης κατά περιόδους ή όποτε χρειαστεί αναγκαίο. Η MME ελέγχει επίσης τα κλειδιά κρυπτογράφησης και ακεραιότητας της επικοινωνίας του χρήστη μέσω του κύριου κλειδιού κάθε χρήστη που έχει λάβει μέσω του διανύσματος αυθεντικοποίησης από τον HSS κατά την αρχική αυθεντικοποίηση του χρήστη στο δίκτυο. Για όση ώρα διεξάγεται η επικοινωνία του χρήστη με το συγκεκριμένο δίκτυο η MME διαβιβάζει στο χρήστη μια προσωρινή ταυτότητα που ονομάζεται Globally Unique Temporary Identity (GUTI) η οποία απαιτείται για κάθε είδους επικοινωνία σηματοδότησης του συνδρομητή με το συγκεκριμένο δίκτυο. Η ταυτότητα αυτή διαβιβάζεται στο χρήστη με ασφαλή τρόπο αφού ξεκινήσει η κρυπτογράφηση της ραδιοζεύξης και έχει ως σκοπό την

προστασία της επικοινωνίας από παθητικού τύπου επιθέσεις. Για κάθε νέα αυθεντικοποίηση του χρήστη στο σύστημα αποστέλλεται νέα προσωρινή ταυτότητα καταργώντας την προηγούμενη.

- Διαχείριση κινητικότητας των χρηστών. Η MME γνωρίζει την θέση των συνδρομητών που βρίσκονται μέσα στην περιφέρεια ελέγχου της. Όταν κάποιος χρήστης συνδεθεί στο δίκτυο η MME δημιουργεί μια εγγραφή γ' αυτόν και σηματοδοτεί την τοποθεσία του στον HSS. Ανάλογα με την δραστηριότητα του χρήστη ρυθμίζει τις κατάλληλες λειτουργίες τόσο στον eNodeB όσο και στην S-GW (Serving Gateway). Για παράδειγμα σε περίπτωση που ένας συνδεδεμένος χρήστης παραμένει ανενεργός ο διάυλος μεταφοράς δεδομένων προς τον χρήστη αυτόν μπορεί να δεσμευθεί από κάποιον άλλο. Η MME είναι επίσης υπεύθυνη για τον έλεγχο σηματοδότησης σε περίπτωση handover ενός ενεργού χρήστη ανάμεσα σε διαφορετικά eNodeBs, S-GWs ή MMEs. Η MME διαχειρίζεται κάθε αλλαγή στον eNodeB εφόσον δεν υπάρχει πλέον ξεχωριστός RNC να διαχειρίζεται την κινητικότητα του χρήστη. Ένας ανενεργός χρήστης ενημερώνει για τη θέση του καθώς κινείται ή σε τακτά χρονικά διαστήματα αν βρίσκεται σε ακινησία. Σε περίπτωση λήψης δεδομένων για κάποιον χρήστη από διαφορετικά δίκτυα αποστέλλονται από τον eNodeB μέσω της MME.
- Διαχείριση προφίλ χρήστη και διασύνδεση υπηρεσιών. Από τη στιγμή που ένας συνδρομητής συνδεθεί στο δίκτυο η MME ανακτά πληροφορίες για το προφίλ του από τον HSS και αποθηκεύει τα νέα δεδομένα κατά τη διάρκεια της εξυπηρέτησης. Το προφίλ αυτό καθορίζει σε ποια διαφορετικά δίκτυα μπορεί να είναι συνδεδεμένος ο χρήστης. Η MME μπορεί αυτόματα να αποδώσει στον χρήστη το κατάλληλο κανάλι απ' όπου θα πάρει την αντίστοιχη IP για την χρήση της συγκεκριμένης υπηρεσίας. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την επικοινωνία ανάμεσα στον eNodeB και στην S-GW με τα κατάλληλα σήματα ελέγχου. Η MME σε κάθε περίπτωση μπορεί να επέμβει για τη δημιουργία νέων διαύλων υπηρεσιών που αφορούν το ίδιο το δίκτυο ή διαφορετικά σε περίπτωση αιτήματος από τον χρήστη.

Η MME συνδέεται με όλους σχεδόν τους κόμβους της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου LTE και περιλαμβάνει τις κύριες διαδικασίες για τις διασυνδέσεις αυτές. Επίσης ανταλλάσσει δεδομένα και με άλλες MMEs σε περιπτώσεις απώλειας σήματος της συσκευής του χρήστη ή handover. Το σχήμα 1.5 παρουσιάζει τη βασική αρχιτεκτονική ενός δικτύου LTE και τη διασύνδεση μεταξύ των κόμβων του. (9), (10), (11), (12)



Σχήμα 1.5 Αρχιτεκτονική δικτύου LTE

### 1.3.2 System Architecture Evolution Gateway (SAE GW)

Αποτελείται από το συνδυασμό δύο διαφορετικών πυλών, την **Serving Gateway (S-GW)** και την **Packet Data Network Gateway (P-GW)** που προσδιορίζουν το επίπεδο χρηστών στο επίπεδο EPC (Evolved Packet Core). Λειτουργώντας ταυτόχρονα ως SAE

GW εμφανίζονται ως μια ενιαία μονάδα αλλά υπάρχουν αρκετές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους.

### 1.3.2.1 Serving Gateway (S-GW)

Στη βασική LTE αρχιτεκτονική η κύρια λειτουργία της S-GW είναι η διαχείριση του επιπέδου χρηστών (UP) και η μετάβαση δεδομένων και λειτουργιών ανάμεσα στις οντότητες του δικτύου. Για υπηρεσίες που βασίζονται στο GTP (GPRS Tunnelling Protocol) η πύλη S-GW θα δημιουργήσει GTP κανάλια για όλες τις διασυνδέσεις στο επίπεδο χρηστών επιτρέποντας την επικοινωνία και με GSM δίκτυα. Η σχεδίαση για συμβατότητα ανάμεσα σε IP υπηρεσίες και GTP κανάλια γίνεται μέσω της πύλης P-GW αφού ο έλεγχος για τη διασύνδεση των GTP καναλιών διεξάγεται από την P-GW και την MME. Στην περίπτωση αυτή δεν είναι αναγκαία η σύνδεση της S-GW με την PCRF καθώς οι διαδικασίες στο επίπεδο ελέγχου δεν είναι δική της αρμοδιότητα. Σε περίπτωση που η διεπαφή ανάμεσα στην P-GW και S-GW χρησιμοποιεί IP υπηρεσίες τότε η S-GW είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία συμβατότητας ανάμεσα σε υπηρεσίες IP και GTP κανάλια και μέσω της σύνδεσης με την PCRF λαμβάνει τις πληροφορίες για τη σχεδίαση συμβατότητας. Η S-GW έχει ελάχιστο ρόλο σε διαδικασίες ελέγχου. Είναι υπεύθυνη για τους δικούς της πόρους τους οποίους κατανέμει ανάλογα με τις απαιτήσεις των MME, P-GW και PCRF. Αν υπάρχει κάποια αίτηση από την P-GW ή την PCRF θα μεταδώσει την αίτηση στην MME ώστε να γίνει από κει ο έλεγχος του καναλιού προς τον eNodeB. Ομοίως όταν η MME στέλνει μια αίτηση, η S-GW ενημερώνει την P-GW ή την PCRF ανάλογα αν η διεπαφή S5/S8 βασίζεται σε GTP ή IP υπηρεσία αντίστοιχα. Αν η διεπαφή βασίζεται σε IP υπηρεσία τότε τα δεδομένα θα αποσταλούν μέσω IP καναλιών σε κάθε χρήστη. Αντίθετα αν βασίζεται σε GTP κάθε κομιστής θα έχει το δικό του GTP κανάλι για την αποστολή δεδομένων ή φωνής.

Κατά τη διάρκεια της κινητικότητας του χρήστη ανάμεσα στους eNodeBs η MME μπορεί να δώσει εντολή στην S-GW να αλλάξει κανάλι από έναν eNodeB σε κάποιον άλλο ή την δημιουργία νέου καναλιού για προώθηση δεδομένων όταν χρειαστεί να μεταφερθούν δεδομένα ανάμεσα σε δυο eNodeBs σε περιπτώσεις handover. Επίσης σε περιπτώσεις κινητικότητας του χρήστη μπορεί να χρειαστεί μετάβαση από μια S-GW σε κάποια άλλη. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της MME που ελέγχει τη διαδικασία της αλλαγής καταργώντας τα κανάλια της παλιάς S-GW και δημιουργώντας τα στην καινούρια.

Για όλα τα δεδομένα που αφορούν ένα συνδεδεμένο χρήστη η S-GW αναμεταδίδει τα δεδομένα ανάμεσα στον eNodeB και στην P-GW. Όταν όμως κάποιος χρήστης παραμένει ανενεργός οι πόροι που του παρέχονται από τον eNodeB αποδεσμεύονται και το κανάλι που είχε δημιουργηθεί μέχρι την S-GW τερματίζεται. Αν κατά τη διάρκεια αυτή λάβει δεδομένα από την P-GW που αφορούν ένα τέτοιου είδους κανάλι, τα δεδομένα αποθηκεύονται προσωρινά και ξεκινάει η διαδικασία της ανάκτησης για την αποστολή προς το χρήστη από την MME. Η διαδικασία αυτή θα αναγκάσει τη συσκευή του χρήστη να επανασυνδεθεί δημιουργώντας νέα κανάλια για τη μεταφορά των δεδομένων αυτών. Η S-GW θα επιμεληθεί για την αποστολή των δεδομένων μέσω των καναλιών και θα συλλέξει πληροφορίες για καταμέτρηση και χρέωση του συνδρομητή.

Μια S-GW μπορεί να εξυπηρετεί μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή με συγκεκριμένο αριθμό eNodeBs και ομοίως υπάρχει ένας συγκεκριμένος αριθμός από MMEs που ελέγχουν την περιοχή αυτή. Μια S-GW μπορεί επίσης να συνδεθεί με οποιαδήποτε P-GW πύλη στο δίκτυο καθώς η P-GW δεν επηρεάζεται από την κινητικότητα του χρήστη στο δίκτυο, κατά την πιθανή μετάβαση σε νέα S-GW καθώς ο χρήστης κινείται. Για συνδέσεις που αναφέρονται σε έναν μόνο συνδρομητή η S-GW επικοινωνεί με μία MME και η σύνδεση γίνεται μέσω ενός κάθε φορά eNodeB. Σε περίπτωση που κάποιος χρήστης είναι συνδεδεμένος σε περισσότερα του ενός δίκτυα μέσω διαφορετικών P-GWs η S-GW συνδέεται με κάθε μια απ' αυτές ξεχωριστά. Αν η διεπαφή S5/S8 στηρίζεται σε IP υπηρεσίες τότε γίνεται σύνδεση και με την PCRF για κάθε P-GW που χρησιμοποιεί ο χρήστης.

### 1.3.2.2 Packet Data Network Gateway (P-GW)

Η Packet Data Network Gateway (P-GW, αναφερόμενη και ως PDN-GW) είναι ο τελευταίος δρομολογητής ανάμεσα στο τμήμα EPC (Evolved Packet Core) του δικτύου και στα εξωτερικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Είναι το υψηλότερο επίπεδο συντονισμού του συστήματος και συνήθως λειτουργεί ως ένα σημείο IP σύνδεσης για τους συνδρομητές. Ελέγχει τη συμφόρηση του δικτύου και εκτελεί κυρίως λειτουργίες φιλτραρίσματος ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε υπηρεσίας που εκτελεί.

Ουσιαστικά η P-GW κατανέμει τις IP διευθύνσεις σε κάθε χρήστη και μέσω αυτής ο κάθε συνδρομητής κάνει χρήση των υπηρεσιών (επικοινωνία με άλλους συνδρομητές, internet κλπ). Η δρομολόγηση των πακέτων έπειτα για την επικοινωνία μεταξύ του συνδρομητή και του δικτύου που είναι συνδεδεμένος γίνεται μέσω της P-GW για κάθε



χρήστη. Η διεύθυνση IP για κάθε χρήστη κατανέμεται κάθε φορά που επιθυμεί τη σύνδεση με κάποιο εξωτερικό δίκτυο, πράγμα το οποίο γίνεται τουλάχιστον μια φορά κατά τη σύνδεση του συνδρομητή στο δίκτυο και μπορεί να συμβεί διαδοχικά κάθε φορά που ζητάει σύνδεση για κάποιο νέο εξωτερικό δίκτυο. Η P-GW μέσω του Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) ανακτά τις IP διευθύνσεις για κάθε συνδρομητή.

Η P-GW περιλαμβάνει την PCEF (Policy and Charging Enforcement Function), μια λειτουργία που είναι υπεύθυνη για την επιβολή της πολιτικής των παρόχων στους συνδρομητές καθώς και την εξουσιοδότηση των συνδρομητών στις υπηρεσίες του συγκεκριμένου παρόχου. Έχει επίσης την αρμοδιότητα για την καταγραφή στοιχείων και αναφορών που σχετίζονται με τη χρέωση των χρηστών του δικτύου.

Η κίνηση στο επίπεδο χρηστών ανάμεσα στην P-GW και στα εξωτερικά δίκτυα γίνεται με τη μορφή IP πακέτων για κάθε IP υπηρεσία που εξυπηρετεί. Αν η διεπαφή S5/S8 ανάμεσα στην S-GW στηρίζεται σε GTP κανάλια, η P-GW δημιουργεί την συμβατότητα για την αποστολή IP δεδομένων μέσω των καναλιών αυτών προς τους χρήστες. Η P-GW δημιουργεί τα κανάλια αυτά είτε μέσω της PCRF είτε από την S-GW που μεταφέρει τα δεδομένα της MME. Στην δεύτερη περίπτωση η P-GW αλληλεπιδρά με την PCRF προκειμένου να λάβει τις απαραίτητες πληροφορίες πολιτικής, αν δεν υπάρχουν στην PCEF για την δημιουργία των καναλιών. Αν η διεπαφή S5/S8 στηρίζεται σε IP υπηρεσίες, η P-GW σχεδιάζει τη ροή των δεδομένων από τα εξωτερικά δίκτυα προς κάθε χρήστη μέσα από ένα κανάλι χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο δρομολόγησης GRE (Generic Routing Encapsulation) ενθυλακώνοντας το πλήθος των διαφορετικών πακέτων κάθε εξωτερικού δικτύου και δρομολογώντας τα μέσα από ένα IP κανάλι. Κατά τη διαδικασία αυτή όλες οι πληροφορίες ελέγχου ανταλλάσσονται μέσω της PCRF. Η P-GW επίσης παρακολουθεί και καταγράφει τα μεταδιδόμενα δεδομένα για στατιστικούς αλλά και νομικούς σκοπούς.

Η P-GW είναι το τελευταίο επίπεδο συντονισμού στο σύστημα. Καθώς ένας χρήστης κινείται μπορεί να περάσει από τον έλεγχο μιας S-GW σε μια άλλη. Στην περίπτωση αυτή τα κανάλια μετάδοσης δεδομένων μεταφέρονται στην νέα S-GW μέσω της P-GW. Κάθε P-GW μπορεί να συνδέεται με περισσότερες από μια S-GW και PCRF. Για κάθε χρήστη που σχετίζεται με μια P-GW, είναι συνδεδεμένος με μία μόνο S-GW κάθε φορά, αλλά μπορεί να υπάρχουν συνδέσεις σε διαφορετικά εξωτερικά δίκτυα και διαφορετικές PCRF. (13), (14), (15)

### 1.3.3 Εξωτερικά δίκτυα και υπηρεσίες ( External networks and Services)

Τα εξωτερικά δίκτυα μπορεί να αποτελούνται από ένα σύνολο υποσυστημάτων, συστήματα υπολογιστών ή πόρων συνδεδεμένα στο Internet ή σε κάποιο ιδιωτικό δίκτυο. Οι κατηγορίες υπηρεσιών που είναι διαθέσιμες είναι οι ακόλουθες:

**Υπηρεσίες βασισμένες στο IMS (IP Multimedia Subsystem).** Το IMS είναι μια αρχιτεκτονική κατασκευή που παρέχει υπηρεσίες βασισμένες στο πρωτόκολλο IP. Αρχικά σχεδιάστηκε από τον 3GPP στα πλαίσια της εξέλιξης του GSM δικτύου για τη δημιουργία της 3<sup>ης</sup> γενιάς κινητών επικοινωνιών για την υποστήριξη υπηρεσιών GPRS ενώ αργότερα αναβαθμίστηκε για να υποστηρίζει και άλλες υπηρεσίες όπως WLAN και CDMA2000.

**Υπηρεσίες που δεν βασίζονται στο IMS.** Η αρχιτεκτονική των δικτύων που δεν βασίζονται στο IMS δεν συμπεριλαμβάνεται σε κάποιο πρότυπο. Μπορεί να είναι ένας εγκατεστημένος server ενός ιδιωτικού δικτύου στο οποίο οι χρήστες συνδέονται με κάποιο διαφορετικό πρωτόκολλο που υποστηρίζει η συσκευή τους (πχ streaming υπηρεσίες).

Άλλες υπηρεσίες που δεν υποστηρίζονται από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, όπως διάφορες υπηρεσίες μέσω Internet. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να είναι η σύνδεση του χρήστη σε κάποιον server μέσω Internet για υπηρεσίες τηλεφωνίας μέσω IP (VoIP). (16)

### 1.3.4 Μονάδα Πολιτικής και Χρεώσεων (Policy and Charging Resource Function-PCRF)

Η PCRF είναι η μονάδα του δικτύου που είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της πολιτικής των παρόχων και των χρεώσεων των συνδρομητών (Policy and Charging Control, PCC). Ελέγχει τις παρεχόμενες υπηρεσίες και εξασφαλίζει την ποιότητα των υπηρεσιών του δικτύου, παρέχει πληροφορίες στη μονάδα PCEF που βρίσκεται εντός της P-GW και διαμορφώνει τα κανάλια μεταφοράς δεδομένων σύμφωνα με την πολιτική που υποστηρίζει. Η PCRF είναι συνήθως κάποιος server τοποθετημένος κοντά στις υπόλοιπες μονάδες του δικτύου.

Οι πληροφορίες που παρέχει στην μονάδα PCEF ονομάζονται κανόνες χρέωσης και πολιτικής (PCC rules) και αποστέλλονται κάθε φορά που δημιουργείται κάποιο κανάλι για μεταφορά δεδομένων. Η δημιουργία ενός τέτοιου καναλιού, για παράδειγμα, απαιτείται κατά τη σύνδεση κάποιου χρήστη αρχικά στο δίκτυο και τη δημιουργία του καναλιού επικοινωνίας προς αυτόν, αλλά και στα επόμενα κανάλια που θα

δημιουργηθούν στη συνέχεια. Η PCRF μπορεί να παρέχει PCC κανόνες ανάλογα με αιτήματα που λαμβάνει είτε από την P-GW είτε από την S-GW σε περιπτώσεις IP υπηρεσιών, καθώς και από τα εξωτερικά δίκτυα που εξυπηρετεί. Στην περίπτωση αυτή αφού ο χρήστης θελήσει να έχει πρόσβαση σε κάποιο εξωτερικό δίκτυο, πχ κάποια IMS υπηρεσία, οι κατάλληλες διαδικασίες του δικτύου αυτού θα μεταδώσουν στην PCRF τις απαραίτητες πληροφορίες, με τις οποίες θα δημιουργήσει τους κατάλληλους PCC κανόνες που θα μεταδώσει στην P-GW και βάσει αυτών θα σχεδιαστεί η ζεύξη από την S-GW προς τον χρήστη. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να αναφέρονται στον τρόπο διεξαγωγής της επικοινωνίας, στην επιβολή πολιτικής και στην ποιότητα υπηρεσιών του εξωτερικού δικτύου.

Η σύνδεση της PCRF με τις υπόλοιπες μονάδες του δικτύου φαίνεται επίσης στο σχήμα 1.5. Κάθε PCRF μπορεί να συνδέεται με περισσότερα από ένα εξωτερικά δίκτυα, P-GW και S-GW αλλά κάθε χρήστης σχετίζεται με μία μόνο PCRF για κάθε δίκτυο που είναι συνδεδεμένος.

### **1.3.5 Τοπικός Server συνδρομητών (Home Subscription Server - HSS)**

Στην LTE αρχιτεκτονική ο Home Location Register αναφέρεται ως HSS. Αποτελεί την αποθήκη δεδομένων των συνδρομητών και περιέχει πληροφορίες για κάθε χρήστη που είναι εγγεγραμμένος στο δίκτυο. Επίσης καταγράφει ανά τακτά χρονικά διαστήματα την τοποθεσία που βρίσκεται στην περιοχή κάλυψης του δικτύου μέσω επικοινωνίας με την MME. Ο HSS είναι μια βάση δεδομένων που βρίσκεται σε χώρο ελέγχου των παρόχων.

Αποθηκεύει το μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας που αφορά το προφίλ των χρηστών, το οποίο περιέχει πληροφορίες για τις υπηρεσίες που έχει πρόσβαση ο κάθε χρήστης, συμπεριλαμβάνοντας και τα διαφορετικά δίκτυα που μπορεί να συνδεθεί, τα στοιχεία του, καθώς πληροφορίες για την θέση στην οποία βρισκόταν κατά την τελευταία σύνδεσή του στο δίκτυο. Για τη διατήρηση συμβατότητας με τα υπόλοιπα δίκτυα, ο HSS καταγράφει κάθε φορά την ταυτότητα των P-GWs που χρησιμοποιούνται. Το κύριο κλειδί, το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των διανυσμάτων αυθεντικοποίησης κατά τη σύνδεση των χρηστών στο δίκτυο, καθώς και για την παραγωγή των κλειδιών κρυπτογράφησης και ακεραιότητας της επικοινωνίας, είναι αποθηκευμένο στο κέντρο αυθεντικοποίησης (AuC) που αποτελεί μέρος του HSS. Για κάθε σηματοδότηση που σχετίζεται με αυτές τις λειτουργίες, ο HSS αλληλεπιδρά με την MME ανταλλάσσοντας

δεδομένα. Ο HSS πρέπει να μπορεί να συνδεθεί με κάθε MME του δικτύου στα πλαίσια του οποίου οι χρήστες μπορούν να κινηθούν. Για κάθε χρήστη ο HSS θα καταγράψει τη θέση του μέσω της MME που τον εξυπηρετεί. Σε περίπτωση που ο χρήστης περάσει στην υπηρεσία μιας νέας MME, ο HSS θα διαγράψει την θέση του από την παλιά και θα αρχίσει να καταγράφει μέσω της νέας MME. (17), (18), (19), (20), (21)

### **1.3.6 Σταθμός Βάσης (eNodeB)**

Ο μοναδικός κόμβος στο τμήμα E-UTRAN του δικτύου είναι ο eNodeB. Είναι ένας σταθμός βάσης ασύρματης αποστολής και λήψης δεδομένων που έχει τον έλεγχο όλης της ασύρματης επικοινωνίας για την κυψέλη που εξυπηρετεί σε συνεργασία με το σταθερό τμήμα του δικτύου. Οι σταθμοί αυτοί είναι κατανομημένοι σ' όλη την περιοχή κάλυψης του δικτύου και κάθε ένας βρίσκεται δίπλα σε μια κεραία ασύρματης επικοινωνίας.

Λειτουργικά ο eNodeB αποτελεί μια γέφυρα ανάμεσα στο EPC τμήμα του δικτύου και στον χρήστη, αποτελώντας τον τερματικό σταθμό όλων των ασύρματων πρωτοκόλλων προς τον χρήστη και αναμεταδίδοντας δεδομένα μέσω της ασύρματης ζεύξης προς τον χρήστη και μέσω IP συνδεσιμότητας προς το EPC. Σ' αυτή τη διαδικασία ο eNodeB εκτελεί κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση των δεδομένων του χρήστη κατά την επικοινωνία, συμπίεση και αποσυμπίεση καθώς και απόδοση IP κεφαλίδων στα πλαίσια δεδομένων αποφεύγοντας έτσι την επαναποστολή ίδιων ή διαδοχικών δεδομένων.

Ο eNodeB είναι υπεύθυνος και για πολλές διαδικασίες ελέγχου. Είναι υπεύθυνος για την διαχείριση της ραδιοζεύξης, τον έλεγχο δηλαδή της ασύρματης σύνδεσης με τους χρήστες. Η λειτουργία αυτή περιλαμβάνει την κατανομή καναλιών ανάλογα με τις αιτήσεις, την προτεραιότητα εξυπηρέτησης και την διαχείριση συμφόρησης σύμφωνα με την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών του δικτύου και την καταγραφή των χρησιμοποιούμενων ζεύξεων για κάθε στιγμή.

Επίσης ο eNodeB έχει σημαντικό ρόλο και στην διαχείριση κινητικότητας. Ελέγχει και αναλύει τις μετρήσεις για την ποιότητα του ασύρματου σήματος που καταγράφονται από τη συσκευή του χρήστη, εκτελεί και ο ίδιος τις αντίστοιχες μετρήσεις, και βάσει αυτών αποφασίζει για την μεταπομπή των χρηστών στην κατάλληλη γειτονική κυψέλη (handover). Στην περίπτωση αυτή ο eNodeB αλληλεπιδρά με τους γειτονικούς eNodeBs και με την MME με σκοπό να διαπιστωθεί από ποιον eNodeB δέχεται καλύτερο σήμα

ώστε να περάσει στον έλεγχό του. Όταν ένας χρήστης επιχειρεί μέσω ενός νέου eNodeB να συνδεθεί στο δίκτυο, ο eNodeB είναι υπεύθυνος για την μετάδοση του αιτήματός του στην MME που εξυπηρετούσε τον συγκεκριμένο χρήστη ή να επιλέξει μια νέα MME να αυθεντικοποιήσει το χρήστη αν η σύνδεση στην προηγούμενη δεν είναι εφικτή. Τα δίκτυα 3<sup>ης</sup> γενιάς στις περιπτώσεις handover χρησιμοποιούν soft και softer αλγορίθμους μεταπομπής, σε αντίθεση με τους hard αλγορίθμους των GSM δικτύων, ώστε να γίνεται ομαλά η μετάβαση στον νέο eNodeB διατηρώντας συνήθως για κάποιο χρονικό διάστημα και τις 2 ραδιοζεύξεις (παλιού και νέου eNodeB) μέχρι να αποφασιστεί σε ποιον θα συνδεθεί. Με τον τρόπο αυτό διατηρούνται οι υπηρεσίες που χρησιμοποιούσε ο χρήστης χωρίς να δημιουργηθούν προβλήματα λόγω της μεταπομπής (διακοπή κλήσεων ή αποσύνδεση σε υπηρεσίες Internet).

Στο σχήμα 1.5 φαίνεται η σύνδεση του eNodeB με τους άλλους κόμβους του δικτύου. Κάθε eNodeB μπορεί να εξυπηρετεί πολλούς χρήστες στην περιοχή κάλυψής του όμως κάθε χρήστης εξυπηρετείται από ένα μόνο eNodeB κάθε φορά. Για την καλύτερη υποστήριξη handover από το δίκτυο θα πρέπει να διευκολύνεται η επικοινωνία ανάμεσα σε γειτονικούς eNodeBs ώστε να είναι εφικτή η διαδικασία μεταπομπής των χρηστών όταν κρίνεται αναγκαίο. Τόσο οι MMEs όσο και οι S-GWs μπορεί να είναι ομαδοποιημένες σε τμήματα, δηλαδή ένα σύνολο τέτοιων κόμβων να είναι σχεδιασμένο ώστε να εξυπηρετεί ένα συγκεκριμένο τμήμα από eNodeBs. Από την πλευρά του eNodeB αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται να μπορεί να συνδεθεί με πολλές MMEs και S-GWs όμως κάθε eNodeB εξυπηρετείται από μία μόνο MME και S-GW κάθε φορά. Ο eNodeB θα πρέπει να διατηρεί τις συσχετίσεις αυτές καθώς δεν μπορούν να αλλάξουν από την πλευρά του σταθμού βάσης αλλά μόνο οι MME και S-GW έχουν το δικαίωμα να τις αλλάξουν, πχ σε περιπτώσεις handover.

### **1.3.7 Συσκευή Χρήστη (UE)**

Η συσκευή χρήστη (UE) είναι η συσκευή μέσω της οποίας ο συνδρομητής χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες του δικτύου. Είναι όμοια με την συσκευή χρήστη των 2G και 3G δικτύων με μόνη διαφορά την ικανότητά της για χρήση των υπηρεσιών του LTE δικτύου (υποστήριξη των τεχνολογιών OFDMA και SC-FDMA). Όπως στα 3G δίκτυα, έτσι και στα LTE η συσκευή αυτή περιέχει την USIM, μια εφαρμογή τοποθετημένη σε μια αποσπώμενη έξυπνη κάρτα, την UICC η οποία βρίσκεται στον εξοπλισμό του χρήστη με παρόμοια εφαρμογή.

Μέσω της UE διεξάγεται η σηματοδότηση για την σύνδεση του χρήστη στο δίκτυο, την διατήρηση των ασύρματων ζεύξεων κατά την διάρκεια της επικοινωνίας και την κατάργησή τους μετά το τέλος αυτής. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει διάφορες λειτουργίες, όπως διαχείριση της κινητικότητας του χρήστη, μεταπομπές ανάμεσα σε γειτονικούς σταθμούς βάσης και καταγραφή της θέσης της συσκευής, τις οποίες εκτελεί η συσκευή σύμφωνα με την πολιτική του δικτύου που είναι συνδεδεμένη. Γενικά μέσω της UE ο χρήστης μπορεί να διατηρεί τη σύνδεση με το δίκτυο και να ανταλλάσσει δεδομένα χρησιμοποιώντας τις υπηρεσίες του δικτύου. Μια τέτοια συσκευή μπορεί να είναι για παράδειγμα ένα κινητό τηλέφωνο, ένας φορητός υπολογιστής ή οποιαδήποτε συσκευή υποστηρίζει σύνδεση με δίκτυα LTE. (22), (23), (24)

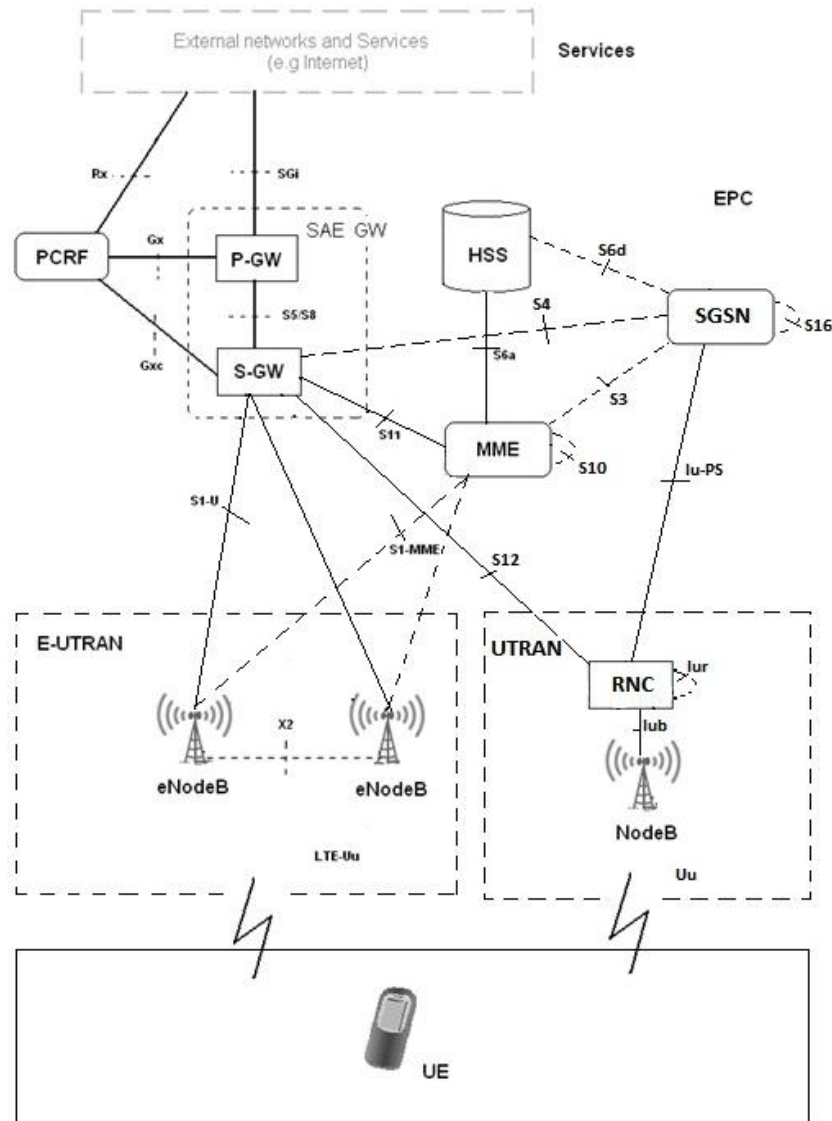
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Πρωτόκολλα δικτύων LTE και διασύνδεση

### 2.1 Εισαγωγή

Ο ρόλος της διασύνδεσης των πρωτοκόλλων στα δίκτυα LTE είναι να στήσει, να επανασηματίσει και να απελευθερώσει το κανάλι μέσω του οποίου γίνεται η μεταφορά πακέτων του EPS (Evolved Packet System). Τα επίπεδα πρωτοκόλλων πάνω από το φυσικό επίπεδο, περιλαμβάνουν τα πρωτόκολλα επιπέδου 2 (Layer 2) τα οποία είναι το Medium Access Control (MAC), το Radio Link Control (RLC) και το Packet Data Convergence Protocol (PDCP), ενώ το φυσικό επίπεδο περιλαμβάνει το μέσο και τις τεχνικές μετάδοσης. Επίσης, στο 3<sup>ο</sup> επίπεδο (Layer 3) έχουμε το πρωτόκολλο Radio Resource Control (RRC) που ανήκει στο επίπεδο ελέγχου. Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε στην δομή, την αρχιτεκτονική και τις βασικές λειτουργίες των πρωτοκόλλων αυτών.

### 2.2 Διασύνδεση δικτύων

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει τα LTE δίκτυα σχεδιάστηκαν εκτός των νέων υπηρεσιών που προσφέρουν, με σκοπό να υποστηρίζουν την βέλτιστη συμβατότητα και διασύνδεση με διαφορετικά δίκτυα ασύρματων επικοινωνιών. Η αρχιτεκτονική των δικτύων LTE υποστηρίζει τη διασύνδεση με δίκτυα του προτύπου 3GPP στο τμήμα EPC του κυρίως δικτύου. Η διασύνδεση ενός LTE και ενός UMTS δικτύου γίνεται ανάμεσα στις οντότητες των δικτύων αλλά και με απ' ευθείας διασύνδεση μέσω της πύλης S-GW και του RNC του UMTS δικτύου όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Τα LTE δίκτυα μπορούν επίσης μέσω της διασύνδεσης με τα UMTS δίκτυα και συγκεκριμένα μέσω του κόμβου SGSN να επικοινωνούν και με GSM δίκτυα αλλά στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε μόνο στην διασύνδεση τους με τα δίκτυα UMTS. Η διασύνδεση των δικτύων αυτών και η επικοινωνία ανάμεσα στις οντότητές τους φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



**Σχήμα 2.1 Διασύνδεση μεταξύ LTE και UMTS δικτύων**

Λειτουργικά, τα δίκτυα LTE και UMTS παρέχουν παρόμοιες λειτουργίες διασύνδεσης και από τη σκοπιά του τελικού χρήστη το μόνο που αλλάζει είναι οι ταχύτεροι ρυθμοί μετάδοσης και η καλύτερη απόκριση και ποιότητα υπηρεσιών του δικτύου που παρέχουν τα LTE δίκτυα. Αρχιτεκτονικά όμως η διασύνδεση με τον σταθμό βάσης και οι λειτουργίες που εκτελούνται από τα δίκτυα κατά την διάρκεια της επικοινωνίας είναι διαφορετικές. Η εγκαθίδρυση των ασύρματων καναλιών επικοινωνίας, για παράδειγμα, και οι τεχνολογίες μετάδοσης είναι διαφορετικές στα δύο δίκτυα. Παρόλα αυτά κατά την διασύνδεση στο EPC τμήμα του δικτύου οι λειτουργίες του UMTS εκτελούνται κανονικά, όπως θα εκτελούνταν σ' ένα 3G δίκτυο με την πύλη S-GW



να παίζει το ρόλο της GGSN. Η μόνη διαφορά έγκειται στην πιθανή αλλαγή S-GW κατά την κίνηση του χρήστη.

