

Πτυχιακή Εργασία του φοιτητή Αγγελή Αλέξανδρου



ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ Τ.Ε.Ι. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημιουργία LTE σεναρίων με το λογισμικό προσομοίωσης ns3

Του φοιτητή

Αγγελή Αλέξανδρου

Αρ. Μητρώου: 042470

Επιβλέπων καθηγητής

Δρ. Περικλής Χατζημίσιος

Θεσσαλονίκη 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με τη παρούσα πτυχιακή εργασία κλείνει ο κύκλος των προπτυχιακών μου σπουδών στο τμήμα Πληροφορικής του Αλεξανδρείου Τεχνολογικού Ιδρύματος Θεσσαλονίκης. Μέσα στις επόμενες σελίδες θα δούμε μια εισαγωγή στα δίκτυα υπολογιστών και στις τηλεπικοινωνίες, μια σύντομη αναδρομή στην ιστορία του Long Term Evolution (LTE) και στη συνέχεια το θεωρητικό υπόβαθρο ώστε να κατανοήσουμε το LTE στο βαθμό που χρειάζεται για να δημιουργήσουμε τα πρώτα μας σενάρια. Ακολουθούν παρουσίαση του προσομοιωτή NS3 και του LTE μοντέλου που υπάρχει για τη δημιουργία σεναρίων. Στόχος της εργασίας αυτής είναι η κατανόηση του LTE αλλά και του NS3 ώστε να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε και να μελετήσουμε την απόδοση σεναρίων προσομοίωσης για την τεχνολογία δικτύωσης LTE.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα πτυχιακή θα μελετήσουμε την τεχνολογία LTE με τη βοήθεια της αντίστοιχης θεωρίας αλλά και της πρακτικής δηλαδή των προσομοιώσεων με τη βοήθεια του λογισμικού NS3.

Ποιο αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια θα δούμε

- Στο πρώτο κεφάλαιο θα δούμε μια γενική εισαγωγή στα δίκτυα και τις τηλεπικοινωνίες και τη σύνδεση αυτών.
- Στο τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο θα αναλύσουμε τη τεχνολογία LTE.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση της Ποιότητας Υπηρεσιών (QoS) και των EPS φορέων που έχουμε στο LTE.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τον προσομοιωτή και το LTE module.
- Στο έκτο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα σενάρια και τα αποτελέσματα αυτών.
- Στο έβδομο κεφάλαιο έχουμε τα συμπεράσματα των σεναρίων και της μελέτης του προσομοιωτή.

ABSTRACT

In this thesis we will study LTE technology through conducting simulation of various scenarios with the help of the ns-3 simulator.

In the following chapters we will see

- In chapter 1 we make a general introduction to networks and telecommunications
- In chapter 2 and 3 we will analyze the LTE technology.
- In chapter 4 we will show the quality of service (QoS) and EPS bearers in LTE.
- In chapter 5 will introduce the simulator and the LTE module(LENA-Project).
- In chapter 6 we will present the scenarios and the results in both form of charts and trace files.
- In chapter 7 we will give some conclusions about the scenarios and the simulator.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αμέριστη συμπαράσταση τους και υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου αλλά και τον υπεύθυνο καθηγητή Περικλή Χατζημίσιο για την βοήθεια του και την ανάθεση της πτυχιακής.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ	8
1.1 Τηλεπικοινωνίες	8
1.2 Δίκτυα Υπολογιστών	9
1.3 Δίκτυα και Τηλεπικοινωνίες	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ LTE	11
2.1 Τι είναι το LTE	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ LTE ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ	18
3.1 Συνολική επισκόπηση αρχιτεκτονικής	18
3.1.1 The User Equipment(UE)	20
3.1.2 The access Network (E-UTRAN)	21
3.1.3 The Core Network (EPC)	24
3.1.4 Roaming Αρχιτεκτονική	27
3.1.5 Συνεργασία με άλλα δίκτυα	28
3.2 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων	29
3.2.1 User Plane	30
3.2.2 Control Plane	31
3.2.3 Protocol Stack Layers	33
3.2.4 Layers Data Flow	38
3.3 Κανάλια Επικοινωνίας	41
3.3.1 Λογικά Κανάλια	41
3.3.2 Κανάλια Μεταφοράς	44
3.3.3 Φυσικά Κανάλια	45

3.4	E-UTRAN Interfaces	48
3.4.1	S1 Interface	48
3.4.2	X2 Interface	58
3.5	Τεχνολογία OFDM στο LTE	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ (QoS) ΚΑΙ EPS ΦΟΡΕΙΣ	71
4.1	Διαδικασία εγκατάστασης φορέα	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	NS-3 LTE MODULE	79
5.1	Ιστορία του Network Simulator	79
5.2	Network Simulator 3	80
5.2.1	Βασικά αντικείμενα για τη προσομοίωση	82
5.3	Το πρότυπο LTE στον ns-3	83
5.3.1	Αρχές Σχεδίασης LTE μοντέλου	84
5.3.2	Αρχές Σχεδίασης του EPC	87
5.4	Ανάλυση αποτελεσμάτων σεναρίων	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	Σενάρια-Εξαγωγή αποτελεσμάτων	91
6.1	Σενάριο 1 μέτρηση ρυθμοαπόδοσης ενός σταθμού με σταθερή θέση σε δύο διαφορετικές αποστάσεις	92
6.2	Σενάριο 2 σύγκριση Proportional Fair, BET και MaxThroughput mac schedulers	96
6.3	Σενάριο 3 προσομοίωση LTE-EPC με κινούμενο σταθμό	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	104
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		109

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

1.1 Τηλεπικοινωνίες

Η ιστορία με τις τηλεπικοινωνίες δεν είναι κάτι καινούργιο στον ανθρώπινο πολιτισμό και ξεκινάει από τα αρχαία χρόνια. Όταν γινόταν χρήση της φωτιάς για να ειδοποιηθούν οι πόλεις για επικείμενες επιθέσεις ή για την επιτυχία αποστολών. Ο Όμηρος αναφέρει πως οι Αχαιοί, χρησιμοποίησαν τις φρυκτωρίες, δηλαδή μεγάλες φωτιές στις κορυφές βουνών, για να αναγγείλουν την πτώση της Τροίας στις Μυκήνες. Η χρήση της φωτιάς ως μέσο τηλεπικοινωνίας συνεχίστηκε μέχρι τον 19ο αιώνα. Επιχειρώντας έναν ορισμό μπορούμε να πούμε ότι στόχος των Επικοινωνιών είναι η αποστολή ενός μηνύματος από ένα σημείο σε ένα άλλο, καθώς και η επιβεβαίωση της πλήρους, ορθής και κατανοητής λήψης του από τον εξουσιοδοτημένο παραλήπτη.

Γνωστές εφαρμογές των τηλεπικοινωνιών είναι η Τηλεφωνία, το Ιντερνετ, η Ραδιοφωνία και η Τηλεόραση. Στις μέρες μας εξαιτίας και της ραγδαίας ανάπτυξης των υπολογιστών και του Διαδικτύου οι εφαρμογές αυτές συνδυάζονται με αποτέλεσμα να έχουμε τεχνολογίες όπως το Long Term Evolution (LTE) που εξετάζουμε και στην παρούσα πτυχιακή. Έτσι έχουμε τον κλάδο της Τηλεπληροφορικής που έχει δημιουργήσει ευρύτερες δυνατότητες επικοινωνιών όχι μόνο στην εξυπηρέτηση φωνής αλλά και άλλων μορφών πληροφορίας όπως είναι το κείμενο, τα δεδομένα(data), η εικόνα κ.α που η ολοκλήρωσή τους υποβοηθάται από τη χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας.

1.2 Δίκτυα υπολογιστών

Ένα δίκτυο υπολογιστών είναι ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα από αυτόνομους ή μη αυτόνομους διασυνδεδεμένους υπολογιστές. Οι υπολογιστές θεωρούνται διασυνδεδεμένοι όταν είναι σε θέση να ανταλλάξουν πληροφορίες μεταξύ τους και αυτόνομοι όταν δεν είναι δυνατό κάποιος υπολογιστής να ελέγξει τη λειτουργία (π.χ. εκκίνηση ή τερματισμό) κάποιου άλλου. Η επιστημονική μελέτη των δικτύων υπολογιστών γίνεται από τα υπολογιστικά συστήματα, έναν βασικό κλάδο της πληροφορικής. Το θεμελιώδες ηλεκτρονικό υλικό των τηλεπικοινωνιακών συσκευών μελετάται επίσης από την ηλεκτρονική μηχανική.

Η ταξινόμηση των δικτύων γίνεται με τους εξής χαρακτηρισμούς που καθορίζουν και τη κατηγορία τους:

- Ανάλογα με το φυσικό μέσο διασύνδεσης τους χαρακτηρίζονται ως *ενσύρματα* ή *ασύρματα*.
- Ανάλογα με τον τρόπο πρόσβασης σε αυτά χαρακτηρίζονται ως *δημόσια* ή *ιδιωτικά* δίκτυα.
- Ανάλογα με την γεωγραφική κάλυψη του δικτύου χαρακτηρίζονται ως *τοπικά* Local Area Networks, *μητροπολιτικά* Metropolitan Area Networks, *ευρείας κάλυψης* Wide Area Networks και *προσωπικά* Personal Area Networks.

Όσον αφορά τη γεωγραφική κάλυψη των δικτύων πιο αναλυτικά:

- **Τοπικά:** Τα τοπικά δίκτυα ή και LAN είναι δίκτυα που συνδέουν υπολογιστές σε κοντινές αποστάσεις, πχ. από υπολογιστές που βρίσκονται σε ένα δωμάτιο μέχρι υπολογιστές που απέχουν μερικά χιλιόμετρα μεταξύ τους. Χρησιμοποιούνται συνήθως για να συνδέουν προσωπικούς υπολογιστές και σταθμούς εργασίας σε γραφεία εταιρειών, εργοστάσια, πανεπιστήμια κλπ.
- **Μητροπολιτικά:** Ένα μητροπολιτικό δίκτυο ή και MAN είναι μια μεγαλύτερη εκδοχή ενός τοπικού δικτύου καθώς καλύπτει μεγαλύτερες αποστάσεις, π.χ.

από μια ομάδα γειτονικών γραφείων μιας εταιρείας έως μια πόλη.

- **Δίκτυα ευρείας περιοχής:** Ένα ευρείας κάλυψης δίκτυο ή και WAN είναι μια μεγαλύτερη εκδοχή ενός τοπικού δικτύου καθώς καλύπτει μεγαλύτερες αποστάσεις, π.χ. από μια ομάδα γειτονικών πόλεων έως μια χώρα.
- **Διαδίκτυα:** Τα διαδίκτυα είναι δίκτυα ευρείας περιοχής τα οποία καλύπτουν γεωγραφικές περιοχές μίας ή περισσοτέρων ηπείρων διασυνδέοντας επιμέρους δίκτυα. Σε ένα διαδίκτυο μπορεί να συνυπάρχουν διασυνδεδεμένοι υπολογιστές και δίκτυα που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες και λειτουργικά συστήματα. Το Διαδίκτυο (Internet) είναι το μεγαλύτερο τέτοιου είδους δίκτυο.

1.3 Δίκτυα και τηλεπικοινωνίες

Η ανάγκη των δικτύων προέκυψε λόγω του συνεχούς αυξανόμενου αριθμού χρηστών και συνεπώς και των συσκευών που απαιτούνταν για την επικοινωνία μεταξύ αυτών. Έτσι έχουμε τη δημιουργία τηλεπικοινωνιακών δικτύων που με τη πάροδο των χρόνων και την ανάπτυξη των υπολογιστών, έχουμε δίκτυα τηλεπικοινωνιών που στηρίζονται στους υπολογιστές και πλέον έχουν γίνει στη πραγματικότητα μια οντότητα. Αν μελετήσουμε τις τηλεπικοινωνίες σήμερα θα δούμε ότι φιλοξενούν στους υπολογιστές μεγάλο μέρος του λογισμικού επικοινωνιών αλλά και των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούν. Μάλιστα η τεχνολογία LTE που θα αναπτύξουμε παρακάτω είναι ένα τέτοιο παράδειγμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ LTE

2.1 Τι είναι το LTE

Το LTE (Long Term Evolution) είναι μια ασύρματη ευρυζωνική τεχνολογία σχεδιασμένη για να υποστηρίξει την roaming πρόσβαση στο Διαδίκτυο μέσω κινητών τηλεφώνων και συσκευών χειρός, με υψηλές ταχύτητες. Βασίζεται στα προϋπάρχοντα δίκτυα Global System for Mobile communications/Enhanced Data Rates for GSM Evolution και Universal Mobile Telecommunications System/High Speed Packet Access, αυξάνοντας τη χωρητικότητα και τη ταχύτητα του δικτύου χρησιμοποιώντας νέες τεχνικές διαμόρφωσης. Το πρότυπο αυτό αναπτύσσεται από τον οργανισμό 3GPP.

Με την αρχιτεκτονική του να βασίζεται στο Internet Protocol (IP), σε αντίθεση με πολλά άλλα κυτταρικά πρωτόκολλα του Διαδικτύου, το Long Term Evolution υποστηρίζει την περιήγηση σε ιστοσελίδες, VoIP και άλλες IP-based υπηρεσίες. Το LTE μπορεί να υποστηρίξει θεωρητικά λήψεις με 300 megabits ανά δευτερόλεπτο (Mbps) ή περισσότερο με βάση πειραματικές δοκιμές. Ωστόσο, το πραγματικό εύρος ζώνης δικτύου που προσφέρεται σε ένα άτομο LTE συνδρομητή κοινής χρήσης δικτύου του φορέα παροχής υπηρεσιών με άλλους πελάτες είναι σημαντικά μικρότερη.

Το LTE εξελίχθηκε από ένα προηγούμενο 3GPP σύστημα που είναι γνωστό ως το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών (UMTS) , το οποίο με τη σειρά του εξελίχθηκε από το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (GSM) . Οι προδιαγραφές που σχετίζονται με το LTE είναι επίσημα γνωστές ως Evolved UMTS Terrestrial Radio Access (E - UTRA) και Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E - UTRAN) . Η πρώτη έκδοση του LTE τεκμηριώθηκε στην 8η έκδοση προδιαγραφών της 3GPP .

Η ταχεία αύξηση της χρήσης του κινητού δεδομένων και η ανάδειξη των νέων

εφαρμογών, όπως MMOG (Multimedia Online Gaming) , κινητή τηλεόραση(mobile TV) , το Web 2.0 , streaming περιεχομένου έδωσαν το κίνητρο για την ομάδα εργασίας 3ης γενιάς (3GPP) για να εργαστούν για το Long -Term Evolution (LTE) στο δρόμο προς την τέταρτη γενιά κινητής τηλεφωνίας .

Ο κύριος στόχος του LTE είναι να παρέχει ένα υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων , χαμηλή καθυστέρηση(low latency) και πακέτα με βελτιστοποιημένη radioaccess τεχνολογία που υποστηρίζει την ευελιξία στη χρήση εύρους ζώνης. Την ίδια ώρα η αρχιτεκτονική του δικτύου έχει σχεδιαστεί με στόχο να υποστηρίζει με μεταγωγή πακέτων την κυκλοφορία με απρόσκοπτη κινητικότητα και εξαιρετική ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών.

Year	Event
Mar 2000	Release 99 - UMTS/WCDMA
Mar 2002	Rel 5 - HSDPA
Mar 2005	Rel 6 - HSUPA
Year 2007	Rel 7 - DL MIMO, IMS (IP Multimedia Subsystem)
November 2004	Work started on LTE specification
January 2008	Spec finalized and approved with Release 8
2010	Targeted first deployment

Πίνακας 2.1 LTE Evolution[26]

Στοιχεία για το LTE

- είναι η τεχνολογία διάδοχος όχι μόνο του UMTS , αλλά και CDMA 2000
- Το LTE είναι σημαντικό γιατί θα βελτιώσει έως και 50 φορές την απόδοση όπως επίσης θα παρέχει και πολύ καλύτερη φασματική απόδοση σε δίκτυα

κινητής τηλεφωνίας .

- Το LTE προσφέρει υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, 300Mbps peak downlink και 75 Mbps peak uplink, Σε ένα 20MHz φορέα , η μετάδοση δεδομένων πέραν των 300Mbps μπορεί να επιτευχθεί υπό πολύ καλές συνθήκες σήματος.
- Το LTE είναι ιδανική τεχνολογία για να υποστηρίξει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων για υπηρεσίες όπως Voice over IP (VoIP) , streaming πολυμέσων , τηλεδιάσκεψης ή ακόμη και ένα υψηλής ταχύτητας κυψελοειδή modem .
- Το LTE χρησιμοποιεί και Time Division Duplex (TDD) και Frequency Division Duplex (FDD) mode. Στην FDD uplink και downlink μετάδοσης χρησιμοποιείται διαφορετική συχνότητα , ενώ στο TDD και uplink και downlink χρησιμοποιούν τον ίδιο φορέα και χωρίζονται σε χρόνο .
- Το LTE υποστηρίζει ευέλικτο εύρος ζώνης μεταφοράς , από 1,4 MHz έως 20 MHz , όπως και οι FDD και TDD . LTE έχει σχεδιαστεί με υψηλό εύρος φορέα από 1,4 MHz έως 20 Mhz , το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τη ζώνη συχνοτήτων και το ποσό του διαθέσιμου φάσματος με το χειριστή του δικτύου .
- Όλες οι LTE συσκευές πρέπει να υποστηρίζουν (MIMO) Multiple Input Multiple Output μεταδόσεις , οι οποίες επιτρέπουν στον σταθμό βάσης να μεταδώσει πολλές ροές δεδομένων πάνω από τον ίδιο φορέα ταυτόχρονα .
- Όλες οι διασυνδέσεις(interfaces) μεταξύ των κόμβων βασίζονται στο IP, συμπεριλαμβανομένης της σύνδεσης backhaul με τους σταθμούς βάσης κινητής τηλεφωνίας. Αυτό είναι μεγάλη απλοποίηση σε σχέση με τις παλαιότερες τεχνολογίες που βασίζονταν σε E1/T1, ATM και frame relay συνδέσμους με τα περισσότερα απ' αυτά να είναι χαμηλών εύρους ζώνης συχνοτήτων και ακριβά.

- Έχει τυποποιηθεί Quality of Service (QoS) μηχανισμός σε όλες τις διασυνδέσεις(interfaces) για να εξασφαλιστεί ότι η απαίτηση των φωνητικών κλήσεων για μια σταθερή καθυστέρηση και σταθερό εύρος ζώνης, μπορούν ακόμη να ικανοποιούνται όταν φθάσει στα όρια της χωρητικότητας.
- Δουλεύει με τα GSM / EDGE / UMTS συστήματα αξιοποιώντας το ήδη υπάρχον 2G και 3G φάσμα. Υποστηρίζει hand-over και roaming στα υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Πλεονεκτήματα του LTE

- Υψηλή ρυθμοαπόδοση : Μπορούν να επιτευχθούν υψηλοί ρυθμοί δεδομένων και στο downlink αλλά και στο uplink. Αυτό δημιουργεί υψηλή ρυθμοαπόδοση.
- Χαμηλή καθυστέρηση : Ο χρόνος που απαιτείται για τη σύνδεση με το δίκτυο βρίσκεται εντός εμβέλειας μερικές εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου και καταστάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μπορούν πλέον να εισέρχονται και να εξέρχονται πολύ γρήγορα .
- FDD και TDD στην ίδια πλατφόρμα: Frequency Division Duplex (FDD) και η Time Division Duplex (TDD), και τα δύο συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ίδια πλατφόρμα.
- Βελτιωμένη εμπειρία του τελικού χρήστη: Βελτιστοποιημένη σηματοδότηση για την εγκατάσταση σύνδεσης και άλλες διεπαφές αέρα και τις διαδικασίες διαχείρισης της κινητικότητας έχουν βελτιώσει περαιτέρω την εμπειρία του χρήστη. Μειωμένη καθυστέρηση(latency) (10 ms) για την καλύτερη εμπειρία του χρήστη.
- Seamless σύνδεση : LTE θα υποστηρίξει επίσης την απρόσκοπτη σύνδεση με τα υφιστάμενα δίκτυα, όπως το GSM, CDMA και WCDMA.
- Plug and play: Ο χρήστης δεν χρειάζεται να εγκαταστήσει χειροκίνητα το

πρόγραμμα οδήγησης για τη συσκευή. Το σύστημα αναγνωρίζει αυτόματα τη συσκευή, φορτώνει νέα προγράμματα οδήγησης για το υλικό, αν χρειαστεί, και αρχίζει να συνεργάζεται με τη νέα συνδεδεμένη συσκευή.

- Απλή αρχιτεκτονική: λόγω της απλής αρχιτεκτονικής χαμηλής λειτουργικές δαπάνες (λειτουργικά έξοδα).