Οι λειτουργίες των οντοτήτων του δικτύου είναι οι ίδιες που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο για την βασική αρχιτεκτονική του LTE δικτύου. Στο EPC τμήμα του δικτύου σ' αυτή την περίπτωση χρειάζεται η δημιουργία νέων διεπαφών και λειτουργιών κατά την διασύνδεση των οντοτήτων των διαφορετικών δικτύων. Οι νέες διεπαφές και λειτουργίες θα πρέπει να υποστηρίζονται και από τα δύο δίκτυα. Οι νέες αυτές λειτουργίες όπως φαίνονται και στο σχήμα 2.1 είναι για την διασύνδεση των οντοτήτων των δικτύων, οι διεπαφές S4, S6d και S3 για την διασύνδεση της πύλης SGSN με την S-GW, τον HSS και την MME αντίστοιχα και η διεπαφή S12 για την απευθείας σύνδεση της S-GW με τον RNC του δικτύου 3G.

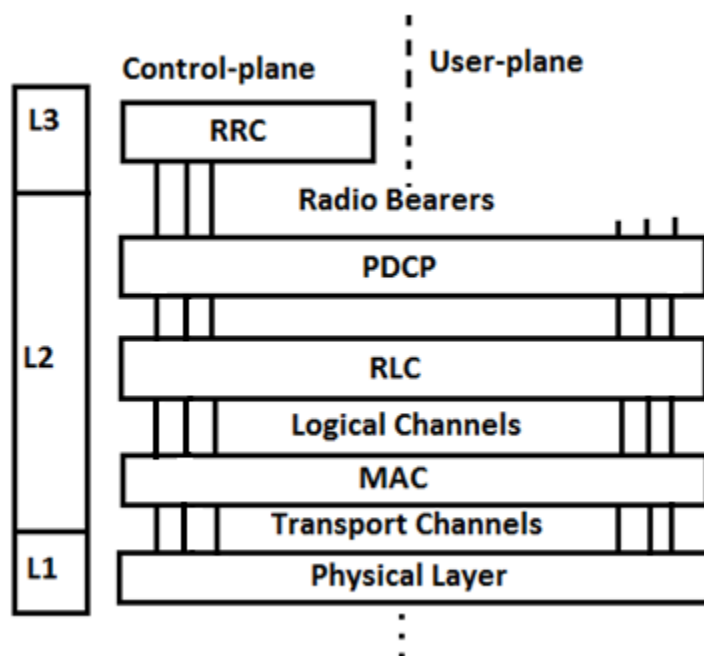
Κατά την σχεδίαση του eNodeB στα LTE δίκτυα σκοπός ήταν η βέλτιστη λειτουργία κατά τη χρήση των νέων υπηρεσιών μετάδοσης των δικτύων LTE αποσυσχετίζοντας τον eNodeB από τον RNC και από λειτουργίες διασύνδεσης με άλλα δίκτυα. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 2.1, όπου ο eNodeB δεν αλληλεπιδρά απευθείας με το UMTS δίκτυο αλλά κάθε είδους επικοινωνία γίνεται μέσω του τμήματος EPC. Για την καλύτερη απόκριση του δικτύου σε περιπτώσεις handover, ο eNodeB θα πρέπει να μπορεί να λάβει και να συγκρίνει μετρήσεις σήματος της συσκευής χρήστη ώστε βάσει αυτά να μπορεί να αποφασίσει και να εκτελέσει μεταπομπή σε γειτονικά UMTS κελιά. Αντίστοιχες λειτουργίες θα πρέπει να υποστηρίζονται και από τον NodeB του UMTS δικτύου ώστε να μπορεί να εκτελεί λειτουργίες handover σε γειτονικά LTE κελιά.

Το EPC τμήμα του δικτύου έχει κύριο ρόλο στην διασύνδεση μεταξύ των δικτύων. Εκτός από τις διεπαφές που περιλαμβάνει, η MME και η S-GW διαθέτουν χωριστές λειτουργίες συνδεσιμότητας και συμβατότητας τις οποίες η SGSN του UMTS δικτύου πρέπει να υποστηρίζει για μια επιτυχή διασύνδεση. Η πύλη S-GW είναι η βασική οντότητα που διαχειρίζεται την κινητικότητα στη διασύνδεση των 3GPP δικτύων. Για τις λειτουργίες δημιουργίας καναλιών και την μετάβαση στην SGSN συμπεριφέρεται όπως η GGSN ενός UMTS δικτύου προσφέροντας υπηρεσίες τόσο προς την SGSN όσο και στον RNC. Πολλές από τις προσφερόμενες υπηρεσίες διαμορφώνονται από την P-GW χωρίς αυτό να είναι εμφανές από την SGSN. Η S-GW διατηρεί τον ρόλο της και ελέγχεται είτε από την MME, είτε από την SGSN ανάλογα σε ποιο δίκτυο είναι συνδεδεμένος ο χρήστης. Για την υποστήριξη της διασύνδεσης η MME χρειάζεται να επικοινωνεί με την SGSN. Οι λειτουργίες αυτής της διασύνδεσης είναι ουσιαστικά ίδιες μ' αυτές της

διασύνδεσης ανάμεσα σε MMEs. Μια επιπλέον λειτουργία της MME είναι η διατήρηση της επικοινωνίας και η δημιουργία νέων συνδέσεων κατά την εναλλαγή S-GW ή SGSN λόγω της κινητικότητας του χρήστη. Η SGSN ενός 3G δικτύου έχει παρόμοιο ρόλο με την MME ενός δικτύου LTE αποτελώντας τον κόμβο ελέγχου του δικτύου κορμού.

### 2.3 Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων

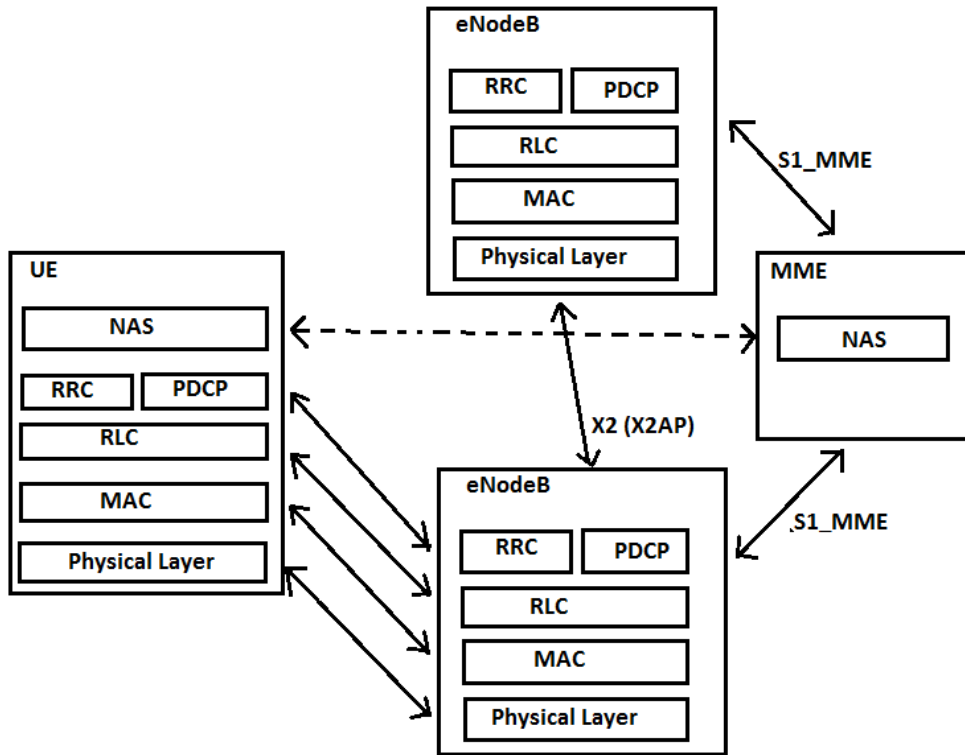
Η συνολική αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων ενός δικτύου LTE φαίνεται στο σχήμα 2.2. Η έννοια του πρωτοκόλλου αναφέρεται στα πρότυπα και τις συμβάσεις ανάμεσα στις επικοινωνούντες οντότητες για το πώς θα πρέπει να διεξάγεται η επικοινωνία ενώ η έννοια του επιπέδου περιλαμβάνει το σύνολο των πρωτοκόλλων και των λειτουργιών που υποστηρίζει το συγκεκριμένο επίπεδο. Οι έννοιες αυτές συχνά μπορεί να μπερδευτούν. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται τα κύρια πρωτόκολλα που ασχολούνται με την μετάδοση ασύρματου μέσου του LTE και πώς αυτά δομούνται σε επίπεδα. Επιπροσθέτως, υπάρχουν πρωτόκολλα που βρίσκονται μεταξύ του δικτύου κορμού και του εξοπλισμού του χρήστη (UE) τα οποία όμως λειτουργούν διαφανώς ως προς τα επίπεδα ασύρματης μετάδοσης και αναφερόμαστε σ' αυτά γενικώς με την ορολογία Non-Access Stratum (NAS).



Σχήμα 2.2 Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων LTE

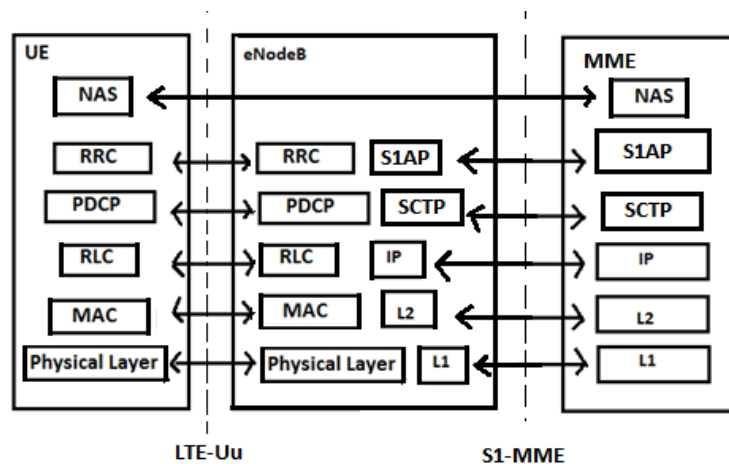
Το φυσικό επίπεδο λειτουργεί με βάση τα κανάλια που παρέχονται από το επίπεδο MAC. Τα κανάλια μεταφοράς περιγράφουν το πώς και με ποια χαρακτηριστικά τα δεδομένα μεταφέρονται από το επίπεδο ασύρματης μετάδοσης του φυσικού στρώματος. Το επίπεδο MAC προσφέρει λογικά κανάλια στο επίπεδο RLC. Τα λογικά κανάλια χαρακτηρίζουν τον τύπο των προς μετάδοση δεδομένων. Πάνω από το επίπεδο RLC είναι το PDCP που χρησιμοποιείται τόσο από το επίπεδο ελέγχου όσο και από το επίπεδο χρήστη στα δίκτυα LTE, σε αντίθεση με το WCDMA όπου χρησιμοποιούνταν μόνο από το επίπεδο χρήστη. Το επίπεδο 2 (L2) παρέχει ασύρματα κανάλια για την επικοινωνία με τα ανώτερα στρώματα. Τα κανάλια αυτά είναι 2 ειδών, τα Signaling Radio Bearers που μεταφέρουν τα μηνύματα σηματοδότησης του RRC και τα απλά Radio Bearers που μεταφέρουν τα δεδομένα του χρήστη. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 τα πρωτόκολλα MAC, RLC, PDCP και RRC βρίσκονται όλα στον eNodeB. Στα UMTS δίκτυα, τα RRC και PDCP βρισκόταν στον RNC (Radio Network Controller) ενώ το MAC βρισκόταν είτε στον NodeB είτε στον RNC.

Η σηματοδότηση μεταξύ διαφορετικών στοιχείων του δικτύου στο επίπεδο ελέγχου γίνεται με βάση τη διεπαφή X2 που χρησιμοποιείται για την διασύνδεση και την εσωτερική επικοινωνία μεταξύ των eNodeBs. Για την επικοινωνία μεταξύ της MME (Mobility Management Entity) και του eNodeB χρησιμοποιείται η διεπαφή S1\_MME. Η διασύνδεση ενός χρήστη μέσω των αντίστοιχων πρωτοκόλλων με τον eNodeB καθώς και των eNodeBs με την MME φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (σχήμα 2.3).

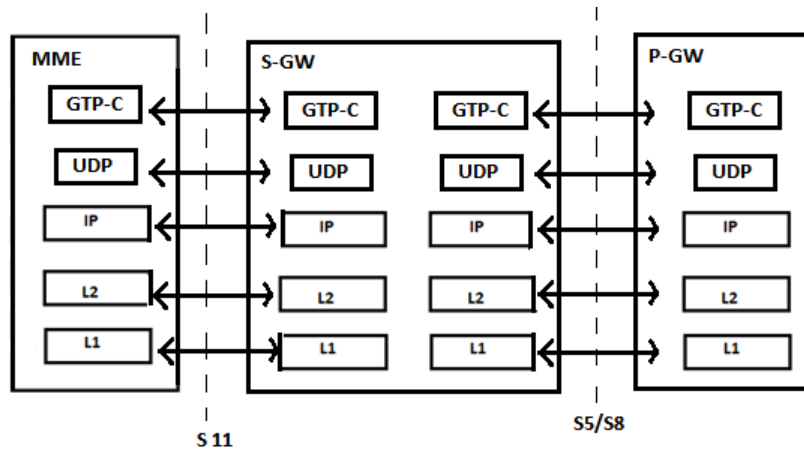


**Σχήμα 2.3 Διασύνδεση κόμβων ενός LTE δικτύου στο τμήμα E-UTRAN**

Τα σχήματα 2.4, 2.5 παρουσιάζουν τη δομή και την επικοινωνία των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία των κόμβων του δικτύου κατά τη σύνδεση και την εξυπηρέτηση ενός χρήστη. Απεικονίζουν τις διεπαφές μιας MME σε δύο διαφορετικά τμήματα. Το σχήμα 2.4 δείχνει τα επικοινωνούντα πρωτόκολλα προς το τμήμα E-UTRAN και το χρήστη ενώ το σχήμα 2.5 απεικονίζει την οργάνωση και την επικοινωνία των πρωτοκόλλων προς τις πύλες εξόδου S-GW και P-GW για τις αντίστοιχες διεπαφές.



**Σχήμα 2.4 Πρωτόκολλα διασύνδεσης E-UTRAN-MME στο επίπεδο ελέγχου (CP)**



**Σχήμα 2.5** Πρωτόκολλα διασύνδεσης MME με τις πύλες S-GW, P-GW στο επίπεδο ελέγχου (CP)

Το ανώτερο τμήμα στο επίπεδο ελέγχου είναι το επίπεδο NAS, το οποίο αποτελείται από δύο διαφορετικά πρωτόκολλα τα οποία επιτρέπουν την απ' ευθείας μετάδοση σηματοδότησης ανάμεσα στην MME και τον χρήστη. Το περιεχόμενο των πρωτοκόλλων αυτών δεν είναι ορατό προς τον eNodeB ούτε ανακατεύεται στην επικοινωνία αυτή με άλλον τρόπο εκτός απ' το να μεταδίδει αυτά τα μηνύματα και να παρέχει επιπλέον πληροφορίες για το είδος των μηνυμάτων σε ορισμένες περιπτώσεις. Τα πρωτόκολλα του επιπέδου NAS είναι:

**EPS Mobility Management (EMM):** το πρωτόκολλο EMM είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο της κινητικότητας του χρήστη μέσα στο σύστημα. Περιλαμβάνει λειτουργίες συσχέτισης και αποσυσχέτισης του χρήστη με το δίκτυο και στο ενδιάμεσο ενημερώνει για τις πιθανές αλλαγές στη θέση του χρήστη. Αυτό ονομάζεται Tracking Area Updating (TAU) και συμβαίνει στην διάρκεια που ο χρήστης παραμένει ανενεργός. Μπορεί ο έλεγχος κατά την διαδικασία των handover να γίνεται από τα πρωτόκολλα χαμηλότερων επιπέδων, αλλά το EMM περιλαμβάνει διαδικασίες επανενεργοποίησης των χρηστών στην περίπτωση αυτή. Η σύνδεση ενός χρήστη αρχικά στο δίκτυο καλείται Service Request (αίτημα εξυπηρέτησης) και για κάθε νέα σύνδεση το δίκτυο δημιουργεί νέες ραδιοζεύξεις προς τον καινούριο χρήστη. Η αυθεντικοποίηση και η προστασία της ταυτότητας του χρήστη όπως η κατανομή προσωρινής ταυτότητας GUTI στον χρήστη είναι αρμοδιότητα του EMM πρωτοκόλλου. Επίσης έχει τον έλεγχο όλων των λειτουργιών ελέγχου στο επίπεδο NAS, την κρυπτογράφηση και την ακεραιότητα των δεδομένων.

**EPS Session Management (ESM):** το πρωτόκολλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διαχείριση των ζεύξεων ανάμεσα στην UE και στην MME, και χρησιμοποιείται επιπλέον για την διαχείριση των ζεύξεων στο τμήμα E-UTRAN. Οι διαδικασίες του πρωτοκόλλου αυτού δεν χρησιμοποιούνται αν το περιβάλλον της ζεύξης είναι ήδη διαθέσιμο από το δίκτυο οπότε και λειτουργούν οι διαδικασίες του τμήματος E-UTRAN. Αυτό για παράδειγμα θα μπορούσε να συμβεί στην περίπτωση που ένας χρήστης προσπαθεί να συνδεθεί σε κάποιο εξωτερικό δίκτυο και οι πληροφορίες αυτές να είναι διαθέσιμες μέσω της PCRF.

Η διεπαφή S1 συνδέει το τμήμα E-UTRAN με το EPC τμήμα του δικτύου και περιλαμβάνει τα ακόλουθα πρωτόκολλα:

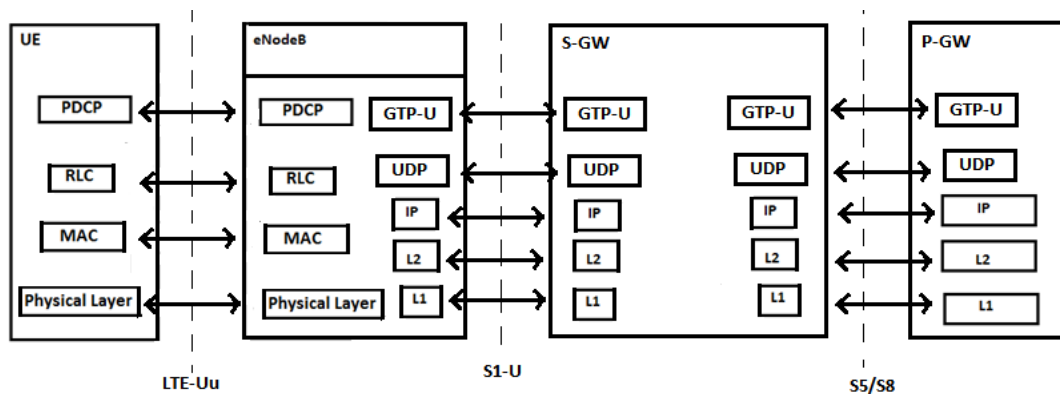
**S1 Application Protocol (S1AP):** το πρωτόκολλο αυτό διαχειρίζεται τις συνδέσεις σε επίπεδο ελέγχου και επίπεδο χρήστη του UE ανάμεσα στα τμήματα E-UTRAN και EPC, συμμετέχοντας και στις περιπτώσεις handover όταν περιλαμβάνεται και το EPC τμήμα του δικτύου.

**SCTP/IP signalling transport:** το Stream Control Transmission Protocol (SCTP) και το πρωτόκολλο IP αντιπροσωπεύουν την βασική μετάδοση IP μηνυμάτων σε θέματα σηματοδοσίας. Το SCTP παρέχει αξιόπιστη μετάδοση και ένα σύνολο λειτουργιών μετάδοσης.

Στο EPC τμήμα του δικτύου υπάρχουν δύο εναλλακτικά πρωτόκολλα για την διεπαφή S5/S8, ανάλογα αν η επικοινωνία βασίζεται σε GTP κανάλια μετάδοσης ή IP. Όταν η διεπαφή βασίζεται σε GTP τότε χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα πρωτόκολλα :

**GPRS Tunnelling Protocol, Control Plane (GTP-C):** διαμορφώνει τις UP συνδέσεις στο επίπεδο χρήστη. Αυτό περιλαμβάνει την σηματοδοσία για ποιότητα υπηρεσιών (QoS) και άλλες παραμέτρους καθώς επίσης και τα κανάλια του GTP-U (σχήμα 2.6). Το GTP-C διαχειρίζεται τις λειτουργίες ελέγχου κινητικότητας στο EPC τμήμα του δικτύου, για παράδειγμα όταν τα GTP-U κανάλια που συνδέονται με κάποιον χρήστη πρέπει να συνδεθούν σε κάποιον άλλο κόμβο.

**UDP/IP transport:** τα πρωτόκολλα UDP (Unit Data Protocol) και IP χρησιμοποιούνται για την βασική μετάδοση IP. Το UDP χρησιμοποιείται στο επίπεδο αυτό αντί του TCP για μετάδοση φωνής συνήθως μιας και στα ανώτερα επίπεδα παρέχεται ήδη έλεγχος σφαλμάτων και επαναποστολή. Τα πακέτα IP στο τμήμα EPC μεταδίδονται από τα επίπεδα L1 και L2.



**Σχήμα 2.6** Πρωτόκολλα διασύνδεσης για GTP υπηρεσίες στο επίπεδο χρήστη (UP)

Σε περιπτώσεις που η διεπαφή S5/S8 βασίζεται σε IP υπηρεσίες τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται είναι τα ακόλουθα :

**Proxy Mobile IP (PMIP):** όταν η S5/S8 βασίζεται σε IP υπηρεσίες το πρωτόκολλο PMIP (κινητής IP) είναι το βασικό πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται. Διαχειρίζεται την κινητικότητα των χρηστών σε διαφορετικά δίκτυα διατηρώντας μια μόνιμη IP, αλλά δεν περιέχει λειτουργίες ελέγχου των ζευξιών.

**IP:** το βασικότερο πρωτόκολλο για την μετάδοση των πακέτων προς το χρήστη όπου στο επίπεδο αυτό συνεργάζεται με το PMIP αποκρύπτοντας την κινητικότητα. (25), (26), (27)

### 2.3.1 Πρωτόκολλο διαχείρισης ασύρματων πόρων (Radio Resource Control - RRC)

Τα μηνύματα του RRC είναι ένα σημαντικό κομμάτι των πληροφοριών ελέγχου που ανταλλάσσονται μεταξύ του UE και του E-UTRAN. Το RRC στο E-UTRAN έχει απλοποιηθεί σημαντικά σε σχέση με αυτό στο UTRAN αφού έχει μειωθεί ο αριθμός των μηνυμάτων αλλά και το περιεχόμενό τους. Το RRC χρησιμοποιεί την ίδια γλώσσα πρωτοκόλλου με το WCDMA, την Abstract Syntax Notation One (ASN.1) καθώς μπορεί να διευκολύνει την εξέλιξη σε διαφορετικές εκδόσεις λόγω της ικανότητας που έχει, να δέχεται επεκτάσεις (extensions). Η κωδικοποίηση των μηνυμάτων στα interface X2 και S1 γίνεται επίσης με την ASN.1.

Σε αντίθεση με το UTRAN (WCDMA), οι καταστάσεις της συσκευής του χρήστη στο τμήμα E-UTRAN έχουν απλοποιηθεί σημαντικά και υπάρχουν πλέον μόνο δύο

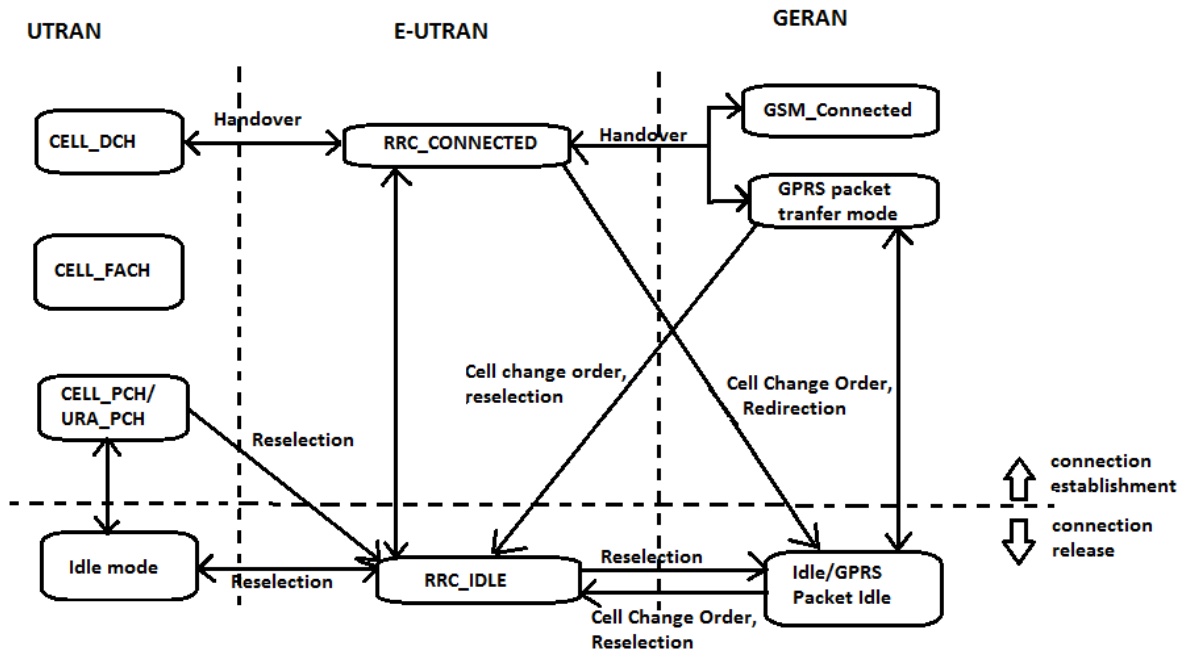
καταστάσεις, οι RRC\_CONNECTED και η RRC\_IDLE, που εξαρτώνται από το αν έχει εγκαθιδρυθεί η RRC σύνδεση ή όχι.

Στην κατάσταση RRC\_IDLE η συσκευή χρήστη παρακολουθεί ένα κανάλι εντοπισμού, για να εντοπίσει εισερχόμενες κλήσεις, να λάβει πληροφορίες για το δίκτυο, πληροφορίες για τις γειτονικές κυψέλες και να ξαναεπιλέξει κυψέλη εάν αυτό είναι απαραίτητο. Σε αυτή την κατάσταση, μια συγκεκριμένη DRX (Discontinuous Reception) λειτουργία της συσκευής του χρήστη μπορεί να παραμετροποιείται από το ανώτερο επίπεδο και η φορητότητα να ελέγχεται από τη συσκευή χρήστη εξοικονομώντας ταυτόχρονα ενέργεια.

Στην κατάσταση RRC\_CONNECTED η συσκευή χρήστη λαμβάνει ή στέλνει δεδομένα από και προς το δίκτυο. Για να γίνει αυτό, η UE παρακολουθεί κάποια κανάλια ελέγχου που συνδέονται με το διαμοιραζόμενο κανάλι δεδομένων για να καθορίσει το αν θα πρέπει να στείλει ή να λάβει δεδομένα. Επίσης η UE τροφοδοτεί με δεδομένα feedback και δεδομένα που αφορούν την ποιότητα του καναλιού τον eNodeB. Επίσης και σε αυτή την κατάσταση, η UE κάνει μετρήσεις που αφορούν τις γειτονικές κυψέλες με βάση τη διαμόρφωση που παρέχεται από τον eNodeB. Σε αντίθεση με το σύστημα UTRAN, η UE μπορεί να λάβει πληροφορίες από BCCH (Broadcast Control Channel) όταν βρίσκεται σε κατάσταση RRC\_CONNECTED. Σε χαμηλότερα επίπεδα, η UE παραμετροποιείται από μια συγκεκριμένη DRX και η φορητότητα ελέγχεται από το δίκτυο, όπως γίνεται σε καταστάσεις handover.

Το σχήμα 2.7 δείχνει την υποστήριξη φορητότητας μεταξύ των E-UTRAN, UTRAN και GSM EDGE Radio Access Network (GERAN). Καθώς το CELL\_FACH στο UTRAN θεωρείται μια πολύ μικρή περίοδος, η απευθείας μετάβαση από την UTRAN CELL\_FACH στην κατάσταση E-UTRAN RRC δεν υποστηρίζεται. (28), (29)





Σχήμα 2.7 Φορητότητα ανάμεσα σε διαφορετικά δίκτυα

### 2.3.1.1 Ασύρματα κανάλια σηματοδότησης (Signaling Radio Bearers - SRB)

Οι SRBs είναι ειδικοί φορείς σημάτων που μεταφέρουν μόνο μηνύματα RRC και NAS. Ορίζονται τρία είδη SRB. Οι SRB0 μεταφέρουν μηνύματα RRC που χρησιμοποιούν Common Control Channel (CCCH) κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης μιας σύνδεσης ή όταν μια σύνδεση πέσει. Έτσι, για παράδειγμα τα παρακάτω μηνύματα μπορούν να μεταφερθούν μέσω SRB0: αίτημα σύνδεσης (RRC Connection Request), εγκατάσταση σύνδεσης (RRC Connection Setup), αίτημα αποσυσχέτισης (RRC Connection Reject), αίτημα επανασυσχέτισης (RRC Connection Reestablishment Request), αίτημα αποσύνδεσης (RRC Connection Reestablishment Reject). Αφού έχει εγκαθιδρυθεί η σύνδεση, χρησιμοποιούνται οι SRB1 για να μεταφέρουν μηνύματα RRC χρησιμοποιώντας τόσο DCCH όσο και NAS μέχρι να ενεργοποιηθούν οι διαδικασίες ασφάλειας. Όταν ενεργοποιηθεί η ασφάλεια, τα μηνύματα NAS μεταφέρονται μέσω SRB2 ενώ τα RRC συνεχίζουν να μεταφέρονται μέσω SRB1. Οι SRB1 έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα από τους SRB2.

Συνοπτικά οι λειτουργίες που παρέχονται από το επίπεδο του πρωτοκόλλου RRC είναι οι εξής:

- **broadcast of system information** : εκπομπή πληροφοριών συστήματος
- **paging** : εντοπισμός

- **establishment, maintenance and release of an RRC connection between the UE and e-UTRAN:** εγκαθίδρυση, διατήρηση και απελευθέρωση μιας σύνδεσης RRC μεταξύ ενός UE και ενός E-UTRAN.
- **security functions including key management:** υπηρεσίες ασφάλειας συμπεριλαμβανομένης και της διαχείρισης κλειδιών.
- **establishment, configuration, maintenance and release of point-to-point Radio Bearers:** εγκαθίδρυση, ρύθμιση, διατήρηση και απελευθέρωση των point to point Radio Bearers.
- **UE measurement reporting and control of the reporting:** Μετρήσεις της ισχύς σήματος της συσκευής χρήστη και έλεγχο για διαδικασίες μεταπομπής (Handover).
- **UE cell selection and reselection and control of cell selection and reselection:** επιλογή και επανεπιλογή κυψέλης σε περιπτώσεις μεταπομπής καθώς και έλεγχο της διαδικασίας
- **context transfer between eNodeBs:** μετάβαση μεταξύ των eNodeBs
- **NAS direct message transfer between network and UE:** μεταφορά μηνυμάτων NAS απευθείας μεταξύ του δικτύου και της συσκευής χρήστη
- **UE capability transfer:** δυνατότητες μεταφοράς της συσκευής χρήστη
- **generic protocol error handling:** διαχείριση λαθών του πρωτοκόλλου
- **support of self-configuration and self-optimization:** υποστήριξη των λειτουργιών self-configuration και self-optimization

### 2.3.2 Πρωτόκολλο μετατροπής πακέτων δεδομένων (Packet Data Convergence Protocol - PDCP)

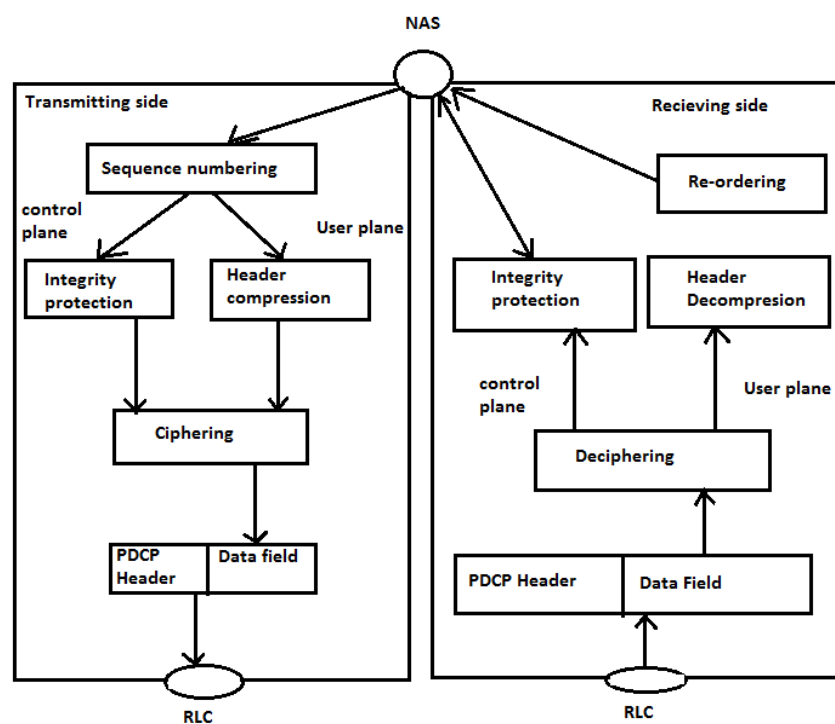
Το PDCP βρίσκεται πάνω από το επίπεδο RLC και χρησιμοποιείται επίσης για τα περισσότερα μηνύματα RRC. Η κύρια διαφορά του από το αντίστοιχο των UMTS δικτύων είναι ότι όλα τα δεδομένα του χρήστη περνούν από το επίπεδο PDCP γιατί η κρυπτογράφηση γίνεται τώρα στο PDCP που βρίσκεται στον eNodeB. Σε κάποια αρχικά σχέδια για την αρχιτεκτονική του PDCP του LTE αυτό βρισκόταν στην άλλη πλευρά του S1 interface, στο δίκτυο κορμού αλλά αργότερα τοποθετήθηκε στον eNodeB μαζί με όλα τα υπόλοιπα πρωτόκολλα. Οι κύριες λειτουργίες του PDCP είναι:

**Header compression and corresponding decompression of the IP packets:** Αυτή η λειτουργία βασίζεται στο πρωτόκολλο Robust Header Compression (ROHC) που

καθορίζεται στο Internet Engineering Task Force και επίσης αποτελεί μέρος του επιπέδου PDCP των δικτύων UMTS. Η συμπίεση των κεφαλίδων είναι σημαντική για να πετύχουμε μικρά IP πακέτα ειδικά όταν έχουμε να κάνουμε με υπηρεσίες VoIP αφού το μεγάλο μέγεθος πακέτων σε αυτή την περίπτωση θα μπορούσε να προκαλέσει σημαντική πτώση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.

**Ciphering and deciphering:** κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση, οι οποίες στα UMTS δίκτυα βρισκόντουσαν στα επίπεδα MAC και RLC

**Integrity protection and verification:** Προστασία ακεραιότητας και επαλήθευση για να εξασφαλιστεί ότι οι υπηρεσίες ελέγχου προέρχονται από τη σωστή πηγή.



**Σχήμα 2.8** Λειτουργίες RRC και PDCP

Το επίπεδο PDCP λαμβάνει PDCP SDUs (Service Data Units) από τα NAS και RRC και αφού τα κρυπτογραφήσει, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8, τα δεδομένα προωθούνται στο επίπεδο RLC. Τα SDUs είναι τμήματα δεδομένων που προωθούνται προς το κατώτερο επίπεδο όπου στη συνέχεια μεταβιβάζονται ανάμεσα στους χρήστες των δικτύων. Αντίστοιχα, όταν λαμβάνονται δεδομένα από το επίπεδο RLC γίνεται η αντίστροφη διαδικασία. Εκτός όμως από τις λειτουργίες που αναφέρθηκαν παραπάνω το PDCP έχει και κάποιες άλλες λειτουργίες που έχουν να κάνουν με τις διαδικασίες μεταπομπών. Το PDCP εκτελεί τη λειτουργία παράδοσης πακέτων στη σωστή σειρά

αλλά και τον έλεγχο για διπλά πακέτα στην κατερχόμενη ζεύξη. Στην ανερχόμενη ζεύξη, αναμεταδίδει πακέτα που δεν έχουν σημειωθεί από τα χαμηλότερα στρώματα ως απεσταλμένα, ενώ τα κατώτερα στρώματα θα άδειαζαν τους καταχωρητές HARQ μετά από handover. Στην κατερχόμενη ζεύξη το επίπεδο PDCP αναμεταδίδει όλα τα πακέτα που δεν έχουν παραδοθεί στο νέο eNodeB. Έτσι εξασφαλίζεται ότι δεν θα χαθούν δεδομένα στην περίπτωση που έχουμε μια μεταπομπή ανάμεσα σε δύο eNodeBs του δικτύου. (30)

### 2.3.3 Πρωτόκολλο ελέγχου ασύρματων συνδέσεων (Radio Link Control - RLC)

Το επίπεδο RLC εκτελεί τις παρακάτω βασικές λειτουργίες:

- Μεταφορά των PDUs που έχουν ληφθεί από υψηλότερα στρώματα πχ από το RRC ή το PDCP.
- Διόρθωση λαθών με ARQ – τοποθέτηση σε σειρά και κατακερματισμός έτσι ώστε να μπορεί να εξασφαλισθεί η άρτια παραλαβή και η ανίχνευση διπλών πακέτων.
- Διαχείριση λαθών πρωτοκόλλου έτσι ώστε να εντοπίζονται σφάλματα και να γίνεται η ανάκτηση τους με βάση τις καταστάσεις λαθών του πρωτοκόλλου (protocol error states).

Η ουσιώδης διαφορά του LTE RLC σε σύγκριση με το UMTS είναι η έλλειψη κρυπτογραφικής ικανότητας στο RLC. Επίσης, μπορεί να γίνει τμηματοποίηση των προς αποστολή δεδομένων ξανά πριν την αναμετάδοση του RLC.

#### Τρόποι λειτουργίας του RLC :

Το RLC μπορεί να λειτουργήσει με τρεις διαφορετικούς τρόπους, τους transparent, unacknowledged και acknowledged.

**Transparent Mode (TM):** Στον τρόπο λειτουργίας TM το RLC μόνο λαμβάνει και στέλνει PDUs σε ένα λογικό κανάλι αλλά δεν προσθέτει κεφαλίδες και έτσι δεν υπάρχει κανένα ίχνος του ληφθέντος PDU μεταξύ της οντότητας που στέλνει και αυτής που λαμβάνει. Ο τρόπος λειτουργίας TM είναι κατάλληλος μόνο για υπηρεσίες που δεν χρησιμοποιούν τη λειτουργία της αναμετάδοσης φυσικού μέσου η δεν απαιτούν συγκεκριμένη σειρά παράδοσης των πακέτων. Συνεπώς από τα λογικά κανάλια μόνο τα BCCH, CCCH και PCCH μπορούν να λειτουργήσουν σε TM mode. Στα UMTS δίκτυα

το AMR speech call χρησιμοποιούνταν σε TM mode, όμως τώρα επειδή όλα τα δεδομένα χρήστη έχουν αναμεταδόσεις φυσικού μέσου και αφού αναμένεται μια ελάχιστη αλληλουχία πακέτων κατά την παράδοση χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας

**Unknowlegded Mode (UM):** Αυτός ο τρόπος λειτουργίας παρέχει περισσότερη λειτουργικότητα λόγω και της παράδοσης πακέτων σε σειρά χάρη στη λειτουργία HARQ που γίνεται στα χαμηλότερα επίπεδα. Τα δεδομένα του UM είναι κατακερματισμένα ή συνεχόμενα σε κατάλληλου μεγέθους RLC SDUs και μετά προστίθεται η κεφαλίδα UM. Η κεφαλίδα RLC UM περιλαμβάνει τον αριθμό της σειράς διευκολύνοντας έτσι την παράδοση σε σειρά. Η πλευρά που λαμβάνει θα πρέπει βασιζόμενη στις πληροφορίες της κεφαλίδας να επανενώσει το αρχικό μήνυμα. Εκτός από τα DCCH και DTCH ο τρόπος λειτουργίας UM έχει σχεδιαστεί για χρήση και με κανάλια πολυεκπομπής όπως είναι τα MCCH και MTCH.

**Aknowlegded Mode (AM):** Αυτός ο τρόπος λειτουργίας παρέχει, επιπρόσθετα στις λειτουργίες της UM mode, τη δυνατότητα αναμετάδοσης εάν χαθούν PDUs ως αποτέλεσμα των λειτουργιών των χαμηλότερων επιπέδων. Τα δεδομένα της AM μπορούν επίσης να κατακερματιστούν έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των φυσικών μέσων μέσω των οποίων γίνεται η μετάδοση και η αναμετάδοση.

### **Ροή Δεδομένων στο επίπεδο RLC**

Για την λειτουργία AM RLC το επίπεδο RLC λαμβάνει δεδομένα από το επίπεδο PDCP. Τα δεδομένα αποθηκεύονται προσωρινά σε έναν καταχωρητή μετάδοσης και μετά με βάση τους πόρους που είναι διαθέσιμοι κατακερματίζονται και μπαίνουν σε σειρά. Στην κατεύθυνση του downlink είναι διαθέσιμοι οι ακόλουθοι έλεγχοι για το AM RLC:

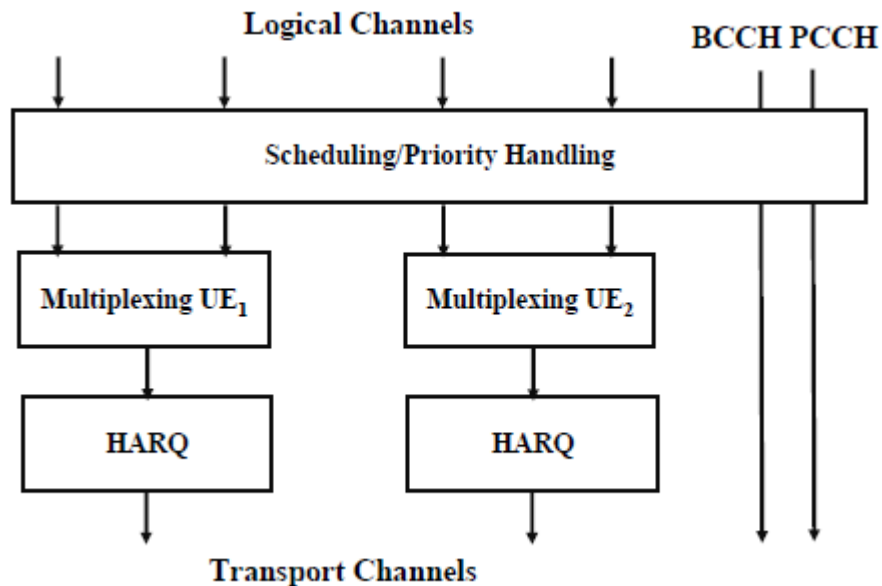
- 10bit Sequence number (SN): Χρησιμοποιείται έτσι ώστε να μπορούμε να έχουμε ένα αρκετά μεγάλο παράθυρο λήψης
- Καταχώρηση του τελευταίου SN που έχει ληφθεί σωστά αλλά και των SN που έχουν ληφθεί με σφάλμα.

Όταν η οντότητα λήψης λάβει ένα RLC PDU ελέγχει για πιθανά διπλά κομμάτια και μετά το προωθεί για επανασυναρμολόγηση (υποθέτοντας ότι δεν λείπει κάποιο SN). Στη συνέχεια μεταβιβάζει τα δεδομένα στο επόμενο επίπεδο πρωτοκόλλου (στη

συγκεκριμένη περίπτωση το PDCP) για περαιτέρω επεξεργασία. Αν κάποιο SN λείπει, η συσκευή λήψης θα ζητήσει αναμετάδοση του πακέτου. (31), (32)

### 2.3.4 Επίπεδο MAC (Medium Access Control)

Το επίπεδο MAC μετατρέπει τα λογικά κανάλια σε κανάλια μεταφοράς, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9 Κανάλια σηματοδότησης και μεταφοράς στο επίπεδο MAC

Άλλοι στόχοι του επιπέδου MAC στα δίκτυα LTE είναι:

- Multiplexing και demultiplexing των RLC Payload Data Units (PDUs) που ανήκουν σε μία ή διαφορετικές ασύρματες ζεύξεις από η προς τα μπλοκ μεταφοράς (Transport Blocks – TB) και από ή προς το φυσικό στρώμα, σε κανάλια μεταφοράς
- Μέτρηση της κίνησης έτσι ώστε να παρέχονται στο RRC πληροφορίες για τον όγκο της κίνησης που υπάρχει στο δίκτυο
- Διόρθωση λαθών μέσω HARQ, έτσι ώστε να ελέγχονται οι αναμεταδόσεις των eNodeB σε φυσικό επίπεδο
- Διαχείριση της προτεραιότητας μεταξύ καναλιών των συσκευών χρήστη μέσω του δυναμικού προγραμματισμού, έτσι ώστε ο προγραμματισμός

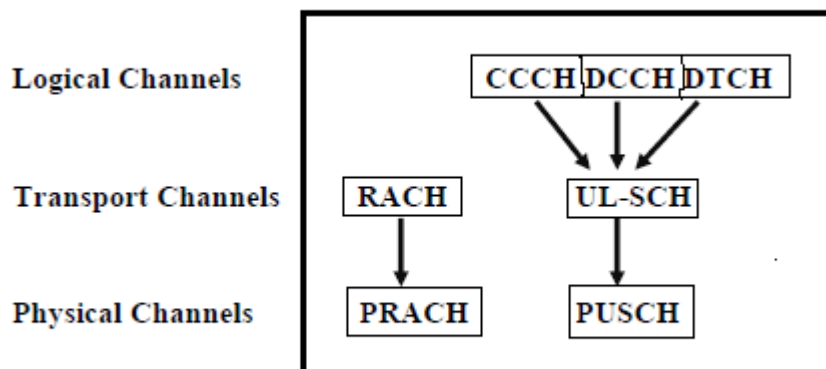
σε ένα eNodeB να θεωρείται ότι γίνεται σε επίπεδο MAC παρόμοια με το πρότυπο HSPA

- Επιλογή του τρόπου μετάδοσης

Σε σύγκριση με το UMTS δεν υπάρχει διαφορά στην λειτουργικότητα του επιπέδου MAC ούτε υπάρχει αλλαγή των καναλιών μεταφοράς αφού τα δεδομένα του χρήστη μεταφέρονται μέσω ενός μόνο τύπου καναλιού μεταφοράς το οποίο μπορεί να είναι είτε Uplink Shared Channel (UL-SCH) είτε Downlink Shared Channel (DL-SCH). Εφόσον η αναγνώριση του χρήστη βασίζεται στη σηματοδότηση του φυσικού στρώματος δεν χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε το επίπεδο MAC για την αναγνώριση της συσκευής του χρήστη. Η λειτουργία downlink που φαίνεται στο σχήμα 2.9 είναι ίδια και στην κατεύθυνση uplink. Προφανώς όμως τα Broadcast Control Channel (BCCH) και Paging Control Channel (PCCH) δεν υπάρχουν, και στη δομή του uplink θεωρείται ότι υπάρχει μόνο ένας χρήστης.

#### 2.3.4.1 Λογικά Κανάλια

Το επίπεδο MAC παρέχει τις υπηρεσίες του στο RLC μέσω των λογικών καναλιών. Διαφορετικά λογικά κανάλια ορίζονται για διαφορετικές υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων στις κατευθύνσεις uplink και downlink.



**Σχήμα 2.10 Κανάλια μεταφοράς στο επίπεδο MAC**

Η αντιστοιχία των λογικών καναλιών σε κανάλια μεταφοράς φαίνεται στο σχήμα 2.10. Στα δίκτυα LTE υπάρχουν τα ακόλουθα είδη λογικών καναλιών:

- **Common Control Channel (CCCH):** μεταφέρει πληροφορίες ελέγχου μεταξύ της συσκευής του χρήστη και του δικτύου. Χρησιμοποιείται στην περίπτωση που δεν υπάρχει σύνδεση RRC μεταξύ της συσκευής χρήστη (UE) και του δικτύου
- **Dedicated Control Channel (DCCH):** είναι ένα κανάλι από σημείο σε σημείο (point to point) για μεταφορά συγκεκριμένων πληροφοριών ελέγχου μεταξύ της UE και του δικτύου
- **Dedicated Traffic Channel (DTCH):** μεταφέρει όλα τα δεδομένα του χρήστη σε point to point συνδέσεις
- Στην ανερχόμενη ζεύξη όλα τα λογικά κανάλια αντιστοιχίζονται σε UL-SCH. Δεν υπάρχει λογικό κανάλι που να αντιστοιχίζεται σε Random Access Channel (RACH) αφού δεν μπορεί να μεταφέρει πληροφορίες πάνω από το επίπεδο MAC.

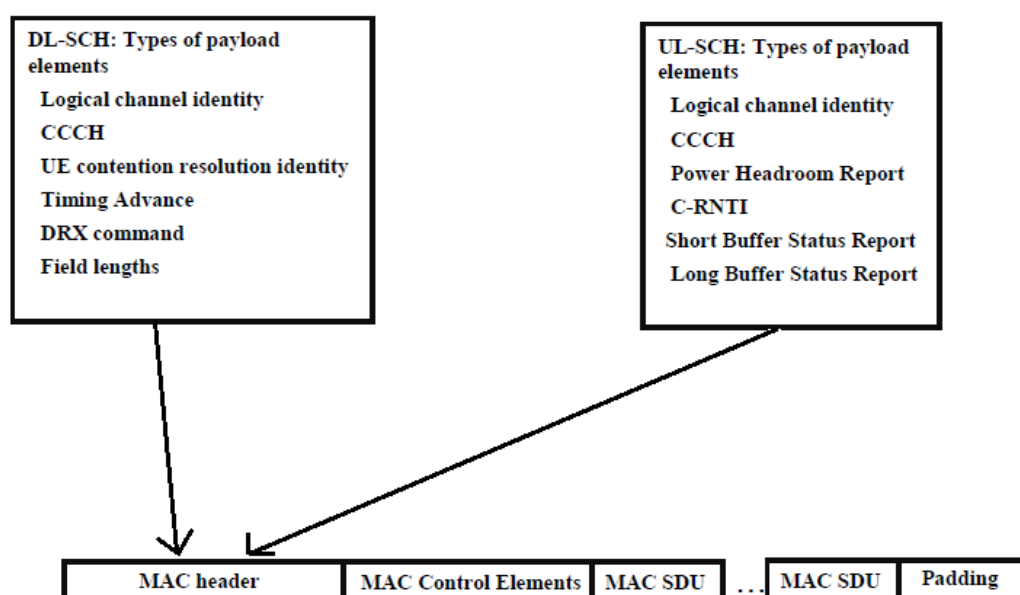
Στην κατερχόμενη ζεύξη στα δίκτυα LTE ορίζονται τα παρακάτω λογικά κανάλια μεταφοράς:

- **CCCH, DCCH, DTCH:** Τα κανάλια αυτά εκτελούν τις ίδιες λειτουργίες όπως και στην κατεύθυνση uplink μόνο που τώρα μεταφέρουν τα δεδομένα ελέγχου ή χρήστη προς την αντίθετη κατεύθυνση. Πλέον, αντιστοιχίζονται σε DL-SCH κανάλια μεταφοράς.
- **Multicast Control Channel και Multicast Traffic Channel:** Δεν είναι μέρος της έκδοσης 8 αλλά αναμένεται να συμπεριληφθούν στην έκδοση 9 του LTE ή σε κάποια μεταγενέστερη. Σκοπός των καναλιών αυτών είναι να μεταφέρουν δεδομένα με πολλαπλούς παραλήπτες μαζί με τα σχετικά δεδομένα ελέγχου σε ένα σύστημα point to multipoint παρόμοιο με την υπηρεσία Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS) του UMTS.
- **Broadcast Control Channel (BCCH):** τα κανάλια αυτά μεταφέρουν τις πληροφορίες εκπομπής, όπως τις παραμέτρους που είναι απαραίτητες για την πρόσβαση στο σύστημα. Χρησιμοποιεί το Broadcast Channel (BCH) ως το κανάλι μεταφοράς για το Master Information Block (MIB) ενώ τα System Information Blocks (SIB) αντιστοιχούνται σε DL-SCH.
- **Paging Control Channel (PCCH):** Μεταφέρει τις πληροφορίες εντοπισμού έτσι ώστε το δίκτυο να μπορεί να εντοπίσει μια συσκευή. Αυτά τα λογικά κανάλια αντιστοιχίζονται στο Paging Channel (PCH).



### 2.3.4.2 Ροή Δεδομένων στο επίπεδο MAC

Το επίπεδο MAC λαμβάνει δεδομένα από το επίπεδο RLC ως MAC Service Data Units (SDUs). Το MAC PDU αποτελείται από την κεφαλίδα MAC, τα MAC SDUs και τα στοιχεία ελέγχου MAC. Τα στοιχεία ελέγχου MAC περιλαμβάνουν σημαντικές πληροφορίες ελέγχου που χρησιμοποιούνται σε πολλές λειτουργίες ελέγχου όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11 Πλαίσιο MAC

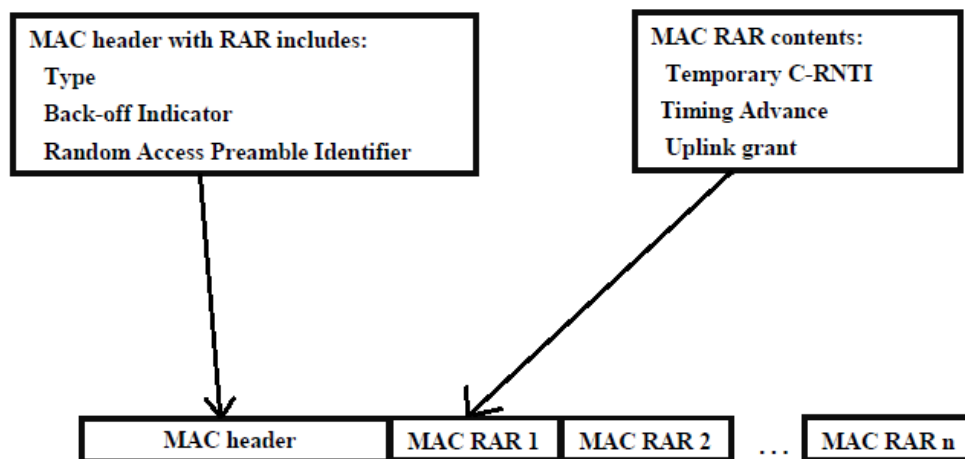
Στην ανερχόμενη ζεύξη εκτός από τα δεδομένα, το MAC payload μπορεί να περιέχει αρκετές πληροφορίες ελέγχου όπως:

- **Buffer status report:** αναφέρει πόσα δεδομένα υπάρχουν στη συσκευή του χρήστη έτοιμα για μετάδοση καθώς και πληροφορίες σχετικά με την προτεραιότητα των δεδομένων στον buffer.
- **Power headroom report:** ένδειξη για το πόσοι πόροι υπάρχουν διαθέσιμοι για την μετάδοση προς το δίκτυο.
- Πληροφορίες για την διαδικασία επίλυσης ζητημάτων ανταγωνισμού (CCCH & C-RNTI)

Στην κατερχόμενη ζεύξη οι πληροφορίες που περιέχονται στα στοιχεία ελέγχου του πρωτοκόλλου MAC είναι οι εξής:

- Έλεγχος της λειτουργίας μη συνεχόμενης λήψης (Discontinuous Reception – DRX)
- Εντολές ελέγχου έτσι ώστε να εξασφαλίζεται το σωστό timing με το κανάλι του uplink.
- Πληροφορίες για την επίλυση ζητημάτων ανταγωνισμού.

Οι κεφαλίδες MAC και τα MAC payloads για το RACH είναι διαφορετικά, όπως επίσης και η όλη διαδικασία αντιμετώπισης συγκρούσεων και υπερφόρτωσης σε μία κυψέλη.



**Σχήμα 2.12 Πλαίσιο MAC στην περίπτωση διαδικασίας RACH**

Η σηματοδότηση του random access MAC φαίνεται στο σχήμα 2.12 αποτελείται από τις απαραίτητες πληροφορίες ελέγχου που χρειάζονται για να αρχίσει η μετάδοση δεδομένων μετά από μια επιτυχημένη διαδικασία RACH. Οι πληροφορίες που μεταδίδονται στην MAC Random Access Response είναι:

- **Time advance:** υποδεικνύει τις απαραίτητες προσαρμογές που πρέπει να γίνουν στο κανάλι του uplink έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι θα εξυπηρετηθούν όλοι οι χρήστες χωρίς να επικαλύπτονται
- **Uplink grant:** δείχνει αναλυτικά τους πόρους που έχουν κατανεμηθεί να χρησιμοποιηθούν στην κατεύθυνση uplink
- **Temporary C-RNTI:** παρέχει στη συσκευή του χρήστη μια προσωρινή ταυτότητα για να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια εκτέλεσης μιας λειτουργίας random access

Η κεφαλίδα υποδεικνύει πιθανές αποσύρσεις από την διαδικασία αλλά και την ταυτότητα των όσων έχουν ληφθεί. (33), (34)

### 2.3.5 Φυσικό επίπεδο (Physical Layer)

Το φυσικό επίπεδο ασχολείται με την μετάδοση των δεδομένων με την μορφή δυαδικών ψηφίων. Τα ζητήματα σχεδίασης στο επίπεδο αυτό ασχολούνται κυρίως με την αναπαράσταση των bits (πόσα volt συμβολίζουν το 0 και το 1), την χρονική διάρκεια κάθε bit, την εγκαθίδρυση και τον τερματισμό των συνδέσεων, τις χρονικές διασυνδέσεις καθώς και με το φυσικό μέσο μετάδοσης το οποίο βρίσκεται κάτω από το φυσικό επίπεδο. Το φυσικό επίπεδο στα LTE δίκτυα χαρακτηρίζεται από την διαχείριση πόρων (καναλιών επικοινωνίας) που βασίζονται μόνο στον δυναμικό προσδιορισμό των διαμοιραζόμενων πόρων παρά στην διατήρηση μόνιμων ζεύξεων για την εξυπηρέτηση κάθε χρήστη χωριστά, κάνοντας έτσι το δίκτυο πιο ευέλικτο χωρίς να δαπανώνται πόροι που παραμένουν ανενεργοί αλλά να κατανέμονται σε άλλους χρήστες που τους χρειάζονται. Αυτή η στρατηγική είναι ανάλογη με την διαχείριση πόρων στο internet, όπου βασίζεται στην μεταγωγή πακέτων χωρίς την αποκλειστική δέσμευση πόρων για κάθε χρήστη. Κατά τα άλλα έχει την ίδια λειτουργία με το φυσικό επίπεδο των άλλων ασύρματων δικτύων.

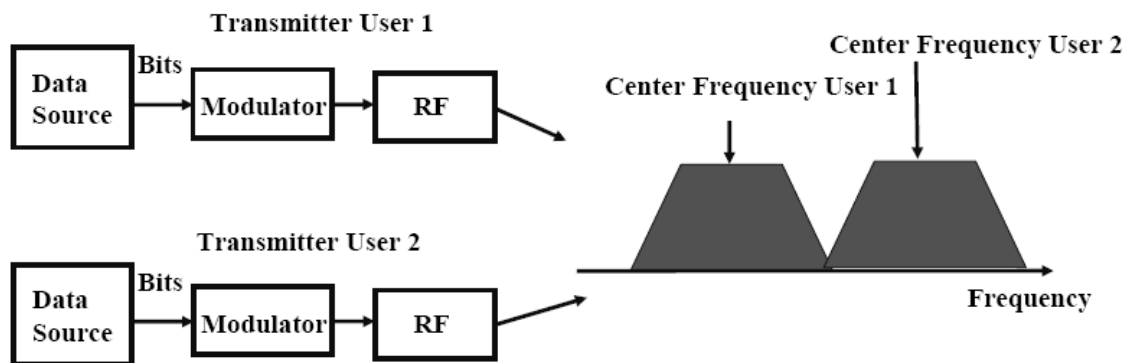
Όπως σε όλα τα ανταγωνιστικά δίκτυα, όπου πολλοί χρήστες ανταγωνίζονται την χρήση ενός καναλιού, έτσι και στα LTE πρέπει να υπάρχει ένα αποτελεσματικό πρωτόκολλο που να εγγυάται την καλή εκτέλεση της επικοινωνίας ανάμεσα στο δίκτυο και τον τελικό χρήστη. Η επίπεδη αρχιτεκτονική των LTE δικτύων και κυρίως η μεταφορά των διαδικασιών ελέγχου διαχείρισης πόρων στον eNodeB, στον τελευταίο κόμβο πριν το μέσο μετάδοσης, επιτρέπουν την αποδοτικότερη και ταχύτερη διαχείριση των συνδέσεων στο επίπεδο αυτό βελτιώνοντας αρκετά την επικοινωνία.

### 2.3.6 Τεχνολογίες μετάδοσης

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η πολλαπλή πρόσβαση στα δίκτυα LTE είναι διαφορετική από ότι στα UMTS. Στην κατερχόμενη ζεύξη των LTE, η πολλαπλή πρόσβαση βασίζεται σε ορθογώνια διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA) ενώ στην ανερχόμενη ζεύξη βασίζεται σε διαίρεση συχνότητας μονού φέροντος (Single Carrier Frequency Division Multiple Access - SC-FDMA). Στο εδάφιο αυτό θα αναφερθούμε στις αρχές λειτουργίας των μεθόδων OFDMA και SC-FDMA.

## Βασικές Αρχές της λειτουργίας πολλαπλής πρόσβασης στα δίκτυα LTE

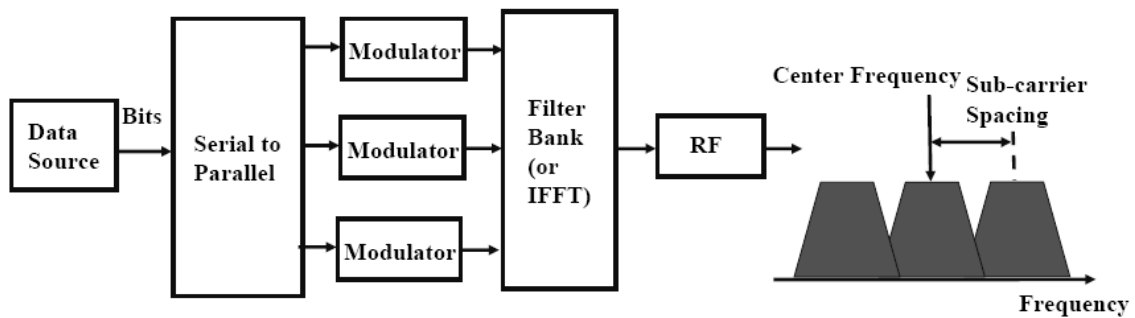
Μια μετάδοση μονού φέροντος σημαίνει ότι η πληροφορία διαμορφώνεται μόνο σε ένα φορέα, μεταβάλλοντας τη φάση ή το πλάτος του φορέα ή και τα δύο. Επίσης, θα μπορούσε να μεταβληθεί η συχνότητα, αλλά στα LTE αυτό δεν είναι εφικτό. Όσο πιο υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έχουμε, τόσο αυξάνεται και ο ρυθμός μεταφοράς συμβόλων σε ένα ψηφιακό σύστημα και έτσι αυξάνεται η συνολική χωρητικότητα του καναλιού. Με τη χρήση απλής τετραγωνικής διαμόρφωσης πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation – QAM) ο πομπός μεταβάλλει το σήμα έτσι ώστε να μεταφέρει τον επιθυμητό αριθμό bits ανά σύμβολο. Το φάσμα της κυματομορφής στο οποίο καταλήγουμε είναι ένα φάσμα μονού φέροντος για κάθε χρήστη που μεταδίδει με χαρακτηριστικά τη συχνότητα και το εύρος μετάδοσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13 με την μάσκα του ραδιοφάσματος να επηρεάζεται από το σχήμα του παλμού που χρησιμοποιείται.



Σχήμα 2.13 Αρχή λειτουργίας FDMA

Σύμφωνα με τις αρχές της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας, διαφορετικοί χρήστες θα μπορούσαν να χρησιμοποιούν διαφορετικούς φορείς ή υποφορείς, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13, για να έχουν πρόσβαση στο σύστημα ταυτόχρονα κάνοντας διαμόρφωση συχνότητας με βάση διαφορετικές αρχικές συχνότητες. Εδώ χρειάζεται προσοχή έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια κυματομορφή με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ των δύο φερόντων και να μην χρειάζεται να αφήσουμε μεγάλο κενό συχνοτήτων ανάμεσα σε δύο χρήστες για ασφάλεια.

Η βασική ιδέα της χρήσης πολλαπλών φερόντων φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, όπου τα δεδομένα χωρίζονται σε διαφορετικούς υποφορείς ενός μεταδότη.



**Σχήμα 2.14 Αρχή λειτουργίας πολλαπλών φερόντων**

Για να διευθετήσουμε την ανεπάρκεια που προκύπτει από τις πιθανές απαιτήσεις για συχνότητες ασφαλείας, θα πρέπει να διαλέγουμε τις παραμέτρους του συστήματος με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ορθογωνικότητα μεταξύ διαφορετικών μεταδόσεων και να δημιουργούμε υποφορείς με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ τους, αλλά τα φάσματά τους να μπορούν να επικαλύπτονται στον τομέα των συχνοτήτων. Αυτό επιτυγχάνεται με την πολύπλεξη ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας όπου κάθε μια από τις κεντρικές συχνότητες για τους υποφορείς επιλέγεται από ένα σύνολο που έχει τέτοια διαφορά στον τομέα συχνοτήτων έτσι ώστε οι υπόλοιποι γειτονικοί υποφορείς να έχουν μηδενική τιμή σε μια στιγμιαία δειγματοληψία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15. Στα δίκτυα LTE η συνεχής διαφορά συχνότητας μεταξύ δυο υποφορέων είναι 15 kHz στην έκδοση 8. Σε μελλοντικές εκδόσεις προβλέπεται η τιμή αυτή να αλλάξει στα 7.5 kHz.

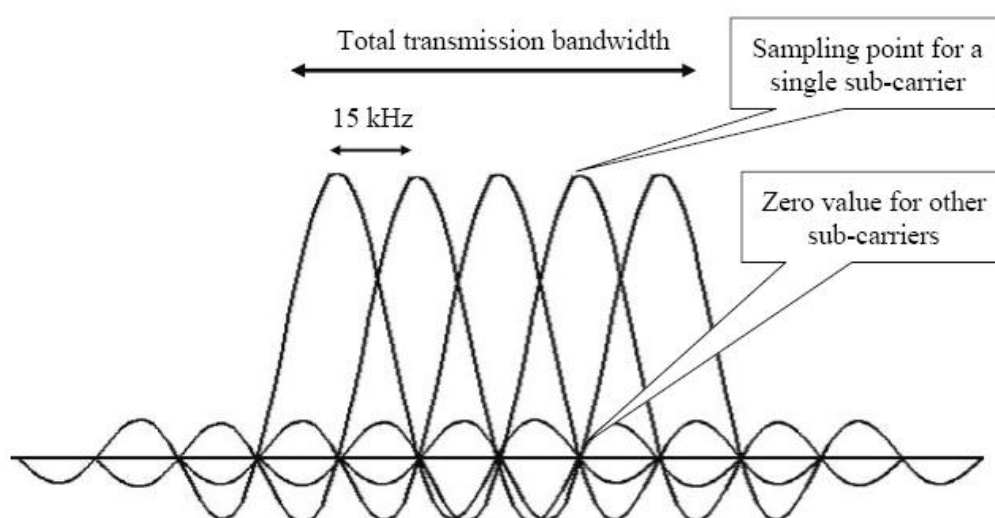
Η βασική αρχή λειτουργίας του OFDMA ήταν ήδη γνωστή από τη δεκαετία του 50, σε μια εποχή όπου τα συστήματα χρησιμοποιούσαν ακόμα αναλογική τεχνολογία και έτσι το να διατηρήσεις την ορθογωνικότητα των φορέων ήταν κάτι δύσκολο λόγω των μεταβολών στα εξαρτήματα αλλά και του εύρους της θερμοκρασίας λειτουργίας τους. Από τότε όμως που εξαπλώθηκε η χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας στις επικοινωνίες η τεχνολογία OFDMA έγινε πιο εφικτό να χρησιμοποιηθεί. Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία αυτή έχει επίσης υιοθετηθεί και σε άλλους τομείς όπως η επίγεια ψηφιακή τηλεόραση αλλά και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN).

Οι αρχές του OFDMA χρησιμοποιούνται και στην ανερχόμενη ζεύξη στα δίκτυα LTE αφού το SC-FDMA χρησιμοποιεί πολλές από τις αρχές του OFDMA για να επιτύχει καλύτερη φασματική απόδοση. Το SC-FDMA στην τωρινή μορφή του είναι μια νέα τεχνολογία για την οποία οι δημοσιεύσεις ξεκίνησαν στα τέλη της δεκαετίας του 90.

Γενικά, αυτό που ώθησε στη χρήση της OFDMA στα LTE δίκτυα αλλά και σε άλλα συστήματα είναι οι παρακάτω ιδιότητες που έχει:

- Καλή απόδοση σε διαλειπτικά κανάλια επιλογής συχνότητας
- Χαμηλή πολυπλοκότητα του δέκτη βάσης
- Καλές φασματικές ιδιότητες και διαχείριση πολλαπλών εύρων ζώνης
- Προσαρμογή των συνδέσεων και προγραμματισμός του τομέα συχνοτήτων
- Συμβατότητα με εξελιγμένους δέκτες και τεχνολογίες κεραιών

Πολλά από αυτά τα οφέλη δεν θα μπορούσαν να επιτευχθούν εάν δεν είχε γίνει μετάβαση σε νέες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης στις οποίες ο έλεγχος των ασύρματων καναλιών έχει μεταφερθεί στον σταθμό βάσης (eNodeB).



**Σχήμα 2.15 Διατήρηση ορθογωνικότητας μονού φέροντος**

Το OFDMA έχει επίσης να αντιμετωπίσει κάποιες προκλήσεις όπως είναι η ανοχή στο offset των συχνοτήτων και ο υψηλός λόγος Peak-to-Average του μεταδιδόμενου σήματος. Η ανοχή στο offset των συχνοτήτων αντιμετωπίστηκε κατά το σχεδιασμό των LTE επιλέγοντας έναν διαχωρισμό των υποφορέων κατά 15 kHz, κάτι που προσφέρει μεγάλη ανοχή σε μετατοπίσεις Doppler λόγω εμβέλειας και ατελειών στην πρακτική εφαρμογή.