LTE – Quality of Service(QoS)

Η LTE αρχιτεκτονική υποστηρίζει ολοκληρωμένο QoS, με end-to-end ποιότητα υπηρεσιών και εγγυημένο bit rate (Guaranteed Bit Rate) για ράδιο φορείς(radio bearers). Ακριβώς όπως το Ethernet και το διαδίκτυο έχουν διαφορετικούς τύπους QoS, για παράδειγμα, διάφορα επίπεδα QoS μπορούν να εφαρμοστούν σε LTE κυκλοφορία(traffic) για διαφορετικές εφαρμογές. Οι Evolved Packet System (EPS) φορείς παρέχουν ένα-προς-ένα αντιστοιχία με τους RLC ράδιο φορείς και παρέχουν υποστήριξη για τα πρότυπα Ροής Κυκλοφορίας (Traffic Flow Templates or TFT). Υπάρχουν τέσσερις τύποι EPS φορέων:

- ➔ GBR Φορέας: οι πόροι διατίθενται μόνιμα από τον έλεγχο αποδοχής
- ➔ Μη-GBR Φορέας: κανένας έλεγχος αποδοχής
- ➔ Αφιερωμένο στον κομιστή που σχετίζονται με συγκεκριμένες TFT (GBR ή μη GBR)
- ➔ Προ επιλεγμένος Φορέας Μη GBR, catch-all για μη διαθέσιμη κυκλοφορία

Παρακάτω θα δούμε συγκεντρωτικά τις βασικές παραμέτρους της LTE τεχνολογίας

Parameters	Description
Frequency range	UMTS FDD bands and TDD bands defined in 36.101(v860) Table 5.5.1, given below
Duplexing	FDD, TDD, half-duplex FDD
Channel coding	Turbo code
Mobility	350 km/h
Channel Bandwidth (MHz)	1,4 3 5 10 15 20
Transmission Bandwidth Configuration NRB: (1 resource block = 180kHz in 1ms TTI)	6 15 25 50 75 100
Modulation Schemes	UL: QPSK, 16QAM, 64QAM(optional)
	DL: QPSK, 16QAM, 64QAM
Multiple Access Schemes	UL: SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) supports 50Mbps+ (20MHz spectrum)
	DL: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) supports 100Mbps+ (20MHz spectrum)
Multi-Antenna Technology	UL: Multi-user collaborative MIMO
	DL: TxAA, spatial multiplexing, CDD ,max 4x4 array
Peak data rate in LTE	UL: 75Mbps(20MHz bandwidth)
	DL: 150Mbps(UE Category 4, 2x2 MIMO, 20MHz bandwidth)
	DL: 300Mbps(UE category 5, 4x4 MIMO, 20MHz bandwidth)
MIMO (Multiple Input Multiple Output)	UL: 1 x 2, 1 x 4
	DL: 2 x 2, 4 x 2, 4 x 4
Coverage	5 - 100km with slight degradation after 30km
QoS	E2E QoS allowing prioritization of different class of service

Latency	End-user latency < 10mS
---------	-------------------------

Πίνακας 2.2 LTE-Parameters[27]

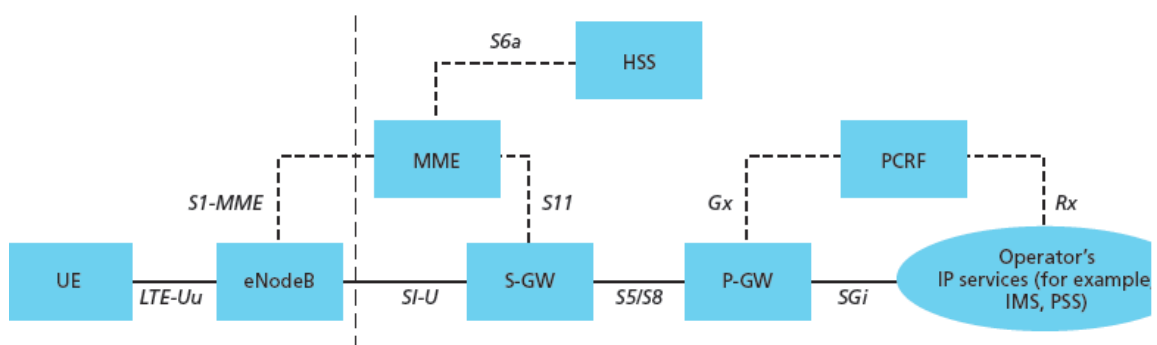
E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode
	$F_{UL, low}$ – $F_{UL, high}$	$F_{DL, low}$ – $F_{DL, high}$	
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894MHz	FDD
6	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz – 1447.9 MHz	1475.9 MHz – 1495.9 MHz	FDD
12	698 MHz – 716 MHz	728 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
...			
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD

Πίνακας 2.3 E-UTRA Operating Bands[28]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ LTE ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ

3.1 Συνολική επισκόπηση αρχιτεκτονικής

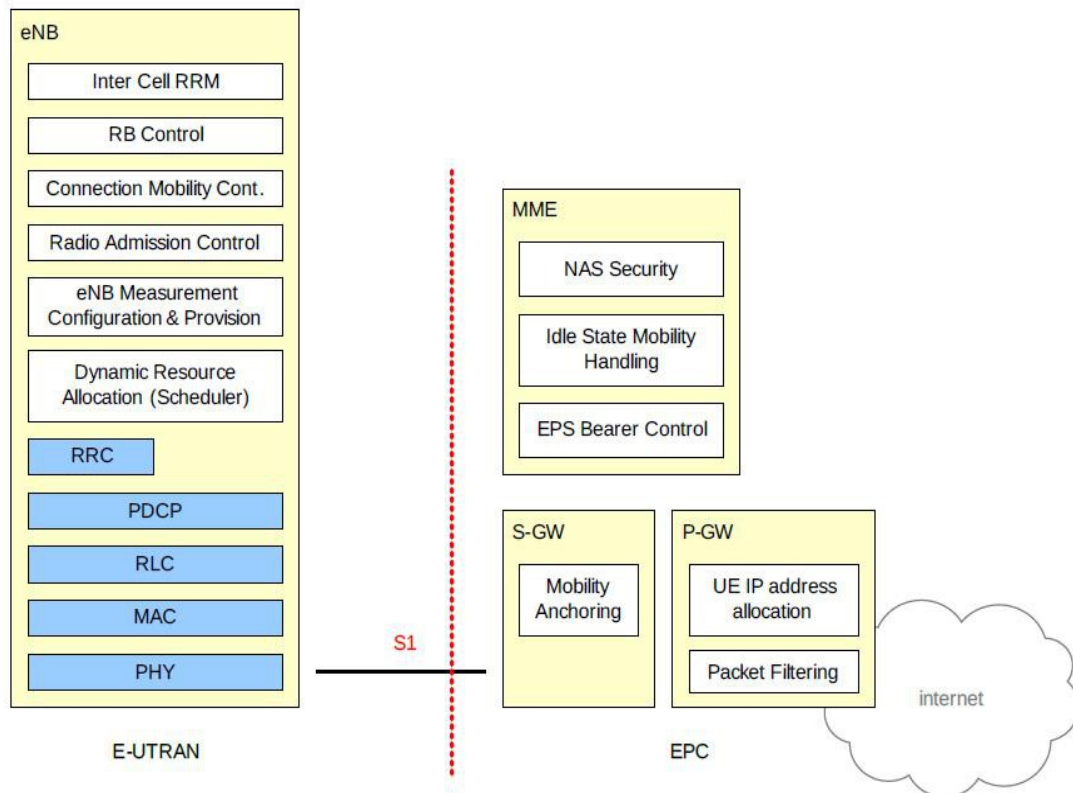
Το EPS(Evolved Packet System) παρέχει στο χρήστη IP συνδεσιμότητα σε ένα PDN για την πρόσβαση στο Internet, καθώς και για τη λειτουργία υπηρεσιών όπως Voice over IP (VoIP). Ένας κομιστής(bearer) EPS συνδέεται τυπικά με QoS. Πολλαπλοί φορείς μπορούν να δημιουργηθούν για ένα χρήστη, ώστε να παρέχουν διαφορετικές ροές QoS ή συνδεσιμότητα σε διαφορετικές PDNs. Για παράδειγμα, ένας χρήστης μπορεί ταυτόχρονα με μια τηλεφωνική κλήση (VoIP) να χρησιμοποιεί τον web browser για να περιηγηθεί στο web ή να κατεβάσει ένα αρχείο FTP στη συσκευή του. Ένας κομιστής VoIP θα παρέχει την αναγκαία QoS για την τηλεφωνική κλήση, ενώ ένας φορέας best-effort θα είναι κατάλληλος για την περιήγηση στο διαδίκτυο ή για το κατέβασμα του FTP αρχείου. Το δίκτυο θα πρέπει επίσης να παρέχει ασφάλεια και προστασία απορρήτου στον χρήστη και την προστασία του δικτύου έναντι δόλιας χρήσης.



Σχήμα 3.1 The EPS network elements[29]

Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των διαφόρων στοιχείων του δικτύου EPS που έχουν διαφορετικούς ρόλους. Το Σχήμα 3.1 δείχνει τη συνολική αρχιτεκτονική του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των στοιχείων του δικτύου και τις τυποποιημένες διεπαφές.

Σε υψηλό επίπεδο, το δίκτυο αποτελείται από το CN(core network) και το δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN. Ενώ το CN αποτελείται από πολλούς λογικούς κόμβους, το δίκτυο πρόσβασης αποτελείται από ουσιαστικά ένα μόνο κόμβο, τον evolved NodeB (eNodeB), ο οποίος συνδέεται στα UEs. Κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία δικτύου διασυνδέεται μέσω των διασυνδέσεων, που είναι τυποποιημένα, ώστε να καταστεί δυνατή multi -vendor διαλειτουργικότητα. Αυτό δίνει στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων τη δυνατότητα να προμηθεύονται τα διάφορα στοιχεία του δικτύου από διάφορους προμηθευτές. Στην πραγματικότητα, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων μπορούν να επιλέξουν στις φυσικές υλοποιήσεις τους να χωρίσουν ή να συγχωνεύσουν αυτά τα λογικά στοιχεία του δικτύου ανάλογα με εμπορικά κριτήρια. Η λειτουργική διάσπαση μεταξύ του EPC και E-UTRAN δείχνεται στο Σχήμα 3.2. Το EPC και το E-UTRAN στοιχεία του δικτύου περιγράφονται με περισσότερη λεπτομέρεια παρακάτω.



Σχήμα 3.2 Functional split between E-UTRAN and EPC[30]

3.1.1 The User Equipment(UE)

Η εσωτερική αρχιτεκτονική του εξοπλισμού χρήστη για το LTE είναι ταυτόσημη με εκείνη που χρησιμοποιείται από τα UMTS και GSM το οποίο είναι στην πραγματικότητα ένας κινητός εξοπλισμός (ME - Mobile Equipment). Ο κινητός εξοπλισμός αποτελείται από τις ακόλουθες σημαντικές οντότητες:

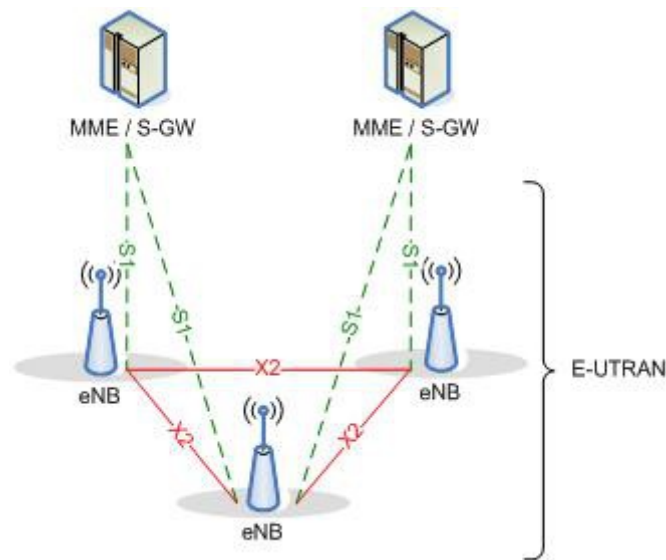
- Mobile Termination (MT): Αυτό χειρίζεται όλες τις λειτουργίες επικοινωνίας.
- Terminal Equipment (TE): Αυτό τερματίζει τις ροές δεδομένων.

- Universal Integrated Circuit Card (UICC): Αυτή είναι επίσης γνωστή ως η κάρτα SIM για τις LTE συσκευές. Τρέχει μια εφαρμογή γνωστή ως η Universal Subscriber Identity Module (USIM).

Μια USIM κάρτα αποθηκεύει τα δεδομένα του χρήστη παρόμοια με τη κάρτα SIM 3G. Αυτή κρατά τις πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό τηλεφώνου του χρήστη, τη home network identity (σε ποιο δίκτυο ανήκει ο χρήστης) και τα κλειδιά ασφαλείας κλπ.

3.1.2 The access network (E-UTRAN)

Το δίκτυο πρόσβασης του LTE, E-UTRAN αποτελείται απλά από ένα δίκτυο eNodeBs όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 E-UTRAN[31]

Για την κανονική κίνηση (σε αντίθεση με την εκπομπή), δεν υπάρχει κεντρικός ελεγκτής E-UTRAN, Ως εκ τούτου το E-UTRAN αρχιτεκτονική λέγεται ότι είναι επίπεδη. Οι eNodeBs συνδέονται μεταξύ τους με τη βοήθεια της διεπαφής X2, και στο EPC μέσω της διεπαφής S1 - ποιο συγκεκριμένα στο MME μέσω της S1-MME

διεπαφής και στο S-GW μέσω της S1-U διεπαφής. Τα πρωτόκολλα που κινούνται μεταξύ των eNodeBs και των UE είναι γνωστά ως “πρωτόκολλα AS” (Access Stratum).

Το E-UTRAN είναι υπεύθυνο για όλες τις ράδιο-σχετικές λειτουργίες, οι οποίες μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- ✓ Radio Resource Management (RRM) : Αυτό καλύπτει όλες τις λειτουργίες σχετικές με τους ράδιο-φορείς, όπως ο ράδιο-έλεγχος φορέα, ο ράδιο-έλεγχος αποδοχής, ο ράδιο-έλεγχος κινητικότητας, ο σχεδιασμός και η δυναμική κατανομή των πόρων στα UE τόσο στην ανοδική όσο και στη καθοδική ζεύξη (uplink,downlink).
- ✓ Header Compression : Αυτή η λειτουργία βοηθάει στο να διασφαλιστεί η αποτελεσματική χρήση της ράδιο-διεπαφής με την συμπίεση των header των IP πακέτων οι οποίες θα μπορούσαν διαφορετικά να αντιπροσωπεύουν μία ενδεικτική δαπάνη,ειδικά για τα μικρά πακέτα όπως το VoIP.
- ✓ Security : Όλα τα δεδομένα που στέλνονται μέσω τις ράδιο-διεπαφής είναι κρυπτογραφημένα.
- ✓ Connectivity to the EPC : Αυτό αποτελείται από την σηματοδότηση προς MME και την πορεία φορέα προς το S-GW.

Από την πλευρά του δικτύου, όλες αυτές οι λειτουργίες διαμένουν στα eNodeBs, καθένα από αυτά μπορεί να είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση πολλαπλών κυψελών. Σε αντίθεση με ορισμένες από τις προηγούμενες δεύτερης και τρίτης γενιάς τεχνολογίες, το LTE ενσωματώνει την λειτουργία ράδιο-ελεγκτών στον eNodeB. Αυτό επιτρέπει την στενή αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων πρωτοκόλλων του δικτύου πρόσβασης(Radio Access Network-RAN), μειώνοντας έτσι τη λανθάνουσα κατάσταση και επομένως βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα.

Τέτοιος κατανομημένος έλεγχος εξαλείφει την ανάγκη για υψηλή διαθεσιμότητα, εντατική επεξεργασία η οποία έχει στη συνέχεια τη δυνατότητα να μειώσει το κόστος και να αποφύγει 'τα μοναδικά σημεία αποτυχίας'. Επιπλέον δεδομένου ότι το LTE δεν υποστηρίζει soft handover δεν υπάρχει ανάγκη για μια συγκεντρωμένη λειτουργία συνδυασμού δεδομένων στο δίκτυο.

Μια συνέπεια της έλλειψης κεντρικού κόμβου ελέγχου είναι ότι, καθώς τα UE κινούνται, το δίκτυο πρέπει να μεταφέρει όλες της σχετικές πληροφορίες με το UE δηλαδή το πλαίσιο UE μαζί με οποιαδήποτε άλλη αποθηκευμένη πληροφορία από το ένα eNodeB στο άλλο. Συνεπώς μηχανισμοί είναι αναγκαίοι για να αποφευχθεί απώλεια δεδομένων κατά τη διάρκεια της μεταφοράς δεδομένων.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα της διεπαφής S1 που συνδέει το δίκτυο πρόσβασης με το CN(core network) είναι γνωστή ως "S1 flex". Αυτή είναι μια έννοια σύμφωνα με την οποία πολλαπλοί κόμβοι CN (MME / S-GWS) μπορούν να εξυπηρετήσουν μια κοινή γεωγραφική περιοχή, που συνδέεται με ένα δίκτυο πλέγματος με το σύνολο των eNodeBs στην εν λόγω περιοχή. Ένας eNodeB μπορεί έτσι να εξυπηρετείται από πολλαπλές MME / S-GWs, όπως είναι η περίπτωση για eNodeB στο Σχήμα 3.3. Το σύνολο των MME/S-GWs κόμβων που εξυπηρετεί μια κοινή περιοχή καλείται δεξαμενή MME/S-GWs και η περιοχή που καταλείπεται από μια τέτοια δεξαμενή καλείται περιοχή δεξαμενών. Αυτή η έννοια επιτρέπει στα UE στη κυψέλη που ελέγχονται από έναν eNodeB να μοιραστούν μεταξύ πολλαπλών CN κόμβων, παρέχοντας την δυνατότητα κατανομής του φορτίου και επίσης στη εξάλειψη των ενιαίων σημείων αποτυχίας για τους CN κόμβους. Το πλαίσιο του UE παραμένει κανονικά με την ίδια MME εφόσον το UE βρίσκεται μέσα στη περιοχή δεξαμενών.

3.1.3 The Core Network (EPC)

Το Core Network (ονομάζεται EPC στο SAE) είναι υπεύθυνο για τον συνολικό έλεγχο των UE και την εγκατάσταση των φορέων (bearers). Το EPC αποτελείται από τους εξής λογικούς κόμβους:

- PDN Gateway (P-GW)
- Serving Gateway (S-GW)
- Mobility Management Entity (MME)

Εκτός από τους τρεις παραπάνω κόμβους το EPC περιλαμβάνει και άλλους κόμβους και λειτουργίες όπως τον Home Subscriber Server (HSS) και την Policy Control and Charging Rules Function (PCRF) λειτουργία. Δεδομένου ότι το EPC παρέχει μόνο μια διαδρομή bearer ενός συγκεκριμένου QoS, τον έλεγχο των multimedia εφαρμογών όπως της VoIP εφαρμογής παρέχεται από το IP Multimedia Subsystem (IMS), το οποίο βρίσκεται έξω από το EPS.

Παρακάτω θα εξηγήσουμε αναλυτικότερα τη λειτουργία των κόμβων που αναφέραμε προηγουμένως.

- PCRF: Η Policy Control and Charging Rules Function είναι υπεύθυνη για τη χάραξη πολιτικής, λήψη αποφάσεων καθώς και τον έλεγχο ροής λειτουργιών χρέωσης στην Policy Control Enforcement Function (PCEF), η οποία βρίσκεται στην P-GW. Η PCRF παρέχει την QoS άδεια (QoS class identifier [QCI] and bit rates) που αποφασίζει πως μια συγκεκριμένη ροή δεδομένων θα πρέπει να αντιμετωπίζεται από την PCEF και να διασφαλίζει ότι αυτό είναι σύμφωνο με το προφίλ του συνδρομητή-χρήστη.
- HSS: Ο Home Subscriber Server περιέχει τα δεδομένα των εγγεγραμμένων

χρηστών SAE όπως το EPS εγγράφει QoS προφίλ και οποιοδήποτε περιορισμό πρόσβασης για το roaming. Επίσης κρατά πληροφορίες σχετικά με τα PDN που μπορεί να συνδεθεί ο χρήστης. Αυτό θα μπορούσε να είναι με τη μορφή ονόματος ενός σημείου πρόσβασης (APN – Acces Point Name) (το οποίο είναι μια ετικέτα σύμφωνα με τις DNS συμβάσεις ονομασίας που περιγράφει το σημείο πρόσβασης στο PDN) ή μια PDN διεύθυνση (αναφέρει εγγεγραμμένες IP διευθύνσεις). Επιπλέον ο HSS κατέχει δυναμικές πληροφορίες όπως την ταυτότητα του MME στην οποία είναι επί του παρόντος συνδεδεμένος ο χρήστης ή καταχωρημένος. Ο HSS μπορεί επίσης να ενσωματώσει το κέντρο ελέγχου ταυτότητας (AUC – authentication center), το οποίο παράγει τα διανύσματα για έλεγχο ταυτότητας και κλειδιών ασφαλείας.

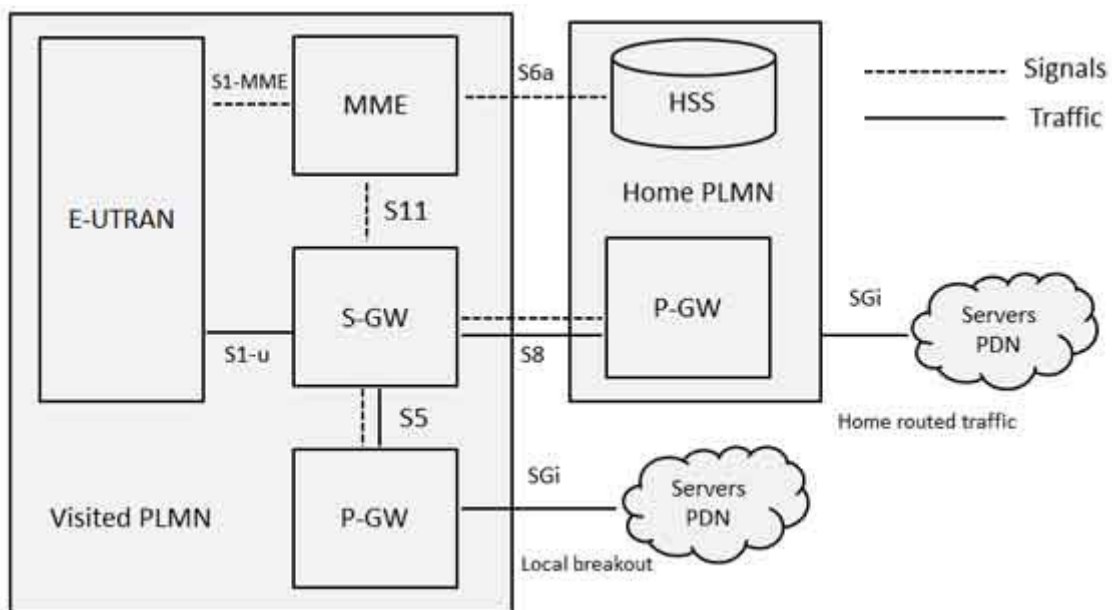
- P-GW : Η PDN πύλη είναι υπεύθυνη για την κατανομή IP διευθύνσεων στα UE καθώς και για την επιβολή του QoS με χρέωση ροής σύμφωνα με τους κανόνες της PCRF. Επίσης είναι υπεύθυνη για το φιλτράρισμα των IP πακέτων της καθοδικής ζεύξης (downlink) του χρήστη στους διάφορους QoS-based bearers. Αυτό γίνεται με βάση σχετικά Traffic Flow Templates (TFT). Η P-GW επιβάλλει QoS για εγγυημένους bit rate (GBR) bearers. Επίσης χρησιμεύει ως σημείο αναφοράς για τη διασύνδεση με άλλες μη 3GPP τεχνολογίες όπως CDMA2000 και WiMAX δίκτυα.
- S-GW : Όλα τα πακέτα IP του χρήστη μεταφέρονται μέσω της S-GW, η οποία χρησιμεύει και ως τοπική διασύνδεση για τους φορείς δεδομένων όταν το UE κινείται μεταξύ eNodeBs. Διατηρεί επίσης τις πληροφορίες σχετικά με φορείς, όταν το UE βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής (γνωστό και ως “EPS Connection Management – IDLE” [ECM-IDLE]) και προσωρινά αποθηκεύει δεδομένα καθοδικής ζεύξης (downlink) ενώ ο MME ξεκινά paging του UE για να αποκαταστήσει τους φορείς. Επιπλέον, η S-GW εκτελεί ορισμένα διοικητικά καθήκοντα στο δίκτυο επίσκεψης, όπως η συλλογή πληροφοριών για τη χρέωση (για παράδειγμα, ο όγκος των

δεδομένων που αποστέλλονται ή λαμβάνονται από το χρήστη) και νόμιμη υποκλοπή. Επίσης λειτουργεί και ως διασύνδεση για την συνεργασία με άλλες με άλλες 3GPP τεχνολογίες, όπως η γενική packet radio service (GPRS) και UMTS.

- MME : Ο MME είναι ο κόμβος ελέγχου που επεξεργάζεται τη σηματοδότηση μεταξύ των UE και του CN. Τα πρωτόκολλα που λειτουργούν μεταξύ των UE και το CN είναι γνωστά ως Non Access Stratum (NAS) πρωτόκολλα. Οι κύριες λειτουργίες που υποστηρίζονται από το MME μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:
 - ✓ Λειτουργίες που σχετίζονται με τη διαχείριση φορέα - Αυτό περιλαμβάνει τη δημιουργία, τη συντήρηση και την απελευθέρωση των φορέων και γίνεται από το επίπεδο διαχείρισης στο NAS πρωτόκολλο.
 - ✓ Λειτουργίες που σχετίζονται με τη διαχείριση της σύνδεσης - Αυτό περιλαμβάνει τη δημιουργία της σύνδεσης και ασφάλειας μεταξύ του δικτύου και του UE και γίνεται από το επίπεδο σύνδεση ή διαχείρισης της κινητικότητας στο NAS πρωτόκολλο.

3.1.4 Roaming Αρχιτεκτονική

Ένα δίκτυο το οποίο διαχειρίζεται ένας φορέας είναι γνωστό ως “Public Land Mobile Network” (PLMN). Το roaming είναι ένα ισχυρό χαρακτηριστικό των δικτύων κινητής τηλεφωνίας το οποίο παρέχετε φυσικά και από το LTE/SAE. Το Roaming δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να συνδεθούν και σε άλλα PLMN εκτός αυτού στο οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένοι. Στο roaming ο χρήστης συνδέεται στα E-UTRAN, MME και S-GW του δικτύου που επισκέπτεται. Παρ' όλα αυτά το LTE/SAE επιτρέπει τη χρήση του P-GW είτε του δικτύου που επισκέπτεται ο χρήστης (visited PLMN) είτε του δικτύου στο οποίο ανήκει ο χρήστης (home PLMN) όπως δείχνει και το σχήμα 3.4.