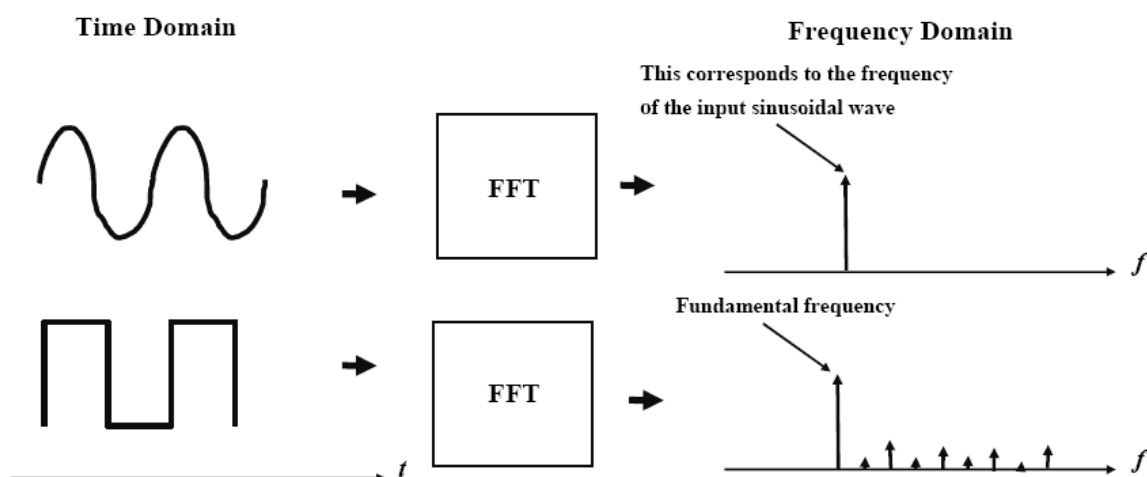
Ο υψηλός λόγος Peak-to-Average (PAR) του μεταδιδόμενου σήματος απαιτεί μεγάλη γραμμικότητα στον πομπό. Οι γραμμικοί ενισχυτές έχουν χαμηλή απόδοση μετατροπής ισχύος και συνεπώς δεν είναι κατάλληλοι για το uplink των ασύρματων δικτύων. Στα

LTE αυτό το θέμα αντιμετωπίστηκε χρησιμοποιώντας το SC-FDMA που επιτρέπει καλύτερη απόδοση των ενισχυτών.

Παρατηρώντας τις τεχνολογικές επιλογές που έγιναν για την 3<sup>η</sup> γενιά ασύρματων δικτύων, βλέπουμε ότι η έλλειψη μιας λογικής λύσης για το uplink, η ανάγκη για πιο εξελιγμένες κεραιές αλλά και ο μη συγκεντρωτικός έλεγχος του ασύρματου μέσου από τον RNC ήταν οι κύριοι παράγοντες που δεν επέτρεψαν νωρίτερα την χρησιμοποίηση της τεχνολογίας OFDMA.

### 2.3.6.1 Τεχνολογία OFDMA

Η πρακτική εφαρμογή ενός OFDMA συστήματος βασίζεται στην ψηφιακή τεχνολογία και πιο συγκεκριμένα στον διακριτό μετασχηματισμό Fourier αλλά και στον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (DFT και IDFT αντίστοιχα) για να κινούμαστε μεταξύ της αναπαράστασης σε σχέση με το χρόνο αλλά και του τομέα των συχνοτήτων. Το σήμα που προκύπτει μετά τη μετατροπή ενός ημιτονοειδούς κύματος μέσω γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) φαίνεται στο σχήμα 2.16 .



**Σχήμα 2.16 Μετασχηματισμός Fourier διαφορετικών κυματομορφών**

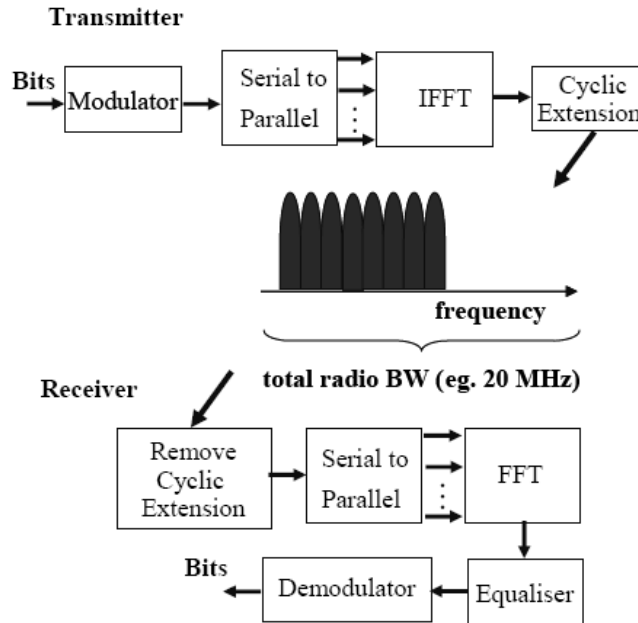
Σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιείται ο FFT. Ο FFT αντιστοιχεί το σήμα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων. Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier (IFFT) κάνει την ίδια διαδικασία αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Για ένα ημιτονοειδές κύμα, η έξοδος της διαδικασίας FFT θα έχει μια κορυφή στην αντίστοιχη συχνότητα και μηδέν οπουδήποτε αλλού. Αν η είσοδος είναι ένα τετραγωνικό κύμα, τότε το εξερχόμενο κύμα θα έχει κορυφές σε πολλαπλές συχνότητες καθώς ένα τέτοιο κύμα

περιέχει αρκετές συχνότητες που καλύπτονται από τον FFT (σχήμα 2.16). Καθώς ο τετραγωνικός παλμός έχει περίοδο  $T$ , υπάρχει μια μεγαλύτερη κορυφή στη συχνότητα  $1/T$  αναπαριστώντας την θεμελιώδη συχνότητα της κυματομορφής, και από μια μικρότερη κορυφή στις περιττές αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας. Η διαδικασία FFT αυτή μπορεί να γίνεται και να αντιστρέφεται, χωρίς να έχουμε απώλειες από την αρχική πληροφορία, υποθέτοντας ότι πληρούνται οι κλασσικές απαιτήσεις για την ψηφιακή επεξεργασία σήματος όπως ο ελάχιστος ρυθμός δειγματοληψίας και το μέγεθος λέξης (για τα αριθμητικά).

Η εφαρμογή του FFT έχει μελετηθεί και βελτιστοποιηθεί. Στα δίκτυα LTE τα απαραίτητα μήκη του FFT συνήθως είναι δυνάμεις του 2, όπως το 512, το 1024 κλπ. Από πλευράς εφαρμογής, είναι καλύτερο να έχουμε για παράδειγμα μέγεθος FFT 1024 παρόλο που χρησιμοποιούνται μόνο 600 έξοδοι, απ' ότι να προσπαθήσουμε να έχουμε ένα μέγεθος για τον FFT μεταξύ 600 και 1024.

Η αρχή μετάδοσης σε οποιοδήποτε σύστημα OFDMA είναι να χρησιμοποιούνται μικροί, αμοιβαία ορθογώνιοι υποφορείς. Στα LTE η απόσταση μεταξύ των υποφορέων είναι 15 kHz ανεξάρτητα από το συνολικό εύρος μετάδοσης. Ο πομπός ενός OFDMA συστήματος χρησιμοποιεί ένα IFFT block για να δημιουργήσει το σήμα. Η πηγή δεδομένων τροφοδοτεί τον μετατροπέα από σειριακή σε παράλληλη μορφή και στη συνέχεια το IFFT block. Κάθε είσοδος για το IFFT block αντιστοιχεί σε μια είσοδο που αναπαριστά ένα συγκεκριμένο υποφορέα και μπορεί να διαμορφωθεί ανεξάρτητα από τους άλλους υποφορείς. Το IFFT block ακολουθείται από την προσθήκη μιας κυκλικής επέκτασης (cyclic extension) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17 .





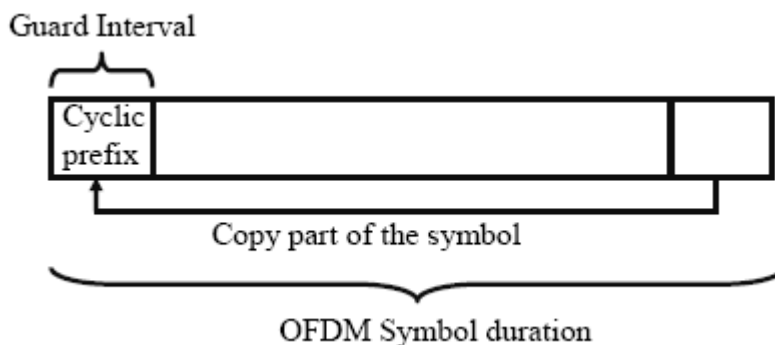
**Σχήμα 2.17 OFDMA πομπός και δέκτης**

Ο λόγος για τον οποίο προστίθεται η κυκλική επέκταση είναι να αποφεύγονται οι παρεμβολές μεταξύ συμβόλων. Όταν ο πομπός προσθέτει μια κυκλική επέκταση μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να υποστηρίξει το κανάλι, η επίδραση στο προηγούμενο σύμβολο μπορεί να αποφευχθεί αγνοώντας την κυκλική επέκταση στον δέκτη. Η κυκλική επέκταση προστίθεται αντιγράφοντας ένα μέρος του συμβόλου από το τέλος και προσθέτοντας το στην αρχή του, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18. Η χρήση της κυκλικής επέκτασης είναι προτιμότερη από ότι μια παύση στη μετάδοση καθώς το σύμβολο OFDMA θα φαίνεται να είναι περιοδικό. Η περιοδική φύση του σήματος μας επιτρέπει να έχουμε ένα διακριτό φάσμα Fourier και να μπορούμε έτσι να χρησιμοποιήσουμε DFT και IDFT στον δέκτη και στον πομπό αντίστοιχα.

Τυπικά το κενό ασφαλείας σχεδιάζεται έτσι ώστε να είναι πιο μεγάλο από την καθυστέρηση μετάδοσης του περιβάλλοντος στο οποίο θα δουλέψει το σύστημα. Εκτός από την καθυστέρηση του καναλιού, στο κενό ασφαλείας θα πρέπει να συνυπολογιστεί και ο χρόνος που χρειάζονται ο πομπός και ο δέκτης για να εφαρμόσουν φίλτρα στο σήμα.

Όσον αφορά το δέκτη, αυτός δεν χρειάζεται να αντιμετωπίσει τις παρεμβολές μεταξύ συμβόλων, αλλά παρόλα αυτά θα πρέπει να ασχοληθεί με τις επιπτώσεις του καναλιού για κάθε υποφορέα που έχει συχνότητα εξαρτώμενη από τη φάση αλλά και τις αλλαγές του πλάτους. Οι εκτιμήσεις που πρέπει να γίνουν για το κανάλι, διευκολύνονται

λαμβάνοντας κάποια κομμάτια των συμβόλων ως σύμβολα αναφοράς ή σύμβολα «οδηγούς». Με την κατάλληλη τοποθέτηση αυτών των συμβόλων στους τομείς του χρόνου και της συχνότητας, ο δέκτης μπορεί να υπολογίσει το αποτέλεσμα του καναλιού στον κάθε υποφορέα μέσω και του πλέγματος αναφοράς στο χρόνο και τη συχνότητα.



**Σχήμα 2.18 Δημιουργία OFDM συμβόλου**

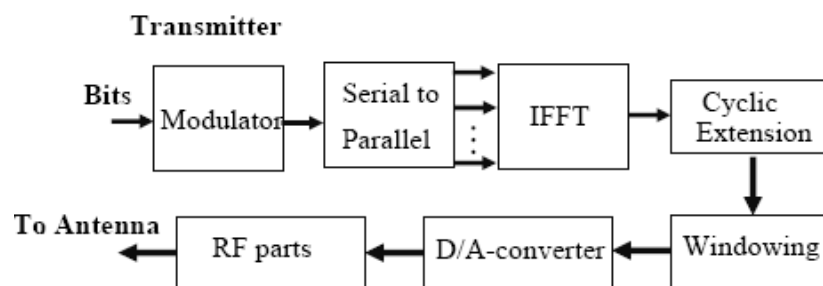
Ένας κλασικός τύπος δέκτη είναι ο ισοσταθμιστής τομέα συχνοτήτων, ο οποίος αντιστρέφει τις επιπτώσεις του καναλιού στον κάθε υποφορέα. Ο ισοσταθμιστής τομέα συχνοτήτων στο OFDMA απλά πολλαπλασιάζει κάθε υποφορέα βασιζόμενος στην απόκριση συχνότητας του καναλιού. Αυτή είναι σαφώς μια απλούστερη διαδικασία σε σχέση με αυτή που γίνεται στο WCDMA και δεν εξαρτάται από το μήκος του καναλιού.

Στο WCDMA η εκτίμηση του καναλιού για το downlink βασίζεται στο κοινό κανάλι οδηγό (Common Pilot Channel – CPICH) και μετά στα σύμβολα οδηγούς στο εξειδικευμένο κανάλι (Dedicated Channel DCH), τα οποία μεταδίδονται μέσω όλου του εύρους ζώνης μετάδοσης και σε διαφορετικά κελιά και ξεχωρίζουν λόγω των διαφορετικών κωδικών διάδοσης. Στο σύστημα OFDMA δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα διάδοσης και έτσι πρέπει να βρεθεί ένας άλλος τρόπος να ξεχωρίσουμε τα σύμβολα αναφοράς μεταξύ διαφορετικών κελιών ή διαφορετικών κεραιών. Σε μεταδόσεις με πολλαπλές κεραιές, τα σύμβολα αναφοράς έχουν διαφορετικές θέσεις. Μια συγκεκριμένη θέση που χρησιμοποιείται για ένα σύμβολο αναφοράς από μία κεραιά, δεν χρησιμοποιείται από άλλες κεραιές στο ίδιο κελί. Αυτό δεν ισχύει για διαφορετικά κελιά.

Οι επιπλέον στόχοι που πρέπει να καλύψει ένας δέκτης OFDMA είναι ο συγχρονισμός μεταξύ χρόνου και συχνότητας. Ο συγχρονισμός επιτρέπει να δημιουργεί ένα σωστό χρονοδιάγραμμα μεταξύ του πλαισίου και του συμβόλου OFDMA έτσι ώστε να αφαιρεθεί το σωστό τμήμα από το πακέτο που λαμβάνεται (αφαίρεση της κυκλικής επέκτασης). Ο συγχρονισμός του χρόνου γίνεται με τη συσχέτιση με γνωστά δείγματα

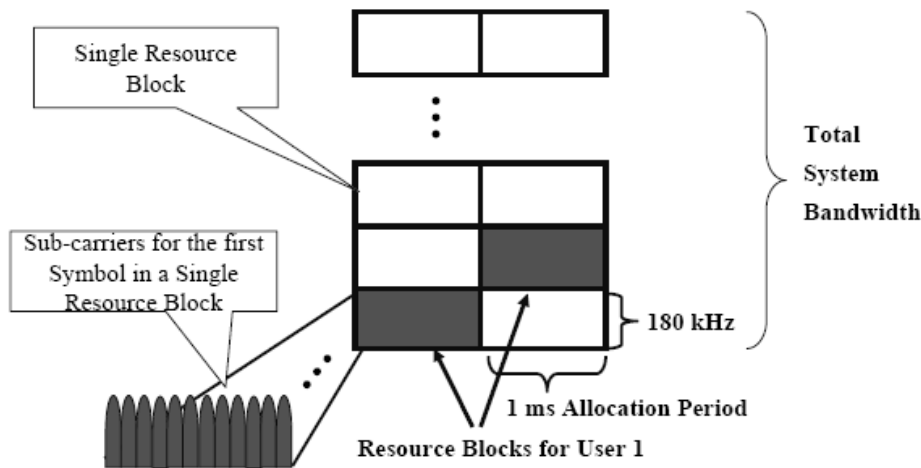
δεδομένων. Ο συσχετισμός με τη συχνότητα υπολογίζει τη διαφορά συχνότητας μεταξύ του πομπού και του δέκτη και με μια καλή εκτίμηση της διαφοράς συχνότητας μεταξύ της συσκευής και του σταθμού βάσης η διαφορά αυτή μπορεί να εξαλειφθεί. Η συσκευή κλειδώνει στη συχνότητα που λαμβάνεται από το σταθμό βάσης καθώς ο ταλαντωτής της συσκευής δεν είναι τόσο ακριβής (και συνεπώς ακριβός) όσο αυτός του σταθμού βάσης.

Παρόλο που στη θεωρία η μετάδοση μέσω OFDMA έχει καλές φασματικές ιδιότητες, ο πραγματικός πομπός θα δημιουργήσει κάποια εξάπλωση του φάσματος λόγω ατελειών. Έτσι ο πομπός θα πρέπει να έχει ικανότητες φιλτραρίσματος παρόμοιες με το φιλτράρισμα του σχήματος του παλμού (pulse shape filtering) στην τεχνολογία WCDMA. Στα συγγράμματα αυτό το φιλτράρισμα αναφέρεται συχνά και ως παραθυροποίηση (windowing), όπως φαίνεται και στο παράδειγμα του σχήματος 2.19.



**Σχήμα 2.19 Πομπός OFDMA με χρήση windowing**

Ένα σημαντικό στοιχείο της χρήσης του OFDMA στον πομπό ενός σταθμού βάσης είναι ότι οι χρήστες μπορούν να κατανεμηθούν σε οποιονδήποτε υποφορέα του τομέα συχνοτήτων. Αυτό είναι ένα επιπρόσθετο στοιχείο στη λειτουργία προγραμματισμού του HSDPA όπου η κατανομή γίνεται μόνο στον τομέα του χρόνου αλλά και στον τομέα του κώδικα και πάντα καταλαμβάνεται όλο το εύρος ζώνης. Η πιθανότητα να έχουμε διαφορετικούς υποφορείς κατανεμημένους σε χρήστες επιτρέπει στον προγραμματιστή (scheduler) να επωφεληθεί από την ποικιλία στον τομέα των συχνοτήτων, με την ποικιλία αυτή να οφείλεται σε στιγμιαίες παρεμβολές σε διαφορετικά τμήματα του εύρους ζώνης του συστήματος. Ο πρακτικός περιορισμός είναι ότι κατά την ανάλυση της σηματοδοσίας, λόγω της προκύπτουσας επιβάρυνσης θα πρέπει η κατανομή να μη γίνει σε κάθε υποφορέα ξεχωριστά αλλά σε block των 12 έχοντας έτσι ένα ελάχιστο εύρος ζώνης των 180 kHz. Αυτό σημαίνει ότι όταν η περίοδος κατανομής είναι 1 ms σε κάθε 1 ms του τομέα του χρόνου θα αντιστοιχούν κάποια block των 180 kHz, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



**Σχήμα 2.20 Κατανομή πόρων στην τεχνολογία OFDMA**

Άρα η μετάδοση OFDMA στον τομέα της συχνότητας αποτελείται από αρκετούς παράλληλους υποφορείς οι οποίοι στον τομέα του χρόνου αντιστοιχούν σε πολλαπλά ημιτονοειδή κύματα με διαφορετικές συχνότητες που γεμίζουν το εύρος ζώνης σε τμήματα των 15 kHz. Με αυτή τη μέθοδο όμως το σήμα έχει μεγάλες διακυμάνσεις, σε σύγκριση με έναν απλό QAM διαμορφωτή, ο οποίος στέλνει ένα σύμβολο τη φορά στον τομέα του χρόνου. Το στιγμιαίο άθροισμα των ημιτόνων οδηγεί σε μια γκαουσιανή κατανομή διαφορετικών μέγιστων πλατών.

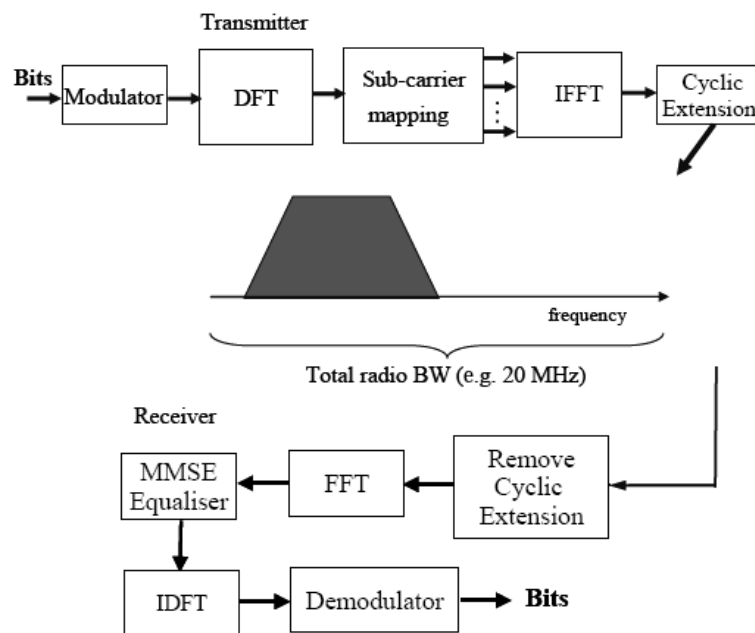
Το γεγονός αυτό δημιουργεί κάποια προβλήματα στη σχεδίαση των ενισχυτών καθώς αυτοί θα πρέπει να παραμένουν στη γραμμική τους περιοχή χρησιμοποιώντας περισσότερη back-off ενέργεια για να αποτραπούν προβλήματα στο εξερχόμενο σήμα και στη μάσκα του φάσματος. Η χρήση επιπρόσθετης back-off ενέργειας οδηγεί είτε σε μειωμένη αποδοτικότητα του ενισχυτή είτε σε μικρότερη ισχύ εξόδου. Κατά συνέπεια, είτε μικραίνει το εύρος του uplink είτε η συσκευή σπαταλά περισσότερη ενέργεια από την μπαταρία της. Αυτό το τελευταίο, δεν είναι πρόβλημα για συσκευές μεγάλου όγκου, αλλά για τις μικρές φορητές συσκευές θα έπρεπε να βρεθεί μια λύση.

Αυτός ήταν και ο λόγος για τον οποίο αποφασίστηκε η χρήση του OFDMA στην κατερχόμενη ζεύξη και του SC-FDMA στην ανερχόμενη ζεύξη των 3GPP δικτύων. (35), (36), (37)

### 2.3.6.2 Τεχνολογία SC-FDMA

Η τεχνολογία SC-FDMA χρησιμοποιείται στα LTE δίκτυα για πολλαπλή πρόσβαση στην ανερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιώντας πολύπλεξη τόσο με διαίρεση χρόνου (TDD)

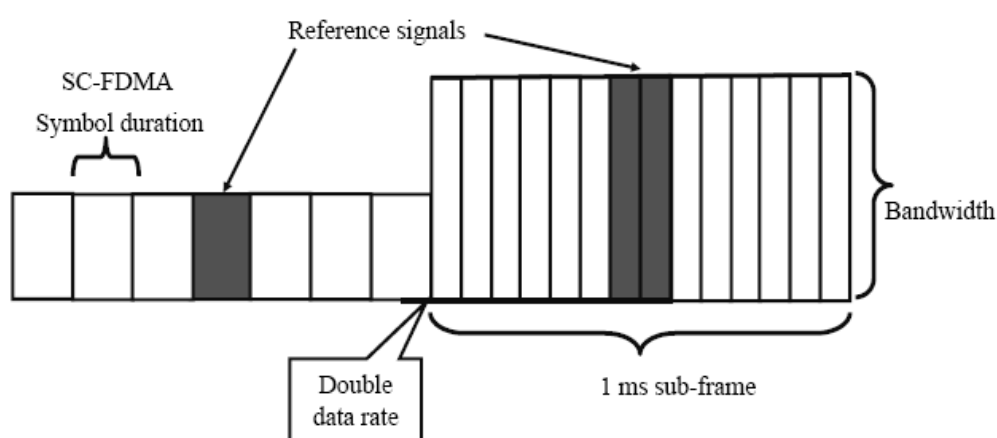
όσο και με διαίρεση συχνότητας (FDD). Το βασικό πρότυπο της τεχνολογίας SC-FDMA μπορεί να παρομοιαστεί με την διαμόρφωση QAM, όπου κάθε ένα σύμβολο στέλνεται στην μονάδα του χρόνου όπως στην τεχνολογία TDMA (Time Division Multiple Access) των δικτύων GSM. Η δημιουργία του σήματος στο πεδίο των συχνοτήτων προσθέτει την αποδοτική φασματική κυματομορφή της OFDMA σε αντίθεση με τη δημιουργία σήματος της διαμόρφωσης QAM στο πεδίο του χρόνου. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (σχήμα 2.21).



**Σχήμα 2.21 Πομπός και δέκτης SC-FDMA**

Μ' αυτόν τον τρόπο η ανάγκη για εύρος ζώνης ελέγχου ανάμεσα σε διαφορετικούς χρήστες μπορεί να αποφευχθεί, ομοίως με την μέθοδο της τεχνολογίας OFDMA στην κατεύθυνση downlink. Όπως στην OFDMA έτσι και εδώ χρειάζεται η προσθήκη μιας κυκλικής επέκτασης περιοδικά κατά την μετάδοση, ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές μεταξύ των συμβόλων και να απλοποιείται η σχεδίαση στον δέκτη. Στον δέκτη υπάρχει επιπλέον διαδικασία για την αντιμετώπιση των παρεμβολών καθώς παρά την προσθήκη της κυκλικής επέκτασης είναι πιθανό να δημιουργηθούν παρεμβολές ανάμεσα στα σύμβολα. Ο δέκτης τρέχει μια διαδικασία εξίσωσης για κάθε τμήμα συμβόλων μέχρις ότου φτάσει στην κυκλική επέκταση όπου εμποδίζεται η περαιτέρω διάδοση των παρεμβολών.

Η μετάδοση καταλαμβάνει ένα συνεχές μέρος του φάσματος που προορίζεται για το χρήστη, και για καλύτερη απόδοση του δικτύου η κατανομή του χρόνου στα LTE δίκτυα είναι μέχρι 1ms. Στο πεδίο των συχνοτήτων το αντίστοιχο διάστημα είναι τα 180kHz. Κάθε μονάδα του χρόνου μπορούν να αποστέλλονται πολλά μπλοκ των 180kHz. Μ' αυτόν τον τρόπο όταν η κατανομή πόρων στο πεδίο των συχνοτήτων διπλασιάζεται (διπλασιάζεται και το μέγεθος των δεδομένων προς αποστολή), το σύστημα μπορεί να καλύψει την μετάδοση των δεδομένων χωρίς να υπάρξει κάποιο κόστος στην ποιότητα υπηρεσιών του δικτύου. Η μετάδοση κάθε χρήστη τώρα είναι συντομότερη σε διάρκεια αλλά ευρύτερη στο πεδίο των συχνοτήτων. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο σχήμα 2.22.



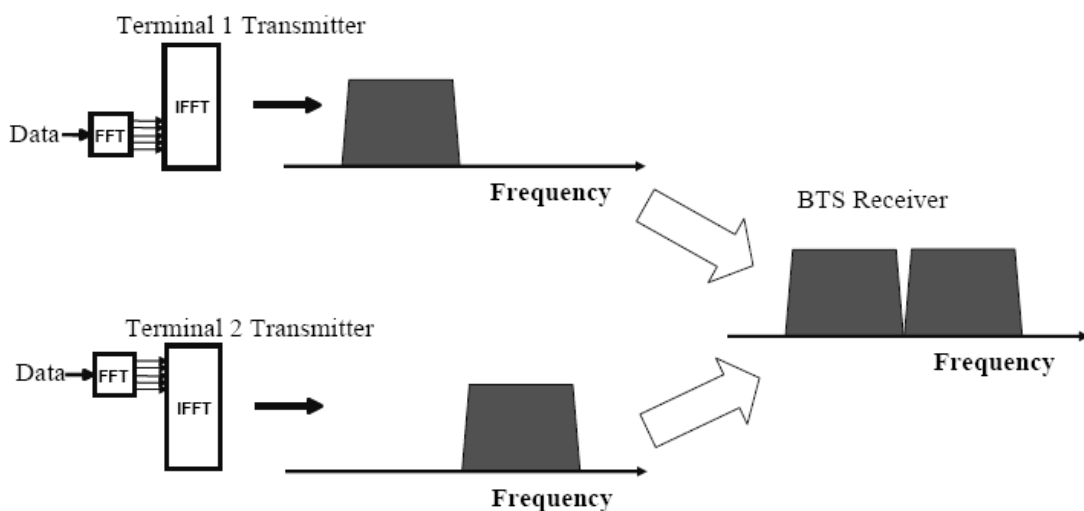
**Σχήμα 2.22 Προσαρμογή μετάδοσης δεδομένων σε σύστημα SC-FDMA**

Παρατηρούμε πλέον ότι η μετάδοση προς τον κάθε χρήστη είναι πλέον συντομότερη σε διάρκεια αλλά έχει σχεδόν διπλάσιο εύρος στο πεδίο των συχνοτήτων. Στο παράδειγμα του σχήματος 2.22 υποθέτουμε ότι στην νέα κατανομή πόρων οι διαθέσιμες συχνότητες διατηρούνται και η ίδια ποσότητα του επιπλέον φάσματος μετάδοσης κατανέμεται, διπλασιάζοντας έτσι την ικανότητα μετάδοσης. Η παραπάνω σηματοδότηση οριοθετείται σε τμήματα εύρους 180kHz που κατανέμονται για την μετάδοση. Η μέγιστη κατανομή εύρους ζώνης εξαρτάται από το ήδη χρησιμοποιούμενο εύρος στο δίκτυο και μπορεί να φτάσει μέχρι τα 20MHz. Το μέγιστο εύρος ζώνης που διατίθεται για την μετάδοση είναι συνήθως μικρότερο καθώς ένα μέρος του δεσμεύεται για εύρος ζώνης ελέγχου ανάμεσα στους χρήστες. Για παράδειγμα αν έχουμε εύρος ζώνης καναλιού 10MHz αυτό θα κατανεμηθεί σε 50 τμήματα των 180kHz αποφέροντας εύρος μετάδοσης 9MHz.

Τα τμήματα των πόρων που δεσμεύονται για την δημιουργία ενός σήματος στο πεδίο των συχνοτήτων καθορίζονται χρησιμοποιώντας τις ίδιες τιμές που χρησιμοποιεί η

τεχνολογία OFDMA στην κατερχόμενη ζεύξη, βασισμένα σε υποφορείς μεγέθους 15kHz. Έτσι ακόμα και αν η πραγματική μετάδοση είναι ένα μονό φέρων σήμα, η φάση του σήματος αποτελείται από μια περίοδο υποφορέων. Στην απλούστερη μορφή η ελάχιστη κατανομή πόρων χρησιμοποιεί 12 υποφορείς, οι οποίοι αντιστοιχούν στα 180kHz. Τα πολύπλοκα διαμορφωμένα σύμβολα δεδομένων που κατανέμονται στους διαθέσιμους πόρους δεν απαιτούν σύμβολα αναφοράς ή πληροφορίες ελέγχου ανάμεσα στα τμήματα. Μετά τον σχεδιασμό για την κατανομή των πόρων, το σήμα διαμορφώνεται στο πεδίο του χρόνου και δημιουργείται έτσι το σήμα SC-FDMA, συμπεριλαμβάνοντας και το επιθυμητό μήκος της κυκλικής επέκτασης.

Πολλοί χρήστες μπορούν έτσι να μοιράζονται τους πόρους τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο των συχνοτήτων. Η κατανομή κάθε timeslot, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, είναι 1ms στο πεδίο του χρόνου και 180kHz στο πεδίο των συχνοτήτων. Ο αποστολέας ελέγχει κάθε μετάδοση ώστε να μην υπάρχει επικάλυψη πόρων, γεγονός που θα οδηγεί σε συγκρούσεις και άρα επαναποστολή των πλαισίων. Με την μετατροπή των εισόδων σε IFFT, ο πομπός μπορεί να τοποθετήσει τα μεταδιδόμενα δεδομένα στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων κατά την αποστολή όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (σχήμα 2.23).



**Σχήμα 2.23 Κατανομή πόρων για πολλαπλή πρόσβαση στο πεδίο των συχνοτήτων (SC-FDMA)**

Ο παραλήπτης μπορεί έτσι να εντοπίσει τα μεταδιδόμενα δεδομένα από την αντίστοιχη συχνότητα. Καθώς η σύνδεση στην ανερχόμενη ζεύξη δρομολογείται από τον σταθμό

βάσης, με εξαίρεση των τυχαίων καναλιών μετάδοσης, ο σταθμός γνωρίζει ποιος χρήστης εκπέμπει σε κάθε πόρο.

Καθώς εκπέμπουμε στο πεδίο του χρόνου ένα διαμορφωμένο σύμβολο κάθε φορά, το σύστημα διατηρεί τα χαρακτηριστικά του και τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής προσδιορίζονται από την μέθοδο διαμόρφωσης. Αυτό επιτρέπει στην μέθοδο SC-FDMA να επιτυγχάνει μια πολύ καλή τιμή PAR (Peak-to-Average Ratio).

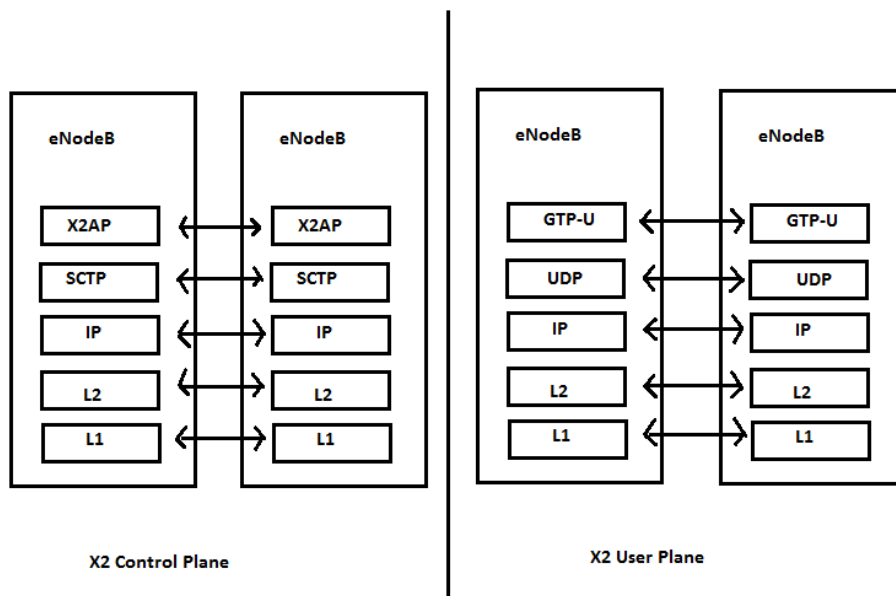
Ο SC-FDMA δέκτης του σταθμού βάσης είναι ελαφρώς πιο περίπλοκος από τον αντίστοιχο OFDMA δέκτη που βρίσκεται στην συσκευή του χρήστη καθώς θα πρέπει να επιτυγχάνει αντίστοιχη απόδοση με αυτή ενός OFDMA δέκτη. Αυτό έχει ως συνέπεια ότι ο δέκτης πρέπει να διαχειριστεί τα επίπεδα παρεμβολών ανάμεσα στα μεταδιδόμενα πλαίσια τα οποία ελέγχει τακτικότερα σε σχέση με τον έλεγχο παρεμβολών στο OFDMA. Παρ' όλα αυτά, η αυξημένη ενέργεια που χρειάζεται αυτή η διαδικασία δεν αποτελεί σοβαρό ζήτημα για τον σταθμό βάσης, ενώ τοποθετώντας τον δέκτη εκεί εκμεταλλευόμαστε τα οφέλη που παρέχει τόσο με τις υψηλές ταχύτητες στην κατεύθυνση uplink όσο και με την εξοικονόμηση ενέργειας στην συσκευή του χρήστη.