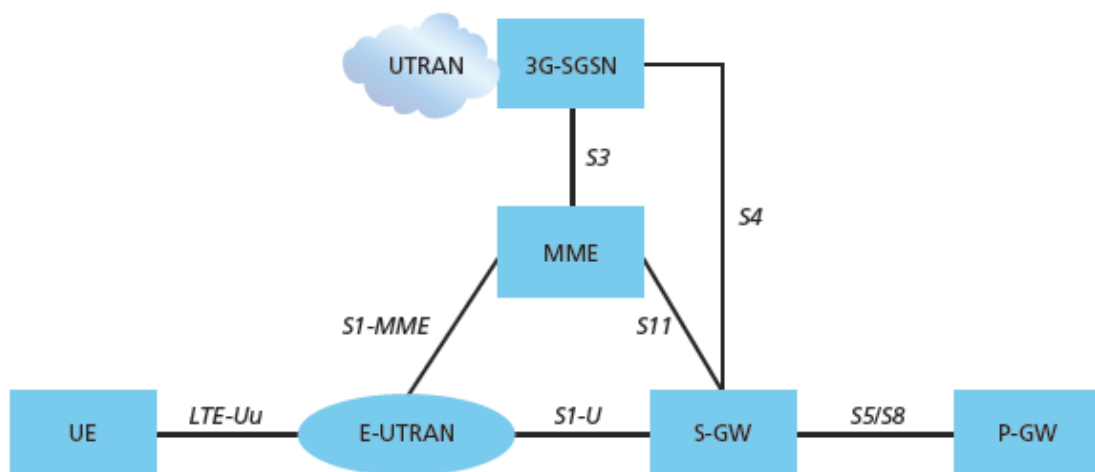
Σχήμα 3.4 Roaming Αρχιτεκτονική[32]

Χρησιμοποιώντας το P-GW του home network δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να έχει πρόσβαση σε υπηρεσίες του δικτύου αυτού ακόμα κι όταν βρίσκεται σε κάποιο άλλο δίκτυο (visited network). Έτσι το P-GW του δικτύου που επισκέπτεται ο

χρήστης επιτρέπει ένα “local breakout” του Διαδικτύου στο δίκτυο αυτό. Η διεπαφή μεταξύ των πυλών εξυπηρέτησης και PDN είναι γνωστή ως S5/S8. Η διεπαφή αυτή έχει δυο ελαφρώς διαφορετικές υλοποιήσεις , την S5 αν οι δυο συσκευές είναι στο ίδιο δίκτυο και την S8 αν είναι σε διαφορετικά δίκτυα. Για τα κινητά που δεν είναι σε roaming η πύλες εξυπηρέτησης και PDN μπορούν να ενσωματωθούν σε μια ενιαία συσκευή ώστε η διεπαφή S5/S8 να εξαφανιστεί εντελώς.

3.1.5 Συνεργασία με άλλα δίκτυα

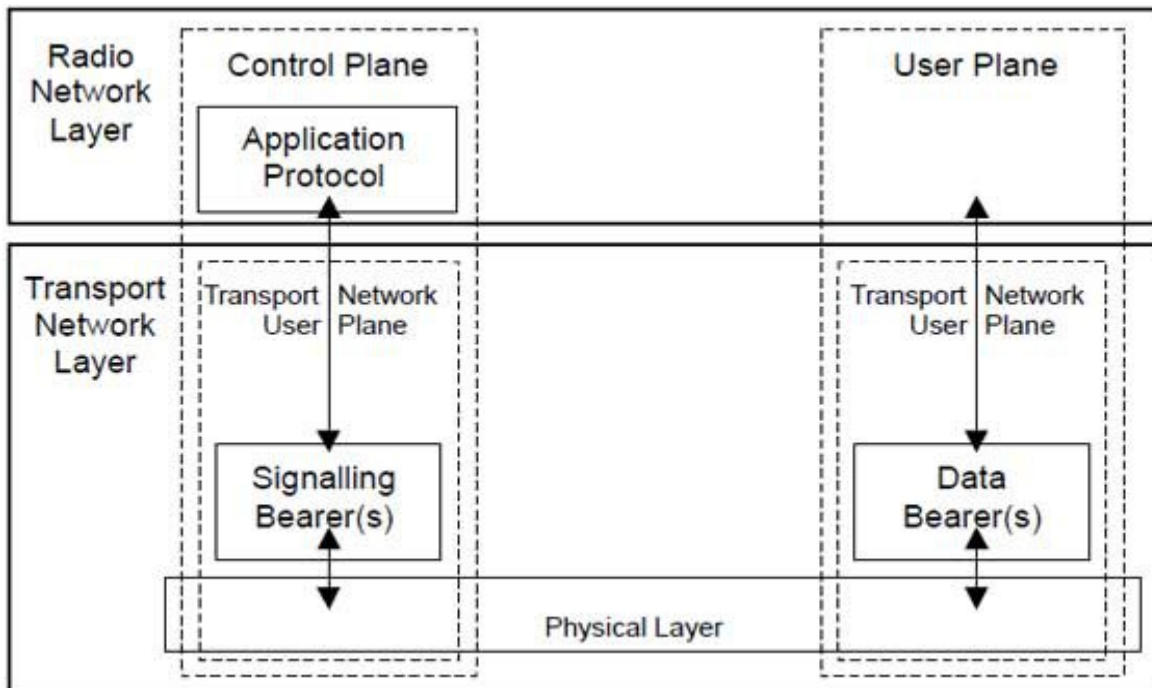
Το EPS υποστηρίζει επίσης τη συνεργασία και την κινητικότητα (handover) με δίκτυα που χρησιμοποιούν άλλες τεχνολογίες ράδιο-πρόσβασης όπως το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (GSM), UMTS, CDMA2000 και WiMAX. Η αρχιτεκτονική για τη πλήρη συνεργασία με τα 2G και 3G δίκτυα φαίνεται στο σχήμα 3.5. Το S-GW ενεργεί ως άγκυρα κινητικότητας ώστε να εξασφαλίζεται η συνεργασία με άλλες 3GPP τεχνολογίες όπως GSM και UMTS, ενώ η P-GW χρησιμεύει ως άγκυρα που επιτρέπει την απρόσκοπτη κινητικότητα σε μη 3GPP δίκτυα όπως CDMA2000 ή WiMAX. Το P-GW μπορεί επίσης να υποστηρίξει ένα Proxy Mobile Internet Protocol (PMIP)-based interface.



Σχήμα 3.5 Αρχιτεκτονική συνεργασίας με άλλα δίκτυα[33]

3.2 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων

Η αρχιτεκτονική ράδιο-πρωτοκόλλου του LTE μπορεί να χωριστεί σε control plane αρχιτεκτονική και σε user plane αρχιτεκτονική όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.6 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου LTE[34]

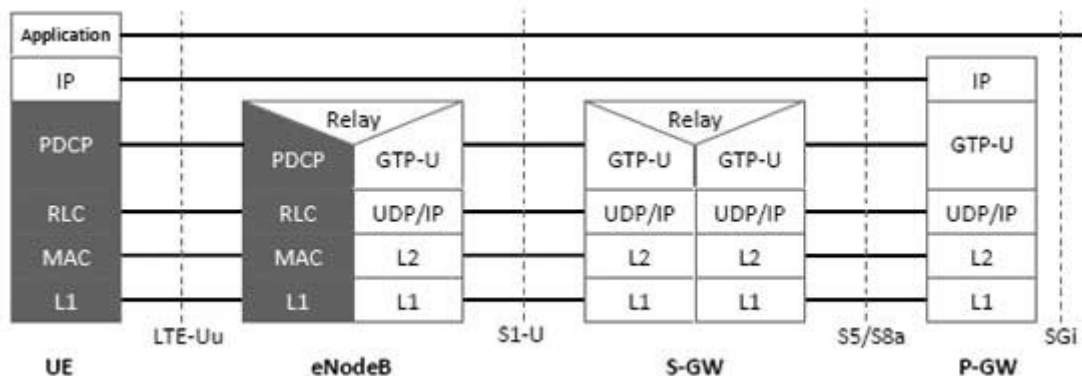
Στη πλευρά του επίπεδο χρήστη (user plane), η εφαρμογή δημιουργεί πακέτα δεδομένων που υποβάλλονται σε επεξεργασία από πρωτόκολλα όπως το TCP, UDP και το IP, ενώ στο επίπεδο ελέγχου (control plane), το radio resource control (RRC) πρωτόκολλο γράφει τα μηνύματα σηματοδότησης που ανταλλάσσονται μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, η επεξεργασία των πληροφοριών γίνεται από το πρωτόκολλο δεδομένων σύγκλισης πακέτου (PDCP), το πρωτόκολλο έλεγχου ραδιοζεύξης (RLC) και το πρωτόκολλο μέσου ελέγχου πρόσβασης (MAC), πριν περάσει στο φυσικό επίπεδο για τη μετάδοση.

3.2.1 User Plane

Η στοίβα πρωτοκόλλων του User Plane μεταξύ του eNodeB και του UE αποτελείται από τα ακόλουθα επιμέρους στρώματα :

- PDCP (Packet Data Convergence Protocol)
- RLC (radio Link Control)
- Medium Access Control (MAC).

Στο επίπεδο χρήστη (user plane), τα πακέτα στο δίκτυο πυρήνα (core network) (EPC) είναι έγκλειστα σε ένα ειδικό πρωτόκολλο EPC και “ταξιδεύουν” μεταξύ της P-GW και του eNodeB. Διαφορετικά πρωτόκολλα ενθυλάκωσης χρησιμοποιούνται ανάλογα με τη διασύνδεση. Το GPRS Tunneling Protocol (GTP) χρησιμοποιείται για την διεπαφή S1 μεταξύ του eNodeB και S-GW και στη διασύνδεση S5/S8 μεταξύ του S-GW και P-GW.



Σχήμα 3.7 User Plance Protocols[35]

Τα πακέτα λαμβάνονται από ένα στρώμα που ονομάζεται Service Data Unit (SDU), ενώ η έξοδος πακέτων ενός στρώματος αναφέρεται από τη Μονάδα Δεδομένων Πρωτοκόλλου (PDU) και πακέτα IP με ροή στο επίπεδο χρήστη από τα πάνω προς τα κάτω στρώματα.

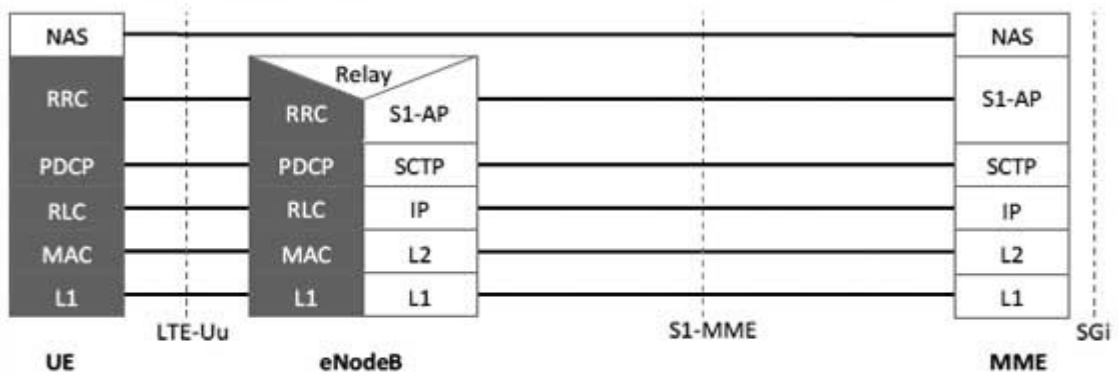
3.2.2 Control Plane

Το επίπεδο ελέγχου περιλαμβάνει επιπλέον το Radio Resource Control layer (RRC), το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διαμόρφωση των χαμηλότερων στρωμάτων.

Το επίπεδο ελέγχου χειρίζεται ράδιο-ειδική λειτουργία που εξαρτάται από την κατάσταση του εξοπλισμού χρήστη, το οποίο περιλαμβάνει δύο καταστάσεις: αδρανή (idle) ή συνδεδεμένα (connected).

- Idle : Το UE εγκαθίσταται σε ένα κελί μετά από μια επιλογή ή εκ νέου επιλογή κελιού όπου λαμβάνονται υπόψιν παράγοντες όπως ποιότητα ράδιο-σύνδεσης, κατάσταση κελιού και τεχνολογίες ράδιο-πρόσβασης. Επίσης το UE παρακολουθεί ένα κανάλι σελιδοποίησης για τον εντοπισμό εισερχόμενων κλήσεων και για την απόκτηση πληροφοριών του συστήματος. Σε αυτή τη λειτουργία το control plane περιλαμβάνει διαδικασίες επιλογής και εκ νέου επιλογής κελιών.
- Connected : Το UE προμηθεύει το E-UTRAN με ποιότητα καναλιού καθοδικής ζεύξης (downlink channel) και με πληροφορίες από τις γειτονικές κυψέλες ώστε να ενεργοποιήσει το E-UTRAN να επιλέξει τη καταλληλότερη κυψέλη για το UE. Στην περίπτωση αυτή το control plane πρωτόκολλο περιλαμβάνει το Radio Resource Control (RRC) πρωτόκολλο.

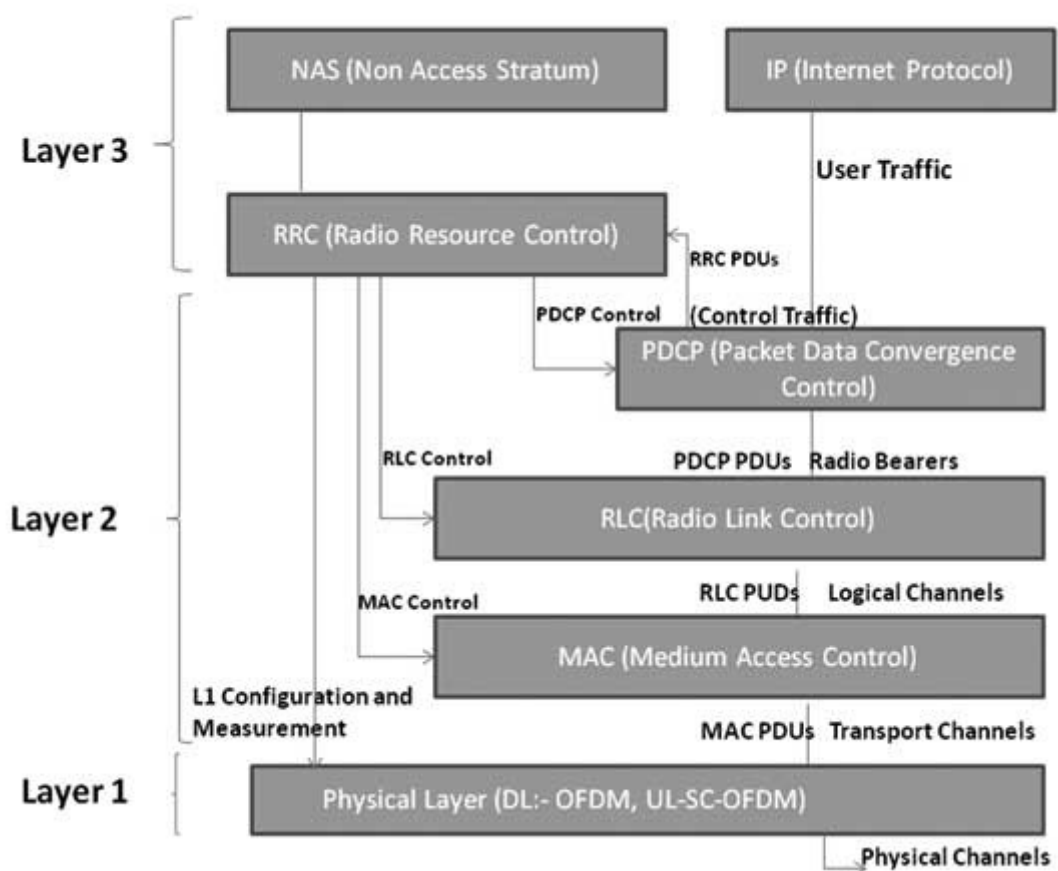
Η στοίβα πρωτοκόλλων για το επίπεδο ελέγχου μεταξύ του UE και MME την βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα. Η γκριζα περιοχή της στοίβας δείχνει τα access stratum (AS) πρωτόκολλα. Οι κατώτερες στοιβάδες εκτελούν τις ίδιες λειτουργίες όπως και για το επίπεδο χρήστη (user plane) με την εξαίρεση ότι δεν υπάρχει καμία λειτουργία συμπίεσης κεφαλίδας για το επίπεδο ελέγχου.



Σχήμα 3.8 Control Plane Protocols[36]

3.2.3 Protocol Stack Layers

Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε λίγο πιο αναλυτικά τα πρωτόκολλα που υπάρχουν στο E-UTRAN. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τα πρωτόκολλα και πως αυτά συνδυάζονται μεταξύ τους.



Σχήμα 3.9 Protocol Stack Layers[37]

Όπως βλέπουμε στο σχήμα 3.9 έχουμε 3 επίπεδα, το πρώτο αποτελείται από το φυσικό επίπεδο, το δεύτερο από το MAC και τα Radio Link Control (RLC) και Packet Data Convergence Control (PDCP) ενώ το τελευταίο επίπεδο έχουμε το NAS, Radio Resource Control (RRC) και Internet Protocol (IP).

Φυσικό επίπεδο (Physical Layer)

Στο φυσικό επίπεδο μεταφέρονται όλες οι πληροφορίες από τα κανάλια μεταφοράς MAC μέσω του δικτύου (air interface). Φροντίζει για την προσαρμογή ζεύξης (AMC), τον έλεγχο της ισχύος, αναζήτηση κυψελών (cell) (για το αρχικό συγχρονισμό και handover σκοπούς) και άλλες μετρήσεις (μέσα στο σύστημα LTE και μεταξύ των συστημάτων) για το στρώμα RRC.

Medium Access Layer (MAC)

Το MAC επίπεδο είναι αρμόδιο για τη χαρτογράφηση μεταξύ λογικών κανάλιων και των καναλιών μεταφοράς, για πολυπλεξία των MAC SDUs από ένα ή διαφορετικά λογικά κανάλια στο μπλοκ των μεταφορών (TB) που πρέπει να παραδοθεί στο φυσικό επίπεδο μέσω των καναλιών μεταφοράς, για αποπολυπλεξία των MAC SDUs από ένα ή διάφορα λογικά κανάλια από μπλοκ μεταφορών (TB) που απεστάλη από το φυσικό επίπεδο μέσω των καναλιών μεταφοράς, προγραμματισμός υποβολής πληροφοριών, διόρθωση σφαλμάτων μέσω HARQ, κατά προτεραιότητα διεκπεραίωση μεταξύ των UEs μέσω δυναμικού προγραμματισμού, κατά προτεραιότητα διεκπεραίωση των λογικών καναλιών ενός UE, λογική ιεράρχηση καναλιών.

Radio Link Control (RLC)

Το RLC έχει τρεις τρόπους λειτουργίας: Transparent Mode (TM), Unacknowledged Mode (UM) και Acknowledged Mode (AM).

Το RLC επίπεδο είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά των PDUs στα ανώτερο στρώμα,

διόρθωση σφαλμάτων μέσω ARQ (Μόνο για AM μεταφορά δεδομένων), Αλληλουχία, τεμαχισμό και την επανασυναρμολόγηση του RLC SDUs (Μόνο για UM και AM μεταφορά δεδομένων). Το RLC είναι επίσης υπεύθυνο για την εκ νέου κατάτμηση των δεδομένων RLC PDUs (Μόνο για AM μεταφορά δεδομένων), αναδιάταξη των δεδομένων RLC PDUs (Μόνο για UM και AM μεταφορά δεδομένων), εις διπλούν ανίχνευσης (Μόνο για UM και AM μεταφορά δεδομένων), την απόρριψη των RLC SDU (Μόνο για UM και AM μεταφορά δεδομένων), την αποκατάσταση RLC , και το πρωτόκολλο ανίχνευσης σφαλμάτων (Μόνο για AM μεταφορά δεδομένων). Στη συνέχεια για να γίνει πιο ξεκάθαρο παραθέτουμε το τι κάνει κάθε τρόπος λειτουργίας.

Transparent Mode

Η TM είναι μια σειρά μεταξύ των RLC SDUs και του RLC PDUs. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας ελέγχει κάποια σηματοδότηση π.χ. Πληροφορίες του συστήματος μετάδοσης και paging μηνύματα.

Unacknowledged Mode

Η UM χρησιμοποιείται για να κρατάει κυκλοφορία όπως είναι το VoIP μέσω του Multimedia broadcast/Multimedia Service (MBMS). Αυτή η λειτουργία εκτελεί τη διανομή και την συνέχεια των RLC SDUs, ανιχνεύει, αντιγράφει και αναδιατάσσει τα RLC PDUs, επίσης δημιουργεί ξανά τα RLC SDUs.

Acknowledged Mode

Η AM υποστηρίζει την καθυστέρηση και τα σφάλματα σε sensitive traffic που είναι μη-πραγματικού χρόνου όπως η περιήγηση του web. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας παρέχει αμφίδρομα δεδομένα όπου το RLC μπορεί να στείλει και να λάβει δεδομένα. Η ειδικότητα του ARQ (Automatic Repeat Request) είναι αυτή που μπορεί να λύσει εξαιρετικά τα σφάλματα πακέτων στην μετάδοση των δεδομένων. Κάποιο Control-plane είναι ότι τα RRC μηνύματα χρησιμοποιούνται σε αυτήν την λειτουργία. Πέρα από τις πληροφορίες της UM, η AM μπορεί να αναμεταδώσει τα

RLC PDUs και να επιλέξει ξανά την αναμετάδοση τους.

Packet Data Convergence Control (PDCP)

Το PDCP επίπεδο είναι υπεύθυνο για τη συμπίεση κεφαλίδας και αποσυμπίεση των δεδομένων IP, τη μεταφορά δεδομένων (επίπεδο χρήστη (user plane) ή το επίπεδο ελέγχου (control plane)), συντήρηση των PDCP αριθμών ακολουθίας (SNS), in-sequence παράδοση των ανωτέρων στρωμάτων PDUs στην αποκατάσταση των χαμηλότερων στρωμάτων, εις διπλούν εξάλειψη των χαμηλότερων στρωμάτων SDUs σε αποκατάσταση των χαμηλότερων στρωμάτων για τους ραδιοφωνικούς φορείς που έχουν χαρτογραφηθεί στο RLC AM, την κρυπτογράφηση και την αποκρυπτογράφηση των δεδομένων στο επίπεδο χρήστη και τα δεδομένα στο επίπεδο ελέγχου, προστασίας της ακεραιότητας και την επαλήθευση της ακεραιότητας των δεδομένων στο επίπεδο ελέγχου, απόρριψη με βάση το χρονόμετρο, εις διπλούν απόρριψη, PDCP χρησιμοποιείται για τα SRBs και DRBs χαρτογραφημένα σε DCCH και DTCH τύπους λογικών διαύλων. Το PDCP είναι υπεύθυνο τόσο για το uplink όσο και για το downlink.

- PDCP uplink: Υπάρχουν τρεις τύποι της διαδικασίας του Uplink μοντέλου που χρησιμοποιούνται στο LTE PDCP Uplink. Στην πρώτη μέθοδο, όταν το PDCP λαμβάνει IP πακέτα από το ανώτερο επίπεδο εφαρμόζει αριθμούς ακολουθίας. Η δεύτερη διαδικασία είναι υπεύθυνη για τη συμπίεση και την αποσυμπίεση των υψηλότερων IP πακέτων από το User-plane με το Robust Header Compression (ROHC) και τέλος η τρίτη είναι υπεύθυνη για την αποτελεσματική χρήση του εύρους φάσματος της διεπαφής.
- PDCP downlink: Σε αυτή τη διαδικασία όταν το PDCP λαμβάνει πακέτα από χαμηλότερα επίπεδα, ελέγχει την αποκρυπτογραφημένη πληροφορία από την κεφαλίδα του PDCP και την διαγράφει. Μετά από αυτό μπορεί να κρυπτογραφήσει τόσο στο User-plane όσο και στο Control-plane, επίσης ελέγχει την ακεραιότητα του Control-plane. Τέλος για την παράδοση των

πακέτων στα υψηλότερα στρώματα η αποσυμπίεση της κεφαλίδας του User-plane δημιουργείται με τους αριθμούς ακολουθίας.