Το βασικότερο πλεονέκτημα της δυναμικής δέσμευσης πόρων με χρονοθυρίδα 1ms είναι ότι ο σταθμός βάσης δεν δεσμεύεται για τις συσκευές που παραμένουν ανενεργές αλλά ο διαθέσιμος χρόνος χρησιμοποιείται δυναμικά από εκείνες που έχουν δεδομένα προς μετάδοση. (38), (39), (40)

### **2.3.7 Πρωτόκολλα διεπαφής X2 (X2 Interface Protocols)**

Τα δίκτυα LTE συνδέονται μέσω της διεπαφής X2 ανάμεσα στους eNodeBs. Η X2 είναι ένα μια λογική διασύνδεση και παρόλο που κανονικά σχεδιάζεται ως μια απευθείας σύνδεση μεταξύ των eNodeBs συνήθως δρομολογείται μέσω της ίδιας σύνδεσης μεταφοράς όπως και το interface S1. Οι στοίβες πρωτοκόλλων για την διεπαφή X2 στο επίπεδο ελέγχου (control plane) αλλά και για το επίπεδο χρήστη (user plane) φαίνονται στο σχήμα 2.24.





**Σχήμα 2.24 Διασύνδεση πρωτοκόλλων ανάμεσα σε eNodeBs**

Η X2 είναι μια ανοιχτή διεπαφή παρόμοια με το Iur interface των δικτύων UMTS. Κανονικά η X2 χρησιμοποιείται μόνο για πληροφορίες του επιπέδου ελέγχου αλλά σε συνδυασμό με το handover μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσωρινά και για την προώθηση δεδομένων του χρήστη. Η κύρια διαφορά μεταξύ του επιπέδου χρήστη και του επιπέδου ελέγχου της στοίβας πρωτοκόλλων της X2 είναι η χρήση του πρωτοκόλλου Stream Control Transmission Protocol (SCTP) για τις μεταδόσεις στο επίπεδο ελέγχου μεταξύ των eNodeBs. Η χρήση του SCTP επιτρέπει την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων ελέγχου μεταξύ των eNodeBs, ενώ για την μεταφορά δεδομένων είναι επαρκές το USER Datagram Protocol (UDP). Το X2 Application Protocol (X2AP) καλύπτει την ασύρματη σηματοδότηση ενώ το GPRS Tunneling Protocol User Plane (GTP-U) είναι το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται επίσης στο interface S1 για τη διαχείριση των απλών δεδομένων.

Οι λειτουργίες του X2AP είναι οι εξής:

- Διαχείριση της φορητότητας εντός του δικτύου LTE. Τα μηνύματα για το handover ανάμεσα στους eNodeBs μεταδίδονται μέσω της διεπαφής X2.
- Διαχείριση φορτίου του δικτύου έτσι ώστε να επιτρέπεται η διακυψελική συνεργασία παρέχοντας πληροφορίες που αφορούν την κατάσταση – διαθεσιμότητα των πόρων, την υπερφόρτωση και την κίνηση που υπάρχει ανάμεσα σε διαφορετικά eNodeBs

- Στήσιμο και επανεκκίνηση της διεπαφής X2
- Διαχείριση λαθών που καλύπτει συγκεκριμένες ή γενικές περιπτώσεις λάθους (41)

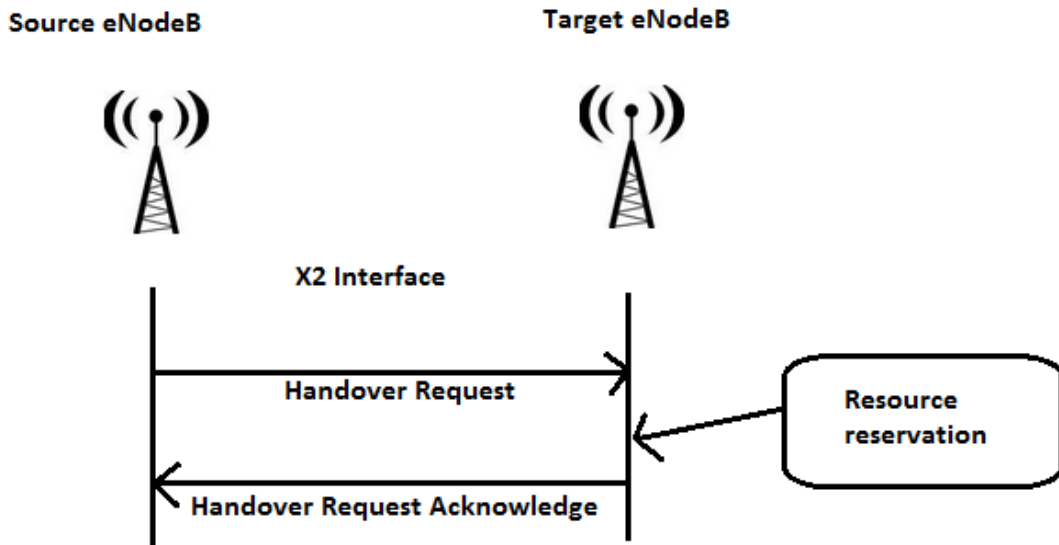
### 2.3.7.1 Η μεταπομπή μέσω της διεπαφής X2

Η διεπαφή X2 παίζει κύριο ρόλο στην διαδικασία handover εντός του δικτύου LTE. Ο αρχικός eNodeB στέλνει μέσω της διεπαφής X2 το μήνυμα για Handover Request στον eNodeB στόχο. Πριν γίνει αυτό όμως θα πρέπει να έχει στηθεί οπωσδήποτε η διεπαφή X2 μεταξύ των eNodeBs. Το μήνυμα για Handover Request ζητά από τον “eNodeB στόχο” να δεσμεύσει πόρους για την εξυπηρέτηση του νέου χρήστη και αυτός με τη σειρά του θα στείλει ένα μήνυμα αποδοχής (Handover Request Acknowledgement) εάν οι πόροι έχουν βρεθεί, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.25.

Υπάρχουν διαφόρων ειδών πληροφορίες που παρέχονται μέσω ενός μηνύματος Handover Request (μερικές εκ των οποίων είναι προαιρετικές), όπως οι παρακάτω:

- Παράδοση των SAE bearers
- Λίστα απαγόρευσης handover για κάποια συσκευή
- Οι τελευταίες κυψέλες στις οποίες η συσκευή του χρήστη έχει συνδεθεί.  
Η πληροφορία αυτή είναι διαθέσιμη μόνο αν η υπηρεσία καταγραφής ιστορικού της συσκευής του χρήστη είναι ενεργοποιημένη.

Η μεταπομπή εκτός της μετάβασης του χρήστη σε γειτονικό eNodeB για καλύτερη εξυπηρέτησή του (διακυψελική μεταπομπή) μπορεί να είναι και ενδοκυψελική όπου στην περίπτωση αυτή γίνεται μεταπομπή των υπηρεσιών του χρήστη σε διαφορετικό δίαυλο της ίδιας κυψέλης ο οποίος παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά.



**Σχήμα 2.25 Handover μεταξύ eNodeBs**

Η διαδικασία μεταπομπής ξεκινάει όταν η στάθμη του σήματος που λαμβάνει η συσκευή χρήστη από τον σταθμό βάσης που την εξυπηρετεί γίνει χαμηλότερη από μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου του συστήματος και επιπλέον χαμηλότερη από τη στάθμη του λαμβανόμενου σήματος των γειτονικών σταθμών. Στην περίπτωση αυτή η συσκευή χρήστη θα επιλέξει να συνδεθεί με τον σταθμό που δίνει την υψηλότερη τιμή λαμβανόμενου σήματος. Συνήθως ορίζεται μια στάθμη λίγο υψηλότερη από την στάθμη κατωφλίου κατά μια παράμετρο  $\Delta$  ώστε να υπάρχει κάποιος διαθέσιμος χρόνος να γίνει η μεταπομπή μέχρι το σήμα να πέσει κάτω από την τιμή κατωφλίου. Αν για παράδειγμα η τιμή κατωφλίου στα όρια μιας κυψέλης είναι  $-100\text{dbw}$  η διαδικασία μεταπομπής θα ξεκινήσει όταν η τιμή του λαμβανόμενου σήματος φτάσει μια τιμή  $-100\text{dbw} + \Delta\text{dbw}$ . Η τιμή του  $\Delta$  ρυθμίζεται σύμφωνα με την ταχύτητα του χρήστη, το ρυθμό υπέρβασης στάθμης του λαμβανόμενου σήματος και τον εκθέτη απωλειών διαδρομής. Μία μεγάλη τιμή του  $\Delta$  σημαίνει ότι μεσολαβεί αρκετός χρόνος μέχρι η στάθμη να πέσει κάτω από  $-100\text{dbw}$  άρα και αρκετό διάστημα για να γίνει η μεταπομπή ενώ μια μικρή τιμή του  $\Delta$  συνεπάγεται λιγότερο χρόνο για ολοκλήρωση της διαδικασίας μεταπομπής. Η διαδικασία αυτή εκτός από τον χρόνο που παρέχει για την εκτέλεση της μεταπομπής αποτρέπει τις καταστάσεις ping-pong ανάμεσα σε σταθμούς όταν ο χρήστης κινείται στα όρια δύο γειτονικών κυψελών καθώς μέσα στο διάστημα αυτό η ισχύς του σήματος μπορεί να παραμείνει σταθερή ή ο χρήστης να αλλάξει πορεία. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη ενότητα (ενότητα 1.3.6) τα δίκτυα 3<sup>ης</sup> γενιάς στις περιπτώσεις handover

χρησιμοποιούν soft και softer αλγορίθμους μεταπομπής διατηρώντας για κάποιο χρονικό διάστημα και τις 2 ραδιοζεύξεις μέχρι να αποφασιστεί σε ποιον θα συνδεθεί αποφεύγοντας πιθανά προβλήματα λόγω της μεταπομπής.

Όταν στέλνεται ένα μήνυμα Handover Request αυτόματα στον eNodeB ξενικά ένας μετρητής. Όταν αυτός τερματίζει και δεν έχει ληφθεί απάντηση, πιθανώς ο χρήστης έμεινε σταθερός ή άλλαξε πορεία και η διαδικασία handover ακυρώνεται. Επίσης στέλνεται και ένα μήνυμα Handover Cancel για να ακυρωθεί η τρέχουσα διαδικασία handover. Σε περίπτωση επιβεβαίωσης το μήνυμα επιβεβαίωσης (Handover Request Acknowledge) δεν επιβεβαιώνει απλά ότι ο eNodeB στόχος μπορεί να φιλοξενήσει τη συσκευή του χρήστη αλλά περιέχει και τις παρακάτω πληροφορίες:

- Πληροφορίες για τον δίαυλο GTP έτσι ώστε κάθε SAE bearer να ενεργοποιήσει τα uplink η downlink PDUs.
- Πιθανά SAE bearers που δεν γίνονται δεκτά
- Ένα block δεδομένων που στη συνέχεια ο αρχικός eNodeB στέλνει στη συσκευή του χρήστη και περιέχει τις εντολές handover.

Η διαδικασία SN Status Transfer υπάρχει για να παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση κάθε SAE bearer που θα μεταφερθεί σε ένα eNodeB. Τα PDCP-SN και HFN παρέχονται και για τις δύο κατευθύνσεις, uplink και downlink για τα SAE bearers των οποίων θέλουμε να μάθουμε την κατάσταση. Αυτό γίνεται τη στιγμή που ο αρχικός eNodeB σταματά να αναθέτει καινούρια PDCP-SNs στο downlink και σταματά να προωθεί δεδομένα από το interface S1 στο EPC.

Τα μηνύματα Context Release από τη συσκευή του χρήστη αναφέρουν στον αρχικό eNodeB ότι το σημείο ελέγχου της έχει αλλάξει και έχει μεταφερθεί στον eNodeB στόχο. Έτσι ο αρχικός eNodeB μπορεί να απελευθερώσει τους πόρους που είχε δεσμεύσει για τη συγκεκριμένη συσκευή χρήστη.

### **Διαχείριση φόρτου δικτύου**

Υπάρχουν τρία διαφορετικά μεγέθη - ενδείξεις που υποστηρίζουν την διαδικασία του load control. Οι ενδείξεις αυτές είναι οι εξής:

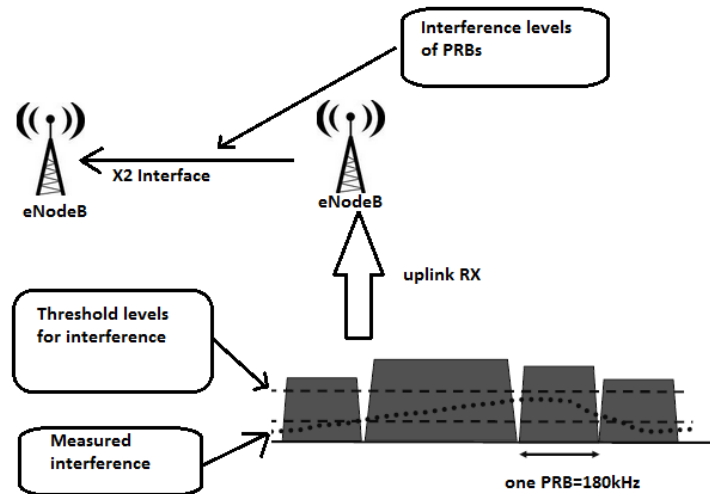
Στην πλευρά του πομπού :

- Η ένδειξη της ισχύς εκπομπής υπό την μορφή του Relative Narrowband Tx Power (RNTP) I.E.

Στην πλευρά του δέκτη:

- Τα επίπεδα παρεμβολών στο εισερχόμενο σήμα
- Η ευαισθησία σε παρεμβολές

Όλα αυτά μετριοούνται ανά PRB (Physical Resource Block) των 180 kHz. Η μέτρηση του επιπέδου παρεμβολών στην διεπαφή X2 φαίνεται στο σχήμα 2.26.



**Σχήμα 2.26 Έλεγχος Παρεμβολών**

Στην κατερχόμενη ζεύξη η ένδειξη της ισχύς εκπομπής ανά PRB χρησιμεύει στο να διευκολυνθεί ο συντονισμός των διαφορετικών eNodeBs για να αποφεύγονται οι παρεμβολές στις συσκευές των χρηστών που βρίσκονται στα όρια των κυψελών. Ο eNodeB που λαμβάνει τις πληροφορίες UL High Interference Indication θα πρέπει να αποφεύγει να εξυπηρετεί χρήστες που βρίσκονται σε PRBs με υψηλές παρεμβολές από γειτονικά eNodeBs. (42), (43)

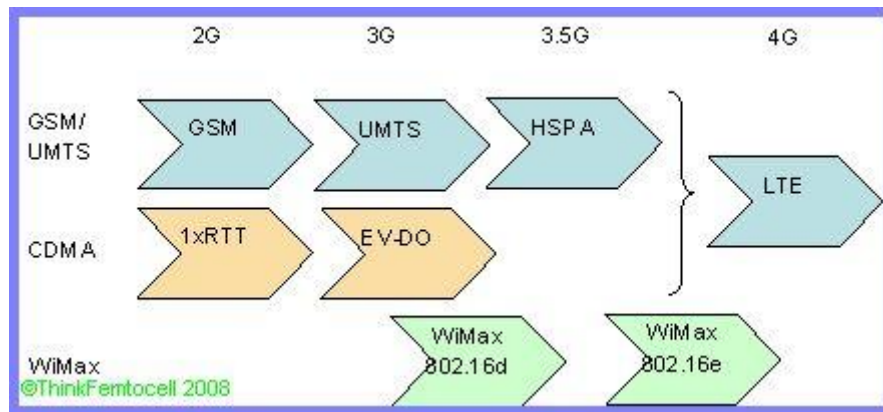
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Femtocells

### 3.1 Εισαγωγή

Ο αποδοτικότερος τρόπος για την αύξηση της χωρητικότητας ενός ασύρματου δικτύου είναι η μείωση της απόστασης ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη, γεγονός που προσφέρει οφέλη καλύτερης ποιότητας υπηρεσιών και απόκρισης δικτύου. Σε ένα δίκτυο με κινητούς χρήστες απαιτείται η ανάπτυξη επιπλέον υποδομής εκτός από τον σταθμό βάσης. Μια συμφέρουσα και οικονομική λύση είναι η ιδέα των Femtocells. Τα Femtocells ή οικιακοί σταθμοί βάσης (home base stations) είναι μικρά τηλεπικοινωνιακά κυψελωτά δίκτυα τα οποία εγκαθίστανται σε ιδιωτικούς κυρίως χώρους όπως σπίτια και μικρές επιχειρήσεις εξυπηρετώντας ένα πλήθος ασύρματων συσκευών επιτυγχάνοντας καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας σε υπηρεσίες φωνής και δεδομένων. Ο πομπός αποτελείται από έναν χαμηλής ισχύος σταθμό βάσης ο οποίος εκπέμπει σε ένα αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων και συνδέεται στα εξωτερικά δίκτυα και το internet μέσω μιας DSL γραμμής ή ενός καλωδίου ευρείας σύνδεσης.

Η πρώτη ιδέα για την υλοποίηση ενός τέτοιου δικτύου ξεκίνησε το 2002 από ένα τμήμα μηχανικών της Motorola που ερευνούσαν την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και μεθόδων για χρήση στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες. Μερικά χρόνια αργότερα, το 2004 η ιδέα των Femtocells άρχισε να κερδίζει έδαφος και στις πρώτες εταιρίες στην Αγγλία, τις Ubiquisys και 3WayNetworks ανατέθηκε η οριοθέτηση και η εύρεση φάσματος λειτουργίας των Femtocells. Η νέα αυτή τεχνολογία προκάλεσε το ενδιαφέρον αρκετών εταιριών και το 2007 δημιουργείται ο πρώτος οργανισμός προτυποποίησης για τα Femtocells, ο Femto Forum ([www.femtoforum.org](http://www.femtoforum.org)). Σκοπός του ήταν να προωθήσει την δημιουργία και την εξέλιξη των Femtocells σε ευρεία κλίμακα. Ο Femto Forum την περίοδο αυτή έπαιξε το ρόλο του συντονιστή ανάμεσα στις εταιρίες τηλεπικοινωνιών ώστε να βεβαιώσει ότι η ανάπτυξη και η εξέλιξη των Femtocells θα βασίζεται σε κάποια κοινά αποδεκτά και διεθνή πρότυπα λειτουργίας.

Οι τεχνολογίες μετάδοσης στα Femtocells βασίστηκαν κυρίως στα πρότυπα των δικτύων UMTS. Όμως οι νέες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν κατά την εξέλιξη των 3G δικτύων υιοθετήθηκαν από τα Femtocells. Το σχήμα 3.1 δείχνει την εξέλιξη των τεχνολογιών ασύρματης μετάδοσης και την εφαρμογή τους στα Femtocells.



**Σχήμα 3.1 Τεχνολογίες μετάδοσης στα Femtocells**

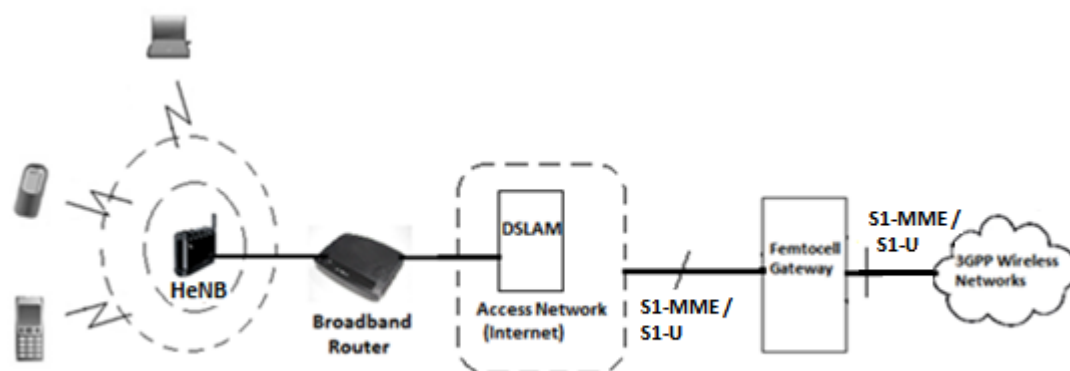
Η τεχνολογία GSM αν και χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα, μπορούμε να πούμε ότι η τοποθέτηση GSM σταθμών βάσης σε αεροσκάφη και πλοία παραπέμπει περισσότερο σε Picocells παρά σε Femtocells λόγω του ότι η εγκατάσταση και η λειτουργία των δικτύων αυτών δεν εξαρτιόνταν από τον συνδρομητή αλλά από την πάροχο εταιρεία.

Τα Femtocells πλέον αποτελούν ένα ολοκληρωμένο κομμάτι της εξέλιξης των κυψελωτών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Εκτός από τα πλεονεκτήματα καλύτερης ποιότητας υπηρεσιών και καλύτερης κάλυψης που προσφέρουν στους χρήστες, έχουν την δυνατότητα υποστήριξης επιπλέον λειτουργιών μέσα στο σπίτι ή την επιχείρηση με χαμηλότερη τιμή χρέωσης. Σύμφωνα με την εξάπλωση και τη χρήση τους εκτιμάται ότι στο μέλλον τα Femtocells θα αποτελέσουν βασικό στοιχείο στις ασύρματες επικοινωνίες, ενώ με βάση μια έρευνα της ABI Research εκτιμάται ότι μέχρι το 2011 θα υπάρχουν 102 εκατομμύρια χρήστες Femtocells με περίπου 32 εκατομμύρια σημεία πρόσβασης παγκοσμίως. Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τα Femtocells που βασίζονται στην τεχνολογία LTE, δηλαδή στις τεχνολογίες μετάδοσης OFDMA και SC-FDMA. (44), (45)

### 3.2 Αρχιτεκτονική Femtocells

Η διαφορά ενός δικτύου Femtocell με τα υπόλοιπα κυψελωτά δίκτυα βασίζεται στο ότι η εγκατάσταση και η χρήση του πρέπει να μπορεί να γίνει από κάθε συνδρομητή χωριστά, μέσα στο σπίτι ή την επιχείρηση του, χωρίς να απαιτείται η δημιουργία κάποιου ογκώδους δικτύου κορμού αλλά και να ελαχιστοποιείται όσο το δυνατόν το κόστος. Ένα δίκτυο Femtocell αποτελείται από ένα χαμηλής ισχύος σταθμό βάσης ο οποίος εκπέμπει σε μια αδειοδοτημένη μπάντα συχνοτήτων, ένα broadband modem-router, το οποίο συνδέεται μέσω μιας DSL γραμμής στο τοπικό DSLAM και μια Femtocell πύλη

(Femtocell gateway) που επιτρέπει την πρόσβαση σε άλλα δίκτυα και στο Internet. Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου Femtocell φαίνεται στο σχήμα 3.2. (46)



Σχήμα 3.2 Αρχιτεκτονική Femtocell

### 3.2.1 Οικιακός Σταθμός Βάσης (Home eNodeB – HeNB)

Αποτελεί το σημείο πρόσβασης όπου συνδέονται όλες οι ασύρματες συσκευές χρήστη που χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες του Femtocell. Είναι ένας σταθμός βάσης χαμηλής ισχύος, ο οποίος είναι τοποθετημένος μέσα στο σπίτι ή στο χώρο που είναι εγκατεστημένο το δίκτυο και παρέχει ασύρματη κάλυψη στο χώρο αυτό χρησιμοποιώντας κάποιο αδειοδοτημένο εύρος συχνοτήτων. Επίσης είναι γνωστός και ως Σημείο Πρόσβασης Femtocell (Femtocell Access Point – FAP). Ο HeNB ενσωματώνει εκτός από τις λειτουργίες της ασύρματης εκπομπής και λήψης δεδομένων και τις λειτουργίες διαχείρισης πόρων και ζεύξεων που σε ένα LTE δίκτυο εκτελούνταν από την S-GW ενώ στα 3G βρίσκονταν στον RNC. Στα 3G δίκτυα ο HeNB αναφέρεται ως HNB (Home NodeB).

### 3.2.2 Femtocell Gateway

Αναφέρεται και ως HeNB-Gateway (HeNB-GW) και αποτελεί τον κόμβο διασύνδεσης ενός δικτύου Femtocell με τα 3GPP δίκτυα. Συνδέεται μέσω της διεπαφής S1 με το EPC τμήμα των εξωτερικών LTE δικτύων και λειτουργεί σαν ένας εικονικός eNodeB προς το δίκτυο κορμού των εξωτερικών δικτύων και ως ένα εικονικό δίκτυο κορμού προς το Femtocell όπου συνδέονται οι HeNBs. Η HeNB-GW εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Εξασφαλίζει την πιστοποίηση και αυθεντικοποίηση των μεταδιδόμενων δεδομένων από και προς εξουσιοδοτημένους HeNBs.



- Συναθροίζει την κίνηση από ένα πλήθος HeNBs και παρέχει σύνδεση στα αντίστοιχα δίκτυα για καθένα απ' αυτούς εξασφαλίζοντας μια υψηλή ποιότητα υπηρεσιών.
- Παρέχει μηχανισμούς υποστήριξης της επικοινωνίας όπως ρολόι συγχρονισμού διανομής και άλλες IP λειτουργίες συγχρονισμού και πρωτόκολλα (IEEE1588, Network Time Protocol).

Στην HeNB-GW βρίσκονται δύο κύριες λειτουργίες, η CNT/DST (Concentration/Distribution) και η SeGW (Security Gateway). Συχνά η SeGW αναφέρεται και ως διαφορετική πύλη που εκτελεί τις λειτουργίες ασφάλειας.

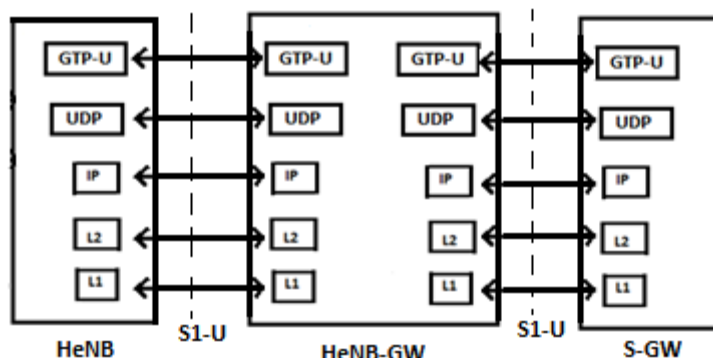
Η CNT/DST συγκεντρώνει τα πακέτα δεδομένων στο επίπεδο μετάδοσης (Transport Network Layer) καθώς η HeNB-GW εγκαθιδρύει ένα πλήθος S1 συνδέσεων ανάμεσα στους HeNBs και στα αντίστοιχα δίκτυα. Η HeNB-GW έπειτα κατανέμει την κίνηση των μηνυμάτων ανάμεσα στους HeNBs ελέγχοντας την συμφόρηση του δικτύου. Η SeGW εκτελεί έλεγχο αυθεντικοποίησης στις συσκευές των χρηστών και στους HeNBs ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής σύνδεση των εξουσιοδοτημένων χρηστών στο δίκτυο κορμού. Αποτελεί το τελευταίο στάδιο κατά την εγκαθίδρυση των IPsec (IP security) καναλιών για την προστασία της επικοινωνίας κατά την μετάδοση ανάμεσα στον HeNB και την HeNB-GW. Στην HeNB-GW βρίσκονται επίσης και άλλα πρωτόκολλα όπως το S1AP, που χρησιμοποιείται κατά την εγκαθίδρυση ζεύξεων ανάμεσα στην HeNB-GW και στο δίκτυο κορμού των εξωτερικών δικτύων και το SCTP (Stream Control Transmission Protocol) για σηματοδότηση και μετάδοση.

Το τμήμα του δικτύου που περιλαμβάνει τον HeNB και το broadband modem-router βρίσκεται στον προσωπικό χώρο του χρήστη και εγκαθίσταται απ' αυτόν. Στον HeNB μπορεί να συνδεθεί κάθε ασύρματη συσκευή που μπορεί να κάνει χρήση των LTE υπηρεσιών όπως κινητά τηλέφωνα, PDAs, υπολογιστές κλπ. Ο HeNB με τη σειρά του, συνδέεται σε έναν broadband modem-router που μέσω αυτού εξασφαλίζεται η πρόσβαση στο internet. Ο δρομολογητής αυτός δεν είναι απαραίτητο να λειτουργεί και ως modem αλλά μπορεί να συνδέεται σε κάποιο εξωτερικό. Στην περίπτωση που ο broadband router λειτουργεί και ως modem το δίκτυο αναφέρεται ως intergraded Femtocell (σχήμα 3.2). Πάνω στον router μπορεί να είναι συνδεδεμένες και άλλες συσκευές όπως για παράδειγμα ηλεκτρονικοί υπολογιστές μέσω ασύρματης σύνδεσης ή καλωδίου Ethernet. Ο broadband modem-router έπειτα συνδέεται στο γειτονικό DSLAM μέσω μιας ADSL γραμμής και αποκτά πρόσβαση στο internet.

Η διεπαφή S1-MME χρησιμοποιείται στο να παρέχει σύνδεση μέσω internet ανάμεσα στον HeNB και στην Femtocell-GW. Στα 3G δίκτυα η σύνδεση αυτή γινόταν μέσω της διεπαφής Iu-h και περιελάμβανε το πρωτόκολλο HNBAP (HNB Application Protocol) που ελέγχει την συμμόρφωση του δικτύου αυξομειώνοντας την ροή των πακέτων από και προς τον HeNB. Η σύνδεση με τον HeNB, στα LTE δίκτυα γίνεται στο EPC (Evolved Packet Core) τμήμα του δικτύου μέσω των διεπαφών S1-MME και S1-U αν η σύνδεση γίνεται μέσω της MME ή της S-GW αντίστοιχα. Η απλή αρχιτεκτονική των δικτύων LTE παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των 3G Femtocells με το βασικότερο απ' αυτά την γρηγορότερη απόκριση του δικτύου και τα ελάχιστα επίπεδα καθυστέρησης. (47), (48)

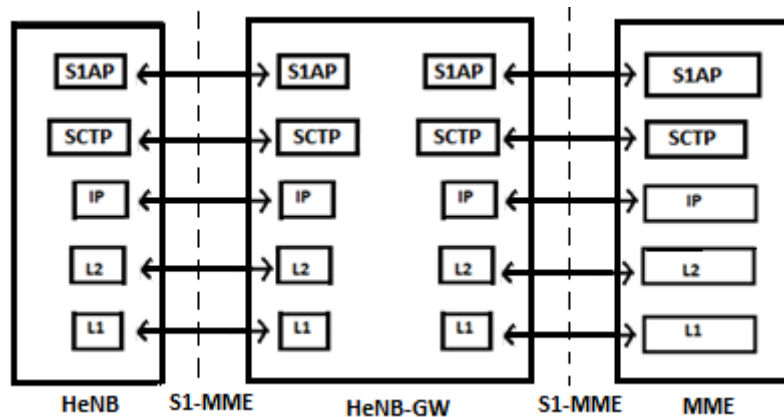
### 3.3 Πρωτόκολλα Femtocell

Η διασύνδεση ανάμεσα στον HeNB και στο τμήμα EPC των εξωτερικών δικτύων γίνεται συνήθως μέσω της HeNB-GW και συνδέεται μέσω της διεπαφής S1-U στο επίπεδο χρήστη (user plane) με την S-GW ενώ στο επίπεδο ελέγχου με την MME μέσω της διεπαφής S1-MME. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για τις διασυνδέσεις αυτές είναι τα ίδια τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση των eNodeBs με τις MME και S-GW που έχουμε αναλύσει στην παράγραφο 2.3.



**Σχήμα 3.3 Διασύνδεση ανάμεσα στον HeNB και στην S-GW στο επίπεδο χρήστη (UP)**

Στο σχήμα 3.3 φαίνονται τα επικοινωνούντα πρωτόκολλα κατά την διασύνδεση του HeNB μέσω της HeNB-GW με την S-GW ενώ στο ακόλουθο σχήμα (3.4) φαίνεται η διασύνδεση στο επίπεδο ελέγχου (CP) ανάμεσα στον HeNB και στην MME. (49)



**Σχήμα 3.4 Διασύνδεση ανάμεσα στον HeNB και στην MME στο επίπεδο ελέγχου (CP)**

### 3.4 Ζητήματα που ανακύπτουν από την χρήση των Femtocells

Τα πλεονεκτήματα των Femtocells όπως ήδη έχουμε αναφέρει είναι αρκετά, όπως η δυνατότητα υποστήριξης επιπλέον λειτουργιών μέσα στο σπίτι ή την επιχείρηση και η καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας σε υπηρεσίες φωνής και δεδομένων. Ωστόσο υπάρχει ένα πλήθος ζητημάτων τα οποία πρέπει να καθοριστούν και να επιλυθούν κατά τον σχεδιασμό και την δημιουργία των Femtocells για την σωστή λειτουργία τους. Τα βασικότερα από αυτά αναλύονται παρακάτω.

#### 3.4.1 Ζητήματα ασφάλειας

Η ασφάλεια και η προστασία της επικοινωνίας στα Femtocells είναι από τα βασικότερα ζητήματα που απασχολούν τόσο τους σχεδιαστές όσο και τους χρήστες. Είναι γνωστό ότι τα μέτρα ασφάλειας σε δίκτυα Wi-Fi και ειδικά η οργάνωση του WEP (Wired Equivalent Privacy) είναι αρκετά εύκολο να παραβιαστούν. Άρα είναι μείζον θέμα τα μέτρα ασφάλειας στα Femtocells, που εξυπηρετούν ένα πλήθος ασύρματων συσκευών και κυρίως κινητών τηλεφώνων να μην μπορούν να παραβιαστούν. Ένα βασικό ζήτημα είναι η αποφυγή οποιουδήποτε ‘παραθύρου’ σε θέματα ασφάλειας από το οποίο θα μπορούσε ο επιτιθέμενος να αποκτήσει πρόσβαση σε σημαντικά σημεία της δομής και της λειτουργίας των Femtocells. Καθώς τα Femtocells αποτελούν ένα ολοκληρωμένο σύστημα επικοινωνίας η ασφάλεια της λειτουργίας τους κάνει όλο και περισσότερους χρήστες να στρέφονται σε τεχνολογίες LTE όπου δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα σε θέματα ασφάλειας σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνολογίες.