Radio Resource Control (RRC)

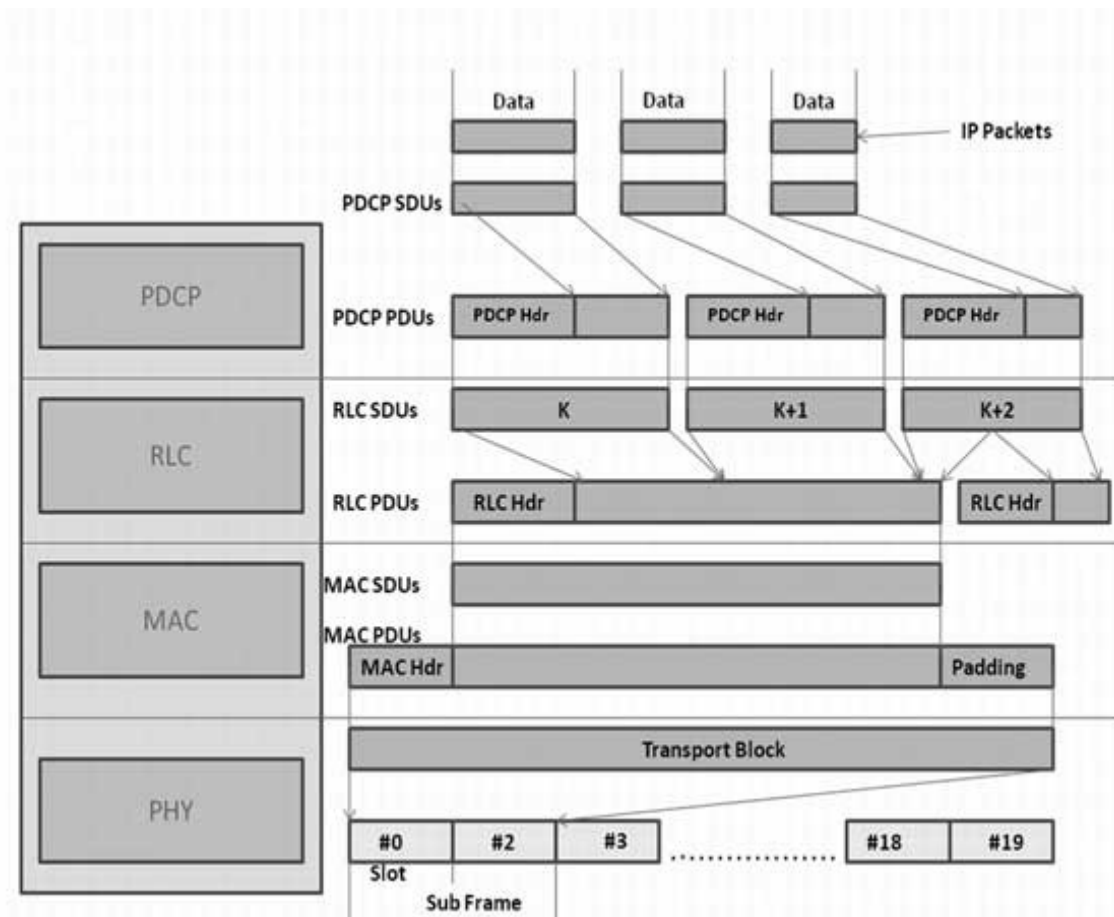
Οι κύριες υπηρεσίες και λειτουργίες του υποστρώματος RRC περιλαμβάνουν εκπομπή πληροφοριών του συστήματος που σχετίζονται με το non-access stratum (NAS), εκπομπή πληροφοριών του συστήματος που σχετίζονται με το access stratum (AS), σελιδοποίηση (paging), την εγκατάσταση, την συντήρηση και την απελευθέρωση μιας σύνδεσης RRC μεταξύ του UE και E-UTRAN, λειτουργίες ασφαλείας, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης κλειδιών, την εγκατάσταση, τη διαμόρφωση, τη συντήρηση και την απελευθέρωση της από point to point ραδιο-φορείς.

Non Access Stratum (NAS) Protocols

Τα non-access stratum (NAS) πρωτόκολλα αποτελούν το υψηλότερο στρώμα του επιπέδου ελέγχου μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη (UE) και MME. Τα NAS πρωτόκολλα στηρίζουν τη κινητικότητα των UE και τις διαδικασίες διαχείρισης συνεδρίας για να καθιερώσουν και να διατηρήσουν IP συνδεσιμότητα μεταξύ των UE και PDN-GW. Επίσης χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ταυτότητας και τη σύσταση των φορέων. Τα μηνύματα από τα NAS προσαρμόζονται, σταθεροποιούνται και ελέγχονται από το MME και τα UE.

3.2.4 Layers Data Flow

Στο παρακάτω σχήμα έχουμε ένα λογικό διάγραμμα των στρωμάτων πρωτοκόλλων E-UTRAN με παράσταση της ροής των δεδομένων μέσα από τα διάφορα στρώματα.

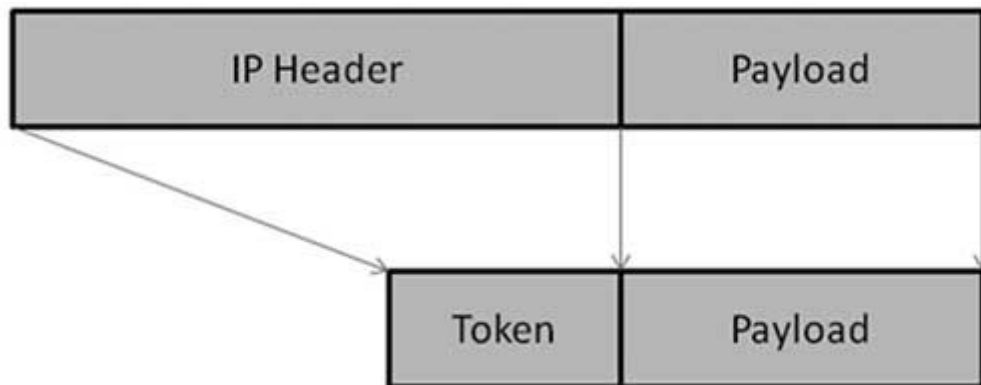


Σχήμα 3.10 Layers Data Flow[38]

Τα πακέτα που λαμβάνονται από ένα στρώμα ονομάζονται Service Data Unit (SDU) ενώ η τα πακέτα που εξέρχονται από ένα στρώμα αναφέρονται ως Protocol Data Unit (PDU). Παρακάτω θα δούμε τη ροή των δεδομένων από πάνω προς τα κάτω:

- Το IP layer υποβάλλει PDCP SDUs (πακέτα IP) στο PDCP layer. Το PDCP με τη σειρά του κάνει συμπίεση κεφαλίδας (header compression) και προσθέτει PDCP κεφαλίδα στα PDCP SDUs που προαναφέραμε. Στη συνέχεια το PDCP στρώμα υποβάλλει PDCP PDUs (RLC SDUs) στο RLC στρώμα.

Εδώ να πούμε δυο λόγια για το PDCP Header Compression: Το PDCP αφαιρεί κεφαλίδα IP (ελάχιστο 20 bytes) από PDU, και προσθέτει Token από 1-4 bytes. Αυτό παρέχει τεράστια εξοικονόμηση στο ποσό των header που διαφορετικά θα πρέπει να περάσει από το air interface.



Σχήμα 3.11 PDCP Header Compression[39]

- Το RLC layer κάνει κατάτμηση των SDUs ώστε να έχουμε τα RLC PDUs. Το RLC προσθέτει κεφαλίδα με βάση τον τρόπο λειτουργίας του RLC. RLC υποβάλλει τα RLC PDUs (MAC SDUs) στο MAC στρώμα.

RLC Segmentation: Εάν ένα RLC SDU είναι μεγάλο ή το διαθέσιμο ποσοστό ροής των δεδομένων είναι χαμηλό (με αποτέλεσμα να έχουμε μικρά block δεδομένων που μεταφέρουμε), το RLC SDU μπορεί να χωριστεί μεταξύ πολλών RLC PDUs. Εάν το RLC SDU είναι μικρό ή το διαθέσιμο ποσοστό ροής δεδομένων είναι υψηλό, πολλά RLC SDUs μπορούν να τοποθετούνται σε ένα PDU.

- Το MAC στρώμα προσθέτει κεφαλίδα και δημιουργεί περιθώριο για να χωρέσει το MAC SDU στο TTI. Το MAC επίπεδο υποβάλλει το MAC PDU στο φυσικό επίπεδο για τη διαβίβαση αυτού στο φυσικό κανάλι.
- Το φυσικό κανάλι μεταδίδει τα δεδομένα μέσα σε slot των υποπλαισίων

3.3 Κανάλια Επικοινωνίας

Η ροή πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων πρωτοκόλλων είναι γνωστά ως κανάλια και σήματα. Το LTE χρησιμοποιεί αρκετούς διαφορετικούς τύπους καναλιών, αυτά είναι τα κανάλια μεταφορών, τα φυσικά και τα λογικά κανάλια. Αυτά διακρίνονται από το είδος των πληροφοριών που μεταφέρουν και από τον τρόπο με τον οποίο επεξεργάζονται τις πληροφορίες.

- Λογικά κανάλια (logical channels): Ορίζουν τον τύπο των πληροφοριών που μεταδίδονται μέσω του αέρα, πχ. τα κανάλια κίνησης (traffic channels), κανάλια ελέγχου (control channels), σύστημα μετάδοσης (system broadcast) κ.λ.π. Δεδομένα και μηνύματα σηματοδότησης μεταφέρονται μέσω λογικούς διαύλους μεταξύ των RLC και MAC πρωτοκόλλων.
- Κανάλια μεταφοράς (transport channels): Ορίζει πως είναι κάτι που μεταδίδεται μέσω του αέρα, πχ την κωδικοποίηση, interleaving επιλογές που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων. Τα δεδομένα και τα μηνύματα σηματοδότησης μεταφέρονται μέσω των καναλιών μεταφοράς μεταξύ του MAC και του φυσικού στρώματος.
- Φυσικά κανάλια (physical channels): Ορίζει που μεταδίδεται κάτι μέσω του αέρα, πχ τα πρώτα N σύμβολα στο DL πλαίσιο. Τα δεδομένα και μηνύματα σηματοδότησης μεταφέρονται μέσω των φυσικών καναλιών μεταξύ των διαφόρων επιπέδων του φυσικού στρώματος.

3.3.1 Λογικά κανάλια

Τα λογικά κανάλια καθορίζουν το είδος των δεδομένων που μεταφέρονται. Αυτά τα κανάλια καθορίζουν τις υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων που προσφέρονται από το MAC επίπεδο. Τα δεδομένα και τα μηνύματα σηματοδότησης μεταφέρονται μέσω λογικών διαύλων μεταξύ των RLC και των MAC πρωτοκόλλων.

Οι λογικοί δίαυλοι μπορούν να χωριστούν σε κανάλια ελέγχου και τα κανάλια κυκλοφορίας. Το κανάλι ελέγχου μπορεί να είναι είτε κοινό κανάλι ή αφιερωμένο κανάλι. Ένα κοινό κανάλι σημαίνει κοινό για όλους τους χρήστες σε ένα κελί (Point to multipoint), ενώ αφιερωμένο σημαίνει ότι το κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο από ένα χρήστη (Point to Point).

Τα λογικά κανάλια χαρακτηρίζονται από τα στοιχεία που μεταφέρουν και μπορούν να ταξινομηθούν με δύο τρόπους. Πρώτον, λογικά κανάλια κυκλοφορίας μεταφέρουν τα δεδομένα στο επίπεδο χρήστη (user plane), ενώ λογικά κανάλια ελέγχου μεταφέρουν μηνύματα σηματοδότησης στο επίπεδο του ελέγχου (control plane). Ο πίνακας που ακολουθεί παραθέτει τα λογικά κανάλια που χρησιμοποιούνται από το LTE:

Channel Name	Acronym	Control Channel	Traffic Channel
Broadcast Control Channel	BCCH	X	
Paging Control Channel	PCCH	X	
Common Control Channel	CCCH	X	
Dedicated Control Channel	DCCH	X	
Multicast Control Channel	MCCH	X	
Dedicated Traffic Channel	DTCH		X
Multicast Traffic Channel	MTCH		X

Πίνακας 3.1 Λογικά κανάλια[40]

Παρακάτω θα αναφερθούμε στο κάθε κανάλι ξεχωριστά για τη λειτουργία του.

Broadcast Control Channel

Ένα downlink κανάλι που χρησιμοποιείται για την μετάδοση των πληροφοριών του συστήματος ελέγχου.

Paging Control Channel

Ένα downlink κανάλι που μεταφέρει πληροφορίες σελιδοποίησης και ειδοποιήσεις αλλαγής του συστήματος πληροφορίας. Αυτό το κανάλι χρησιμοποιεί την σελιδοποίηση, όταν το δίκτυο δεν γνωρίζει την θέση του UE στο κελί.

Common Control Channel

Ένα κανάλι για τη μετάδοση της πληροφορίας ελέγχου μεταξύ των UE και του δικτύου. Χρησιμοποιείται επίσης για τα UE που δεν έχουν RRC σύνδεση με το δίκτυο.

Dedicated Control Channel

Ένα σημείο προς σημείο (point to point) αμφίδρομο κανάλι, που μεταδίδει αφιερωμένες πληροφορίες ελέγχου μεταξύ του UE και του δικτύου. Χρησιμοποιείται για UE που έχουν RRC σύνδεση.

Multicast Control Channel

Ένα σημείο προς πολλά σημεία (point to multipoint) downlink κανάλι το οποίο χρησιμοποιείται για την μετάδοση MBMS πληροφοριών ελέγχου από το δίκτυο στο UE, για ένα ή περισσότερα MTCHs.

Dedicated Traffic Channel

Ένα point to point κανάλι, αφιερωμένο σε ένα UE, για την μετάδοση πληροφοριών χρήστη. Το DTCH μπορεί να υπάρξει τόσο στο Uplink όσο και στο Downlink.

Multicast Traffic Channel

Ένα point to multipoint downlink κανάλι για μετάδοση δεδομένων κίνησης από το δίκτυο στο UE. Αυτό το κανάλι χρησιμοποιείται μόνο από τα UE που λαμβάνουν MBMS.

3.3.2 Κανάλια μεταφοράς

Τα κανάλια μεταφοράς καθορίζουν πως και με τι είδους χαρακτηριστικά τα δεδομένα μεταφέρονται από το φυσικό επίπεδο. Τα δεδομένα και τα μηνύματα σηματοδότησης μεταφέρονται μέσω των καναλιών μεταφοράς μεταξύ του MAC και του φυσικού επιπέδου.

Οι δίαυλοι μεταφοράς διακρίνονται από τους τρόπους με τους οποίους ο επεξεργαστής του διαύλου μεταφοράς τους χειρίζεται. Ακολουθεί πίνακας με τα κανάλια μεταφοράς που χρησιμοποιούνται από το LTE:

Channel Name	Acronym	Control Channel	Traffic Channel
Broadcast Channel	BCH	X	
Downlink Shared Channel	DL-SCH	X	
Paging Channel	PCH	X	
Multicast Channel	MCH	X	
Uplink Shared Channel	UL-SCH		X
Random Access Channel	RACH		X

Πίνακας 3.2 Κανάλια Μεταφοράς[41]

Ας δούμε εν συντομία τι λειτουργία του κάθε καναλιού μεταφοράς.

Broadcast Channel

Τυποποιημένη και προκαθορισμένη μορφή μεταφοράς. Μετάδοση σε ολόκληρη την περιοχή κάλυψης του κελιού.

Downlink Shared Channel

Υποστηρίζει Hybrid ARQ, υποστηρίζει την δυναμική προσαρμογή της σύνδεσης μεταβάλλοντας την διαμόρφωση, την κωδικοποίηση και την μετάδοση. Προαιρετικά υποστηρίζει την μετάδοση σε ολόκληρο το κελί και επίσης την διαμόρφωση της

ακτίνας/δέσμης. Ακόμα υποστηρίζει τόσο την δυναμική όσο και την ήμι-στατική κατανομή των πόρων, την ασυνεχή ανατροφοδότηση για την ενεργοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας στα UE. Τέλος υποστηρίζει και την MBMS μετάδοση.

Paging Channel

Υποστηρίζει την ασυνεχή ανατροφοδότηση για την ενεργοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας στα UE. Εκπέμπει σε ολόκληρη την περιοχή που καλύπτει το κελί. Αντιστοιχίζεται σε φυσικούς πόρους οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν δυναμικά για κανάλια ελέγχου κυκλοφορίας και άλλα.

Multicast Channel

Μετάδοση σε ολόκληρη την περιοχή κάλυψης του κελιού. Υποστηρίζει την MBMS μετάδοση σε πολλαπλά κελιά και επίσης την ήμι-στατική κατανομή των πόρων.

Uplink Shared Channel

Προαιρετική υποστήριξη για την διαμόρφωση της ακτίνας/δέσμης. Υποστηρίζει την δυναμική προσαρμογή της σύνδεσης μεταβάλλοντας την ισχύ της μετάδοσης, την διαμόρφωση και τη κωδικοποίηση. Επίσης υποστηρίζει Hybrid ARQ και την δυναμική και ήμι-στατική κατανομή των πόρων.

Random Access Channel

Μεταφέρει ελάχιστες πληροφορίες. Οι μεταδόσεις στο κανάλι μπορούν να χαθούν λόγω συγκρούσεων (collisions).

3.3.3 Φυσικά Κανάλια

Τα δεδομένα και μηνύματα σηματοδότησης μεταφέρονται μέσω των φυσικών καναλιών μεταξύ των διαφόρων επιπέδων του φυσικού επιπέδου και κατά

συνέπεια έχουν χωριστεί σε δύο μέρη:

- Φυσικά κανάλια δεδομένων (Physical Data Channels)
- Φυσικά κανάλια ελέγχου (Physical Control Channels)

Φυσικά Κανάλια Δεδομένων

Τα φυσικά κανάλια δεδομένων διακρίνονται από τους τρόπους με τους οποίους ο επεξεργαστής του φυσικού καναλιού τα χειρίζεται, και από τους τρόπους με τους οποίους έχουν χαρτογραφηθεί πάνω στα σύμβολα και στους sub-carriers που χρησιμοποιούνται από την Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDMA). Στον πίνακα που ακολουθεί παραθέτουμε τα φυσικά κανάλια δεδομένων που χρησιμοποιούνται από το LTE:

Channel Name	Acronym	Downlink	Uplink
Physical downlink shared channel	PD SCH	X	
Physical broadcast channel	PBCH	X	
Physical multicast channel	PMCH	X	
Physical uplink shared channel	PUSCH		X
Physical random access channel	PRACH		X

Πίνακας 3.3 Φυσικά Κανάλια Δεδομένων[42]

Ο επεξεργαστής του καναλιού μεταφοράς συνθέτει διάφορα είδη πληροφοριών ελέγχου, για την υποστήριξη της χαμηλού επιπέδου λειτουργίας του φυσικού στρώματος. Αυτά αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα:

Field Name	Acronym	Downlink	Uplink
------------	---------	----------	--------

Downlink control information	DCI	X	
Control format indicator	CFI	X	
Hybrid ARQ indicator	HI	X	
Uplink control information	UCI		X

Πίνακας 3.4 Πληροφορίες ελέγχου καναλιού μεταφοράς[43]

Φυσικά Κανάλια Ελέγχου

Ο επεξεργαστής του καναλιού μεταφοράς δημιουργεί επίσης πληροφορίες ελέγχου που υποστηρίζουν τη λειτουργία χαμηλού επιπέδου του φυσικού επιπέδου και στέλνει αυτές τις πληροφορίες στον επεξεργαστή του φυσικού καναλιού με τη μορφή φυσικών διαύλων ελέγχου.

Οι πληροφορίες ταξιδεύουν όσο ο επεξεργαστής του καναλιού μεταφοράς είναι στον δέκτη, αλλά είναι εντελώς αόρατο στα υψηλότερα στρώματα. Ομοίως ο επεξεργαστής του φυσικού διαύλου δημιουργεί φυσικά σήματα, τα οποία υποστηρίζουν τις χαμηλότερου επιπέδου πτυχές του συστήματος.

Τα φυσικά κανάλια ελέγχου παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Channel Name	Acronym	Downlink	Uplink
Physical control format indicator channel	PCFICH	X	
Physical hybrid ARQ indicator channel	PHICH	X	
Physical downlink control channel	PDCCH	X	
Relay physical downlink control channel	R-PDCCH	X	
Physical uplink control channel	PUCCH		X

Πίνακας 3.5 Φυσικά κανάλια ελέγχου[44]

Ο σταθμός βάσης μεταδίδει επίσης άλλα δύο φυσικά σήματα, τα οποία βοηθούν το

κινητό να αποκτήσει τον σταθμό βάσης αφού ενεργοποιηθεί για πρώτη φορά. Αυτά τα σήματα είναι γνωστά ως το κύριο σήμα συγχρονισμού (primary synchronization signal – PSS) και το δευτερεύον σήμα συγχρονισμού (secondary synchronization signal – SSS).

3.4 E-UTRAN Network Interfaces

Η παροχή της αυτό-βελτιστοποίησης δικτύων (self-optimizing networks - SONs) είναι ένας από τους βασικούς στόχους του LTE. Πράγματι η αυτό-βελτιστοποίηση του δικτύου είναι μια υψηλή προτεραιότητα για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων ως εργαλείο για να αντλήσει την καλύτερη απόδοση από το δίκτυο με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, ειδικά σε περιβάλλοντα με διαφορετικές ράδιο-διαδόσεις (radio propagation). Ως εκ τούτου, από την αρχή του LTE η αυτό-βελτιστοποίηση δικτύων είναι ο ακρογωνιαίος λίθος και είναι η έννοια γύρω από την οποία όλα τα S1 και X2 interfaces έχουν σχεδιαστεί.

3.4.1 S1 Interface

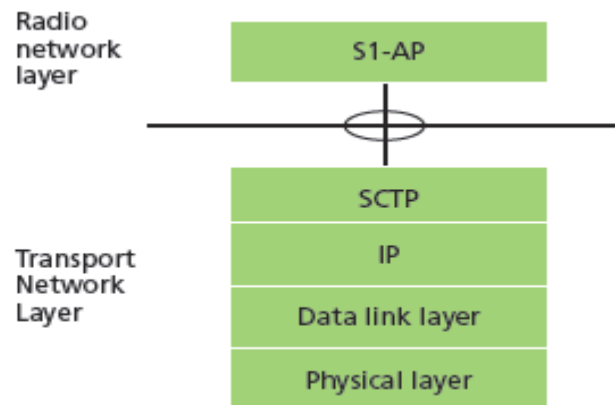
Η S1 διεπαφή συνδέει το eNodeB στο EPC. Χωρίζεται σε δύο διεπαφές, μια για το control plane και μια για το user plane. Η δομή του πρωτοκόλλου για την S1 διεπαφή και η λειτουργικότητα που παρέχετε συζητούνται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια παρακάτω.

Η δομή του πρωτοκόλλου πάνω στο S1 βασίζεται σε μια πλήρη στοίβα μεταφοράς IP χωρίς εξάρτηση από την legacy SS7 δικτυακή διαμόρφωση του δικτύου, όπως χρησιμοποιούταν στα δίκτυα GSM και UMTS. Η απλούστευση αυτή παρέχει μια αναμενόμενη αποταμίευση στις λειτουργικές δαπάνες όταν αναπτύσσονται τα δίκτυα LTE.

Control plane

Το SCTP πρωτόκολλο είναι γνωστό για τα προηγμένα χαρακτηριστικά που κληρονόμησε από το TCP που εξασφαλίζει την απαιτούμενη αξιόπιστη παράδοση

των μηνυμάτων σηματοδότησης. Επιπλέον καθιστά δυνατό να επωφεληθούν από τέτοια βελτιωμένα χαρακτηριστικά όπως η διαχείριση των πολλαπλών ρευμάτων για την εφαρμογή της μεταφοράς πλεονασμού του δικτύου εύκολα και να αποφεύγεται η head-of-line εμπλοκή ή multi-homing.

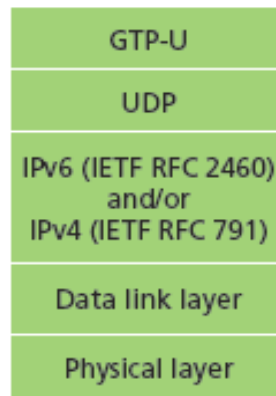


Σχήμα 3.12 S1 control plane protocol stack[45]

Μια απλούστευση στο LTE (για παράδειγμα σε σύγκριση με το UMTS Iu interface) είναι η άμεση χαρτογράφηση της εφαρμογής πρωτοκόλλου S1 (S1-AP) πάνω στο SCTP. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια απλοποιημένη στοίβα πρωτοκόλλων χωρίς ενδιάμεσο πρωτόκολλο διαχείρισης σύνδεσης, δεδομένου ότι οι συνδέσεις αντιμετωπίζονται μεμονωμένα άμεσα από το επίπεδο εφαρμογών. Η πολυπλεξία λαμβάνει χώρα μεταξύ S1-AP και SCTP όπου σε κάθε ρεύμα μιας SCTP ένωσης εφαρμόζεται πολυπλεξία με την κυκλοφορία σηματοδότησης πολλών μεμονωμένων συνδέσεων.

Το LTE έχει δημιουργήσει επίσης την ευελιξία στα χαμηλότερα επίπεδα πρωτοκόλλα, παρέχοντας στον χειριστή πλήρη δυνατότητα επιλογής όσον αφορά την επιλογή της IP έκδοσης και του στρώματος ζεύξης δεδομένων. Για παράδειγμα αυτό επιτρέπει στον χειριστή να αρχίσει την ανάπτυξη χρησιμοποιώντας IP έκδοση 4 με τη ζεύξη δεδομένων προσαρμοσμένη με το σενάριο ανάπτυξης του δικτύου.

User plane



Σχήμα 3.13 S1-U user plane protocol stack[46]

Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης GPRS Tunneling Protocol-User plane (GTP-U) είναι η εγγενής δυνατότητα του να εντοπίζει tunnels και να διευκολύνει την εσωτερική κινητικότητα στο 3GPP. Ο IP αριθμός έκδοσης και το στρώμα ζεύξης δεδομένων έχουν αφεθεί πλήρως προαιρετικά, όπως και για το control plane stack.

Ο κομιστής μεταφοράς προσδιορίζεται από τα τελικά σημεία της GTP σήραγγας και τη διεύθυνση IP (πηγή tunneling ID End [TEID], TEID προορισμού, διεύθυνση IP προέλευσης, διεύθυνση IP προορισμού). Η S-GW στέλνει πακέτα downlink ενός συγκεκριμένου φορέα στη διεύθυνση IP του eNodeB (που ελήφθη στο S10AP) που σχετίζεται με το συγκεκριμένο φορέα.

Ειδικές-vendor κατηγορίες κίνησης (για παράδειγμα, σε πραγματικό χρόνο κίνηση) μπορούν να αντιστοιχιστούν σε Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες (Differentiated Services-DiffServ), σημεία κώδικα (για παράδειγμα, ταχεία προώθηση) από τη λειτουργία του δικτύου και συντήρησης (O&M) ρύθμιση για τη διαχείριση διαφοροποίησης QoS μεταξύ των φορέων.

Κίνηση πάνω στο S1

Η ενεργοποίηση του S1-MME interface επιπέδου ελέγχου ξεκινά με την

αναγνώριση των MMEs στα οποία ο eNodeB πρέπει να συνδεθεί, ακολοθούμενο από τη ρύθμιση του επιπέδου δικτύου μεταφορών (Transport Network Layer – TNL). Με την υποστήριξη της λειτουργίας S1-flex στο LTE, ένα eNodeB πρέπει να ξεκινήσει μια S1 διεπαφή προς κάθε κόμβο MME στην περιοχή στην οποία ανήκει. Ο κατάλογος των MME κόμβων της περιοχής μαζί με την αρχική αντίστοιχη απομακρυσμένη διεύθυνση IP μπορεί άμεσα να διαμορφωθεί στον eNodeB κατά την ανάπτυξη (αν και άλλα μέσα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν). Ο eNodeB ξεκινά στη συνέχεια τη θέσπιση TNL με αυτήν τη διεύθυνση IP. Μόνο μία SCTP ένωση εγκαθίσταται μεταξύ ενός eNodeB και ενός MME.

Κατά την εγκατάσταση της SCTP σύνδεσης, οι δύο κόμβοι διαπραγματεύονται το μέγιστο αριθμό των ροών που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια αυτής της ένωσης. Ωστόσο, συνήθως χρησιμοποιούνται πολλαπλά ζεύγη ροών προκειμένου να αποφευχθεί το head-of-line blocking πρόβλημα που προαναφέραμε. (Να σημειώσουμε ότι ένα ρεύμα είναι μιας κατεύθυνσης και συνεπώς τα ζεύγη πρέπει να χρησιμοποιούνται) Ανάμεσα σε αυτά τα ζεύγη των ρευμάτων, ένα πρέπει να διατηρείται από τους δύο κόμβους για τη σηματοδότηση των κοινών διαδικασιών (δηλαδή εκείνα που δεν είναι ειδικά για ένα UE). Τα άλλα ρεύματα χρησιμοποιούνται για τον αποκλειστικό σκοπό των αφιερωμένων διαδικασιών (δηλαδή εκείνων που είναι ειδικά για ένα UE).

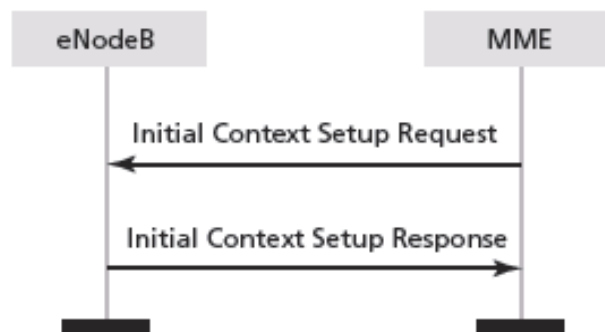
Μόλις το TNL έχει εγκατασταθεί, κάποια δεδομένα ρυθμίσεων σε επίπεδο εφαρμογής για τη λειτουργία του συστήματος ανταλλάσσονται αυτόματα μεταξύ του eNodeB και MME μέσω μιας S1 διαδικασίας εγκατάστασης που ξεκίνησε ο eNodeB. Αυτή η διαδικασία αποτελεί ένα παράδειγμα ενός δικτύου με διεργασία αυτό-διαμόρφωσης που παρέχεται στο LTE για να μειώσει τη διαμόρφωση που χρειάζεται να κάνουν οι χειριστές των δικτύων σε σύγκριση με τις πιο συνήθεις χειροκίνητες διαδικασίες διαμόρφωσης των προηγούμενων συστημάτων.

Μόλις η S1 διαδικασία εγκατάστασης έχει ολοκληρωθεί, η S1 διεπαφή είναι έτοιμη για λειτουργία.

Διαχείριση περιβάλλοντος πάνω στο S1

Σε κάθε pool area, ένα UE συνδέεται με ένα συγκεκριμένο MME για όλες τις επικοινωνίες κατά τη διάρκεια της παραμονής του σ αυτή την περιοχή. Αυτό δημιουργεί ένα πλαίσιο σ' αυτό το MME για το UE. Το συγκεκριμένο MME επιλέγεται από την λειτουργία επιλογής του κόμβου NAS (NAS Node Selection Function -NNSF) στο πρώτο eNodeB από το οποίο το UE εισήλθε στην περιοχή αυτή.

Κάθε φορά που το UE γίνεται ενεργό (δηλαδή κάνει μια μετάβαση από την κατάσταση αδράνειας στην ενεργή λειτουργία), υπό την κάλυψη ενός συγκεκριμένου eNodeB στην περιοχή, το MME παρέχει τις πληροφορίες πλαισίου σ' αυτό το eNodeB με την αρχική ρύθμιση πλαίσιο μηνύματος αίτησης.(βλέπε σχήμα 3.14) Αυτό δίνει τη δυνατότητα στον eNodeB με τη σειρά του να δημιουργήσει ένα πλαίσιο και να διαχειρίζεται το UE για τη διάρκεια της δραστηριότητας του όταν είναι σε ενεργή λειτουργία.



Σχήμα 3.14 Initial Context Setup procedure[47]

Ακόμη και αν η εγκατάσταση των κομιστών είναι κατά τα άλλα σχετικές με μια διαδικασία διαχείρισης αφιερωμένου κομιστή που περιγράφονται παρακάτω, η δημιουργία του πλαισίου eNodeB από την αρχική διαδικασία εγκατάστασης

πλασίου περιλαμβάνει επίσης τη δημιουργία ενός ή περισσότερων φορέων συμπεριλαμβανομένου και του προ επιλεγμένου κομιστή.

Στην επόμενη μετάβαση πίσω στην κατάσταση αναμονής μετά από ένα UE πλαίσιο απελευθέρωσης μηνύματος εντολής που αποστέλλεται από το MME, το πλαίσιο UE στην eNodeB διαγράφονται και μόνο το πλαίσιο UE στο MME παραμένει.

Διαχείριση κομιστή πάνω στο S1

Το LTE χρησιμοποιεί αφιερωμένες διαδικασίες που καλύπτουν ανεξάρτητα την εγκατάσταση, την τροποποίηση και την απελευθέρωση των κομιστών. Για κάθε κομιστή που ζητήθηκε να εγκατασταθεί, η διεύθυνσή του επίπεδου μεταφοράς και το tunnel endpoint παρέχονται στον eNodeB με το μήνυμα Bearer Setup Request για να δείξει τον τερματισμό του κομιστή στην S-GW όπου τα user plane uplink δεδομένα θα πρέπει να σταλούν. Αντίθετα, ο eNodeB υποδεικνύει στο Bearer Setup Response μήνυμα τον τερματισμό του κομιστή στον eNodeB που πρέπει να σταλούν τα user plane downlink δεδομένα. Για κάθε κομιστή, επίσης υποδεικνύονται οι QoS παράμετροι. Ανεξάρτητα από τις τυποποιημένες τιμές QCI, είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιηθεί επιπλέον QCI τιμές για την ταχεία εισαγωγή νέων υπηρεσιών εφόσον οι πωλητές και οι φορείς εκμετάλλευσης συμφωνήσουν σ αυτές.

Paging over S1

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, προκειμένου να αποκατασταθεί μια σύνδεση προς ένα UE σε κατάσταση αναμονής, το MME διανέμει ένα αίτημα σελιδοποίησης με τα σχετικά eNodeBs με βάση τις περιοχές που το UE αναμένεται να βρίσκεται.

Όταν λάβει το αίτημα σελιδοποίησης, ο eNodeB στέλνει μια σελίδα μέσω του radio interface στα κελιά που περιέχονται σε μία από τις περιοχές εντοπισμού που παρέχει αυτό το μήνυμα.

Το UE συνήθως σελιδοποιείται με τη χρήση του S-TMSI. Το μήνυμα αίτησης σελιδοποίησης περιέχει επίσης μια ταυτότητα UE τιμή δείκτη για τον eNodeB ώστε να υπολογίσει τις περιπτώσεις σελιδοποίησης κατά την οποία το UE θα στραφεί στον δέκτη του για να ακούσει για μηνύματα σελιδοποίησης.

Κινητικότητα πάνω στο S1

Το LTE/SAE υποστηρίζει την κινητικότητα εντός αυτών, καθώς και την κινητικότητα και σε άλλα συστήματα που χρησιμοποιούν τόσο 3GPP όσο και μη 3GPP τεχνολογίες. Οι διαδικασίες κινητικότητας περιλαμβάνουν επίσης τις διασυνδέσεις δικτύου. Παρακάτω θα συζητήσουμε τις διαδικασίες πάνω στο S1 για την υποστήριξη της κινητικότητας.

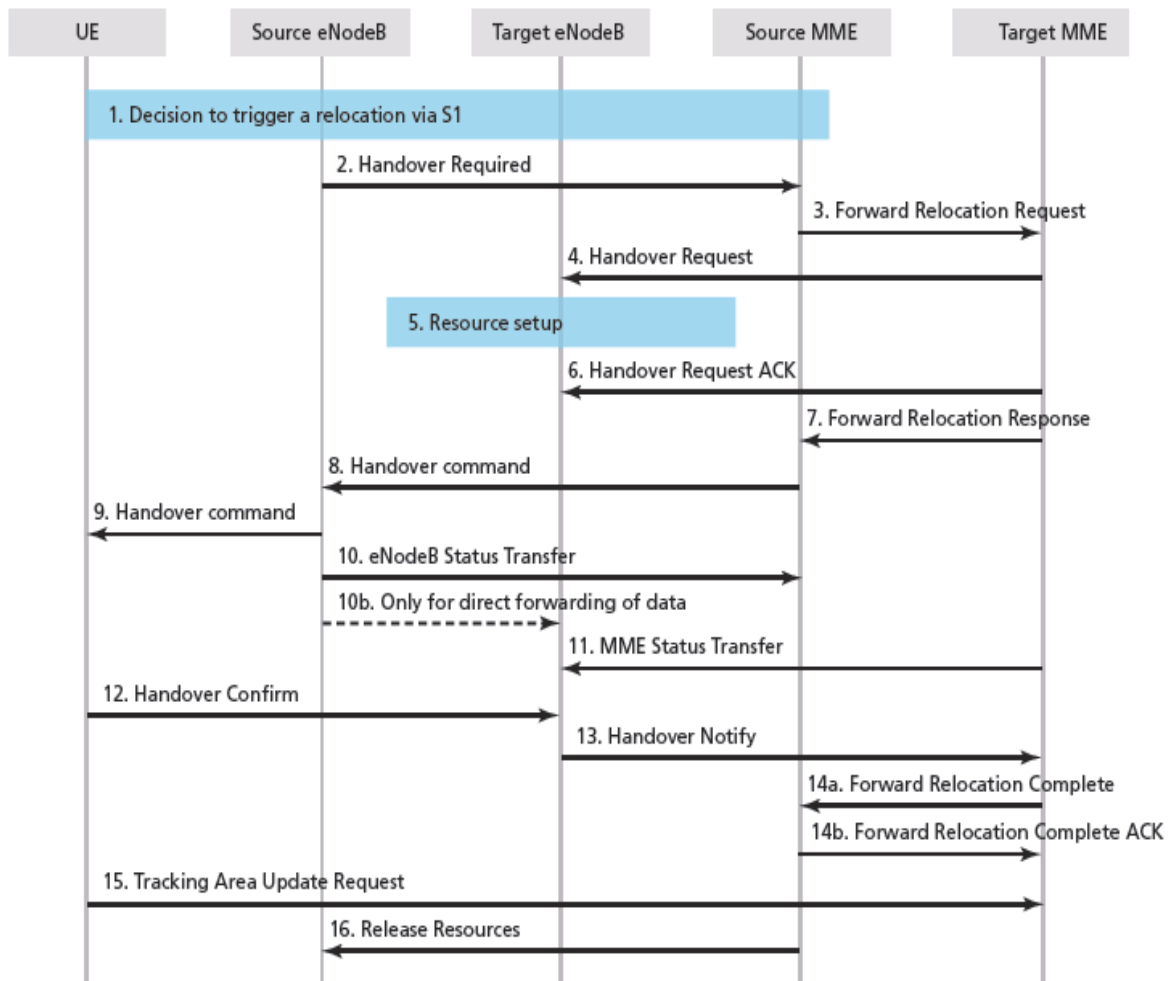
Εσωτερική κινητικότητα στο LTE

Υπάρχουν δύο τύποι διαδικασίας παράδοσης στο LTE για τα Ues σε ενεργό κατάσταση : S1 και X2 διαδικασίες παράδοσης.

Για την κινητικότητα εντός του LTE συστήματος, η X2 διαδικασία παραδόσεως χρησιμοποιείται συνήθως για inter-eNodeB παράδοση. Ωστόσο, όταν δεν υπάρχει X2 διεπαφή μεταξύ των δύο eNodeBs, ή εάν η πηγή eNodeB έχει ρυθμιστεί να ξεκινήσει παράδοση προς ένα συγκεκριμένο eNodeB μέσω της διεπαφής S1, τότε ένα S1-handover θα ενεργοποιηθεί.

Η διαδικασία παραδόσεως S1, που δείχνετε στο σχήμα 3.15, έχει σχεδιαστεί με παρόμοιο τρόπο με το UMTS Serving Radio Network Subsystem (SRNS) διαδικασία μετεγκατάστασης : αποτελείται από μια φάση προετοιμασίας, όπου οι πόροι CN ετοιμάζονται στη πλευρά του στόχου (βήματα 2 έως 8), ακολουθείται

από μια φάση εκτέλεσης (βήματα 8 έως 12) και μία φάση ολοκλήρωσης (μετά το βήμα 13).



Σχήμα 3.15 S1 based handover procedure[48]

Σε σύγκριση με το UMTS, η κύρια διαφορά είναι η εισαγωγή του μηνύματος Status Transfer που αποστέλλεται από τη πηγή eNodeB (βήματα 10 και 11). Αυτό το μήνυμα έχει προστεθεί προκειμένου να φέρει κάποιες PDCP πληροφορίες για την κατάσταση που απαιτούνται στο στόχο eNodeB σε περιπτώσεις όπου η διατήρηση

του status του PDCP ισχύει για την S1-handover, αυτό έρχεται σε συμφωνία με τις

πληροφορίες που αποστέλλονται με το X2 Status transfer message που χρησιμοποιείται για το X2-handover. Ως αποτέλεσμα αυτής της συμφωνίας, ο χειρισμός του handover από τον στόχο eNodeB όπως φαίνεται από το UE είναι ακριβώς ο ίδιος, ανεξάρτητα από το είδος του handover (S1 ή X2) που χρησιμοποιείται.

Η διαδικασία status transfer υποτίθεται ότι ενεργοποιείται παράλληλα με την έναρξη της αποστολής των δεδομένων από την πηγή eNodeB έχει λάβει το handover command μήνυμα από την πηγή MME. Αυτή η διαβίβαση δεδομένων μπορεί να είναι είτε άμεση είτε έμμεση, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα μιας άμεσης διαδρομής για τα δεδομένα επιπέδου χρήστη μεταξύ της πηγής eNodeB και του στόχου eNodeB.

Το handover μήνυμα ειδοποίησης (βήμα 13), το οποίο αποστέλλεται αργότερα από τον στόχο eNodeB όταν η άφιξη του UE από τη πλευρά του στόχου επιβεβαιώνεται, διαβιβάζεται από το MME ώστε να προκαλέσει την ενημέρωση της αλλαγής διαδρομής στο S-GW προς το στόχο eNodeB. Σε αντίθεση με το X2 handover, το μήνυμα δεν αναγνωρίζεται και οι πόροι στην πλευρά της πηγής απελευθερώνονται αργότερα με τη λήψη ενός μηνύματος Resource Release που άμεσα ενεργοποιείται από την πηγή MME (βήμα 17 στο παραπάνω σχήμα).

Inter-Radio Access Technology Mobility

Ένα βασικό στοιχείο του σχεδιασμού της πρώτης έκδοσης του LTE είναι η ανάγκη να συνυπάρχει με άλλες τεχνολογίες. Όσον αφορά την κινητικότητα από το LTE προς το UMTS, η διαδικασία παράδοσης μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει τις διαδικασίες S1-handover που περιγράφεται παραπάνω, με εξαίρεση του μηνύματος κατάσταση μεταφοράς, το οποίο δεν απαιτείται στα βήματα 10 και 11, δεδομένου ότι το πλαίσιο PDCP δεν συνεχίζεται. Όσον αφορά την κινητικότητα προς την κατεύθυνση CDMA2000, αφιερωμένες uplink και downlink διαδικασίες έχουν εισαχθεί στο LTE. Επί της ουσίας ο στόχος τους είναι το tunneling της CDMA2000 σηματοδότησης μεταξύ του UE και του συστήματος CDMA2000 μέσω

της διασύνδεσης S1, χωρίς να ερμηνεύεται από τον κόμβο eNodeB κατά τη διάρκεια. Το Uplink S1 CDMA2000 tunneling μήνυμα περιλαμβάνει επίσης το Radio Access Technology (RAT) προκειμένου να εντοπίσει το CDMA2000 RAT με το οποίο το tunneled CDMA2000 μήνυμα σχετίζεται ώστε το μήνυμα να δρομολογηθεί στο σωστό κόμβο μέσα στο σύστημα CDMA2000.

Διαχείριση φόρτου πάνω στο S1

Τρεις τύποι διαδικασιών διαχείρισης φόρτου εφαρμόζονται πάνω στο S1: μια κανονική διαδικασία εξισορρόπησης φόρτου για τη διανομή της κυκλοφορίας, μια διαδικασία υπερφόρτωσης για να ξεπεράσει μια ξαφνική κορύφωση στη φόρτωση και μια διαδικασία εξισορρόπησης φόρτου για να αποφορτίσουν μερικώς/πλήρως ένα MME.

Η διαδικασία εξισορρόπησης φόρτου MME στοχεύει να διανείμει την κίνηση στους MMEs στην “πισίνα” ομοιόμορφα σύμφωνα με τις αντίστοιχες δυνατότητες τους. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, η διαδικασία βασίζεται στην κανονική NNSF παρούσα σε κάθε eNodeB ως μέρος της S1-flex λειτουργίας. Υπό την προϋπόθεση ότι κατάλληλοι συντελεστές βάρους που αντιστοιχούν στην χωρητικότητα του κάθε MME κόμβου είναι διαθέσιμα στους eNodeBs εκ των προτέρων, ένας σταθμισμένος NNSF που γίνεται από κάθε και για κάθε eNodeB στο δίκτυο επιτυγχάνει συνήθως στατιστικά ισορροπημένη κατανομή του φόρτου μεταξύ των κόμβων MME χωρίς περαιτέρω ενέργειες. Ωστόσο συγκεκριμένες ενέργειες απαιτούνται ακόμη για ορισμένα συγκεκριμένα σενάρια:

- Εάν ένας νέος κόμβος MME εισάγεται (ή αφαιρείται), μπορεί να είναι αναγκαίο να αυξήσει (ή μειώσει) προσωρινά τον συντελεστή βάρους που συνήθως αντιστοιχεί στην χωρητικότητα αυτού του κόμβου ώστε να το κάνουν να πιάσει περισσότερη (ή λιγότερη) κυκλοφορία κατά την έναρξη μέχρι να φτάσει σε επαρκές επίπεδο φόρτου.
- Σε περίπτωση που μια απροσδόκητη κορύφωση στο φόρτο, ένα μήνυμα υπερφόρτωσης μπορεί να σταλεί μέσω της διασύνδεσης S1 από το

υπερφορτωμένο MME. Όταν λαμβάνεται από ένα eNodeB, αυτό το μήνυμα ζητεί προσωρινό περιορισμό από έναν ορισμένο τύπο κίνησης. Ένα MME μπορεί να προσαρμόσει τη μείωση της κίνησης που επιθυμεί με τον καθορισμό του αριθμού των eNodeBs στα οποία στέλνει το μήνυμα υπερφόρτωσης και τον καθορισμό των τύπων κυκλοφορίας που υπόκεινται σε περιορισμό.

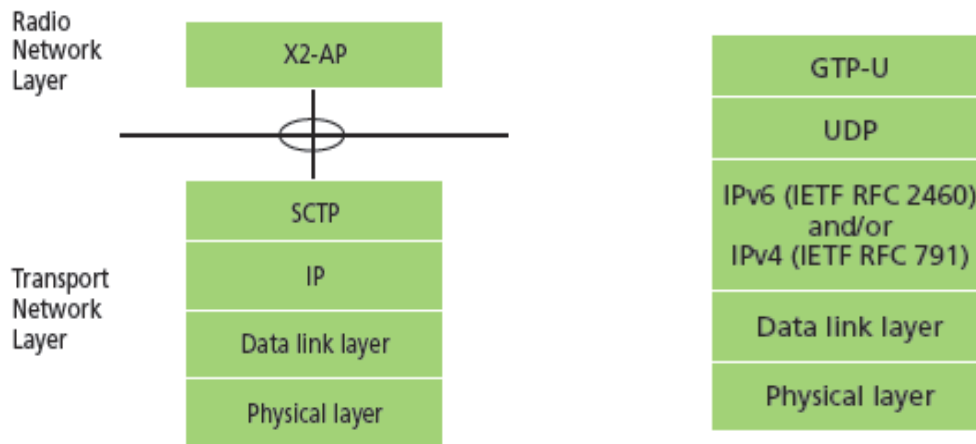
- Τέλος, αν το MME θέλει να αναγκάσει γρήγορα την αποφόρτιση ορισμένων ή όλων των Ues του, θα χρησιμοποιήσει τη λειτουργία εξισορρόπησης. Η λειτουργία αυτή αναγκάζει τα Ues να συνδεθούν σε άλλο MME, χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη “cause value” στο μήνυμα UE Release Command S1. Σε ένα πρώτο στάδιο εφαρμόζεται στα Ues σε κατάσταση αναμονής και σε ένα δεύτερο στάδιο μπορεί επίσης να εφαρμόζεται σε Ues σε κατάσταση σύνδεσης (connected) (σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η πλήρης αποφόρτισης του MME , για παράδειγμα για λόγους συντήρησης).