Οι περιπτώσεις που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον όσον αφορά την προστασία τους από υποκλοπές είναι οι ακόλουθες:

- **Προστασία της ταυτότητας του χρήστη.** Μέσω της χρήσης των Femtocells ένα μεγάλο τμήμα πληροφορίας που αφορά το χρήστη, συμπεριλαμβάνοντας τόσο υπηρεσίες φωνής όσο και δεδομένων, διακινείται στο Internet. Ως αποτέλεσμα αυτού είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται η προσωπικότητα του χρήστη απ' όλες αυτές τις IP επικοινωνίες και να αποφεύγεται η καταγραφή και η παρακολούθηση των δεδομένων.
- **Διαθεσιμότητα και πρόσβαση σε υπηρεσίες.** Ένα σημαντικό θέμα που αφορά τους παρόχους υπηρεσιών είναι η εξασφάλιση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών και της στρατηγικής ασφάλειας που προκύπτει από το γεγονός ότι η σύνδεση ανάμεσα στο Femtocell και στο δίκτυο κορμού των εξωτερικών δικτύων γίνεται μέσω Internet και βασίζεται στο πρωτόκολλο IP. Επομένως οι πάροχοι είναι ευάλωτοι σε επιθέσεις 'άρνησης υπηρεσιών' (denial of service attack) οι οποίες υπερφορτώνουν το δίκτυο και υποβαθμίζουν την ποιότητα υπηρεσιών του ή ακόμα αποτρέπουν τους νόμιμους χρήστες να συνδεθούν με το κυψελωτό δίκτυο.
- **Υποκλοπή υπηρεσιών.** Η υποκλοπή υπηρεσιών αναφέρεται στις περιπτώσεις όπου μη εξουσιοδοτημένοι χρήστες αποκτούν πρόσβαση στο Femtocell και χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες του είτε για να αποφύγουν τις χρεώσεις είτε να επιβαρύνουν σκοπίμως τον νόμιμο χρήστη. Τέτοιες περιπτώσεις φέρνουν σε πολύ δυσμενή κατάσταση τους νόμιμους χρήστες και είναι λογικό να δίνουν ιδιαίτερη βαρύτητα στον τομέα αυτό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από την πρώτη φάση ανάπτυξης των Femtocells μέχρι τις τελικές οι διαχειριστές διατηρούσαν αρκετά κριτήρια ασφάλειας και συνεχώς τα αναβάθμιζαν για κάθε νέα τεχνολογία ή σε κάθε πρόβλημα που προέκυπτε. (50)

#### 3.4.1.1 Ευάλωτα σημεία των Femtocells σε θέματα ασφάλειας

Σε ένα δίκτυο Femtocell υπάρχουν αρκετά σημεία που ενέχουν κινδύνους σε θέματα ασφάλειας. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το δίκτυο κορμού ενός κυψελωτού δικτύου είναι ασφαλές από κακόβουλες επιθέσεις. Αυτό είναι μια ασφαλής υπόθεση καθώς το δίκτυο κορμού βρίσκεται υπό τον έλεγχο του διαχειριστή και κάθε ζήτημα που αφορά την ασφάλεια του δικτύου παρακολουθείται και ελέγχεται είτε το Femtocell είναι ενεργό είτε

όχι. Οι κύριοι τομείς ενός δικτύου Femtocell που είναι ευάλωτοι σε εξωτερικές επιθέσεις είναι:

- **Η ασύρματη σύνδεση των συσκευών με τον σταθμό βάσης.** Σ' αυτό το σημείο υπάρχει η πιθανότητα εξωτερικών μεταδόσεων από συσκευές που προσπαθούν να αποκτήσουν μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στο δίκτυο.
- **Συνολικά το δίκτυο Femtocell.** Είναι πιθανό εξωτερικοί φορείς να προσπαθήσουν να αποκτήσουν πρόσβαση στον σταθμό βάσης και έπειτα πρόσβαση στο router θέτοντας έτσι το δίκτυο υπό τον έλεγχό τους εξυπηρετώντας δικούς τους σκοπούς και αποκόπτοντας την πρόσβαση στον νόμιμο χρήστη.
- **Η σύνδεση με το Internet.** Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η σύνδεση ανάμεσα στο Femtocell και στο δίκτυο κορμού του δικτύου γίνεται μέσω Internet και βασίζεται στο πρωτόκολλο IP. Στο σημείο αυτό και ειδικότερα στο σημείο όπου γίνεται η σύνδεση με την Femtocell Gateway υπάρχει η πιθανότητα επιθέσεων που έχουν σκοπό την υποκλοπή πληροφοριών και την δημιουργία προβλημάτων στο δίκτυο.

#### 3.4.1.2 Κριτήρια ασφάλειας στα Femtocells

Για την αποφυγή των παραπάνω περιπτώσεων και την εγγύηση της ασφαλούς επικοινωνίας υπάρχουν κάποιες λειτουργίες που λαμβάνονται υπ' όψη και θα πρέπει να υποστηρίζονται από τα Femtocells. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

- **Χρήση του πρωτοκόλλου IPsec.** Για την διασφάλιση ότι η ασφάλεια της επικοινωνίας διατηρείται κατά την σύνδεση μέσω Internet απαιτείται η χρήση του πρωτοκόλλου IPsec. Το IPsec είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο ορισμένο από την IETF (Internet Engineering Task Force) που διαχειρίζεται θέματα ασφάλειας σε περιπτώσεις IP υπηρεσιών.
- **Ασφάλεια αυθεντικοποίησης στο Femtocell.** Η αυθεντικοποίηση του χρήστη απαιτείται τόσο από τον πάροχο υπηρεσιών όσο και από το ίδιο το δίκτυο για να εξασφαλιστεί ότι τα εξουσιοδοτημένα Femtocells αποκτούν πρόσβαση στο δίκτυο κορμού του δικτύου. Επιπλέον τα Femtocells χρειάζεται να είναι σωστά ταυτοποιημένα στο δίκτυο. Οι διαδικασίες αυτές θα πρέπει να πραγματοποιούνται μέσω της κάρτας USIM και του πιστοποιητικού X.509.

- **Ασφάλεια ασύρματης σύνδεσης.** Η ασύρματη σύνδεση των συσκευών με τον σταθμό βάσης είναι μια περιοχή όπου απαιτείται έλεγχος για επιβεβαίωση ότι οι μη εξουσιοδοτημένοι χρήστες δεν θα αποκτήσουν πρόσβαση στο Femtocell. Εκτός από τις διαδικασίες ταυτοποίησης και αυθεντικοποίησης θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη και άλλες τεχνικές που να αποτρέπουν φαινόμενα παραβιάσεων όπως ο έλεγχος της ακτίνας κάλυψης του Femtocell ώστε να μην υπερβαίνει τα όρια τα οποία θέλουμε να καλύπτει.
- **Χρήση του πρωτοκόλλου EAP (Extensible Authentication Protocol).** Το πρωτόκολλο αυτό έχει εφαρμογή στα ασύρματα δίκτυα και η χρήση του έχει προταθεί για θέματα ασφάλειας στα Femtocell.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι τα θέματα ασφάλειας είναι ζητήματα ζωτικής σημασίας για την χρήση των Femtocell. Τα κριτήρια ασφάλειας θα πρέπει να ελέγχονται για την αποτελεσματικότητά τους και να αναβαθμίζονται συνεχώς ανάλογα με τις απαιτήσεις που προκύπτουν ώστε να εγγυώνται την ασφάλεια στην χρήση των Femtocells. Έτσι τα δίκτυα Femtocell θα μπορούν να εξυπηρετούν τις ανάγκες των χρηστών, αλλά και οι χρήστες να τα εμπιστευτούν και να τα υιοθετήσουν.

### 3.4.2 Ζητήματα υγείας

Ένα από τα ζητήματα το οποίο μπορεί να συσχετιστεί με την χρήση των Femtocells είναι αυτό της υγείας που απορρέει από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Αρκετοί είναι αυτοί που αναρωτιούνται για τους πιθανούς κινδύνους της ακτινοβολίας που δημιουργείται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του σταθμού βάσης, για την ανθρώπινη ασφάλεια. Καθώς τα δίκτυα Femtocell είναι κυψελωτά συστήματα που περιέχουν έναν σταθμό ασύρματης εκπομπής υπάρχει λογική ανησυχία όσον αφορά τις επιπτώσεις της ακτινοβολίας αυτής στον ανθρώπινο οργανισμό. Ωστόσο η ισχύς της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον σταθμό βάσης είναι αρκετά μικρή και δεν ξεπερνάει αυτή των κοινών σταθμών Wi-Fi που υπάρχουν στα περισσότερα σπίτια.

Αρκετές έρευνες έχουν γίνει, εδώ και 50 περίπου χρόνια, για να διαπιστωθεί η επίδραση της ακτινοβολίας χαμηλής ισχύος στον άνθρωπο χωρίς ωστόσο όλα αυτά τα χρόνια να προκύψει κάποια έντονη ανησυχία ή κάποιος σοβαρός κίνδυνος ώστε να χρειαστεί να αλλάξει κάτι ή να αποσυρθεί. Οι περισσότερες έρευνες ήταν στατιστικής μορφής ανάμεσα σε άτομα που χρησιμοποιούσαν ασύρματες συσκευές αρκετά και άτομα που εκτίθονταν πολύ λίγο ή καθόλου σε ακτινοβολία. Οι ασθένειες και οι επιπτώσεις που

παρουσιάζονταν στα δείγματα των ανθρώπων ήταν παρόμοιες είτε αυτοί εκτίθονταν είτε όχι σε ακτινοβολία. Κανένα από τα συμπτώματα των ατόμων που εκτίθονταν σε ακτινοβολία δεν μπορούσε να αποδειχτεί ότι οφειλόταν στην ίδια την ακτινοβολία και έτσι οι παγκόσμιοι οργανισμοί υγείας επέτρεψαν την χρήση των Femtocells με αυτά τα επίπεδα ισχύς.

Παρόλα αυτά όμως είναι γνωστή η επίδραση της ακτινοβολίας στους ανθρώπινους ιστούς αν εκτεθούν πολύ ώρα σ' αυτή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αύξηση της θερμοκρασίας και ο πόνος στο αυτί μετά από κάποιο χρονικό διάστημα χρήσης του κινητού τηλεφώνου. Αν και δεν υπάρχουν αποδεδειγμένα παραδείγματα ότι η ακτινοβολία αυτή είναι υπεύθυνη για την εμφάνιση διαφόρων μορφών καρκίνου, είναι προτεινόμενο η χρήση των ασύρματων αυτών συσκευών να μην γίνεται εκτεταμένα. Στα δίκτυα Femtocell παρατηρείται ότι η ισχύς ελαττώνεται σύμφωνα με την σχέση  $1/d^2$ , όπου  $d$  η απόσταση από τον σταθμό βάσης, πράγμα που σημαίνει ότι τα επίπεδα ακτινοβολίας ελαττώνονται κατά πολύ όσο απομακρυνόμαστε από τον σταθμό βάσης (βάσει του τετραγώνου της απόστασης) και είναι αρκετά χαμηλά ώστε να αποτελούν κίνδυνο. (51)

#### 3.4.2.1 Πρότυπα επίπεδα ισχύς και ακτινοβολίας στα Femtocells

Τα επίπεδα ισχύς του σταθμού βάσης των Femtocell είναι αρκετά χαμηλά δεδομένου ότι ο σταθμός καλύπτει πολύ μικρές αποστάσεις. Τα επίπεδα ισχύς που παράγονται είναι περίπου στα 0.1watts ή 100milliwatts, παρόμοια με αυτά ενός Wi-Fi σταθμού βάσης.

Καθώς τα κινητά τηλέφωνα βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης του Femtocell δεν απαιτείται από αυτά ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος γεγονός που ρίχνει την ισχύ τους σε χαμηλότερα επίπεδα, όσο χρειάζεται για την σωστή διεξαγωγή της επικοινωνίας. Με τον τρόπο αυτό και με την εξασθένηση της ισχύς βάσει την σχέση  $1/d^2$  που αναφέραμε προηγουμένως, η συνολική ακτινοβολία του δικτύου μειώνεται αισθητά.

Κατά τον σχεδιασμό του σταθμού βάσης λαμβάνονται υπ' όψη τα επίπεδα ακτινοβολίας που εκπέμπει ώστε να ικανοποιούν κάποια κοινώς αποδεκτά πρότυπα. Ο σταθμός βάσης έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τα ίδια πρότυπα ασφάλειας που έχουν σχεδιαστεί όλες οι ασύρματες συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα, οι σταθμοί βάσης Wi-Fi, οι συσκευές Bluetooth κλπ. Αυτά τα πρότυπα ασφάλειας έχουν καθοριστεί από την ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radio Protection) και επικυρώθηκαν από τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας (World Health Organisation -

WHO). Τα πρότυπα αυτά έχουν καθοριστεί διεθνώς και έχουν υιοθετηθεί από όλες τις χώρες δίνοντας έτσι ένα παγκόσμιο πρότυπο για την δημιουργία των Femtocells.

### **3.4.3 Ρυθμιστικά ζητήματα**

Εκτός από τα επίπεδα ισχύς και ακτινοβολίας που έπρεπε να καθοριστούν για την λειτουργία των Femtocells ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί και στο μέσο μετάδοσης. Το φάσμα εκπομπής και λήψης αποτελεί έναν ιδιαίτερα ασταθή πόρο, ειδικά όταν απαιτείται η μεταφορά μεγάλης ποσότητας δεδομένων. Η εύρεση του κατάλληλου φάσματος το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από έναν πολύ μεγάλο αριθμό Femtocells απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, αν και σε μερικές περιστάσεις η χρήση σήματος μονής κατεύθυνσης με περισσότερους σταθμούς βάσης ίσως είναι καλύτερη επιλογή.

Τα Femtocells όπως έχουμε αναφέρει, εκπέμπουν σε ένα αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων. Αν και αυτό δεν συμβαίνει στους σταθμούς βάσης των Wi-Fi, τα Femtocells χρειάζονται έγκριση για το φάσμα λειτουργίας τους. Το εύρος συχνοτήτων και οι ρυθμίσεις λειτουργίας των Femtocells διαφέρουν από χώρα σε χώρα με αποτέλεσμα να απαιτείται μια διεθνή συμφωνία που να διευκρινίζει όλες αυτές τις λειτουργίες ώστε τα Femtocells να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά ανεξαρτήτως χώρας. (52)

### **3.4.4 Ζητήματα παρεμβολών**

Ένα βασικό ζήτημα που σχετίζεται με την λειτουργία των Femtocells είναι αυτό των παρεμβολών. Υπάρχει ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων στο οποίο μπορούν να λειτουργήσουν τα κυψελωτά συστήματα, με αποτέλεσμα πολλές από τις χρησιμοποιούμενες (ή κοντινές) συχνότητες να επαναλαμβάνονται ανάμεσα σε γειτονικά δίκτυα προκαλώντας παρεμβολές. Παρόλα αυτά τα Femtocells είναι αναγκαίο να μπορούν να λειτουργούν μέσα στο επιτρεπτό φάσμα που χρησιμοποιούν και τα υπόλοιπα κυψελωτά συστήματα. Αν και τα Femtocells παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το χαμηλό κόστος εγκατάστασής τους, οι παρεμβολές μπορεί να δημιουργήσουν αρκετά προβλήματα δυσχεραίνοντας την λειτουργία τους. Καθώς οι παρεμβολές μπορεί να υποβαθμίσουν αρκετά την ποιότητα υπηρεσιών του δικτύου, η εξάλειψη ή ελαχιστοποίησή τους αποτελεί σημαντικό ζήτημα για τους κατασκευαστές των συστημάτων. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση των παρεμβολών ώστε να εξασφαλιστεί η καλή λειτουργία και η εξάπλωση των δικτύων Femtocell. Μερικοί απ' αυτούς είναι η χρήση εξειδικευμένων



ασύρματων τεχνολογιών, η χρήση συστημάτων που είναι ανεκτικά στις παρεμβολές όπως για παράδειγμα τα LTE δίκτυα και η καλύτερη κατανομή φάσματος ανάμεσα σε γειτονικά συστήματα όπου αυτό είναι δυνατό.

#### 3.4.4.1 Πιθανά σενάρια παρεμβολών

Τα προβλήματα παρεμβολών μειώνονται στο ελάχιστο όταν τα Femtocells χρησιμοποιούν διαφορετική συχνότητα απ' αυτή που χρησιμοποιούν τα συστήματα που τα περιβάλλουν. Σε περιπτώσεις όμως που γειτονικά δίκτυα χρησιμοποιούν ίδιες ή κοντινές συχνότητες τότε είναι πιθανό να προκύψουν διάφορα προβλήματα παρεμβολών μερικά από τα οποία θα εξετάσουμε παρακάτω. Με την σωστή κατανομή φάσματος όλα τα γειτονικά δίκτυα δουλεύουν αποτελεσματικά χωρίς προβλήματα παρεμβολών μεταξύ τους, όμως όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο φάσμα τότε συχνά μπορεί να προκύψουν τα ακόλουθα σενάρια παρεμβολών:

- **Παρεμβολές ανάμεσα σε Femtocells και σταθμούς βάσης που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα.** Όταν ένας αριθμός Femtocells βρίσκονται εντός πεδίου κάλυψης ενός μεγαλύτερου δικτύου (macro cell) και λειτουργούν στην ίδια συχνότητα είναι πιθανό να δημιουργηθούν παρεμβολές τόσο στα Femtocells όσο και στο εξωτερικό δίκτυο δημιουργώντας προβλήματα και στα δύο.
- **Παρεμβολές ανάμεσα σε γειτονικά δίκτυα Femtocell.** Όταν ένας αριθμός δικτύων Femtocell είναι πολύ κοντά εγκατεστημένα μεταξύ τους και επικαλύπτονται οι περιοχές εμβέλειάς τους είναι πιθανό να υπάρξουν προβλήματα καθυστέρησης και συνακρόασης δημιουργώντας προβλήματα στην λειτουργία τους.
- **Κάποια συσκευή χρήστη να εκπέμπει με υψηλή ισχύ έτσι ώστε να επικοινωνεί και με κάποιον σταθμό βάσης εξωτερικού δικτύου.** Παρόλο που η κάλυψη των εξωτερικών δικτύων μέσα στα κτήρια είναι ασθενής με αποτέλεσμα τα επίπεδα σηματοδότησης των κινητών συσκευών να φτάνουν εξασθενημένα στους σταθμούς βάσης, υπάρχει η πιθανότητα μια συσκευή του δικτύου Femtocell να επικοινωνεί και με κάποιον άλλο σταθμό βάσης. Αυτό εκτός από τα προβλήματα που θα προκαλέσει στην συγκεκριμένη συσκευή όπως πιθανές καθυστερήσεις,

αποσυνδέσεις και παρεμβολές, θα δημιουργήσει επιπλέον θόρυβο και θα επηρεάζει την λειτουργία και των δύο δικτύων.

Όλα τα παραπάνω σενάρια παρεμβολών μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα και την υποβάθμιση των υπηρεσιών του δικτύου. Αν και τα προβλήματα παρεμβολών επηρεάζουν όλα τα κυψελωτά ασύρματα δίκτυα, η κατάσταση στα Femtocell είναι ιδιαίτερα σημαντική εξ' αιτίας του γεγονότος ότι παρατάσσονται σε μια ad-hoc δομή χωρίς το σχεδιασμό κάποιου δικτύου να εγγυάται την λειτουργία τους.

#### 3.4.4.2 Μέτρα αντιμετώπισης παρεμβολών

Όπως είδαμε παραπάνω υπάρχουν αρκετά πιθανά σενάρια παρεμβολών που μπορεί να προκύψουν κατά την λειτουργία των Femtocells συνεπώς απαιτούνται περισσότεροι του ενός τρόποι για την αντιμετώπισή τους. Είναι βασικό για την σωστή λειτουργία του δικτύου οι παρεμβολές που προκαλούνται να μπορούν να εξαλειφθούν ή να μειωθούν στο ελάχιστο αν αυτό δεν είναι δυνατό. Από μελέτες που έχουν διεξαχθεί αναπτύχθηκαν μέθοδοι που ελαχιστοποιούν τα προβλήματα παρεμβολών μέχρι κάποια ανεκτά όρια. Αυτοί έχουν ήδη αρχίσει να εισάγονται στην κατασκευή των Femtocells. Οι βασικότεροι απ' αυτούς είναι:

- **Προσαρμοστικός οδηγός ελέγχου ισχύος.** Με τον τρόπο αυτό το Femtocell εντοπίζει το εκπεμπόμενο σήμα γειτονικών δικτύων και προσαρμόζει ανάλογα την ισχύ εκπομπής του με στόχο βέβαια να καλύπτει την περιοχή εμβέλειάς του αλλά να μην επικαλύπτει, όσο είναι δυνατό, την περιοχή των άλλων δικτύων.
- **Δυναμική διαχείριση ενίσχυσης δέκτη.** Καθώς τα Femtocells μπορούν να αλληλεπιδρούν αρκετά καλά με ασύρματες συσκευές, είτε είναι εντός της περιοχής κάλυψης είτε λίγο μακρύτερα, μπορεί να εφαρμοστεί ένας τρόπος ενίσχυσης/εξασθένισης του λαμβανόμενου σήματος των συσκευών. Έτσι όσες συσκευές βρίσκονται εντός κάλυψης του Femtocell το σήμα τους να ενισχύεται ενώ το λαμβανόμενο σήμα των εξωτερικών συσκευών να εξασθενεί χωρίς να επηρεάζει το δίκτυο. Μ' αυτόν τον τρόπο οι νόμιμες συσκευές μπορούν να χρησιμοποιούν το δίκτυο χωρίς να αυξάνουν την ισχύ εκπομπής τους, με όλα τα οφέλη που συνεπάγεται αυτό, ενώ ταυτόχρονα το δίκτυο προστατεύεται από εξωτερικές παρεμβολές και θόρυβο.

- **Ανώτατο φράγμα εκπεμπόμενης ισχύς ασύρματων συσκευών.** Είναι καλό να υπάρχει ένα ανώτατο όριο εκπεμπόμενης ενέργειας των ασύρματων συσκευών χρήστη, όταν αυτές βρίσκονται σε περιβάλλον Femtocell. Έτσι όταν η συσκευή απομακρυνθεί από το δίκτυο Femtocell και το λαμβανόμενο σήμα της αρχίζει να εξασθενεί, θα γίνει η μεταπομπή της σε κάποιο εξωτερικό δίκτυο χωρίς να χρειαστεί να αυξάνει την ισχύ εκπομπής της. Με τον τρόπο αυτό δεν θα μπορεί να επικοινωνήσει με κάποιο εξωτερικό δίκτυο ενώ είναι συνδεδεμένη στο Femtocell, ενώ μετά την μεταπομπή η χαμηλή ισχύς του σήματός της δεν θα επηρεάζει το δίκτυο Femtocell προκαλώντας του παρεμβολές.
- **Δέκτης Femtocell δυναμικής εμβέλειας.** Για να εξασφαλίσουμε ότι ένα δίκτυο Femtocell μπορεί να λειτουργήσει σωστά ακόμα και όταν υπάρχουν κοντά του ασύρματες συσκευές ενός εξωτερικού δικτύου που εκπέμπουν σε υψηλή ισχύ, είναι απαραίτητο να βεβαιωθούμε ότι ο δέκτης του μπορεί να λειτουργήσει σωστά παρά την παρουσία ισχυρών εξωτερικών σημάτων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με έναν δέκτη δυναμικής εμβέλειας που να μπορεί να αγνοεί τα σήματα που προέρχονται από συσκευές που δεν ανήκουν στο Femtocell. Οι διαδικασίες αυτές άρχισαν να ενσωματώνονται από την έκδοση 8 (Release 8) του 3GPP. (53)

Τα προβλήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια και τις παρεμβολές είναι ίσως τα σημαντικότερα ζητήματα που πρέπει να διευθετηθούν για την σωστή λειτουργία των Femtocells. Για κάθε πρόβλημα που προκύπτει υπάρχουν οι κατάλληλες τεχνικές που το αντιμετωπίζουν ή το προλαμβάνουν. Τα συστήματα Femtocell που κατασκευάζονται περιέχουν αρκετές μεθόδους αντιμετώπισης τέτοιου είδους προβλημάτων, οι βασικότερες από τις οποίες αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Είναι βασικό η κατασκευή των Femtocells να υιοθετεί τις νέες μεθόδους που συνεπάγονται από την εξέλιξη της τεχνολογίας αλλά και στα ήδη εγκατεστημένα συστήματα να υπάρχει η δυνατότητα αναβάθμισης, ώστε η νέα αυτή τεχνολογία να βρει απήχηση στους καταναλωτές και να μπορέσει να εξελιχθεί.

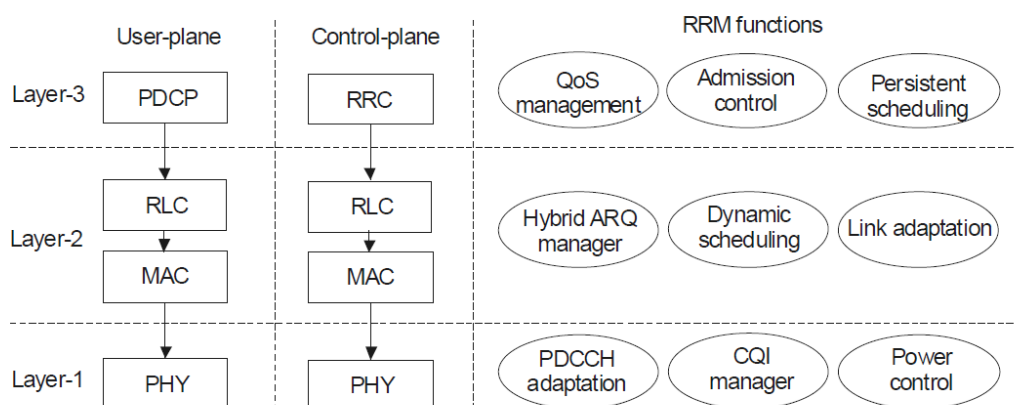
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Διαχείριση πόρων σε δίκτυα LTE και LTE Femtocells

### 4.1 Εισαγωγή

Ο ρόλος της διαχείρισης ασύρματων πόρων (Radio resource management – RRM) είναι να διασφαλίσει ότι οι ασύρματοι πόροι (ραδιοζεύξεις) χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά, επωφελούμενη από τις διαθέσιμες τεχνικές προσαρμογής, έτσι ώστε να εξυπηρετήσει τους χρήστες σύμφωνα με τις επιλεγμένες παραμέτρους ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service – QoS) του καθενός.

### 4.2 Περίληψη των αλγορίθμων διαχείρισης ασύρματων πόρων

Στο σχήμα 4.1 φαίνεται μια περίληψη της στοίβας πρωτοκόλλων σε επίπεδο χρήστη αλλά και σε επίπεδο ελέγχου στον eNodeB, καθώς επίσης και η αντιστοίχιση των αρχικών αλγορίθμων διαχείρισης ασύρματων πόρων με τα αντίστοιχα επίπεδα. Το σύνολο των αλγορίθμων διαχείρισης ασύρματων πόρων στον eNodeB εκμεταλλεύεται τις διάφορες λειτουργίες των επιπέδων 1 έως 3. Οι λειτουργίες του επιπέδου 3, όπως η διαχείριση της ποιότητας υπηρεσιών, ο έλεγχος αποδοχής και η ημιεπίμονη δρομολόγηση, χαρακτηρίζονται ως ημιδυναμικοί μηχανισμοί, αφού χρησιμοποιούνται κυρίως κατά τη δημιουργία νέων ροών δεδομένων. Οι αλγόριθμοι των επιπέδων 1 και 2 εκτελούνται δυναμικά, με πράξεις που γίνονται ανά διαστήματα χρόνου εκπομπής (Transmission Time Interval – TTI) του ενός ms.



**Σχήμα 4.1** Στοίβα πρωτοκόλλων σε επίπεδο χρήστη και επίπεδο ελέγχου

Ο διαχειριστής του Δείκτη Ποιότητας Καναλιού (Channel Quality Indicator – CQI) επεξεργάζεται τις εισερχόμενες αναφορές CQI αλλά και τα Sounding Reference Signals

(SRSs) από ενεργούς χρήστες του κελιού. Κάθε λαμβανόμενη αναφορά CQI και SRS χρησιμοποιείται από τον eNodeB για αποφάσεις δρομολόγησης και για σκοπούς προσαρμογής της σύνδεσης τόσο στην κατερχόμενη όσο και στην ανερχόμενη ζεύξη.

Ο οργανισμός 3GPP καθορίζει τη σηματοδότηση που συνδέεται με τους αλγόριθμους διαχείρισης ασύρματων πόρων αλλά και οι ίδιοι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο εξαρτώνται από τον πάροχο του εκάστοτε συστήματος και τον διαχειριστή του.  
(54), (55)

### **4.3 Παράμετροι Ελέγχου Αποδοχής και Ποιότητας Υπηρεσιών**

Ο αλγόριθμος Ελέγχου Αποδοχής του eNodeB αποφασίζει αν οι αιτήσεις για νέους φορείς μηνυμάτων Evolved Packet System (EPS) θα γίνουν δεκτές ή όχι. Ο Έλεγχος Αποδοχής, λαμβάνει υπόψη του την κατάσταση των πόρων στο κελί, τις απαιτήσεις για ποιότητα υπηρεσιών, τα επίπεδα προτεραιότητας καθώς και την ποιότητα υπηρεσιών που παρέχεται εκείνη τη στιγμή στις ενεργές συνδέσεις στο κελί με το ίδιο επίπεδο προτεραιότητας. Μια νέα αίτηση γίνεται δεκτή αν εκτιμηθεί ότι μπορούν να εκπληρωθούν οι απαιτήσεις της για ποιότητα υπηρεσιών ενώ ταυτόχρονα η ποιότητα υπηρεσιών των συνδέσεων που βρίσκονται σε εξέλιξη στο κελί, ίδιας η μεγαλύτερης προτεραιότητας, να παραμείνει σε αποδεκτά επίπεδα. Οι ακριβείς κανόνες για αποδοχή η όχι μιας αίτησης καθορίζονται από τον κατασκευαστή του eNodeB και όχι από την επιτροπή προτυποποίησης του 3GPP.

Κάθε φορέας σημάτων EPS στα LTE δίκτυα έχει ένα σεντ παραμέτρων σχετικών με την ποιότητα υπηρεσιών. Όλα τα πακέτα του ίδιου φορέα έχουν τις ίδιες απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσιών. Επίσης, οι παράμετροι αυτοί μπορούν να αλλάξουν δυναμικά, καθώς και να ενεργοποιηθεί ένας παράλληλος φορέας με σκοπό την παροχή υπηρεσιών διαφορετικής ποιότητας για διαφορετικές εφαρμογές. Ο νέος αυτός φορέας μπορεί να αρχικοποιηθεί είτε από τη συσκευή χρήστη είτε από δίκτυο κορμού.

Το προφίλ ποιότητας υπηρεσιών ενός φορέα EPS αποτελείται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- Διατήρηση κατανομής προτεραιότητας (allocation retention priority- ARP)
- Εγγυημένος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, και στις δύο ζεύξεις (Guaranteed bit rate – GBR)

- Αναγνωριστικό κλάσης ποιότητας υπηρεσιών (QoS class identifier – QCI)

Η παράμετρος ARP είναι ένας ακέραιος που παίρνει τιμές από 1 έως 16 και χρησιμοποιείται για την παραχώρηση προτεραιότητας κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων Ελέγχου Αποδοχής. Το QCI είναι ένας δείκτης σε ένα σετ λεπτομερέστερων παραμέτρων ποιότητας υπηρεσιών. Ένα παράδειγμα του QCI αλλά και των παραμέτρων που εμπεριέχει φαίνεται στο σχήμα 4.2.

QCI #	Priority	L2 packet delay budget	L2 packet loss rate	Example services
1 (GBR)	2	100 ms	$10^{-2}$	Conversational voice
2 (GBR)	4	150 ms	$10^{-3}$	Conversational video
3 (GBR)	5	300 ms	$10^{-6}$	Buffered streaming
4 (GBR)	3	50 ms	$10^{-3}$	Real-time gaming
5 (non-GBR)	1	100 ms	$10^{-6}$	IMS signaling
6 (non-GBR)	7	100 ms	$10^{-3}$	Live streaming
7 (non-GBR)	6	300 ms	$10^{-6}$	Buffered streaming, email,
8 (non-GBR)	8	300 ms	$10^{-6}$	browsing, file download,
9 (non-GBR)	9	300 ms	$10^{-6}$	file sharing, etc.

#### Σχήμα 4.2 Παράδειγμα του QCI αλλά και των παραμέτρων που εμπεριέχει

Μια άλλη παράμετρος ποιότητας υπηρεσιών λέγεται «ρυθμός μεταφοράς δεδομένων με προτεραιότητα» (prioritized bit rate – PBR) και ορίζεται για κάθε φορέα δεδομένων στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink). Ο PBR υπάρχει για να αποφεύγεται το φαινόμενο της έλλειψης εύρους ζώνης (bandwidth) που μπορεί να υπάρξει για μια συσκευή χρήστη που χρησιμοποιεί πολλαπλούς φορείς. Το πρωτόκολλο RRC ελέγχει τον ρυθμό μεταφοράς δεδομένων στην ανερχόμενη ζεύξη δίνοντας σε κάθε φορέα έναν αριθμό προτεραιότητας και ένα PBR. Ο PBR δεν σχετίζεται με την παράμετρο GBR. Η λειτουργία ελέγχου της ροής δεδομένων στην ανερχόμενη ζεύξη εξασφαλίζει ότι η συσκευή του χρήστη θα εξυπηρετεί τους φορείς σημάτων με την εξής σειρά :

- Όλοι οι φορείς με φθίνουσα σειρά προτεραιότητας και μετά ταξινομούνται με βάση το PBR τους
- Όλοι οι φορείς σε φθίνουσα σειρά προτεραιότητας κατανέμονται στους υπόλοιπους πόρους.

Όταν ο PBR τίθεται στο 0 για όλους τους φορείς το πρώτο βήμα παραλείπεται και η κατανομή των πόρων γίνεται με αυστηρή σειρά προτεραιότητας.

Το όλο σύστημα διασφάλισης της ποιότητας υπηρεσιών στα LTE δίκτυα έχει απλοποιηθεί σε σχέση με το WCDMA/HSPA όπου υπήρχαν πάνω από δέκα διαφορετικές παράμετροι σχετικές με την QoS. (56)

#### **4.4 Δυναμική δρομολόγηση και προσαρμογή σύνδεσης στην κατερχόμενη ζεύξη (Downlink)**

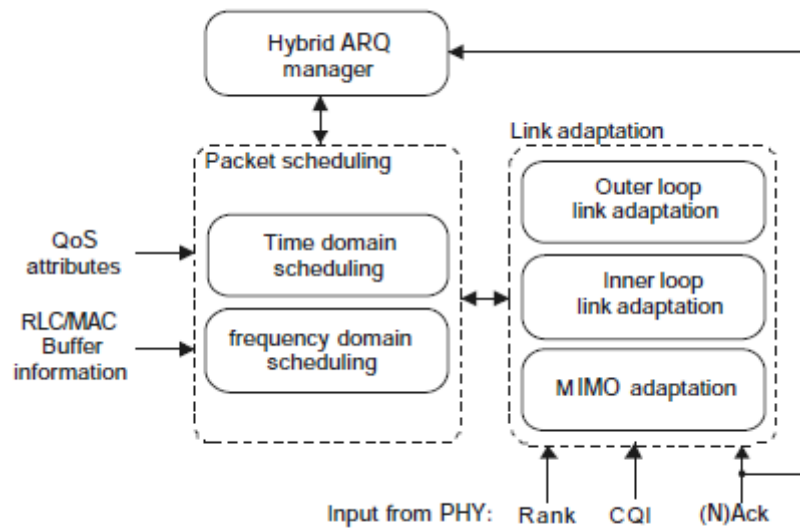
Η δυναμική δρομολόγηση και η προσαρμογή σύνδεσης είναι πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά που εξασφαλίζουν την υψηλή φασματική απόδοση ενώ παρέχουν την απαραίτητη ποιότητα υπηρεσιών στο κελί. Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούμε στο γενικό πλαίσιο αλλά και σε συγκεκριμένους αλγόριθμους και εφαρμογές.

##### **4.4.1 Δρομολόγηση δεύτερου επιπέδου και πλαίσιο προσαρμογής σύνδεσης**

Η οντότητα που πραγματοποιεί τις λειτουργίες RRM στο επίπεδο 2 είναι ο δυναμικός δρομολογητής πακέτων, ο οποίος λαμβάνει τις αποφάσεις δρομολόγησης, παραχωρώντας μπλοκ φυσικών πόρων (Physical Resource Blocks – PRB) στους χρήστες, καθώς και παραμέτρους μετάδοσης συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης. Ο απώτερος στόχος του δρομολογητή των πακέτων είναι να μεγιστοποιήσει την χωρητικότητα του κελιού ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει την κατώτερη αποδεκτή ποιότητα υπηρεσιών. Κάθε ενεργός χρήστης με έναν φορέα σημάτων EPS έχει τουλάχιστον δύο ροές δεδομένων στο επίπεδο 2. Παρόλα αυτά, οι αποφάσεις δρομολόγησης γίνονται με βάση τον χρήστη. Οι δύο ροές δεδομένων που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι μία για το πρωτόκολλο RRC και μία για τους φορείς σημάτων EPS. Κάθε ροή δεδομένων χαρακτηρίζεται μοναδικά με ένα πεδίο των 5 bit που ονομάζεται Λογική Αναγνώριση Καναλιού (Logical Channel Identification – LCID).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3 ο δρομολογητής πακέτων αλληλεπιδρά με τον διαχειριστή HARQ αφού αυτός είναι υπεύθυνος για τη δρομολόγηση των αναμεταδόσεων. Για την κατερχόμενη ζεύξη υποστηρίζεται ασύγχρονο προσαρμοζόμενο HARQ με 8 stop & wait κανάλια για κάθε κωδικολέξη, έχοντας έτσι την ευελιξία να δρομολογεί δυναμικά τις αναμεταδόσεις HARQ που απομένουν. Σε κάθε TTI ο δρομολογητής πακέτων θα πρέπει να αποφασίσει αν θα στείλει μια καινούρια μετάδοση ή μια αναμετάδοση HARQ. Η «προσαρμογή σύνδεσης» παρέχει στον δρομολογητή

πακέτων πληροφορίες για τα υποστηριζόμενα μοντέλα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ανάλογα με το επιλεγμένο σετ PRB.



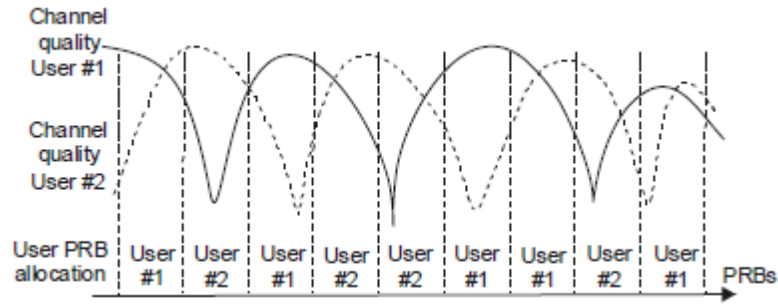
**Σχήμα 4.3 Λειτουργία και διασυνδέσεις του δυναμικού χρονοπρογραμματιστή πακέτων**

Η «προσαρμογή σύνδεσης» βασίζεται στις αποφάσεις της σε πληροφορίες ανατροφοδότησης από το QCI που προέρχονται από χρήστες στο κελί. (57)

#### 4.4.2 Δρομολόγηση πακέτων στο πεδίο της συχνότητας

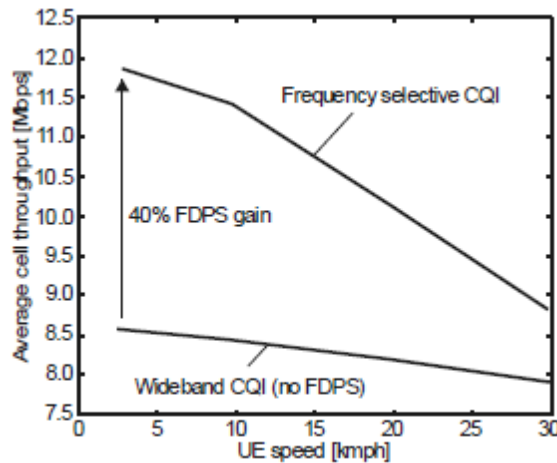
Η δρομολόγηση πακέτων στο πεδίο της συχνότητας (Frequency Domain Packet Scheduling – FDPS) είναι μια ισχυρή τεχνική για βελτίωση της χωρητικότητας των δικτύων LTE. Η βασική αρχή της FDPS φαίνεται στο σχήμα 4.4. Η FDPS εκμεταλλεύεται τις διακυμάνσεις της έντασης που παρουσιάζονται ανάλογα με τη συχνότητα είτε στο επιθυμητό σήμα, είτε στις παρεμβολές, παραχωρώντας εύρος ζώνης σε χρήστες με υψηλή ποιότητα καναλιού. Μια προϋπόθεση για να επιτύχουμε αυξημένη απόδοση της FDPS είναι το πραγματικό εύρος ζώνης συνοχής του ασύρματου καναλιού να είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του συστήματος. Αυτό τυπικά ισοδυναμεί micro και macro κελιά με εύρος ζώνης συστήματος ίσο ή μεγαλύτερο των 5MHz





**Σχήμα 4.4 Η βασική αρχή της FDPS**

Ως παράδειγμα, στο σχήμα 4.5, βλέπουμε τα αποτελέσματα στην απόδοση ενός συστήματος macrocell σε σχέση με την ταχύτητα της συσκευής του χρήστη. Αυτά τα αποτελέσματα λαμβάνονται από ένα σύστημα με εύρος ζώνης 10MHz που χρησιμοποιεί μια κεραία εκπομπής και συσκευές χρηστών διπλής κεραίας με απόρριψη παρεμβολών, και όλες τις υποθέσεις που αποδεχόμαστε ότι ισχύουν και κατά την προσομοίωση 3GPP συστημάτων. Τα αποτελέσματα για απλό CQI ευρείας ζώνης αντιστοιχούν στις περιπτώσεις χωρίς FDPS, ενώ τα αποτελέσματα με CQI επιλεκτικής συχνότητας λαμβάνονται με αναλογικό FDPS. Παρατηρείται ότι το κέρδος της FDPS ανέρχεται στο 40% για μικρές και μεσαίες ταχύτητες της συσκευής χρήστη ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες το κέρδος μειώνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί το ασύρματο κανάλι δεν μπορεί να ανιχνευθεί ακριβώς λόγω καθυστερήσεων των αναφορών CQI στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink).



**Σχήμα 4.5 Αποτελέσματα στην απόδοση ενός συστήματος macrocell σε σχέση με την ταχύτητα της συσκευής του χρήστη**

Η δρομολόγηση στο πεδίο του χρόνου μπορεί επίσης να παρέχει ποικίλα κέρδη σε πολυχρηστικά συστήματα, όταν υπάρχει γρήγορη επίπεδη εξασθένιση συχνότητας. Τα κέρδη εξαρτώνται από το μέγεθος και την ταχύτητα της εξασθένισης. Όταν υπάρχει μεγάλη εξασθένιση ο δρομολογητής μπορεί πιο εύκολα να επιλέξει τον βέλτιστο χρήστη για μετάδοση. Έτσι, ο δρομολογητής στο πεδίο του χρόνου έχει λιγότερα οφέλη με:

- Πολλαπλές κινητές κεραιές, καθώς μειώνουν την εξασθένιση
- Πολλαπλές κεραιές στο σταθμό εκπομπής, καθώς έτσι μειώνεται επίσης η εξασθένιση
- Μεγάλο εύρος ζώνης, αφού μειώνεται η εξασθένιση λόγω των διαφορετικών συχνοτήτων
- Μεγάλη ταχύτητα κινητής συσκευής
- Διάδοση μέσω πολλαπλών μονοπατιών

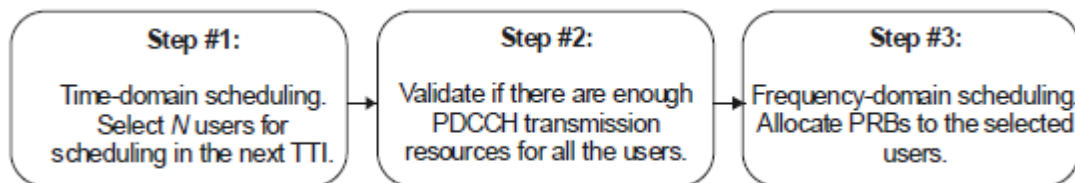
Τα οφέλη της δρομολόγησης στον τομέα του χρόνου στα δίκτυα LTE είναι σχετικά λίγα αφού οι πολλαπλές κεραιές είναι δεδομένες σε ένα σταθμό βάσης και επίσης επειδή τα δίκτυα LTE χρησιμοποιούν μεγάλο εύρος ζώνης.

Ακόμα και αν η φασματική απόδοση μεγιστοποιηθεί λόγω λειτουργίας με πλήρη επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων, το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει σε κατάσταση αμελητέου φορτίου αν υπάρχουν μόνο λίγα δεδομένα για μετάδοση στον eNodeB. Αν προκύψει τέτοια κατάσταση, τα προσωρινά αποθηκευμένα δεδομένα στον eNodeB μεταδίδονται μόνο μέσω των PRB που είναι απαραίτητα. Έτσι, σε καταστάσεις αμελητέου φορτίου ο δρομολογητής πακέτων διαλέγει τα PRB με την υψηλότερη ποιότητα καναλιού βασιζόμενος στις πληροφορίες ανατροφοδότησης από το CQI. Όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα 4.6, με ένα παράδειγμα δύο κελιών, αυτό επιτρέπει την συμπληρωματική κατανομή των PRB έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ των δύο κελιών. (58)

#### **4.4.3 Αλγόριθμοι συνδυασμένης δρομολόγησης στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας**

Στο σχήμα 4.7 φαίνεται η δρομολόγηση πακέτων σε τρία βήματα. Το πρώτο βήμα αποτελείται από τον αλγόριθμο δρομολόγησης στο πεδίο του χρόνου, ο οποίος επιλέγει μέχρι  $N$  χρήστες οι οποίοι είναι υποψήφιοι για μετάδοση στο επόμενο TTI. Σε αυτό το βήμα επιλέγονται χρήστες που έχουν δεδομένα προς μετάδοση και χρήστες που έχουν ρυθμιστεί για μετάδοση στο επόμενο TTI. Σε κάθε χρήστη δίνεται ένας αριθμός

προτεραιότητας. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος για να διαπιστωθεί αν υπάρχει αρκετή χωρητικότητα στο κανάλι ελέγχου έτσι ώστε να εξυπηρετηθούν όλοι οι χρήστες που έχουν επιλεγεί. Σε αυτή την περίπτωση, επιβάλλεται να ελεγχθεί αν υπάρχουν αρκετοί πόροι μετάδοσης για τα 3 πρώτα OFDM σύμβολα, έτσι ώστε να έχουμε αξιόπιστη μετάδοση μέσω του καναλιού ελέγχου κατερχόμενης ζεύξης (Physical Downlink Control Channel-PDCCH) για κάθε έναν από τους  $N$  χρήστες. Αν δεν πληρείται η παραπάνω προϋπόθεση τότε μόνο ένα υποσύνολο των  $N$  χρηστών προωθούνται στον δρομολογητή στο πεδίο της συχνότητας. Σε περιπτώσεις με συμφόρηση στο κανάλι ελέγχου οι χρήστες στους οποίους έχει παραχωρηθεί μικρότερη προτεραιότητα από τον δρομολογητή στο πεδίο του χρόνου μπλοκάρονται. Στο τελευταίο στάδιο ο δρομολογητής στο πεδίο της συχνότητας κατανέμει στους χρήστες τα διαθέσιμα PRB.

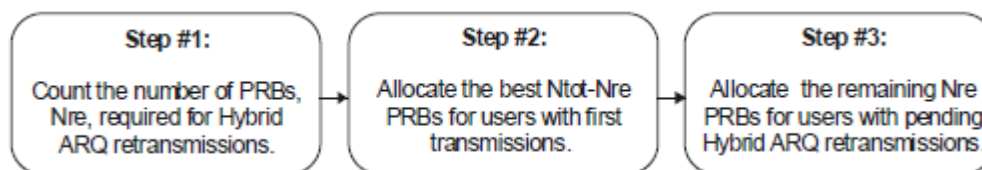


**Σχήμα 4.6 Δρομολόγηση πακέτων σε τρία βήματα**

Υποθέτοντας ότι ο προγραμματισμένος αριθμός χρηστών για μετάδοση ανά TTI είναι μικρότερος από τους χρήστες που μπορούν να εξυπηρετηθούν στο κελί, ο δρομολογητής στο πεδίο του χρόνου γίνεται το κύριο όργανο ελέγχου της QoS, ενώ ο δρομολογητής στο πεδίο της συχνότητας έχει ως στόχο να επωφεληθεί από τη διασπορά της συχνότητας στους πολλαπλούς χρήστες του κελιού. Αυτό σημαίνει ότι η γενική ιδέα της QoS από το HSDPA μπορεί να εφαρμοστεί στον δρομολογητή στο πεδίο του χρόνου των δικτύων LTE.

Όσον αφορά τον δρομολογητή στο πεδίο συχνοτήτων, αυτός κατανέμει τα PRB στους χρήστες που έχουν επιλεγεί για μετάδοση από τον δρομολογητή στο πεδίο του χρόνου. Ο στόχος είναι να κατανεμηθούν έτσι τα PRB στους χρήστες, ώστε να υπάρχει το μέγιστο κέρδος από το πολυχρηστικό FDPS. Τα PRB κατανέμονται τόσο σε χρήστες για νέες μεταδόσεις αλλά και για αναμεταδόσεις HARQ. Ωστόσο, δεν είναι δυνατόν ένας χρήστης να μεταδίδει ταυτόχρονα νέα δεδομένα αλλά και αναμεταδόσεις HARQ στο ίδιο TTI. Οι αναμεταδόσεις HARQ χρησιμοποιούν τον ίδιο αριθμό PRB με τις αρχικές μεταδόσεις. Λόγω της συνδυαστικής αύξησης της απολαβής των αναμεταδόσεων HARQ δεν είναι απαραίτητο αυτές να χρησιμοποιήσουν τα καλύτερα PRB. Έτσι, καταλήγουμε στο

πλαίσιο χρονοπρογραμματισμού στο πεδίο της συχνότητας που φαίνεται στο σχήμα 4.7. (59), (60), (61)



Σχήμα 4.7 Πλαίσιο δρομολόγησης στο πεδίο της συχνότητας

#### 4.4.4 Δρομολόγηση πακέτων με MIMO (Multiple Input – Multiple Output)

Η μετάδοση με πολλαπλές κεραίες (MIMO), με δύο κεραίες εκπομπής και δύο κεραίες λήψης μπορεί να χρησιμοποιήσει είτε ένα μπλοκ μεταφοράς είτε δύο ανεξάρτητα κωδικοποιημένα μπλοκ προς το χρήστη σε εικονικές ροές στα κατανεμημένα PRB. Τα κωδικοποιημένα μπλοκ μεταφοράς ονομάζονται επίσης και κωδικολέξεις. Η μετάδοση δύο ανεξάρτητα κωδικοποιημένων μπλοκ μεταφοράς απαιτεί ο βαθμός του καναλιού MIMO να είναι τουλάχιστον 2. Σε αυτή την περίπτωση οι πληροφορίες ανατροφοδότησης CQI από το χρήστη περιλαμβάνουν πληροφορίες που επιτρέπουν στη μονάδα προσαρμογής σύνδεσης του eNodeB να επιλέξει διαφορετικές μεθόδους διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για κάθε κωδικολέξη. Για κάθε κωδικολέξη στέλνονται ξεχωριστές επιβεβαιώσεις λήψης έτσι ώστε η προσαρμογή σύνδεσης και η HARQ για τις δυο ροές να ξεχωρίζουν. Ο eNodeB μπορεί να αλλάζει δυναμικά μεταξύ της μετάδοσης ενός ή δύο κωδικολέξεων ανάλογα με τις πληροφορίες ανατροφοδότησης από το CQI και το δείκτη του βαθμού του καναλιού του χρήστη.

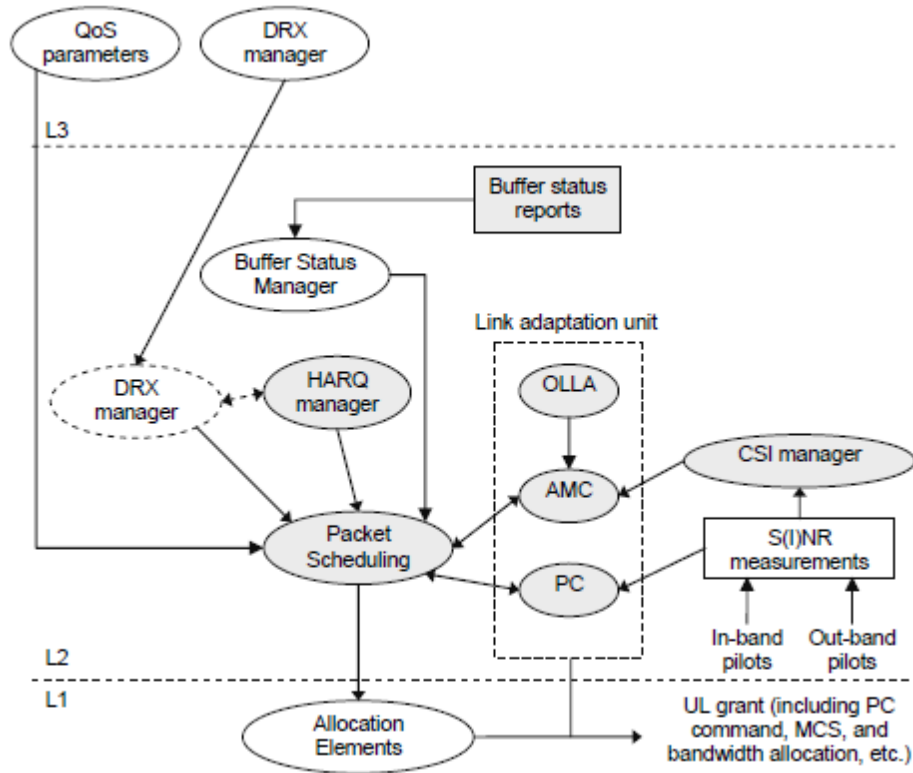
Επίσης το σύστημα LTE υποστηρίζει μετάδοση MIMO πολλαπλών χρηστών, όπου δύο χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν μέσω των ίδιων PRB, στέλνοντας από μία ξεχωριστή κωδικολέξη στον κάθε χρήστη χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο σετ από βάρη μετάδοσης της κεραίας. Για να λειτουργήσει όμως έτσι το σύστημα LTE υπάρχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην δρομολόγηση αφού πρέπει να επιλέγονται χρήστες με παρόμοια χαρακτηριστικά ασύρματου καναλιού. Έτσι, απαιτείται η χρήση περισσότερων σημάτων ελέγχου (PDCCH). (62)

#### 4.5 Δυναμική δρομολόγηση και προσαρμογή σύνδεσης στην ανερχόμενη ζεύξη (Uplink)

Μεταξύ των δρομολογητών πακέτων της κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης υπάρχουν κάποιες διαφορές, οι βασικότερες από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

- Ο eNodeB δεν γνωρίζει την ποσότητα των δεδομένων που είναι αποθηκευμένα στην συσκευή του χρήστη και πρέπει να μεταδοθούν.
- Στην ανερχόμενη ζεύξη είναι πιο πιθανό να υπάρχουν περιορισμοί ενέργειας λόγω των μικρών ποσοτήτων ενέργειας που διαθέτει η συσκευή του χρήστη
- Σε ένα χρήστη επιτρέπεται να κατανεμηθούν μόνο συνεχόμενα μπλοκ φυσικών πόρων λόγω της FDMA μετάδοσης μονού φορέα.
- Η ανερχόμενη ζεύξη χαρακτηρίζεται από μεγάλες διαφορές στην ένταση των παρεμβολών. Οι διαφορές αυτές είναι της τάξεως των 15 με 20 dB και καθιστούν δύσκολη την ακριβή στιγμιαία εκτίμηση των παρεμβολών για την ανερχόμενη ζεύξη.
- Στην ανερχόμενη ζεύξη υπάρχει μια καθυστέρηση μετάδοσης των 4ms λόγω της αποκωδικοποίησης PDCCH και του χρόνου επεξεργασίας στην συσκευή του χρήστη.

Μια γενική εικόνα των λειτουργικών μονάδων της διαχείρισης πόρων στην ανερχόμενη ζεύξη φαίνεται στο σχήμα 4.8. Οι πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού προέρχονται από τα μηνύματα σηματοδότησης SRS που μεταδίδονται από τη συσκευή του χρήστη και στα οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια. Ο κορμός της λειτουργίας διαχείρισης πόρων στο uplink είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ του δρομολογητή πακέτων και της μονάδας προσαρμογής σύνδεσης που περιλαμβάνει τον έλεγχο ισχύος (Power control – PC) και τις μονάδες προσαρμογής κωδικοποίησης και διαμόρφωσης (Adaptive modulation and coding – AMC) και προσαρμογής σύνδεσης εξωτερικού βρόγχου (Outer-Loop Link Adaptation – OLLA). Οι αναφορές για την κατάσταση της προσωρινής μνήμης αλλά και οι αιτήσεις για δρομολόγηση αποτελούν επίσης σημαντικό τμήμα του κορμού αυτού.



**Σχήμα 4.8 Γενική εικόνα των λειτουργικών μονάδων της διαχείρισης πόρων**

Η μονάδα προσαρμογής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης είναι υπεύθυνη για την παροχή πληροφοριών στον δρομολογητή πακέτων που αφορούν την κατάσταση του καναλιού ενός συγκεκριμένου χρήστη σε συνδυασμό με ένα συγκεκριμένο εύρος μετάδοσης. Επίσης, ο σκοπός της μονάδας ελέγχου ισχύος στα δίκτυα LTE είναι να περιορίσει τις παρεμβολές εντός του ίδιου κελιού ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται το ελάχιστο SINR (Signal to Interference-plus-Noise Ratio) με βάση τις απαιτήσεις για ποιότητα υπηρεσιών, το φορτίο του κελιού αλλά και τις ενεργειακές δυνατότητες της συσκευής του χρήστη. Ο ρόλος της OLLA είναι να εξισορροπεί τα λάθη στις πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού έτσι ώστε οι μονάδες PC και AMC να μπορούν να λειτουργήσουν σωστά. (63), (64)

#### **4.5.1 Μηνύματα σηματοδότησης για την υποστήριξη των λειτουργιών προσαρμογής σύνδεσης και δρομολόγησης πακέτων στην ανερχόμενη ζεύξη**

Η γρήγορη προσαρμογή σύνδεσης και η δρομολόγηση με βάση το κανάλι στην ανερχόμενη ζεύξη των δικτύων LTE βασίζεται στην διαθεσιμότητα των πληροφοριών που αφορούν την κατάσταση του καναλιού, οι οποίες βασίζονται στις μετρήσεις SRS.

Επιπλέον, αφού η προσωρινή μνήμη για το uplink βρίσκεται στην συσκευή του χρήστη, οι πληροφορίες για την κατάστασή της πρέπει να μεταδοθούν στη ζεύξη αυτή. Ακόμη, οι χρήστες χρειάζεται να αποστέλλουν πληροφορίες για τα περιθώρια ενέργειας που έχουν στον δρομολογητή πακέτων έτσι ώστε να γνωρίζουν πόσο κοντά λειτουργούν στην μέγιστη δυνατή ενέργεια. Στην ενότητα αυτή αναφέρονται θέματα που αφορούν τη σηματοδότηση από τη σκοπιά της διαχείρισης πόρων.

#### 4.5.1.1 Μηνύματα αναφοράς μετρήσεων (Sounding Reference Signals – SRS)

Οι παράμετροι των μηνυμάτων αναφοράς μετρήσεων έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ακρίβεια των μετρήσεων SRS και συνεπώς στην προσαρμογή σύνδεσης αλλά και στην δρομολόγηση πακέτων. Οι πιο σημαντικές παράμετροι μετρήσεων είναι οι παρακάτω:

- Εύρος Ζώνης SRS: δείχνει το εύρος ζώνης της μετάδοσης SRS. Η παράμετρος αυτή καθορίζεται ημι-στατικά από το πρωτόκολλο RRC.
- Περίοδος και χρονική μετάθεση SRS: δείχνει τον αριθμό του πλαισίου του συστήματος, αλλά και την περιοδικότητα των SRS μιας συσκευής. Η παράμετρος αυτή καθορίζεται επίσης από το RRC.
- Διάρκεια SRS: Δείχνει το χρονικό διάστημα για το οποίο μια συσκευή χρήστη θα πρέπει να συνεχίσει να μεταδίδει uplink SRS. Και αυτή η παράμετρος καθορίζεται από το RRC.
- Συνδυασμός μετάδοσης, δείκτης ευρετηρίου και κυκλική ολίσθηση αυτοσυσχέτισης σταθερού μηδενικού εύρους: Απαραίτητο για να εξασφαλισθεί η ορθογωνικότητα μεταξύ χρηστών που μεταδίδουν uplink SRS με το ίδιο εύρος μετάδοσης.
- Συχνότητα μεταπήδησης υποζώνης SRS: καθορίζει τη συχνότητα μεταπήδησης στην περίπτωση που το εύρος ζώνης SRS είναι πολύ μικρότερο από το συνολικό εύρος ζώνης για δρομολόγηση.

Σκοπός της διαχείρισης πόρων είναι η κατανομή των διαθέσιμων πόρων SRS στους ενεργούς χρήστες έτσι ώστε να είναι διαθέσιμες οι ενημερωμένες πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού.

#### 4.5.1.2 Αναφορές κατάστασης προσωρινής μνήμης (Buffer Status Reports – BSR)

Οι πληροφορίες για την κατάσταση της προσωρινής μνήμης της συσκευής του χρήστη στέλνονται στον δρομολογητή πακέτων της ανερχόμενης ζεύξης και περιέχουν πληροφορίες για τα προσωρινά αποθηκευμένα δεδομένα στη συσκευή. Τα δίκτυα LTE εισάγουν ένα νέο μηχανισμό ο οποίος επιτρέπει τον διαχωρισμό δεδομένων με διαφορετικές προτεραιότητες. Ο μηχανισμός αυτός λειτουργεί σε δύο φάσεις, αυτή της ενεργοποίησης και αυτή της αναφοράς.

##### **Φάση ενεργοποίησης**

Μια BSR ενεργοποιείται αν συμβεί ένα από τα παρακάτω γεγονότα :

- Άφιξη δεδομένων για αποστολή στην προσωρινή μνήμη της συσκευής του χρήστη που ανήκουν σε ένα γκρουπ με υψηλότερη προτεραιότητα από τα δεδομένα που υπάρχουν ήδη στην μνήμη. Αυτό καλύπτει και την περίπτωση που δεδομένα φτάνουν στην προσωρινή μνήμη όταν αυτή είναι άδεια.
- Κατανέμονται πόροι του uplink και ο αριθμός των bit προσαύξεσης είναι μεγαλύτερος από το BSR στοιχείο ελέγχου του MAC. Σε αυτή την περίπτωση η BSR αναφέρεται και ως BSR προσαύξεσης.
- Γίνεται αλλαγή του κελιού εξυπηρέτησης. Σε αυτή την περίπτωση η BSR αναφέρεται και ως κανονική BSR.
- Ο περιοδικός χρονομετρητής BSR λήγει. Σε αυτή την περίπτωση η BSR αναφέρεται και ως περιοδική BSR.

##### **Φάση αναφοράς**

Οι κύριοι μηχανισμοί αναφοράς κατάστασης της προσωρινής μνήμης στην ανερχόμενη ζεύξη των δικτύων LTE είναι η αίτηση δρομολόγησης (Scheduling Request – SR) και η αναφορά κατάστασης προσωρινής μνήμης (Buffer status report – BSR).

Η SR χρησιμοποιείται για να γίνει αίτηση για πόρους στο φυσικό διαμοιραζόμενο κανάλι του uplink (Physical Uplink Shared Channel – PUSCH) και μεταδίδεται όταν ένα γεγονός αναφοράς έχει ενεργοποιηθεί και δεν έχει δρομολογηθεί η συσκευή χρήστη στο



PUSCH στο συγκεκριμένο TTI. Η SR μπορεί να μεταβιβαστεί στην συσκευή του χρήστη με δύο τρόπους :

- Χρησιμοποιώντας μια BSR του ενός bit στο κανάλι φυσικού ελέγχου του uplink (Physical Uplink Control Channel – PUCCH).
- Χρησιμοποιώντας τη διαδικασία τυχαίας προσπέλασης. Η τυχαία προσπέλαση χρησιμοποιείται όταν δεν έχει γίνει κατανομή PUSCH αλλά ούτε υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι SR στο PUCCH.

Μια SR μεταδίδεται μόνο ως συνέπεια της ενεργοποίησης μιας κανονικής BSR.

Οι BSR μεταδίδονται χρησιμοποιώντας ένα στοιχείο ελέγχου του MAC όταν έχουν κατανεμηθεί στην συσκευή του χρήστη πόροι PUSCH στο συγκεκριμένο TTI και έχει ενεργοποιηθεί ένα γεγονός αναφοράς. Στην ουσία οι BSR μεταδίδονται ως MAC-C PDUs όπου χρησιμοποιείται μόνο η κεφαλίδα ενώ το πεδίο δεδομένων παραλείπεται και αντικαθίσταται με πληροφορίες για την κατάσταση της προσωρινής μνήμης.

Γενικά, η ιδέα και η τυποποίηση των BSR για την ανερχόμενη ζεύξη των UTRAN LTE έχει βασιστεί στους δύο παρακάτω παράγοντες :

- Χρειάζονται ξεχωριστές BSR για ροές δεδομένων με διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις QoS έτσι ώστε να υποστηριχθεί η κατανομή των ασύρματων πόρων με βάση την QoS.
- Οι επιπλέον πόροι που απαιτούνται για τις BSR πρέπει να ελαχιστοποιούνται, αφού επηρεάζουν άμεσα την χωρητικότητα της ανερχόμενης ζεύξης.

#### 4.5.1.3 Αναφορές για τους διαθέσιμους ενεργειακούς πόρους (Power Headroom Reports – PHR)

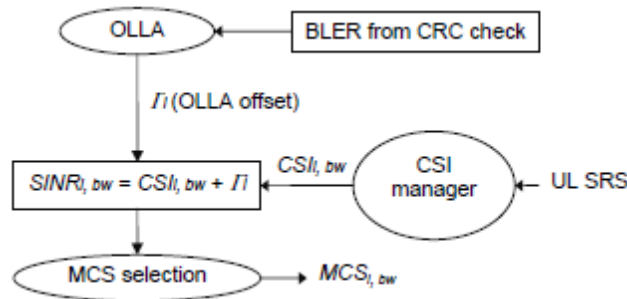
Οι πληροφορίες για την φασματική πυκνότητα ισχύος είναι σημαντικές για να λαμβάνονται σωστές αποφάσεις διαχείρισης πόρων στον eNodeB, ειδικά όταν αυτές αφορούν την κατανομή του εύρους μετάδοσης, τη διαμόρφωση και το σχήμα κωδικοποίησης. Η μη γνώση των παραμέτρων αυτών θα μπορούσε να οδηγήσει για παράδειγμα στην κατανομή πολύ υψηλού εύρους μετάδοσης σε μια συσκευή σε σχέση με τις ενεργειακές της δυνατότητες οδηγώντας έτσι σε χαμηλότερο SINR από αυτό που αναμενόταν. Οι πληροφορίες για τη φασματική πυκνότητα ενέργειας που χρησιμοποιείται στην συσκευή του χρήστη μπορούν να ληφθούν μέσω των PHR, δεδομένου ότι ο eNodeB γνωρίζει το αντίστοιχο εύρος μετάδοσης. Το περιθώριο ισχύος

υπολογίζεται από τη συσκευή του χρήστη ως η διαφορά μεταξύ της μέγιστης ενέργειας εκπομπής της συσκευής με την ονομαστική ενέργεια εκπομπής του PUSCH. Μια PHR ενεργοποιείται όταν:

- Ένας κατάλληλα ορισμένος χρονοδιακόπτης περιορισμού λήγει ή έχει λήξει και η απώλεια μονοπατιού έχει ξεπεράσει κάποιο προκαθορισμένο κατώτατο όριο. Ο χρονοδιακόπτης αυτός χρησιμοποιείται για να αποτρέψει την αχρείαστη εκπομπή PHR.
- Ένας κατάλληλα ορισμένος περιοδικός χρονοδιακόπτης λήγει.

#### 4.5.2 Προσαρμογή σύνδεσης στην ανερχόμενη ζεύξη

Η προσαρμογή σύνδεσης στην ανερχόμενη ζεύξη βασίζεται στις μετρήσεις SRS. Παρόμοια με το CQI στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) οι μετρήσεις SRS χρησιμοποιούνται από τον διαχειριστή κατάστασης του καναλιού για να καθοριστεί η κατάλληλη παραμετροποίηση, MCS (Modulation and Coding Scheme) για μετάδοση σε ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης. Επίσης οι μετρήσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον δρομολογητή στο πεδίο της συχνότητας του uplink όταν για παράδειγμα υπολογίζεται η προτεραιότητα ενός χρήστη με βάση ένα εύρος συχνοτήτων. Η λειτουργία της προσαρμογής σύνδεσης στην ανερχόμενη ζεύξη που βασίζεται σε γρήγορη προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση φαίνεται στο σχήμα 4.9 .



Σχήμα 4.9 Η λειτουργία της προσαρμογής σύνδεσης στην ανερχόμενη ζεύξη

#### 4.5.3 Δρομολόγηση πακέτων στην ανερχόμενη ζεύξη

Η κύρια ευθύνη του δρομολογητή πακέτων στην ανερχόμενη ζεύξη είναι να διαμοιράζει τους διαθέσιμους ασύρματους πόρους στους χρήστες λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς και τις απαιτήσεις που επιβάλλουν οι άλλες λειτουργίες διαχείρισης

ασύρματων πόρων. Μια λίστα των περιορισμών σε σχέση με την εκάστοτε λειτουργία φαίνεται παρακάτω :

- Δρομολόγηση πακέτων και λειτουργίες διακοπτόμενης αποστολής και λήψης DRX (Discontinuous Reception)/DTX (Discontinuous Transmission) : Οι χρήστες δεν μπορούν να δρομολογηθούν για συνεχή μετάδοση στο PUSCH εκτός αν λαμβάνουν τα κανάλια ελέγχου L1/L2.
- Δρομολογητής πακέτων και διαχείριση ενέργειας : Οι ενεργειακές δυνατότητες εκπομπής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν ο δρομολογητής κατανέμει το εύρος ζώνης της ανερχόμενης ζεύξης.
- Δρομολογητής πακέτων και QoS : Ο δρομολογητής πακέτων είναι υπεύθυνος για την τήρηση των απαιτήσεων για ποιότητα υπηρεσιών.
- Δρομολογητής πακέτων και BSRs : Οι χρήστες δεν μπορούν να δρομολογηθούν για μετάδοση εκτός αν έχουν δεδομένα προς μετάδοση. Επίσης η προτεραιότητα μεταξύ των χρηστών καθορίζεται με βάση τις πληροφορίες από τις BSR.
- Δρομολογητής πακέτων και HARQ : Στην ανερχόμενη ζεύξη των δικτύων LTE χρησιμοποιείται συγχρονισμένο HARQ. Έτσι, μια συσκευή χρήστη θα πρέπει να δρομολογείται για μετάδοση εάν μια προηγούμενη μετάδοση έχει αποτύχει.
- Δρομολογητής πακέτων και MIMO : MIMO πολλαπλών χρηστών μπορεί να χρησιμοποιηθεί και έτσι ο δρομολογητής πακέτων να διαθέσει του ίδιους πόρους συχνότητας σε δύο χρήστες. Για να γίνει αυτό δεν χρειάζονται επιπλέον μηνύματα σηματοδότησης.

Όπως και στην κατερχόμενη ζεύξη έτσι και στην ανερχόμενη ο δρομολογητής πακέτων χωρίζεται σε δύο υπομονάδες, έναν που λειτουργεί στο πεδίο του χρόνου και έναν που λειτουργεί στο πεδίο της συχνότητας. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο δρομολογητής στο πεδίο του χρόνου στο uplink θα πρέπει πάντα να δίνει προτεραιότητα σε χρήστες που έχουν αναμεταδόσεις εν αναμονή. (65), (66), (67)

#### **4.6 Διαχείριση ασύρματων πόρων σε δίκτυα Femtocell**

Πριν αναλύσουμε τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η διαχείριση πόρων των femtocells θα ήταν πολύ χρήσιμο να απαντήσουμε σε θέματα που αφορούν τη διάταξη, το σχεδιασμό και τις προβλεπόμενες εφαρμογές για την χρήση των femtocells οι οποίες θα

μας βοηθήσουν να καταλάβουμε ποια προβλήματα προκύπτουν σχετικά με τη διαχείριση πόρων. Στη συνέχεια θα δώσουμε προτάσεις – λύσεις για την αντιμετώπιση των προβλημάτων ανά περίπτωση.