3.4.2 X2 Interface

Η διεπαφή X2 χρησιμοποιείται για να διασυνδέσει τα eNodeBs. Η δομή πρωτοκόλλου για τη διεπαφή X2 και η λειτουργικότητα που παρέχεται πάνω σ αυτή συζητούνται παρακάτω.

Δομή πρωτοκόλλου πάνω στην διεπαφή X2

Οι στοίβες πρωτοκόλλου επιπέδου ελέγχου και του χρήστη μέσω της διασύνδεσης X2, που φαίνεται στα σχήματα 3.16 και 3.17 αντίστοιχα, είναι τα ίδια με εκείνα για τη διεπαφή S1, με την εξαίρεση ότι το X2-AP είναι υποκατεστημένο για το S1-AP. Αυτό επιβεβαιώνει επίσης ότι η επιλογή της έκδοσης IP και το στρώμα ζεύξης δεδομένων είναι πλήρως προαιρετική. Η χρήση της ίδιας δομής πρωτοκόλλου πάνω από τις δύο διεπαφές παρέχει πλεονεκτήματα όπως απλοποίηση της λειτουργίας διαβίβασης των δεδομένων.



Σχήμα 3.16 X2 signaling protocol bearer stack[49] Σχήμα 3.17 Transport Network Layer for data streams over X2 [50]

Initiation over X2

Η διεπαφή X2 μπορεί να δημιουργηθεί μεταξύ ενός eNodeB και μερικά γειτονικά eNodeBs προκειμένου να ανταλλάσσουν πληροφορίες σηματοδότησης όταν χρειάζεται. Ωστόσο, ένα πλήρες πλέγμα δεν επιβάλλεται σε ένα δίκτυο E-UTRAN. Δύο τύποι πληροφοριών μπορεί να χρειαστεί συνήθως να ανταλλάσσονται πάνω στην X2 ώστε να οδηγήσει στη δημιουργία μιας διεπαφής X2 μεταξύ δύο eNodeBs: ο φόρτος ή πληροφορίες που σχετίζονται με παρεμβολές και σχετικές με handover πληροφορίες.

Επειδή αυτές οι δύο τύποι πληροφοριών είναι πλήρως ανεξάρτητες η μία από την άλλη, είναι πιθανό ότι μια διεπαφή X2 μπορεί να είναι παρούσα μεταξύ δύο eNodeBs για το σκοπό της ανταλλαγής φόρτου ή πληροφορίες παρεμβολών, ακόμη και αν η διαδικασία X2-handover δεν χρησιμοποιείται για το handover Ues μεταξύ αυτών των eNodeBs. Σε μια τέτοια περίπτωση χρησιμοποιείται η

διαδικασία S1-handover αντί της X2. Η προετοιμασία της διασύνδεσης X2 ξεκινά με τον προσδιορισμό ενός κατάλληλου γείτονα που ακολουθείται από τη δημιουργία της TNL.

Ο προσδιορισμός ενός κατάλληλου γείτονα μπορεί να γίνει με τη διαμόρφωση ή εναλλακτικά με μια λειτουργία γνωστή ως automatic neighbor relation function (ANRF).

Αυτή η λειτουργία επιτρέπει τη χρήση των Ues για τον προσδιορισμό των χρήσιμων γειτονικών eNodeBs: ένα eNodeB μπορεί να ζητήσει από ένα UE να διαβάσει τη καθολική ταυτότητα του κελιού από τη πληροφορία εκπομπής ενός άλλου eNodeB για το οποίο το UE έχει προσδιορίσει τη φυσική ταυτότητα του κελιού (PCI) κατά τη διάρκεια της νέας διαδικασίας αναγνώρισης των κελιών.

Η ANRF είναι ένα άλλο παράδειγμα μιας διαδικασίας SON η οποία εισάγεται με επιτυχία στο LTE. Μέσω αυτής της διαδικασίας αυτό-βελτιστοποίησης τα UEs και οι μετρήσεις των eNodeBs χρησιμοποιούνται για τον αυτόματο συντονισμό του δικτύου.

Μόλις εντοπιστεί ένας κατάλληλος γείτονας, ο αρχικός eNodeB ρυθμίζει το TNL χρησιμοποιώντας τη διεύθυνση IP X2 αυτού του γείτονα είτε ανακτώντας τη από το δίκτυο ή τοπικά ρυθμισμένη. Ειδικότερα, μια SON-διαμορφωμένη αφιερωμένη διαδικασία πάνω στο S1 ονόματι eNB Configuration Transfer procedure έχει σχεδιαστεί για να επιτρέψει την έναρξη στον eNodeB να ζητήσει άμεσα μέσω της διασύνδεσης S1 τη διεύθυνση IP X2 ενός eNodeB γείτονα που ανακαλύφθηκε ώστε να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία της X2 διασύνδεσης. Αυτή η λύση δικτύου μέσω της διεπαφής S1 μπορεί να αποτρέψει την ανάγκη για έναν διαχειριστή δικτύου να χρησιμοποιήσει άλλες πιο σύνθετες λύσεις, όπως την ανάπτυξη των DNS εξυπηρετητών.

Μετά την σύσταση της TNL, ο αρχικός eNodeB πρέπει να ενεργοποιήσει τη διαδικασία εγκατάστασης X2. Η διαδικασία αυτή ενεργοποιεί μια αυτόματη ανταλλαγή επιπέδου εφαρμογής δεδομένων σχετικά με τη διεπαφή X2, παρόμοια

με τη διαδικασία εγκατάστασης της διεπαφής S1. Για παράδειγμα, κάθε eNodeB αναφέρει σε ένα γειτονικό eNodeB, χρησιμοποιώντας το μήνυμα Αίτημα εγκατάστασης X2, πληροφορίες για το κάθε κελί που διαχειρίζεται, όπως τη φυσική ταυτότητα του κελιού, τη ζώνη συχνοτήτων, την ταυτότητα περιοχής εντοπισμού ή/και των συνδεδεμένων PLMNs.

Αυτή η αυτόματη ανταλλαγή δεδομένων κατά τη διαδικασία εγκατάστασης X2 είναι και ο πυρήνας ενός άλλου χαρακτηριστικού SON: η αυτόματη αυτό-διαμόρφωση των PCIs. Σύμφωνα με αυτό το νέο χαρακτηριστικό SON το σύστημα O&M μπορεί να παρέχει στους eNodeBs είτε μια λίστα με τις πιθανές τιμές PCI για να χρησιμοποιήσει ή μια ειδική τιμή PCI. Στην πρώτη περίπτωση, προκειμένου να αποφεύγονται οι συγκρούσεις ο eNodeB πρέπει να χρησιμοποιεί μια PCI που δεν χρησιμοποιείται ήδη στη γειτονιά της. Επειδή οι πληροφορίες PCI περιλαμβάνονται στη διαδικασία εγκατάστασης LTE X2, ενώ ανιχνεύει ένα γειτονικό κελί από τη λειτουργία ANR, ένας eNodeB μπορεί επίσης να ανακαλύψει όλες τις τιμές PCI που χρησιμοποιούνται στη γειτονιά αυτού του κελιού με συνέπεια την εξάλειψη αυτών των τιμών από τον κατάλογο των κατάλληλων PCIs για να αρχίσει με αυτές.

Μόλις έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία εγκατάστασης X2, η διεπαφή X2 είναι λειτουργική.

Κινητικότητα στην X2

Το handover μέσω της διεπαφής X2 ενεργοποιείται από προεπιλογή για την κινητικότητα εντός του LTE, εκτός αν δεν υπάρχει καμιά διασύνδεση X2 εγκατεστημένη ή η eNodeB πηγή έχει ρυθμιστεί να χρησιμοποιεί S1-handover αντ' αυτού. Όπως και η S1-handover έτσι και η X2-handover αποτελείται από ένα στάδιο προετοιμασίας, μία φάση εκτέλεσης και μία φάση ολοκλήρωσης.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του X2-handover για την intra-LTE handover είναι:

- Η παράδοση (handover) εκτελείται κατευθείαν μεταξύ δύο eNodeBs,

καθιστώντας την φάση της προετοιμασίας γρήγορη.

- Η διαβίβαση των στοιχείων μπορεί να λειτουργεί ανά φορέα, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια δεδομένων.
- Το MME ενημερώνεται μόνο στο τέλος της διαδικασίας handover όταν αυτή είναι επιτυχής, προκειμένου να ενεργοποιήσει το διακόπτη διαδρομής.
- Η αποδέσμευση πόρων στην πλευρά της πηγής ενεργοποιείται άμεσα από τον eNodeB στόχο.

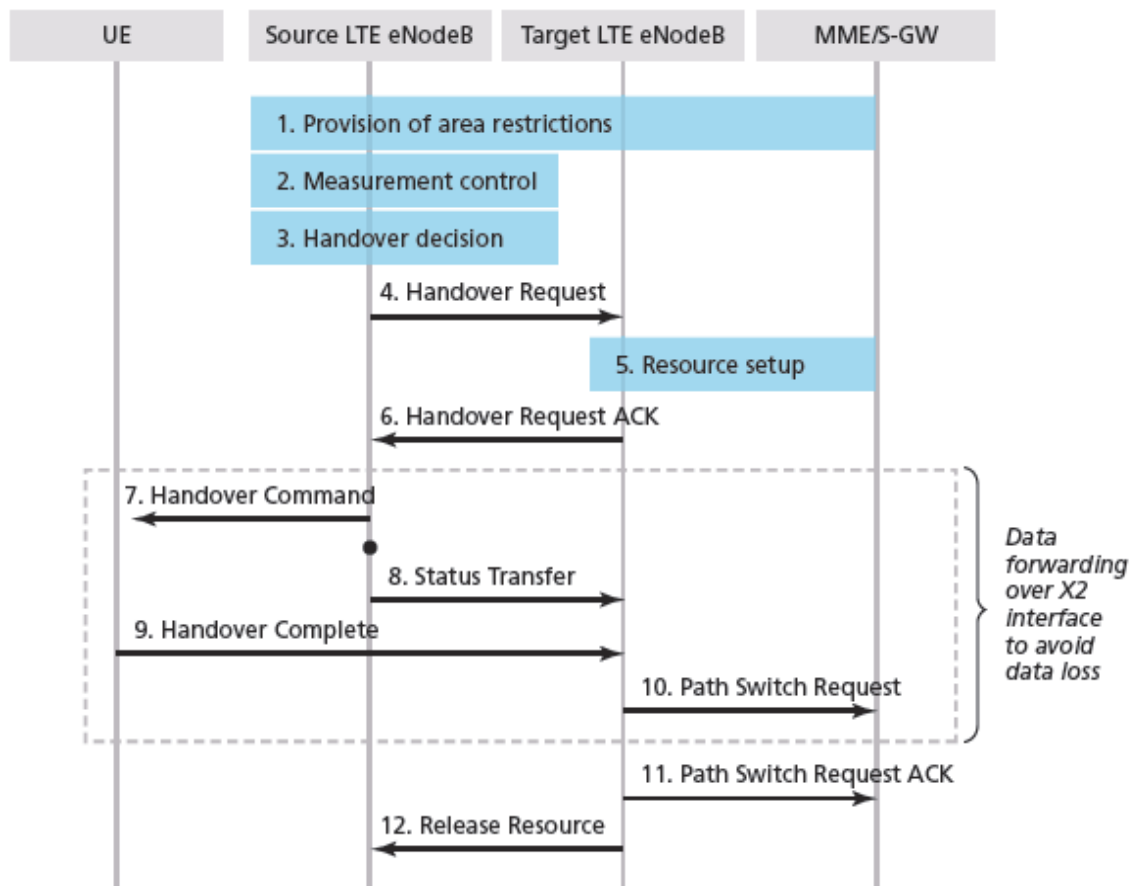
Για εκείνους τους φορείς που απαιτούν παράδοση των πακέτων με τη σωστή σειρά, το μήνυμα κατάστασης μεταφοράς (Status Transfer Message), παρέχει τον αριθμό ακολουθίας (SN) και τον αριθμό υπέρ πλαισίου (HFN – hyper frame number) στον eNodeB στόχο ο οποίος πρέπει να δώσει στο πρώτο πακέτο που δεν έχει ακόμα αριθμό ακολουθίας (SN) και πρέπει να παραδωθεί.

Αυτό το πρώτο πακέτο μπορεί να λαμβάνεται είτε από τη διαδρομή S1 είτε από την X2 εάν τα δεδομένα διαβιβάζονται μέσω της X2 διασύνδεσης. Όταν η eNodeB πηγή στέλνει το μήνυμα κατάσταση μεταφοράς, παγώνει τη κατάσταση πομπού/δέκτη, δηλαδή σταματάει την ανάθεση PDCP Sns για downlink πακέτα και σταματά την παροχή uplink πακέτων στο EPC.

Η κινητικότητα πάνω στο X2 μπορούν να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με την αντοχή του σε απώλεια πακέτων: η παράδοση(handover) μπορεί να ονομαστεί “απρόσκοπτη” αν ελαχιστοποιεί το χρόνο διακοπής κατά τη διάρκεια της κίνησης του UE ή “χωρίς απώλειες” αν δεν ανέχεται καθόλου την απώλεια πακέτων. Αυτοί οι δύο τρόποι χρησιμοποιούν τη διαβίβαση δεδομένων των πακέτων downlink στο επίπεδο χρήστη. Ο eNodeB πηγή μπορεί να αποφασίσει για τη λειτουργία ενός από τους δύο αυτούς τρόπους ανά-EPS-bearer, με βάση το QoS που έλαβε από το S1 για αυτόν τον bearer και την υπηρεσία που λειτουργεί.

Seamless handovers

Εάν ο eNodeB πηγή επιλέξει την απρόσκοπτη λειτουργία για ένα κομιστή, προτείνει στο eNodeB στόχο στο μήνυμα εντολής παράδοσης (handover request message) τη δημιουργία ενός GTP tunnel για να λειτουργήσει η διαβίβαση δεδομένων downlink. Εάν ο στόχος eNodeB το δεχτεί, δείχνει στο μήνυμα Αίτηση Παράδοση ACK το τελικό σημείο όπου τα διαβιβασμένα δεδομένα αναμένονται να ληφθούν. Το τελικό σημείο της διαδρομής μπορεί να είναι διαφορετικό από εκείνο που έχει συσταθεί ως το σημείο τερματισμού του νέου φορέα που εγκαταστάθηκε για το S1 στόχο.



Σχήμα 3.18 X2-based handover procedure[51]

Μετά τη λήψη του μηνύματος ACK αίτηση παράδοση, η πηγή eNodeB μπορεί να αρχίσει τη διαβίβαση των δεδομένων που φθάνουν πρόσφατα μέσω της διαδρομής S1 προς το τελικό σημείο του tunnel παράλληλα με την αποστολή του handover trigger στο UE μέσω της ασύρματης διεπαφής. Έτσι τα διαβιβασμένα δεδομένα είναι διαθέσιμα στον eNodeB στόχο που πρέπει να τα παραδώσει στο UE όσο το δυνατόν νωρίτερα.

Όταν η διαβίβαση είναι σε λειτουργία και απαιτείται η παράδοση των πακέτων σε σωστή σειρά, ο eNodeB στόχος υποτίθεται ότι θα παραδώσει πρώτα τα πακέτα που προωθούνται πάνω στο X2 προτού παραδώσει αυτά που λαμβάνει από το S1 μονοπάτι, τη στιγμή που γίνει η αλλαγή του S1 μονοπατιού. Το τέλος της προώθησης σηματοδοτείται πάνω στο X2 στον eNodeB στόχο με την υποδοχή των “ειδικών πακέτων GTP” τα οποία έχει εισάγει η S-GW πάνω στο μονοπάτι S1 λίγο πριν την αλλαγή του μονοπατιού S1. Στη συνέχεια αυτές προωθούνται από την πηγή eNodeB μέσω του X2 όπως και κάθε άλλο κανονικό πακέτο.

Lossless handover

Εάν ο eNodeB πηγή επιλέξει το χωρίς απώλειες τρόπο (lossless mode) για ένα κομιστή, θα προωθήσει επίσης μέσω του X2 τα πακέτα downlink επιπέδου χρήστη τα οποία έχουν PDCP επεξεργασία, αλλά που εξακολουθούν να αποθηκεύονται τοπικά, επειδή δεν έχουν ακόμη παραδοθεί και αναγνωρισθεί από το UE. Αυτά τα πακέτα προωθούνται μαζί με το ορισμένο PDCP SN που περιλαμβάνεται σε μια GTP επέκταση πεδίου κεφαλίδας. Στέλνονται μέσω του X2 πριν από τα πιο πρόσφατα πακέτα που έχουν φτάσει μέσω του μονοπατιού πηγής S1. Οι ίδιοι μηχανισμοί που περιγράφονται παραπάνω για την απρόσκοπτη παράδοση (seamless handover) χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία GTP tunnel. Το τέλος της αποστολής αντιμετωπίζεται επίσης με τον ίδιο τρόπο. Δεδομένου ότι η σωστή σειρά στη παράδοση πακέτων ισχύει και για τη παράδοση χωρίς απώλειες (lossless handovers). Επιπλέον, ο κόμβος eNodeB στόχος πρέπει να εξασφαλίζει

ότι όλα τα πακέτα, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που υποβλήθηκαν με αριθμό ακολουθίας μέσω του X2, παραδίδονται με τη σωστή σειρά προς το παραλήπτη.

Μια νέα λειτουργία στο LTE είναι η βελτιστοποίηση του radio με επιλεκτική αναμετάδοση. Όταν χρησιμοποιείται η παράδοση χωρίς απώλειες, ο eNodeB στόχος δεν μπορεί να παραδώσει μέσω της ασύρματης διεπαφής μερικά από τα προωθούμενα downlink πακέτα που έλαβε μέσω του X2, εάν έχει ενημερωθεί από το UE ότι αυτά τα πακέτα έχουν ήδη ληφθεί από την πλευρά του αποστολέα. Αυτό ονομάζεται επιλεκτική αναμετάδοση downlink.

Ομοίως στο uplink, ο κόμβος στόχος eNodeB μπορεί να μην επιθυμεί το UE να αναμεταδώσει τα πακέτα που έχει ήδη λάβει νωρίτερα από τη πλευρά της πηγής από τον κόμβο eNodeB πηγή, ώστε για παράδειγμα να αποφευχθεί η σπατάλη πόρων. Για να χρησιμοποιηθεί στο uplink η επιλεκτική αναμετάδοση, ο κόμβος πηγή eNodeB προωθεί τα πακέτα uplink του επιπέδου χρήστη που έχει λάβει σε ακολουθία από το στόχο eNodeB μέσω ενός νέου GTP tunnel. Ο eNodeB στόχος πρέπει πρώτα να ζητήσει από τον eNodeB πηγή για τη δημιουργία του νέου tunnel προώθησης συμπεριλαμβανομένου και ενός τελικού σημείου GTP όπου αναμένει τα πακέτα uplink που προωθούνται, ώστε να λάβει το Handover Request ACK μήνυμα. Εάν είναι δυνατόν, στη συνέχεια ο eNodeB πηγή θα αναφέρει στο μήνυμα κατάσταση μεταφοράς για αυτόν τον φορέα, τον κατάλογο των Sns που αντιστοιχούν στα αναμενόμενα προωθημένα πακέτα. Αυτή η λίστα βοηθά τον eNodeB στόχο να ενημερώσει το UE νωρίτερα, τα πακέτα που δεν έχουν αναμεταδοθεί καθιστώντας το συνολικό uplink επιλεκτικό σύστημα αναμετάδοσης ταχύτερο.

Multiple preparation

Ένα άλλο νέο χαρακτηριστικό της διαδικασίας handover του LTE σε σύγκριση με το UMTS είναι η πολλαπλή προετοιμασία. Αυτή η λειτουργία επιτρέπει στον eNodeB πηγή να ενεργοποιήσει τη διαδικασία προετοιμασίας παράδοσης προς πολλαπλούς υποψήφιους στόχους eNodeBs. Παρ' όλο που μόνο ένας από τους

υποψήφιους υποδεικνύεται ως στόχος προς το UE, αυτό καθιστά την ανάκτηση ταχύτερη σε περίπτωση που το UE αποτύχει να συνδεθεί με τον eNodeB στόχο και αντ' αυτού συνδέεται με ένα από τα άλλα υποψήφια προετοιμασμένα eNodeBs. Ο eNodeB πηγή λαμβάνει μόνο ένα μήνυμα απελευθέρωσης πόρων από τον τελικό επιλεγμένο eNodeB.

Ανεξάρτητα από το αν χρησιμοποιείται πολλαπλή η απλή προετοιμασία, το handover μπορεί να ακυρωθεί κατά τη διάρκεια ή μετά τη φάση της προετοιμασίας. Εάν χρησιμοποιείται η δυνατότητα πολλαπλής προετοιμασίας, συνίσταται κατά τη λήψη του μηνύματος Release Resource ο eNodeB πηγή να πυροδοτεί μια διαδικασία ακύρωσης προς κάθε ένα από τα μη επιλεγμένα προετοιμασμένα eNodeBs.

Διαχείριση φόρτου και παρεμβολών στο X2

Η ανταλλαγή των πληροφοριών φόρτου μεταξύ των eNodeBs είναι καίριας σημασίας για την επίπεδη αρχιτεκτονική που χρησιμοποιείται στο LTE, καθώς δεν υπάρχει κεντρικός κόμβος RRM όπως για παράδειγμα στο UMTS με το χειριστήριο του Radio Network (RNC). Η ανταλλαγή πληροφοριών φόρτου εμπίπτει σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετεί.

- Η ανταλλαγή πληροφοριών φόρτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαδικασία εξισορρόπησης φόρτου στο X2, στην οποία περίπτωση η σχετική συχνότητα της ανταλλαγής είναι μάλλον χαμηλή(της τάξης των δευτερολέπτων)
- Η ανταλλαγή πληροφοριών φόρτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση κάποιων RRM διαδικασιών, όπως ο συντονισμός παρεμβολής, στην οποία περίπτωση η συχνότητα της ανταλλαγής είναι μάλλον υψηλή (της τάξης των δεκάδων χιλιοστών του δευτερολέπτου).

Εξισορρόπηση φόρτου (load balancing)

Όπως και η λειτουργία SON ANRF, έτσι και η εξισορρόπηση φόρτου είναι μια άλλη

πτυχή του SON ενσωματωμένη στο σχεδιασμό του LTE. Ο στόχος της εξισορρόπησης φόρτου είναι να αντισταθμίσει την τοπική ανισορροπία του κυκλοφοριακού φόρτου μεταξύ των γειτονικών κυττάρων με στόχο τη βελτίωση της συνολικής ικανότητας του συστήματος. Μια λύση είναι η βελτιστοποίηση των παραμέτρων των κελιών *reselection/handover* (όπως όρια και την υστέρηση) μεταξύ των γειτονικών κελιών αυτόνομα μετά την ανίχνευση της ανισορροπίας.

Προκειμένου να εντοπίσει μια ανισορροπία, είναι αναγκαίο να συγκριθεί ο φόρτος των κελιών και ως εκ τούτου να ανταλλαχθούν πληροφορίες σχετικά με αυτές μεταξύ των γειτονικών eNodeBs. Οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται για το φόρτο των κελιών μπορεί να είναι διαφόρων τύπων: ράδιο-μετρήσεις που αντιστοιχούν στη χρήση των φυσικών πόρων, ενδεχομένως κατανομή σε πραγματικό και μη πραγματικό χρόνο για την κυκλοφορία ή γενικές μετρήσεις που αντιστοιχούν μη σχετιζόμενα με τη ράδιο-χρήση των πόρων όπως η μεταποίηση ή πληρότητα του υλικού. Ένας μηχανισμός *client-server* που χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή πληροφοριών φόρτου: τα μηνύματα *Resource Status Responce* και *Update* χρησιμοποιούνται για να αναφέρουν τις πληροφορίες φόρτου μέσω της διασύνδεσης X2 μεταξύ ενός αιτούντος eNodeB (*client*) και τα eNodeBs που έχουν εγγραφεί σε αυτό το αίτημα (*servers*). Η αναφορά του φόρτου είναι περιοδική και σύμφωνα με την περιοδικότητα που εκφράζονται στο μήνυμα *Resource Status Request* που πυροδότησε την διαδικασία.