#### **4.6.1 Εκτιμήσεις και σκέψεις για τον σχεδιασμό των Femtocells**

Για τα Femtocells υπάρχουν δύο πιθανά σενάρια εφαρμογής. Η πρώτη προσέγγιση είναι να κρατήσουμε ένα μέρος του φάσματος συχνοτήτων αποκλειστικά για τα Femtocells αφήνοντας το υπόλοιπο στο macro-δίκτυο. Αυτή η διάταξη είναι γνωστή και ως διάταξη αποκλειστικού καναλιού. Η δεύτερη προσέγγιση είναι να τοποθετήσουμε τα femtocells στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων με το macro-δίκτυο. Αυτή η διάταξη είναι γνωστή ως η ομοκαναλική διάταξη. Η πρώτη λύση έχει το πλεονέκτημα της απαλοιφής των παρεμβολών μεταξύ Femtocell και macrocell. Ωστόσο η λύση αυτή δεν είναι οικονομικά αποδοτική αφού το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων δεν είναι μόνο περιορισμένο, αλλά και ακριβό. Επίσης, αυτή η διάταξη μειώνει την αποδοτικότητα χρήσης του ραδιοφάσματος. Παρόλα αυτά είναι πιθανόν κάποιοι πάροχοι να καταφύγουν σε αυτή τη λύση εάν θέλουν να εξασφαλίσουν την μέγιστη χωρητικότητα των Femtocells χωρίς να μειωθεί η απόδοση του macro-δικτύου.

Το ίδιο όμως μπορεί να επιτευχθεί και με τη δεύτερη διάταξη η οποία είναι οικονομικά αποδοτικότερη και βελτιώνει την χρήση των φασματικών πόρων σε σχέση με τη διάταξη αποκλειστικού καναλιού. Ωστόσο, η χρήση της ομοκαναλικής διάταξης προκαλεί παρεμβολές μεταξύ macrocell και Femtocell και έτσι χρειάζεται προσεκτική σχεδίαση για να ελαχιστοποιηθούν ή και να εξαλειφθούν αυτά τα φαινόμενα. Οι επιλογές που υπάρχουν, τα προβλήματα που προκύπτουν καθώς και προτάσεις για τη λύση τους ανάλογα με την περίπτωση θα αναλυθούν στη συνέχεια με τη μορφή ερωτήσεων-προβλημάτων και απαντήσεων-λύσεων.

#### **4.6.2 Ποια είναι τα πιθανά σενάρια διάταξης;**

Τα σενάρια αυτά θα μπορούσαν να χωριστούν σε σενάρια σπιτιών και σενάρια επιχειρήσεων. Τα σενάρια σπιτιών θα μπορούσαν και αυτά να χωριστούν σε αστική διάταξη και σε διάταξη προαστίων. Στην αστική διάταξη μπορούμε να θεωρήσουμε έναν μεγάλο αριθμό διαμερισμάτων σε πολλούς ορόφους στο πυκνοκατοικημένο κέντρο μιας πόλης. Ένα τέτοιο σενάριο χαρακτηρίζεται από μικρή περιοχή κάλυψης με υψηλή πιθανότητα παρεμβολών από γειτονικά Femtocells. Τα άλλα δύο σενάρια

χαρακτηρίζονται από επαρκή απόσταση μεταξύ των femtocells όπως πχ τα οικήματα στα προάστια μιας πόλης αλλά και μεγαλύτερους εσωτερικούς χώρους. Συνεπώς η περιοχή κάλυψης σε αυτή την περίπτωση θα είναι μεγαλύτερη και οι παρεμβολές με άλλα Femtocells πολύ μικρότερες. Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω κάθε σενάριο απαιτεί διαφορετική προσέγγιση ως προς τη διαχείριση πόρων.

#### **4.6.3 Ποιες είναι οι προβλεπόμενες εφαρμογές στην χρήση των Femtocells και ποια θα είναι τα πρότυπα χρήσης τους;**

Η απάντηση σε αυτή την ερώτηση καθορίζεται κυρίως από την τοποθεσία. Για παράδειγμα οι χρήστες στο σπίτι είναι πιθανό να χρησιμοποιούν το οικιακό Femtocell νωρίς το πρωί πριν πάνε στη δουλειά και αργά το απόγευμα αφού γυρίσουν. Παρόμοια το εταιρικό Femtocell θα χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν οι χρήστες βρίσκονται στο χώρο εργασίας τους. Οι εφαρμογές που θα χρησιμοποιούνται είναι ποικίλες και εξαρτώνται από την τοποθεσία και το χρόνο. Για παράδειγμα, οι χρήστες στο γραφείο θα χρησιμοποιούν κυρίως υπηρεσίες φωνής αφού οι μεταφορές δεδομένων θα γίνονται κυρίως μέσω της ευρυζωνικής σύνδεσης της εταιρίας. Από την άλλη, οι οικιακοί χρήστες είναι πιθανόν να χρησιμοποιούν όλων των ειδών τις υπηρεσίες, από φωνή μέχρι video streaming ή πρόσβαση σε υπηρεσίες κοινωνικής δικτύωσης. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής θα πρέπει να διατίθενται στο χρήστη διαφορετικοί πόροι με διαφορετικά χρονοδιαγράμματα. Όταν για παράδειγμα ένας χρήστης χρησιμοποιεί υπηρεσίες FTP χρειάζεται αρκετούς πόρους για ένα μικρό χρονικό διάστημα ενώ κάποιος ο οποίος παρακολουθεί ένα video online απαιτεί έναν ελάχιστο αριθμό πόρων για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Τα παραπάνω θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαχείριση πόρων έτσι ώστε να υπάρχει κάποιο εύρος ζώνης διαθέσιμο για όλους τους χρήστες.

#### **4.6.4 Πώς να διανείμουμε τους πόρους έτσι ώστε να ικανοποιήσουμε τις απαιτήσεις των εφαρμογών;**

Όπως έχουμε δει σε προηγούμενο κεφάλαιο το φάσμα συχνοτήτων σε ένα LTE δίκτυο χωρίζεται σε κομμάτια, τα λεγόμενα RBs (Resource Blocks). Ένα ή περισσότερα RBs εκχωρούνται για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις μιας εφαρμογής ανάλογα με τη διαθεσιμότητα, του πόρους και τις πολιτικές του δικτύου.

Μια λύση θα ήταν να χρησιμοποιήσουμε σάρωση. Αυτό συνεπάγεται τη σάρωση ολόκληρου του φάσματος συχνοτήτων που μπορεί να χρησιμοποιήσει η συσκευή έτσι ώστε να αναγνωρίσουμε τις ενεργές μεταδόσεις και να μην χρησιμοποιήσουμε αυτές τις συχνότητες. Εάν η επιλογή κάποιων συχνοτήτων οδηγήσει σε παρεμβολές τότε η διαδικασία της σάρωσης θα πρέπει να επαναληφθεί για να μετακινηθούμε σε κάποια άλλη συχνότητα. Αυτή η απλή και πρακτική λύση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σενάρια όπου υπάρχουν ελάχιστες ή ανύπαρκτες διενέξεις για τους πόρους, όπως σε μια διάταξη προστασιών. Αυτό συμβαίνει γιατί σε τέτοιες περιπτώσεις, κάποιος πόρος, όταν ανακαλυφθεί είναι πολύ πιθανό να συνεχίσει να χρησιμοποιείται χωρίς διακοπή για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αντίθετα αυτή η λύση δεν είναι πρακτική σε περιπτώσεις με συχνές διενέξεις για τους πόρους. Σε αυτά τα σενάρια, η σάρωση όχι μόνο είναι μη αποδοτική αλλά καταναλώνει και αρκετό χρόνο. Μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις είτε μέχρι να βρεθεί κάποιος διαθέσιμος πόρος είτε κατά την αναζήτηση εναλλακτικών πόρων στην περίπτωση που υπάρχουν παρεμβολές. Επιπλέον, αν υπάρχουν συχνές αλλαγές στη συχνότητα λειτουργίας της συσκευής κατά τη διάρκεια χρήσης μιας εφαρμογής μπορεί να έχουμε μειωμένη απόδοση της εφαρμογής. Αυτό περιορίζει την δυνατότητα εφαρμογής αυτής της λύσης.

Ένα άλλο πρόβλημα με τη χρήση της μεθόδου της σάρωσης είναι το αν θα χρησιμοποιήσουμε ένα πομποδέκτη αποκλειστικά για τη σάρωση ή αν θα τον χρησιμοποιούμε και για σάρωση αλλά και για μεταφορά δεδομένων. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε το πλεονέκτημα ότι μπορούμε να καταγράψουμε τη χρήση του ραδιοφάσματος σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι χρήσιμο στη γρήγορη λήψη αποφάσεων για το πιο τμήμα του φάσματος θα χρησιμοποιήσουμε. Παρόλο που αυτή η προσέγγιση είναι τεχνικά ανώτερη μπορεί να μην είναι επιθυμητή από οικονομικής απόψεως αφού απαιτεί την ύπαρξη ενός επιπλέον πομποδέκτη στην συσκευή του χρήστη. Αντιθέτως, η δεύτερη προσέγγιση δεν εμπεριέχει επιπλέον κόστος αλλά περιορίζει τη λειτουργικότητα της συσκευής αφού δεν της επιτρέπει να κάνει ταυτόχρονα σάρωση αλλά και αποστολή και λήψη δεδομένων.

Μια άλλη απλή προσέγγιση είναι το Femtocell να εκχωρεί οποιοδήποτε διαθέσιμο RB. Στην περίπτωση που υπάρχουν προβλήματα παρεμβολών θα πρέπει να γίνει διαπραγμάτευση για τον πόρο με τη συσκευή η οποία παρεμβάλλεται με τη συσκευή του χρήστη. Μια τέτοια προσέγγιση θα μπορούσε να είναι γρήγορη και αποδοτική όταν υπάρχουν λίγες διενέξεις για τους πόρους, όπως σε αραιοκατοικημένες περιοχές ή όταν

υπάρχει μικρή κίνηση στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει γιατί εφόσον ένας πόρος έχει εκχωρηθεί δεν θα χρειάζεται συχνά επαναδιαπραγμάτευση. Ωστόσο σε πυκνοκατοικημένες περιοχές ή σε περιπτώσεις με αυξημένο όγκο δεδομένων στο δίκτυο είναι πιθανό να υπάρχουν ζητήματα παρεμβολών, για παράδειγμα όταν ίδια RBs εκχωρούνται από γειτονικά Femtocells με κάποια κοινή περιοχή κάλυψης. Σε μια τέτοια περίπτωση είναι απαραίτητη η διαπραγμάτευση για τους πόρους. Για να γίνει αυτό όμως πρέπει να επιλύσουμε τα παρακάτω ζητήματα :

- Πώς να επιβεβαιώσουμε ότι μια συσκευή χρήστη δέχεται παρεμβολές;
- Πώς να αναγνωρίσουμε ποια συσκευή παρεμβάλλεται στη συσκευή του χρήστη;
- Είναι τα γειτονικά Femtocells γνωστά; Εάν όχι πως θα τα ανιχνεύσουμε;
- Αφού εντοπιστούν πως θα ανταλλάξουμε πληροφορίες με τα γειτονικά femtocells έτσι ώστε να λύσουμε το πρόβλημα;

#### **4.6.5 Πώς να επιβεβαιώσουμε ότι μια συσκευή χρήστη δέχεται παρεμβολές;**

Τα ζητήματα παρεμβολών εξαρτώνται κυρίως από την τοπολογία. Η κίνηση της συσκευής του χρήστη ή η αλλαγή της θέσης του FAP εντός του δωματίου μπορεί να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τα επίπεδα παρεμβολών. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε το λόγο των παρεμβολών, όπως για παράδειγμα το ποιος προκαλεί τις παρεμβολές και το ποιος θα πρέπει να ειδοποιηθεί για το πρόβλημα. Η συσκευή του χρήστη που δέχεται τις παρεμβολές είναι πιθανό να μπορεί να εντοπίσει την συσκευή η οποία προκαλεί το πρόβλημα χρησιμοποιώντας ένα είδος χωρικής ποικιλομορφίας. Ωστόσο η τεχνική αυτή μπορεί να επηρεάζεται από τα πρότυπα κίνησης των δύο συσκευών και να μην μπορεί να λύσει το πρόβλημα. Η άλλη εναλλακτική είναι να χρησιμοποιήσουμε περιοδικές αναφορές μετρήσεων που στέλνονται από τη συσκευή του χρήστη στο FAP. Βασίζόμενο σε αυτές τις αναφορές το FAP θα μπορούσε να αποφασίσει αν η συσκευή του χρήστη δέχεται ή όχι παρεμβολές.

#### **4.6.6 Πώς να αναγνωρίσουμε ποια συσκευή παρεμβάλλεται στη συσκευή του χρήστη;**

Είναι ξεκάθαρο ότι τα γειτονικά Femtocells που έχουν εκχωρήσει ίδια RBs όπως αυτά που έχουν εκχωρηθεί στην συσκευή του χρήστη και βρίσκονται εντός της ακτίνας εκπομπής της συσκευής είναι υπεύθυνα για τις παρεμβολές. Ωστόσο τα ίδια RBs μπορεί να έχουν εκχωρηθεί σε κάποια συσκευή και από eNodeBs του macro-δικτύου. Παρόλο που είναι αδύνατο να προσδιορίσουμε τη πηγή των παρεμβολών είναι δυνατό να

περιορίσουμε τη λίστα των πιθανών υπευθύνων χρησιμοποιώντας τη λίστα των αναγνωρισμένων γειτόνων. Οποιαδήποτε δράση που θα οδηγούσε σε μείωση των παρεμβολών θα απαιτούσε κάποιο είδος συνεργασίας με τους υπεύθυνους γείτονες. Αυτό συνεπάγεται την αναγνώριση των γειτονικών Femtocells. Στη συνέχεια θα πρέπει να αρχίσει η επικοινωνία με αυτά τα Femtocells για να επιλυθεί το πρόβλημα. Η λίστα των γειτονικών Femtocells είναι δυνατόν να εισάγεται ως παράμετρος σε κάθε FAP κατά τη διάρκεια της πρώτης ρύθμισής του από το κεντρικό σύστημα διαχείρισης δικτύου του εκάστοτε παρόχου. Εναλλακτικά η λίστα αυτή θα μπορούσε να συμπληρώνεται ανακαλύπτοντας δυναμικά τα γειτονικά Femtocells.

Μηχανισμοί όπως το κανάλι αντιληπτικής οδήγησης (Cognitive pilot channel – CPC) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναγνωρίσουν τους πιθανούς παρεμβολείς και επίσης να παρέχουν πληροφορίες για τις κατειλημμένες συχνότητες. Το CPC είναι μια γενική ιδέα ενός καναλιού ελέγχου μέσω του οποίου θα μπορούν να λαμβάνονται πληροφορίες για γειτονικούς πομπούς. Το CPC θα παρέχει πληροφορίες για τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή αλλά και τις τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης που τις χρησιμοποιούν. Επίσης θα μπορούσε να παρέχει πληροφορίες για τους παρόχους που χρησιμοποιούν τις συχνότητες επιτρέποντας handover σε οριζόντιο επίπεδο ή ακόμα και ανταλλαγές περιοχών συχνοτήτων. Συνεπώς οι πληροφορίες αυτές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από τα Femtocells για να σχεδιάσουν το διαμοιρασμό συχνοτήτων έτσι ώστε να αποφύγουν την πρόκληση παρεμβολών σε άλλους χρήστες αλλά και να αποφύγουν να δεχτούν παρεμβολές από τα γειτονικά δίκτυα. (68), (69)

#### **4.6.7 Πώς να διαπραγματευτούμε τους πόρους έτσι ώστε να μειώσουμε και να αποφύγουμε τις παρεμβολές;**

Αφού αναγνωριστούν οι γείτονες, το επόμενο βήμα είναι η συνεργασία μαζί τους για την επίλυση των ζητημάτων παρεμβολών. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε τέσσερις τρόπους με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί αυτή η συνεργασία.

##### **4.6.7.1 Προσέγγιση 1<sup>η</sup>, έλεγχος της ισχύος εκπομπής**

Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει την προσαρμογή της ισχύος εκπομπής με βάση τη συνεργασία. Αφού αναγνωριστεί ο γείτονας που είναι υπεύθυνος για τις παρεμβολές, η συσκευή που δέχεται τις παρεμβολές θα μπορούσε να διαπραγματευτεί για την ισχύ



εκπομπής με αυτό τον γείτονα. Αν και οι δύο πλευρές μειώσουν την ισχύ εκπομπής τους τότε το πρόβλημα μπορεί να λυθεί θυσιάζοντας την ακτίνα εκπομπής. Αυτό όμως μπορεί να μην είναι μια επιθυμητή λύση καθώς μετά ίσως θα χρειάζεται οι συσκευές να μετακινηθούν κοντά στα FAPs για να έχουν επαρκή κάλυψη. Ωστόσο αυτό μπορεί να αποτελέσει την τελευταία λύση σε περιπτώσεις μεγάλης συγκέντρωσης συσκευών έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του δικτύου ακόμα και με μικρότερη ακτίνα εκπομπής. Για να λειτουργήσει όμως αυτή η μέθοδος απαιτείται συνεργασία μεταξύ των δυο συσκευών. Αν μειώσει μόνο η μια την ισχύ εκπομπής της τότε θα παρουσιαστεί σημαντική μείωση στην απόδοση της χωρίς να έχουν λυθεί τα ζητήματα παρεμβολών.

#### 4.6.7.2 Προσέγγιση 2<sup>η</sup>, Τυχαία χρήση συχνοτήτων

Αυτή είναι μια από τις λύσεις που υποστηρίζεται και από τα δίκτυα LTE. Φάσμα συχνοτήτων του παρόχου διαιρείται σε έναν ορισμένο αριθμό RBs. Αν η εκχώρηση κάποιων RBs για να εξυπηρετηθούν οι απαιτήσεις κάποιας εφαρμογής οδηγήσει σε κακή απόδοση η οποία φαίνεται από τις περιοδικές αναφορές της συσκευής του χρήστη στο FAP, το FAP μπορεί τυχαία να επανεκχωρήσει κάποια άλλα RBs στη συσκευή. Αν κανένα από τα γειτονικά Femtocells δεν χρησιμοποιεί τα νέα εκχωρημένα RBs τότε το πρόβλημα παρεμβολών θα λυθεί. Αυτή η λύση είναι εφικτή σε περιπτώσεις με μικρά επίπεδα κίνησης, ή σε αραιές διατάξεις αφού σε αυτές τις περιπτώσεις η ύπαρξη διαθέσιμων ελεύθερων πόρων είναι μεγάλη. Αντίθετα, σε πυκνές διατάξεις ή σε περιπτώσεις με αυξημένη κίνηση στο δίκτυο η επιλογή μιας τέτοιας λύσης μπορεί να προκαλέσει αστάθειες. Για παράδειγμα ένα FAP μπορεί απλά να μεταβαίνει από ένα σετ συχνοτήτων σε ένα άλλο και απλά να διαπιστώνει ότι και αυτό είναι κατειλημμένο από κάποιο γειτονικό Femtocell οδηγώντας έτσι σε μια ασταθή κατάσταση. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι καταλληλότερο να χρησιμοποιούνται λύσεις με βάση τη συνεργασία.

#### 4.6.7.3 Προσέγγιση 3<sup>η</sup>, Εκχώρηση πόρων βασισμένη σε αναγωγή

Σε αυτή την προσέγγιση το δίκτυο Femtocell προσπαθεί να απομνημονεύσει τα πρότυπα χρήσης των πόρων και να συγχρονίζεται με βάση αυτά εκμεταλλευόμενο τους ελεύθερους πόρους. Είναι ξεκάθαρο ότι μια τέτοια λύση θα δούλευε μόνο σε περιπτώσεις που η κίνηση μπορεί να προβλεφθεί, κάτι που δεν συναντάμε συχνά στην πραγματικότητα. Επιπλέον, ο συγχρονισμός δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί σε ένα

κατανεμημένο περιβάλλον. Αυτές είναι οι δυσκολίες που περιορίζουν την εφαρμογή αυτής της λύσης.

#### 4.6.7.4 Προσέγγιση 4<sup>η</sup>, Συνεργατική διαπραγμάτευση πόρων

Σε αυτή την προσέγγιση γίνονται διαπραγματεύσεις με τους γείτονες για την συχνότητα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί είτε με τρόπο κεντρικό είτε με κατανεμημένο. Ένας απλός τρόπος εφαρμογής είναι να έχουμε μια κεντρική οντότητα που να συντονίζει τη διαχείριση πόρων. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι είναι απλή και ο πάροχος διατηρεί τον έλεγχο. Ωστόσο, μια κεντρική οντότητα δεν θα μπορούσε να ανταπεξέλθει στη διαχείριση πόρων εκατοντάδων ή και χιλιάδων Femtocells. Κάτι τέτοιο όχι μόνο θα οδηγούσε σε κλιμακούμενα προβλήματα αλλά θα επέφερε και σημαντικές καθυστερήσεις στη λήψη αποφάσεων διαχείρισης πόρων που αφορούν τα Femtocells. Μια κατανεμημένη προσέγγιση από την άλλη πλευρά, είναι πιο γρήγορη και ακριβής όταν λαμβάνονται τοπικές αποφάσεις. Αυτό όμως έχει αυξημένη πολυπλοκότητα και ο πάροχος χάνει κάποιο βαθμό ελέγχου. Επίσης, αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σταθερότητας αφού είναι δύσκολο να αποδείξουμε ότι εφαρμόζοντας την προτεινόμενη λύση οι συσκευές θα συμπεριφέρονται πάντα με ένα προβλεπόμενο τρόπο. Μια τέτοια περίπτωση θα είχαμε αν για παράδειγμα όλοι οι κόμβοι που δέχονται παρεμβολές άλλαζαν συχνότητα ταυτόχρονα. Τότε, το πρόβλημα δεν θα λυνόταν και μπορεί να γινόταν πολυπλοκότερο.

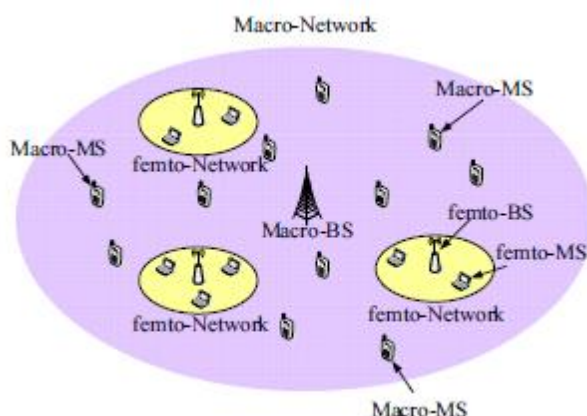
Κάποια υβριδική λύση που θα συνδύαζε τις δυο παραπάνω θα γεφύρωνε το κενό μεταξύ τους. Ένα κατανεμημένο σύστημα για το διαμοιρασμό τοπικών πληροφοριών και μια τοπικά κεντρική οντότητα για τη λήψη αποφάσεων θα ήταν μια αρκετά καλή εναλλακτική λύση. Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και στα δίκτυα LTE με μεγάλη αποτελεσματικότητα. Επίσης μια άλλη λύση θα ήταν να υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των FAPs διαμέσου του ενσύρματου δικτύου. Κάτι τέτοιο βέβαια απαιτεί την ύπαρξη ενός ενσύρματου IP δικτύου το οποίο να προσφέρει αξιόπιστη και με γρήγορη απόκριση επικοινωνία καθώς είναι πιθανό να χρειαστεί να ανταλλάξουμε πληροφορίες και να φτάσουμε σε μια απόφαση διαχείρισης πόρων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα αναφερθούμε σε έναν αλγόριθμο ο οποίος υλοποιεί κάποιες από τις λειτουργίες που έχουν αναφερθεί παραπάνω. (70)

#### 4.6.8 Περιγραφή του Αλγορίθμου Αντίληψης (Cognitive Radio Resource Management – CRRM)

Ο CRRM είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος επιτρέπει στο femto-δίκτυο να ‘διαβάζει’ περιοδικά τα ασύρματα κανάλια και να εκτιμά τη χρήση των ασύρματων πόρων από το macro-δίκτυο.

Το μοντέλο του συστήματος στο οποίο θα αναφερθούμε φαίνεται στο σχήμα 4.10. Το δίκτυο αποτελείται από πολλά femto-δίκτυα, τα οποία λειτουργούν μέσα στην ακτίνα κάλυψης ενός macro-δικτύου. Κάθε femto-δίκτυο αποτελείται από ένα σταθμό βάσης (femto-BS) και πολλούς κινητούς σταθμούς (femto-MS). Το macro-δίκτυο αποτελείται αντίστοιχα από έναν σταθμό βάσης (Macro-BS) και πολλούς κινητούς σταθμούς (Macro-MS). Και τα δύο δίκτυα χρησιμοποιούν την τεχνολογία OFDMA και μοιράζονται το ίδιο φάσμα συχνοτήτων.



Σχήμα 4.10 Μοντέλο συστήματος LTE με macrocell και femtocell

Τα βήματα του αλγορίθμου CRRM είναι τα εξής:

- Ο femto-BS ‘διαβάζει’ το κανάλι για να αναγνωρίσει ποια μπλοκ πόρων είναι κατειλημμένα από το macro-δίκτυο. Η περίοδος ‘διαβάσματος’ διαρκεί  $T$  frames και το διάβασμα κάθε καναλιού απαιτεί 1 frame. Ένα frame αναφέρεται και ως frame διαβάσματος αν ο femto-BS εκτελεί διάβασμα του καναλιού στο συγκεκριμένο frame. Αλλιώς το frame αναφέρεται ως frame δεδομένων.
- Ο femto-BS διαβάζει την λαμβανόμενη ισχύ των παρεμβολών από το macro-δίκτυο σε κάθε μπλοκ πόρων κατά τη διάρκεια του frame διαβάσματος

- Αν η λαμβανόμενη ισχύς παρεμβολών ενός μπλοκ πόρων ξεπερνά ένα προκαθορισμένο όριο τότε το μπλοκ αυτό θεωρείται κατειλημμένο από το macro-δίκτυο.
- Σε διαφορετική περίπτωση το μπλοκ πόρων χαρακτηρίζεται ως μη κατειλημμένο.
- Στα ακόλουθα frame δεδομένων ο femto-BS κατανέμει στους femto-MS μόνο πόρους που έχουν χαρακτηριστεί ως μη κατειλημμένοι.
- Επίσης, κατά το διάβασμα του καναλιού ο femto-BS λαμβάνει και τις ακόλουθες πληροφορίες: το φορτίο κίνησης του macro-δικτύου, τη συσχτισμένη πιθανότητα κατανομής ασύρματων πόρων και το ποσοστό συσχτισμένης κατανομής ασύρματων πόρων.

Όσον αφορά την περίοδο  $T$  του πρώτου βήματος του αλγορίθμου, όσο πιο μικρή είναι αυτή τόσο περισσότεροι πόροι απαιτούνται για το διάβασμα του καναλιού αλλά ταυτόχρονα μειώνεται και η πιθανότητα να καταλείψει ο femto-BS σε ένα femto-MS κατειλημμένους πόρους. Όταν η περίοδος  $T$  μεγαλώνει συμβαίνει το αντίστροφο.

Για τις παραμέτρους του τελευταίου βήματος του αλγορίθμου ισχύουν τα παρακάτω :

- Η συσχτισμένη πιθανότητα κατανομής ασύρματων πόρων είναι η πιθανότητα  $n$  να είναι κατειλημμένο ένα μπλοκ δεδομένων εάν αυτό ήταν κατειλημμένο στο προηγούμενο frame.
- Το ποσοστό συσχτισμένης κατανομής ασύρματων πόρων είναι το πηλίκο των πόρων που έχουν μη μηδενική συσχτισμένη πιθανότητα  $n$  προς το συνολικό αριθμό των μπλοκ πόρων σε ένα frame. Οι παράμετροι αυτοί βοηθούν στο να έχουμε μια καλύτερη εικόνα για τη χρήση των ασύρματων πόρων στο macro-δίκτυο. (71)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Βιβλιογραφία

1. <http://www.3gpp.org/LTE>.
2. [http://en.wikipedia.org/wiki/3GPP\\_Long\\_Term\\_Evolution](http://en.wikipedia.org/wiki/3GPP_Long_Term_Evolution).
3. Holma, Toskala - *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access (04-2009)*.
4. A Multiple Content Variant Extension of the Multimedia Broadcast/Multicast Service  
George Xylomenos and Konstantinos Katsaros fxgeorge,ntinosg@aueb.gr.
5. [http://en.wikipedia.org/wiki/Network\\_switching\\_subsystem#Home\\_location\\_register\\_.28HLR.29](http://en.wikipedia.org/wiki/Network_switching_subsystem#Home_location_register_.28HLR.29)
6. [http://en.wikipedia.org/wiki/GGSN#Gateway\\_GPRS\\_Support\\_Node\\_.28GGSN.29](http://en.wikipedia.org/wiki/GGSN#Gateway_GPRS_Support_Node_.28GGSN.29).
7. [http://en.wikipedia.org/wiki/SGSN#Serving\\_GPRS\\_Support\\_Node\\_.28SGSN.29](http://en.wikipedia.org/wiki/SGSN#Serving_GPRS_Support_Node_.28SGSN.29).
8. Holma, Toskala - *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access (04-2009)*.
9. 3GPP TS 29.272, 'MME Related Interfaces Based on Diameter Protocol (Release 8)'.
10. 3GPP TS 33.401, 'Security Architecture (Release 8)'.
11. 3GPP TS 23.401, 'General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (Release 8)'.
12. Holma, Toskala - *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access (04-2009)*.
13. LTE-SAE architecture and performance Per Beming, Lars Frid, Göran Hall, Peter Malm, Thomas Noren, Magnus Olsson and Göran Rune.
14. 3GPP TS 29.274, 'Evolved GPRS Tunnelling Protocol (eGTP) for EPS (Release 8)'.
15. 3GPP TS 29.275, 'PMIP based Mobility and Tunnelling protocols (Release 8)'.
16. M. Poikselkä et al., 'The IMS: IP Multimedia Concepts and Services', 2nd edition, Wiley, 2006.//HSS,PCRF.
17. John Wiley & Sons] *Evolved Packet System (EPS) - The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS (Mar 2008) - Lescuyer & Lucidarme*.
18. John Wiley & Sons] *Evolved Packet System (EPS) - The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS (Mar 2008) - Lescuyer & Lucidarme*.
19. 3GPP TS 33.401, 'Security Architecture (Release 8)'.
20. <http://www.volubill.com/rep-solutions/rub-pcrf.html>.
21. 3GPP TS 23.203, 'Policy and charging control architecture (Release 8)'.

22. LTE, The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice (02-2009).
23. <http://en.wikipedia.org/wiki/>.
24. Holma, Toskala - LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access (04-2009).
25. LTE for 4G Mobile Broadband.
26. 3GPP TS 29.275, 'PMIP based Mobility and Tunnelling protocols (Release 8)'.
27. 3GPP TS 36.413, 'Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); S1 Application Protocol (S1AP) (Release 8)'.
28. [http://en.wikipedia.org/wiki/Radio\\_Resource\\_Control](http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_Resource_Control).
29. <http://wiki.hsc.com/wiki/Main/LTERRC>.
30. 3GPP Technical Specification, TS 36.323, 'Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification'.
31. <http://www.javvin.com/wireless/RLC.html>.
32. <http://www.eventhelix.com/lte/presentations/3GPP-LTE-RLC.pdf>.
33. 3GPP Technical Specification, TS 36.321, 'Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification'.
34. Holma, Toskala - LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access (04-2009).
35. [http://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal\\_frequency-division\\_multiple\\_access](http://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiple_access).
36. <http://www.semitechsemi.com/technology/technologies/ofdma.html>.
37. Holma, Toskala - LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access (04-2009).
38. <http://en.wikipedia.org/wiki/SC-FDMA>.
39. [http://www.ixiacom.com/pdfs/library/white\\_papers/SC-FDMA-INDD.pdf](http://www.ixiacom.com/pdfs/library/white_papers/SC-FDMA-INDD.pdf).
40. Myung, H.G., Goodman, D.J., 'Single Carrier FDMA: A New Air Interface for Long Term Evolution', Wiley,2008.
41. 3GPP TS 36.423, 'Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 Application Protocol (X2AP) (Release 8)'.
42. LTE, The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice (02-2009).
43. 3GPP Technical Specification, TS 36.423, 'X2 application protocol (XSAP)', Version 8.3.0, September 2008.
44. [www.femtoforum.org](http://www.femtoforum.org).
45. <http://www.thinkfemtocell.com/>.

46. IEEE communications Magazine January 2010, Vol 48, No1.
47. Mobility Management Schemes at Radio Network Layer for LTE Femtocells Lan Wang, Yongsheng Zhang, Zhenrong Wei DOCOMO Beijing Communications Laboratories Co. Ltd., Beijing, China.
48. ABI research, “Femtocell Access Points, Fixed-Mobile Convergence for Residential, SMB, and Enterprise Markets”, research report, 2007.
49. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Overall description; Stage 2 (Release 9).
50. <http://www.radio-electronics.com/info/cellular telecomms/femtocells/femto-cells-security.php>.
51. <http://www.radio-electronics.com/info/cellular telecomms/femtocells/femto-cells-health-issues.php>.
52. <http://www.radio-electronics.com/info/cellular telecomms/femtocells/femto-cells-tutorial-basics.php>.
53. <http://www.radio-electronics.com/info/cellular telecomms/femtocells/femto-cells-interference.php>.
54. D. Niyato, E. Hossain, ‘Connection Admission Control Algorithms for OFDM Wireless Networks’, *IEEE Proc. Globecom*, pp. 2455–2459, September 2005.
55. P. Hosein, ‘A Class-Based Admission Control Algorithm for Shared Wireless Channels Supporting QoS Services’, in Proceedings of the Fifth IFIP TC6 International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks, Singapore, October 2003.
56. Holma, Toskala - *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access (04-2009)*.
57. 3GPP 36.300 ‘Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 8)’, October 2007.
58. A. Pokhariyal, et al., ‘HARQ Aware Frequency Domain Packet Scheduler with Different Degrees of Fairness for the UTRAN Long Term Evolution’, *IEEE Proc. Vehicular Technology Conference*, pp. 2761–2765, April 2007.
59. G. Monghal, et al., ‘QoS Oriented Time and Frequency Domain Packet Schedulers for The UTRAN Long Term Evolution’, in *IEEE Proc. VTC-2008 Spring*, May 2008.

60. A. Simonsson, 'Frequency Reuse and Intercell Interference Co-ordination in E-UTRA', IEEE Proc. Vehicular Technology Conference, pp. 3091–3095, April 2007.
61. A. Pokhariyal, et al., 'HARQ Aware Frequency Domain Packet Scheduler with Different Degrees of Fairness for the UTRAN Long Term Evolution', IEEE Proc. Vehicular Technology Conference, pp. 2761–2765, April 2007.
62. H. Yang, 'A Road to Future Broadband Wireless Access: MIMO-OFDM-Based Air Interface', IEEE Communication Magazine, pp. 553–560, January 2005.
63. C. Úbeda Castellanos, D. López Villa, C. Rosa, K.I. Pedersen, F.D. Calabrese, P. Michaelson, J. Michel, 'Performance of Uplink Fractional Power Control in UTRAN LTE', IEEE Trans. on Vehicular Technology, May 2008.
64. *Holma, Toskala - LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access (04-2009)*.
65. C. Rosa, D. López Villa, C. Úbeda Castellanos, F.D. Calabrese, P. Michaelson, K.I. Pedersen, Peter Skov, 'Performance of Fast AMC in E-UTRAN Uplink', IEEE International Conference on Communications (ICC 2008), May 2008.
66. C. Úbeda Castellanos, D. López Villa, C. Rosa, K.I. Pedersen, F.D. Calabrese, P. Michaelson, J. Michel, 'Performance of Uplink Fractional Power Control in UTRAN LTE', IEEE Trans. on Vehicular Technology, May 2008.
67. *Holma, Toskala - LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access (04-2009)*.
68. <http://www.femtoforum.org/femto/index.php?id=69>,. [Ηλεκτρονικό]
69. <http://www.femtoforum.org/femto/>. [Ηλεκτρονικό]
70. Radio Resource Management Considerations for LTE Femto Cells, Parag Kulkarni, Woon Hau Chin, Tim Farnham.
71. Cognitive Radio Resource Management for QoS Guarantees in Autonomous Femtocell Networks Shao-Yu Lien, Student Member, IEEE, Chih-Cheng Tseng, Member, IEEE, Kwang-Cheng Chen, Fellow, IEEE and Chih-Wei Su.