Διαχείριση παρεμβολών

Μια ξεχωριστή διαδικασία ένδειξης φόρτου χρησιμοποιείται μέσω της διεπαφής X2 για την ανταλλαγή πληροφοριών φόρτου που σχετίζονται με τη διαχείριση των παρεμβολών. Δεδομένου ότι αυτές οι μετρήσεις έχουν άμεση επίδραση σε κάποιες RRM διεργασίες σε πραγματικό χρόνο, η συχνότητα των αναφορών χρησιμοποιώντας αυτή τη διαδικασία μπορεί να είναι υψηλή. Για τις *uplink* παρεμβολές, παρέχονται δύο δείκτες μέσα από το μήνυμα ένδειξης φόρτου: ένας “Υψηλός δείκτης παρεμβολών” και ένας “Δείκτης υπερφόρτωσης”.

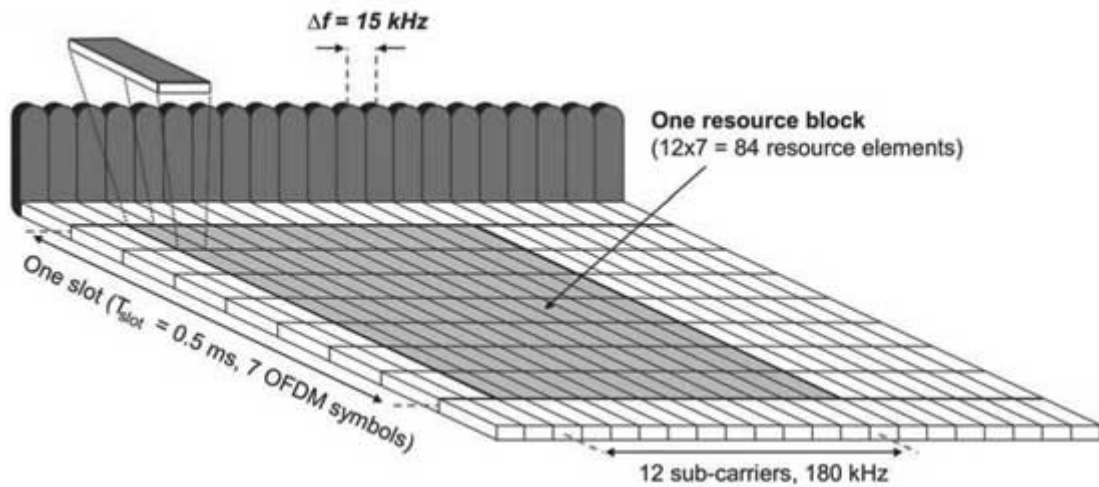
3.5 Τεχνολογία OFDM στο LTE

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα του φαινομένου των πολλαπλών path fading που υπάρχει στο UMTS, το LTE χρησιμοποιεί Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) για το downlink – δηλαδή από το σταθμό βάσης προς τον τερματικό σταθμό για τη μετάδοση των δεδομένων σε πολλές μικρές συχνότητες της τάξης των 180 KHz η κάθε μία, αντί της διάδοσης ενός σήματος σε ολόκληρο το εύρος ζώνης (5 MHz). Η OFDM χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό μικρών συχνοτήτων για τη multi-carrier μετάδοση για να μεταφέρουν τα δεδομένα.

Η Ορθογώνια πολυπλέξη διαίρεσης συχνότητας (OFDM), είναι μια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM) που χρησιμοποιείται ως μια ψηφιακή μέθοδο διαμόρφωσης πολύ-φορέα (multi-carrier).

Η OFDM ικανοποιεί την απαίτηση του LTE για την ευελιξία του ραδιοφάσματος και επιτρέπει οικονομικά αποδοτικές λύσεις για μια ευρεία σειρά φορέων με υψηλά peak rates. Η βασική πηγή του downlink του LTE μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πλέγμα χρόνου-συχνότητας, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.19:

Τα σύμβολα OFDM ομαδοποιούνται σε μπλοκ πόρων. Τα μπλοκ των πόρων έχουν συνολικό μέγεθος 180 KHz στο πεδίο συχνότητας και 0.5ms στο πεδίο του χρόνου. Κάθε 1ms χρονικό διάστημα μετάδοσης (Transmission Time Interval – TTI) αποτελείται από 2 θέσεις (Tslot).



Σχήμα 3.19 LTE-OFDM[52]

Σε κάθε χρήστη διατίθεται μια σειρά από τα λεγόμενα μπλοκ των πόρων στο πλέγμα συχνότητας-χρόνου. Όσα περισσότερα μπλοκ πόρων, παίρνει ένας χρήστης, και όσο υψηλότερη είναι η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται στα στοιχεία των πόρων, τόσο μεγαλύτερη είναι και το bit-rate. Ποια και πόσα μπλοκ παίρνει ο χρήστης σε μια δεδομένη χρονική στιγμή εξαρτάται από τους προηγμένους μηχανισμούς προγραμματισμού στις διαστάσεις συχνότητας και χρόνου. Οι μηχανισμοί προγραμματισμού του LTE είναι παρόμοιοι με εκείνους που χρησιμοποιούνται στην HSPA, και θα επιτρέψει τη βέλτιστη απόδοση για διαφορετικές υπηρεσίες σε διαφορετικά περιβάλλοντα ραδιοεπικοινωνιών.

Πλεονεκτήματα OFDM

- Το κύριο πλεονέκτημα της OFDM πάνω στα single-carrier schemes είναι η ικανότητα να αντιμετωπίσει με σοβαρές συνθήκες καναλιού (για παράδειγμα, η εξασθένηση των υψηλών συχνοτήτων σε ένα μακρύ σύρμα χαλκού, παρεμβολές στενής ζώνης και το επιλεκτικό ξεθώριασμα της συχνότητας λόγω πολλαπλής διαδρομής), χωρίς σύνθετα φίλτρα εξισορρόπησης
- Το κανάλι εξισορρόπησης απλοποιείται επειδή η OFDM μπορεί να θεωρηθεί ότι χρησιμοποιεί πολλά διαμορφωμένα σήματα στενής ζώνης και

όχι ένα ταχέως διαμορφωμένο σήμα ευρείας ζώνης.

- Το χαμηλό ποσοστό συμβόλων καθιστά τη χρήση ενός διαστήματος προστασίας μεταξύ συμβόλων προσιτή, καθιστώντας δυνατή την εξάλειψη των παρεμβολών μεταξύ συμβόλων (ISI).
- Ο μηχανισμός διευκολύνει επίσης το σχεδιασμό δικτύων ενιαίας συχνότητας (SFN), όπου πολλοί παρακείμενοι πομποί στέλνουν το ίδιο σήμα ταυτόχρονα με την ίδια συχνότητα, όπως τα σήματα από πολλαπλούς απομακρυσμένους πομπούς μπορούν να συνδυάζονται εποικοδομητικά, αντί να παρεμβαίνει όπως θα εμφανίζονται συνήθως σε ένα παραδοσιακό ενιαίο σύστημα-φορέα.

Μειονεκτήματα OFDM

- High peak-to-average ratio
- Ευαίσθητα στη συχνότητα offset, ως εκ τούτου και αλλαγή Doppler.

Τεχνολογία SC-FDMA

Το LTE χρησιμοποιεί μια προ κωδικοποιημένη έκδοση του OFDM που ονομάζεται Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) στο uplink. Αυτό γίνεται για να αντισταθμίσει ένα μειονέκτημα με την κανονική OFDM, η οποία έχει ένα πολύ υψηλό Peak στη Μέση αναλογία ισχύος (PAPR). Υψηλή PAPR απαιτεί δαπανηρή και αναποτελεσματική ενίσχυση ισχύος με υψηλές απαιτήσεις σχετικά με τη γραμμικότητα, η οποία αυξάνει το κόστος του τερματικού και στραγγίζει τη μπαταρία γρηγορότερα.

Το SC-FDMA λύνει αυτό το πρόβλημα με την ομαδοποίηση τα μπλοκ των πόρων με τέτοιο τρόπο που μειώνει την ανάγκη για τη γραμμικότητα και επομένως και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, στον ενισχυτή ισχύος. Μια χαμηλή PAPR βελτιώνει επίσης την κάλυψη και την απόδοση των ακραίων κελιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Ποιότητα υπηρεσιών και EPS φορείς

Σε μία τυπική περίπτωση, πολλαπλές εφαρμογές μπορεί να τρέχουν σε ένα UE, ανά πάσα στιγμή, το καθένα με διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Για παράδειγμα, ένα UE μπορεί να εμπλακεί σε μια κλήση VoIP, ενώ την ίδια στιγμή να περιηγείται σε μια ιστοσελίδα ή να κατεβάζει ένα αρχείο FTP. Το VoIP έχει αυστηρότερες απαιτήσεις για QoS όσον αφορά την καθυστέρηση και τη διακύμανση της καθυστέρησης (jitter) από ότι η περιήγηση στο web και το κατέβασμα FTP αρχείων, ενώ τα άλλα απαιτούν ένα πολύ χαμηλότερο ποσοστό απώλειας πακέτων. Για να υποστηρίξουν πολλαπλές απαιτήσεις QoS, διαφορετικοί φορείς έχουν συσταθεί μέσα στο Evolved Packet System (EPS), από τους οποίους κάθε ένας συνδέεται με ένα QoS.

Γενικότερα, οι φορείς μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες με βάση τη φύση των QoS που παρέχουν:

- Φορείς (GBR) με ελάχιστο εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές όπως VoIP. Αυτοί έχουν μια σχετική αξία GBR για τα οποία ειδικοί πόροι μετάδοσης είναι μονίμως διατεθειμένοι (για παράδειγμα από μια λειτουργία ελέγχου αποδοχής στο eNodeB) κατά την εγκατάσταση ή την τροποποίηση του φορέα(bearer). Ρυθμοί μετάδοσης λίγο υψηλότεροι από το GBR μπορεί να επιτραπεί για έναν φορέα GBR εφόσον υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μια παράμετρο μέγιστου ρυθμού μετάδοσης (MBR), η οποία μπορεί επίσης να συνδέεται με ένα φορέα GBR, θέτει ένα ανώτατο όριο για το ρυθμό που μπορεί να αναμένεται από έναν φορέα GBR.

- Non-GBR φορείς που δεν εγγυώνται κανένα συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές όπως περιήγηση στο web ή τη μεταφορά FTP. Για αυτούς τους φορείς, δεν διατίθεται εύρος ζώνης μόνιμα στον κομιστή.

Στο δίκτυο πρόσβασης, είναι ευθύνη του eNodeB να εξασφαλίσει τις απαραίτητες QoS για ένα φορέα μέσω της ασύρματης διεπαφής. Κάθε φορέας διαθέτει και ένα σχετικό QCI, και μια Κατανομή και Διατήρηση Προτεραιότητας (Allocation Retention Priority – ARP).

Κάθε QCI χαρακτηρίζεται κατά προτεραιότητα, καθυστέρηση πακέτων του προϋπολογισμού και αποδεκτό ποσοστό απώλειας πακέτων. Η ετικέτα QCI για κομιστή καθορίζει το πως αντιμετωπίζεται στο eNodeB. Μόνο μια ντουζίνα τέτοια QCIs έχουν τυποποιηθεί έτσι ώστε οι πωλητές να μπορούν να έχουν όλοι την ίδια αντίληψη των βασικών χαρακτηριστικών της υπηρεσίας, και έτσι παρέχουν αντίστοιχη μεταχείριση, συμπεριλαμβανομένης και της διαχείρισης ουράς, της στρατηγικής προσαρμογής και πολιτικής.

Αυτό εξασφαλίζει ότι ο φορέας εκμετάλλευσης LTE μπορεί να αναμένει ομοιόμορφη συμπεριφορά χειρισμού κυκλοφορίας σε όλο το δίκτυο ανεξάρτητα από τους κατασκευαστές του εξοπλισμού eNodeB. Το σύνολο των τυποποιημένων QCIs και τα χαρακτηριστικά τους παρέχονται στον πίνακα 4.1. Ο πίνακας QCI καθορίζει τιμές για το χειρισμό κατά προτεραιότητα, αποδεκτή καθυστέρηση του προϋπολογισμού και ποσοστό απώλειας πακέτων για κάθε ετικέτα QCI.

QCI	RESOURCE TYPE	PRIORITY	PACKET DELAY BUDGET (MS)	PACKET ERROR LOSS RATE	EXAMPLE SERVICES
1	GBR	2	100	10^{-2}	Conversational voice
2	GBR	4	150	10^{-3}	Conversational video (live streaming)
3	GBR	5	300	10^{-6}	Non-conversational video (buffered streaming)
4	GBR	3	50	10^{-3}	Real-time gaming
5	Non-GBR	1	100	10^{-6}	IMS signaling
6	Non-GBR	7	100	10^{-3}	Voice, video (live streaming), interactive gaming
7	Non-GBR	6	300	10^{-6}	Video (buffered streaming)
8	Non-GBR	8	300	10^{-6}	TCP-based (for example, WWW, e-mail), chat, FTP, p2p file sharing, progressive video and others
9	Non-GBR	9	300	10^{-6}	

Πίνακας 4.1 Τυποποιημένα QCIs για το LTE[53]

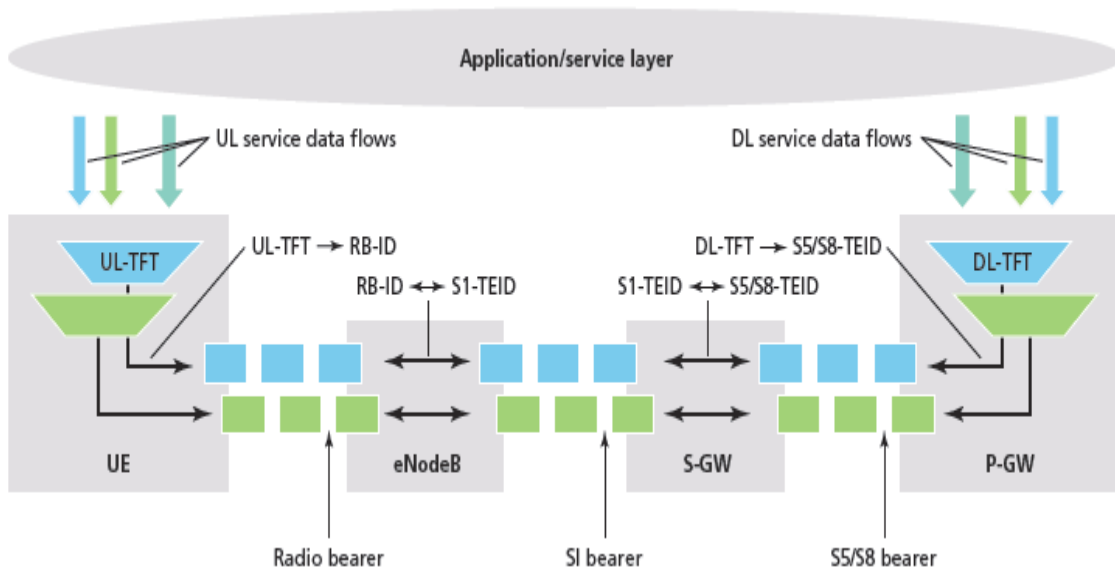
Η προτεραιότητα και η καθυστέρηση πακέτων του προϋπολογισμού (και σε κάποιο βαθμό το αποδεκτό ποσοστό απώλειας πακέτων) από την ετικέτα QCI καθορίζουν τη διαμόρφωση λειτουργίας RLC και πώς το χρονοδιάγραμμα της MAC χειρίζεται τα πακέτα που αποστέλλονται μέσω του κομιστή (για παράδειγμα, όσον αφορά την πολιτική προγραμματισμού, πολιτική διαχείρισης ουράς και της πολιτικής διαμόρφωσης ρυθμού). Για παράδειγμα, μπορεί να αναμένεται ένα πακέτο με υψηλότερη προτεραιότητα να προγραμματιστεί πριν από ένα πακέτο με χαμηλότερη προτεραιότητα. Για τους κομιστές με χαμηλό αποδεκτό ποσοστό απώλειας, μια acknowledged mode (AM) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσα στο επίπεδο πρωτοκόλλου RLC για να εξασφαλίσει ότι τα πακέτα παραδίδονται με επιτυχία σε όλη τη διεπαφή ραδιοσυχνοτήτων.

Το ARP του κομιστή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων δηλαδή, να αποφασίσει κατά πόσον ή όχι θα πρέπει να συσταθεί ο αιτούμενος φορέας στην περίπτωση ράδιο-συμφόρησης. Ο κανόνας αυτός διέπει επίσης την προτεραιότητα του κομιστή για προτίμηση σε σχέση με ένα νέο αίτημα εγκατάστασης κομιστή. Μετά την επιτυχή εγκατάσταση, το ARP ενός κομιστή δεν έχει καμία επίδραση στον χειρισμό της προώθησης πακέτων σε επίπεδο κομιστή (για παράδειγμα, για τον

προγραμματισμό και έλεγχο του ρυθμού). Ο εν λόγω χειρισμός προώθησης πακέτων θα πρέπει να καθορίζεται αποκλειστικά από τις άλλες QoS παραμέτρους επιπέδου κομιστή όπως QCI, GBR και MBR.

Ένας κομιστής EPS πρέπει να διασχίσει πολλαπλές διεπαφές, όπως δείχνεται στο σχήμα 4.2- τη διεπαφή S5/S8 από την P-GW στο S-GW, τη διασύνδεση S1 από την S-GW στον κόμβο eNodeB, και τη διασύνδεση ραδιοσυχνοτήτων (επίσης γνωστή ως “διεπαφή LTE-Uu”) από τον κόμβο eNodeB προς το UE. Σε όλες τις διασυνδέσεις, ο κομιστής EPS χαρτογραφείται επάνω σε ένα κατώτερου επιπέδου κομιστή, το καθένα με τη δική του ταυτότητα κομιστή. Κάθε κόμβος πρέπει να διατηρεί κομμάτι της σύνδεσης μεταξύ των Ids κομιστή σε όλες τις διαφορετικές διεπαφές του.

Ένας κομιστής S5/S8 μεταφέρει τα πακέτα ενός κομιστή EPS μεταξύ ενός P-GW και S-GW. Το S-GW κρατά μια ένα-προς-ένα χαρτογράφιση μεταξύ ενός φορέα S1 και ενός S5/S8 φορέα. Ο κομιστής προσδιορίζεται από το αναγνωριστικό GTP tunnel ID και στις δύο διεπαφές.



Σχήμα 4.1 LTE/SAE φορέας μεταξύ των διαφόρων διεπαφών[54]

Τα πακέτα ενός κομιστή EPS μεταφέρονται από ένα φορέα S1 μεταξύ ενός S-GW και ενός eNodeB, και από ένα ράδιο-φορέα μεταξύ UE και ενός eNodeB. Ένα eNodeB αποθηκεύει μια ένα-προς-ένα αντιστοιχία μεταξύ ενός ID ραδιοφωνικού φορέως και ενός S1 κομιστή για να δημιουργηθεί η αντιστοίχιση μεταξύ των δύο.

Τα πακέτα IP που αντιστοιχίζονται με τον ίδιο EPS κομιστή λαμβάνουν την ίδια μεταχείριση επιπέδου κομιστή στη προώθηση των πακέτων (για παράδειγμα, η πολιτική προγραμματισμού, πολιτική διαχείρισης ουράς, ποσοστό διαμόρφωσης της πολιτικής, RLC διαμόρφωση). Προκειμένου να παρέχει διαφορετικές QoS επιπέδου κομιστή, πρέπει να εγκατασταθεί ξεχωριστός EPS κομιστής για κάθε ροή QoS. Τα IP πακέτα χρήστη θα πρέπει επομένως να φιλτράρονται στους κατάλληλους EPS κομιστές.

Το φιλτράρισμα των πακέτων σε διαφορετικούς κομιστές βασίζεται στα TFTs. Τα TFTs χρησιμοποιούν τις πληροφορίες κεφαλίδας IP, όπως διευθύνσεις IP πηγής και προορισμού και αριθμούς θυρών του πρωτοκόλλου ελέγχου μετάδοσης (TCP) για το φιλτράρισμα πακέτων όπως το VoIP από την κυκλοφορία της περιήγησης web, έτσι ώστε ο καθένας να μπορεί να στείλει προς τα κάτω τους αντίστοιχους φορείς με το κατάλληλο QoS. Ένα uplink TFT (UL TFT) σχετίζεται με κάθε κομιστή στο UE , φιλτράρει τα IP πακέτα σε EPS φορείς στην uplink κατεύθυνση. Μια downlink TFT (DL TFT) στο P-GW είναι ένα παρόμοιο σύνολο των φίλτρων πακέτων downlink.

Ως μέρος της διαδικασίας με την οποία ένα UE συνδέεται με το δίκτυο, στο UE έχει εκχωρηθεί μια διεύθυνση IP από το P-GW και τουλάχιστον ένας φορέας είναι εγκατεστημένος. Αυτός ονομάζεται προ επιλεγμένος φορέας, και εξακολουθεί να είναι εγκατεστημένος σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσης PDN προκειμένου να παράσχει στο UE συνεχή(always on) IP συνδεσιμότητα σε αυτό το PDN. Οι αρχικές τιμές των παραμέτρων QoS επιπέδου φορέα ανατίθενται από το MME, με βάση τα στοιχεία εγγραφής που ανακτώνται από το HSS. Η PCEF μπορεί να αλλάξει αυτές τις τιμές σε αλληλεπίδραση με την PCRF ή σύμφωνα με την τοπική ρύθμιση. Πρόσθετοι φορείς που ονομάζονται αφιερωμένοι φορείς μπορούν επίσης

να εγκατασταθούν οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια ή μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας σύνδεσης ενός UE στο δίκτυο. Ένας αφιερωμένος φορέας μπορεί να είναι είτε GBR ή non-GBR (ο προ επιλεγμένος φορέας πρέπει να είναι πάντα non-GBR, δεδομένου ότι είναι εγκατεστημένος μόνιμα). Η διάκριση μεταξύ προεπιλεγμένων και αφιερωμένων πρέπει να είναι εμφανείς στο δίκτυο πρόσβασης (για παράδειγμα E-UTRAN). Κάθε κομιστής έχει ένα συσχετισμένο QoS, και εάν περισσότεροι από έναν κομιστές είναι εγκατεστημένοι για ένα UE, τότε κάθε κομιστής πρέπει επίσης να συνδέεται με τις κατάλληλες TFTs. Αυτοί οι αφιερωμένοι φορείς θα μπορούσαν να εγκατασταθούν από το δίκτυο, με βάση για παράδειγμα με ένα γεγονός που θα πυροδοτηθεί από το IMS domain, ή θα μπορούσαν να ζητηθούν από το UE. Οι αφιερωμένοι φορείς για ένα UE μπορούν να παρέχονται από ένα ή περισσότερα P-GWs.

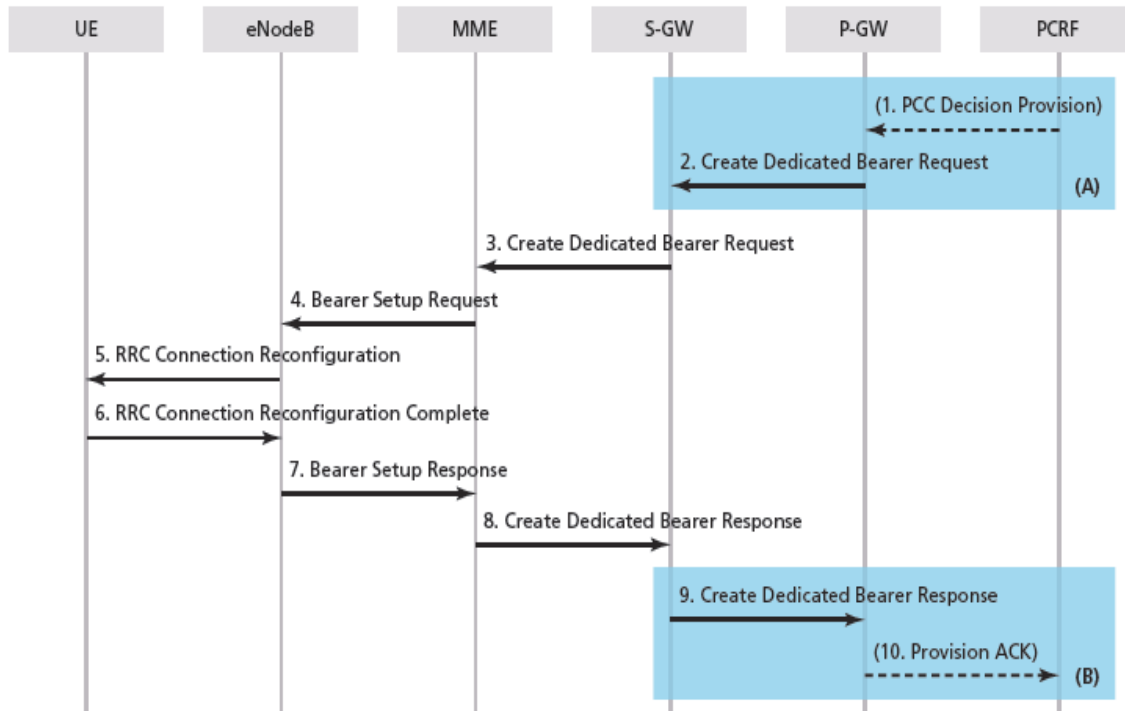
Οι παράμετροι QoS επιπέδου κομιστή για αφιερωμένους φορείς λαμβάνονται μέσω της P-GW από την PCRF και διαβιβάζεται στη S-GW. Το MME προωθεί διαφανώς αυτές τις τιμές που λαμβάνονται από την S-GW πάνω από το σημείο αναφοράς S11 στο E-UTRAN.

4.1 Διαδικασία εγκατάστασης φορέα

Η ενότητα αυτή περιγράφει μία τυπική διαδικασία εγκατάστασης κομιστή απ' άκρο σ' άκρο σε όλους τους κόμβους του δικτύου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3 χρησιμοποιώντας τη λειτουργικότητα που περιγράφεται στις παραπάνω παραγράφους. Όταν είναι εγκατεστημένος ένας φορέας, οι φορείς σε κάθε μια από τις διεπαφές εγκαθίστανται, όπως συζητήθηκε παραπάνω.

Η PCRF στέλνει ένα μήνυμα απόφαση-πρόβλεψη που ονομάζεται Policy Control and Charging (PCC) αναφέροντας τις απαιτούμενες QoS για τον φορέα στο P-GW. Το P-GW χρησιμοποιεί αυτήν την πολιτική QoS για να ορίσει τις παραμέτρους QoS επιπέδου κομιστή. Στη συνέχεια το P-GW στέλνει ένα Create Dedicated Bearer Request μήνυμα συμπεριλαμβανομένων των QoS και UL TFT στο S-GW, που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στο UE. Μετά S-GW λαμβάνει το προαναφερθέν

μήνυμα , συμπεριλαμβανομένου του QoS κομιστή, UL TFT και S1-bearer ID και το προωθεί στο MME(μήνυμα 3 στο σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.2 Παράδειγμα ροής μηνυμάτων για την εγκατάσταση φορέα στο LTE/SAE[55]

Το MME χτίζει στη συνέχεια μια σειρά από πληροφορίες ρύθμισης παραμέτρων διαχείρισης συνεδρίας, συμπεριλαμβανομένης της UL TFT και την ταυτότητα EPS κομιστή και τα περιλαμβάνει στο μήνυμα Bearer Setup Request το οποίο στέλνει στον eNodeB (μήνυμα 4 σχήμα 4.3). Δεδομένου ότι η συνεδρία διαμόρφωσης της διαχείρισης αποτελείται από NAS πληροφορίες, αποστέλλεται διαφανώς από το eNodeB στο UE.

Η αίτηση εγκατάστασης φορέα παρέχει επίσης το QoS του κομιστή στο eNodeB, οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται από τον eNodeB για τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων, αλλά και να εξασφαλίσει τις απαραίτητες QoS με κατάλληλο προγραμματισμό των πακέτων IP του χρήστη. Ο eNodeB χαρτογραφεί τα QoS EPS κομιστή στο ράδιο-κομιστή QoS και στη συνέχεια σηματοδοτεί ένα μήνυμα

Αναδιαμόρφωσης σύνδεσης RRC (συμπεριλαμβανομένου του ράδιο-φορέως QoS, το αίτημα συνόδου διαχείρισης και τη ταυτότητα του EPS ράδιο-φορέα) προς το UE για να ρυθμίσει το ράδιο-φορέα (μήνυμα 5 σχήμα 4.3). Το μήνυμα αναδιαμόρφωση σύνδεσης RRC περιέχει όλες τις παραμέτρους διαμόρφωσης για τη ράδιο-διεπαφή. Αυτά είναι κυρίως για τη διαμόρφωση του επιπέδου 2 (PDCP, RLC και MAC παράμετροι), αλλά επίσης περιέχει και τις παραμέτρους του επιπέδου 1 που απαιτούνται για το UE να προετοιμάσει τη στοίβα πρωτοκόλλου.

Τα μηνύματα 6 έως 10 είναι τα αντίστοιχα μηνύματα απόκρισης για να επιβεβαιώσει ότι οι φορείς έχουν ρυθμιστεί σωστά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 NS3-LTE MODULE

5.1 Ιστορία του Network Simulator

Η πρώτη έκδοση του ns, που είναι γνωστή ως ns-1, αναπτύχθηκε στο Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) κατά το χρονικό διάστημα 1995-1997 από τον Steve McCanne, Sally Floyd, Kevin Fall και άλλους. Αυτό ήταν γνωστό ως το LBNL Network Simulator και προέρχεται από ένα παλαιότερο προσομοιωτή γνωστό ως REAL του S.Keshav. Ο πυρήνας του προσομοιωτή ήταν γραμμένος σε C++, με προσομοιώσεις βασισμένες σε Tcl scripts. Για μεγάλο διάστημα έχουν συνεισφέρει και άτομα από τη Sun Microsystems, UC Berkeley Daedalus και Carnegie Mellon Monarch projects. Το 1996-97, έχουμε μια βελτιωμένη έκδοση του ns-1 την ns-2 από τον Steve McCanne. Η χρήση της Tcl αντικαταστάθηκε από το MIT αντικείμενο Tcl (Otccl), μια αντικειμενοστραφής διάλεκτο της Tcl. Ο πυρήνας του ns-2 είναι επίσης γραμμένος σε C++, αλλά τα αντικείμενα C++ είναι συνδεδεμένα με σκιδώδη αντικείμενα στην Otccl και με μεταβλητές ανάμεσα στις δυο γλώσσες. Τα σενάρια προσομοίωσης είναι γραμμένα στη γλώσσα Otccl, μιας επέκτασης της Tcl. Επί του παρόντος, ο ns-2 αποτελείται πάνω από 300000 γραμμές κώδικα, και είναι πιθανό να υπάρχει ένα συγκρίσιμο ποσό του εισφερόμενου κώδικα που δεν ενσωματώνεται απευθείας στη κύρια διανομή του προσομοιωτή. Τρέχει σε συστήματα GNU/Linux, FreeBSD, Solaris, Mac OS X και Windows εκδόσεις που υποστηρίζουν Cygwin. Είναι εγκεκριμένο για χρήση με την έκδοση 2 της GNU General Public License.

Μια ομάδα με επικεφαλής τον Tom Henderson (University of Washington), George Riley (Georgia Institute of Technology), Sally Floyd, και Sumit Roy (University of Washington), ζήτησε και έλαβε χρηματοδότηση από το Αμερικανικό Εθνικό Ίδρυμα

Επιστημών για την κατασκευή ενός προσομοιωτή που θα αντικαταστήσει τον ns-2, έτσι έχουμε τη δημιουργία του ns-3. Αυτή η ομάδα συνεργάστηκε με το Planete project of INRIA στη Σόφια Αντίπολη, με τον Mathieu Lacage ως επικεφαλής του λογισμικού και σχηματίζεται ένα νέο έργο ανοικτού πηγαίου κώδικα στο οποίο ενώνονται και άλλοι προγραμματιστές από όλο τον κόσμο.

Κατά τη διαδικασία ανάπτυξης του ns-3, αποφασίστηκε να εγκαταλειφθεί πλήρως η συμβατότητα προς τα πίσω με τον ns-2. Ο νέος προσομοιωτής θα πρέπει να γραφτεί από την αρχή, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού C++. Η ανάπτυξη του ns-3 ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2006. Ένα πλαίσιο για τη δημιουργία Python bindings (pybindgen) και τη χρήση του συστήματος Waf build προέρχεται από τον Gustavo Carneiro.

Η πρώτη έκδοση η ns-3.1 βγήκε τον Ιούνιο του 2008, και στη συνέχεια το έργο συνέχισε κάνοντας τριμηνιαίες εκδόσεις λογισμικού και πιο πρόσφατα προχώρησε σε τρεις εκδόσεις κάθε χρόνο. Η δέκατη όγδοη έκδοση του ns-3 έκανε την εμφάνιση της κατά το τρίτο τρίμηνο του 2013.

5.2 Network Simulator 3

Ο Ns-3 είναι ένας εξομοιωτής δικτύων τύπου διακριτού συμβάντος, ο οποίος σχεδιάστηκε για να εξυπηρετεί τόσο ερευνητικές όσο και εκπαιδευτικές ανάγκες εξομοίωσης δικτύων. Πρόκειται για λογισμικό ανοικτού κώδικα (open source) που διατίθεται ελεύθερα για σκοπούς έρευνας αλλά και ανάπτυξης νέων δικτυακών τεχνολογιών.

Βασική επιδίωξη της σχεδίασης του ns-3 είναι η ανάπτυξη του επικρατέστερου ανοικτού περιβάλλοντος εξομοίωσης για δικτυακή έρευνα. Θα πρέπει να είναι ενημερωμένο με τις πιο πρόσφατες ανάγκες της δικτυακής έρευνας, να ενθαρρύνει τη συμμετοχή της κοινότητας χρηστών του και να επιτρέπει την επαλήθευση του λογισμικού του.

Το ns-3 project είναι αφιερωμένο στην δημιουργία ενός σταθερού πυρήνα

εξομοίωσης που είναι καλά τεκμηριωμένος, εύκολος στη χρήση και στο debug και μπορεί να ικανοποιήσει το σύνολο της ροής εξομοίωσης, από την διαμόρφωση της , στην συλλογή που είναι πολύ ρεαλιστικά ώστε να επιτρέψουν στον ns-3 να χρησιμοποιηθεί ως εξομοιωτής δικτύων πραγματικού χρόνου τα οποία συνδέονται με τον πραγματικό κόσμο και επιτρέπουν πολλές από τις υπάρχουσες εφαρμογές του να χρησιμοποιηθούν στον ns-3. Ο πυρήνας του ns-3 υποστηρίζει την έρευνα και στα IP αλλά και στα μη-IP δίκτυα. Ωστόσο η μεγάλη πλειοψηφία των χρηστών του επικεντρώνεται σε ασύρματες/IP εξομοιώσεις που περιλαμβάνουν τα μοντέλα Wi-Fi, WiMAX, LTE και μια ποικιλία από στατικά ή δυναμικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, όπως το OLSR και το AODV για IP-based εφαρμογές.

Τέλος ο ns-3 είναι ένας προσομοιωτής με υψηλούς στόχους σχεδίασης. Χρησιμοποιεί την C++ και Python για την συγγραφή των σεναρίων προσομοιώσεων ώστε οι χρήστες να επωφεληθούν από την πλήρη υποστήριξη της κάθε γλώσσας. Χρήση συμβάντων με επανάκληση αποτελούν απλές κλήσεις συναρτήσεων που είναι χρονοπρογραμματισμένες να εκτελούν σε προκαθορισμένο χρόνο εξομοίωσης, αυτό αφαιρεί την ανάγκη για ύπαρξη ειδικευμένων συναρτήσεων που ελέγχουν κεντρικά την επεξεργασία των συμβάντων σε όλα τα αντικείμενα της εξομοίωσης. Επίσης ο ns-3 έχει ευέλικτο πυρήνα με επιπλέον επίπεδο βοηθητικών αντικειμένων, δίνει έμφαση στην εξομοίωση επιτρέπει δηλαδή στον χρήστη την αλληλεπίδραση με τον πραγματικό κόσμο. Ακόμα η σχεδίαση των αντικειμένων-κόμβων του ns-3 έχει βασιστεί στην αρχιτεκτονική του δικτύου του λειτουργικού συστήματος Linux. Αποτέλεσμα η επαναχρησιμοποίηση υπάρχοντος κώδικα και η βελτίωση της ρεαλιστικότητας των μοντέλων. Τέλος ο εξομοιωτής περιλαμβάνει ένα ενοποιημένο σύστημα ιδιοτήτων για την διαχείριση των παραμέτρων εξομοίωσης. Το μόνο που λείπει είναι το περιβάλλον ανάπτυξης για τη διαμόρφωση, αποσφαλμάτωση, εκτέλεση και οπτικοποίηση των εξομοιώσεων σε ένα παράθυρο εφαρμογής, όπως συμβαίνει σε άλλους εξομοιωτές.

5.2.1 Βασικά αντικείμενα για την προσομοίωση

Για τη δημιουργία μιας εξομοίωσης απαιτείται η συγγραφή ενός προγράμματος σε γλώσσα C++ το οποίο θα κάνει χρήση των βιβλιοθηκών του ns-3 για την υλοποίηση της προσομοίωσης που θέλουμε. Υπάρχουν κάποια βασικά αντικείμενα που μας διευκολύνουν στη δημιουργία του σεναρίου μας, αυτά είναι :

Κόμβοι (Nodes)

Στο ns-3 η βασική έννοια της υπολογιστικής συσκευής καλείται κόμβος. Στη γλώσσα C++ η έννοια αυτή υλοποιείται από την κλάση Node. Ένας κόμβος μπορεί να διαθέτει εφαρμογές, στοίβες πρωτοκόλλων και περιφερειακές κάρτες σύνδεσης που επιτρέπουν στον υπολογιστή να επιτελέσει χρήσιμες για την εξομοίωση λειτουργίες.

Εφαρμογές (Applications)

Στον ns-3 δεν υπάρχει η έννοια του λειτουργικού συστήματος ή των κλήσεων συστήματος. Αντιθέτως, υπάρχει και χρησιμοποιείται η έννοια της εφαρμογής. Όπως μια εφαρμογή εκτελείται σε ένα υπολογιστή για να επιτελέσει κάποια εργασία στον πραγματικό κόσμο έτσι και οι εφαρμογές του ns-3 εκτελούνται σε κάποιον κόμβο Node για να επιτελέσουν εργασίες στην εξομοίωση. Έτσι η βασική αφαιρετική έννοια που περιγράφει ένα πρόγραμμα χρήστη το οποίο δημιουργεί κάποια δραστηριότητα που πρέπει να εξομοιωθεί είναι η εφαρμογή και αναπαριστάται από την κλάση Application.

Κανάλια επικοινωνίας (Channels)

Στην πραγματικότητα ένας υπολογιστής μπορεί να συνδεθεί σε ένα δίκτυο. Το μέσο στο οποίο πραγματοποιείται η ροή των δεδομένων σε αυτό το δίκτυο ονομάζεται κανάλι επικοινωνίας. Στην εξομοίωση που γίνεται στον ns-3, για τη σύνδεση ενός υπολογιστή σε ένα δίκτυο πρέπει να γίνει η σύνδεση ενός αντικειμένου κλάσης

Node σε ένα αντικείμενο που αναπαριστά ένα κανάλι επικοινωνίας. Η κλάση που αναπαριστά το κανάλι επικοινωνίας είναι η Channel η οποία παρέχει μεθόδους για τη διαχείριση δικτυακών αντικειμένων επικοινωνίας και τη σύνδεση κόμβων-υπολογιστών σε αυτά.

Δικτυακές Συσκευές (Net Devices)

Η έννοια της δικτυακής συσκευής που χρησιμοποιούν οι πραγματικοί υπολογιστές χρησιμοποιείται και στον ns-3 όπου η αφηρημένη έννοια Δικτυακή Συσκευή καλύπτει τόσο το λογισμικό οδηγό όσο και το εξομοιωμένο υλικό και υλοποιείται από την κλάση Net Device. Ένα αντικείμενο αυτής της κλάσης εγκαθίσταται σε ένα αντικείμενο κόμβο ώστε να επιτρέψει την επικοινωνία με άλλα αντικείμενα nodes στην εξομοίωση μέσω μιας σύνδεσης με αντικείμενα κλάσης Channel.

Βοηθοί Τοπολογίας (Topology Helpers)

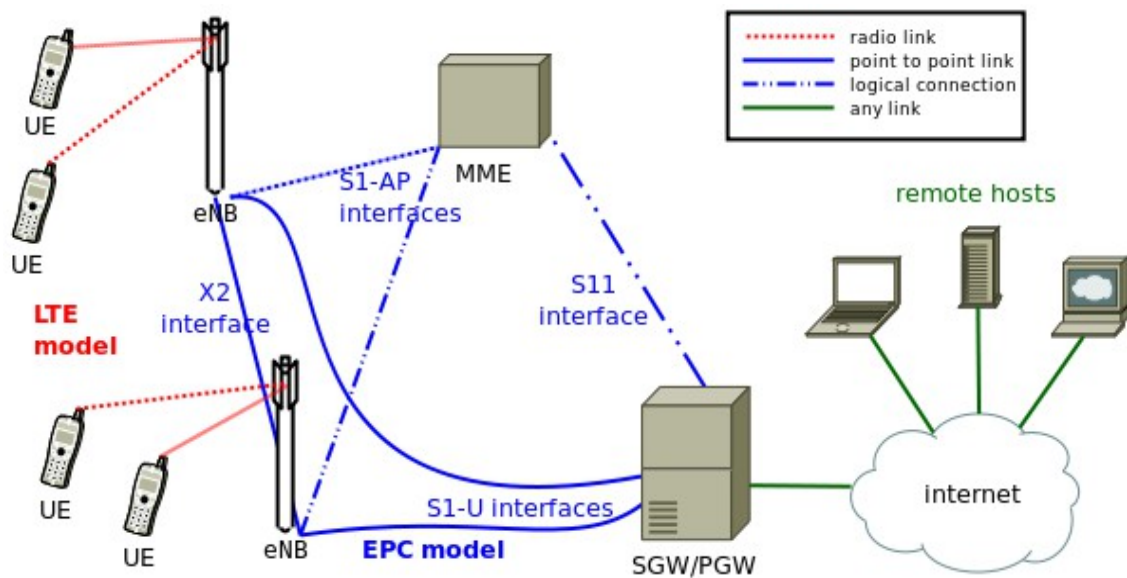
Διαδικασίες όπως η σύνδεση αντικειμένων Net Device σε Nodes, σύνδεση Net Devices σε Channels, ανάθεση IP διευθύνσεων είναι κοινές σε όλες τις υλοποιήσεις εξομοιώσεων, το ns-3 προσφέρει ειδικά αντικείμενα που καλούνται topology helpers για τη διευκόλυνση των διαδικασιών αυτών. Για παράδειγμα απαιτούνται ξεχωριστές διαδικασίες του πυρήνα του ns-3 για τη δημιουργία μιας Net Device, την ανάθεση μιας διεύθυνσης MAC, την εγκατάσταση της δικτυακής συσκευής σε ένα αντικείμενο node, τη διαμόρφωση της στοίβας πρωτοκόλλων και στη συνέχεια της σύνδεσης του αντικειμένου NetDevice σε ένα αντικείμενο channel.

5.3 Το πρότυπο LTE στον ns-3

Πλέον στη βασική έκδοση του ns-3 έχει ενσωματωθεί μοντέλο LTE-EPC (LENA το όνομα του προτύπου που δημιουργήθηκε ανεξάρτητα προτού ενσωματωθεί). Η γενική αρχιτεκτονική του μοντέλου προσομοίωσης απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 5.1.

Υπάρχουν δύο κύρια συστατικά:

- Το LTE μοντέλο: Το μοντέλο περιλαμβάνει την LTE στοίβα πρωτοκόλλου του ασύρματου μέσου (RRC, PDCP, RLC, MAC, PHY). Αυτές οι οντότητες υπάρχουν εξ ολοκλήρου στα UE και στους eNodeB κόμβους.
- Το EPC μοντέλο: Αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει τις διασυνδέσεις του κεντρικού δικτύου, τα πρωτόκολλα και τις οντότητες οι οποίες υπάρχουν στα SGW, PGW και MME κόμβους και εν μέρει στους EnodeB κόμβους.



Σχήμα 5.1 LTE-EPC simulation model[56]

5.3.1 Αρχές Σχεδίασης LTE μοντέλου

Το LTE μοντέλο έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει την αξιολόγηση των παρακάτω πτυχών του συστήματος LTE:

- ✓ Radio Resource Management
- ✓ QoS-aware Packet Scheduling
- ✓ Inter-cell Interference Coordination
- ✓ Dynamic Spectrum Access

Για την μοντελοποίηση των συστημάτων LTE σε ένα επίπεδο λεπτομέρειας που είναι επαρκής για να είναι δυνατή η οργή αξιολόγηση των παραπάνω πτυχών, οι ακόλουθες απαιτήσεις έχουν ληφθεί υπόψιν:

1. Στο επίπεδο του ασύρματου μέσου το επίπεδο της λεπτομέρειας της εξομοίωσης θα πρέπει να φτάνει τουλάχιστον μέχρι το επίπεδο του resource block (RB) που είναι και η βασική μονάδα που χρησιμοποιείται για την κατανομή ασυρμάτων πόρων. Δίχως αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας δεν είναι εφικτό να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια η χρονοδρομολόγηση των πακέτων και οι παρεμβολές μεταξύ των κελιών. Κι αυτό γιατί η χρονοδρομολόγηση πακέτων γίνεται ανά RB και ένα eNodeB μπορεί να εκπέμψει σε ένα υποσύνολο των διαθέσιμων RB και έτσι να παρεμβληθεί με άλλα eNodeB μόνο στα RB στα οποία εκπέμπει.
2. Ο εξομοιωτής θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να υποστηρίζει μοντέλα που περιέχουν δεκάδες κόμβους eNodeB και εκατοντάδες συσκευές UE. Αυτό αποκλείει τη χρήση ενός εξομοιωτή επιπέδου σύνδεσης (link level), ενός εξομοιωτή δηλαδή του οποίου το ασύρματο μέσο μοντελοποιείται με λεπτομέρεια που φτάνει το επίπεδο των συμβόλων. Αυτό θα συνεπαγόταν μια ανάγκη για μοντελοποίηση του φυσικού επιπέδου με όλες τις επεξεργασίες σημάτων κάτι που θα επέβαλε τεράστιες υπολογιστικές απαιτήσεις.
3. Ο εξομοιωτής θα πρέπει να επιτρέπει τη διαμόρφωση διαφορετικών κελιών έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται διαφορετικές συχνότητες παροχών. Οι συχνότητες και το εύρος που χρησιμοποιούνται από τα διαφορετικά κελιά πρέπει να μπορούν να επικαλύπτονται έτσι ώστε να επιτρέπεται να υποστηρίζονται λύσεις δυναμικής αδειοδότησης ραδιοφάσματος. Ο υπολογισμός των παρεμβολών πρέπει να διαχειρίζεται κατάλληλα τέτοιες περιπτώσεις.
4. Για να είναι το μοντέλο εξομοίωσης όσο πιο αντιπροσωπευτικό του

πρωτοκόλλου LTE γίνεται, αλλά και για να προσεγγίζει εφαρμογές του πρωτοκόλλου σε συστήματα του πραγματικού κόσμου ο εξομοιωτής πρέπει να υποστηρίζει την υλοποίηση του χρονοδρομολογητή του επιπέδου MAC που έχει δημοσιευτεί από τον οργανισμό FemtoForum. Αυτή η διεπαφή αναμένεται να χρησιμοποιείται από κατασκευαστές εξοπλισμού LTE για την υλοποίηση αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης και διαχείρισης του ασύρματου μέσου. Εισάγοντας την υποστήριξη για αυτή τη διεπαφή καθίσταται δυνατή η χρήση του εξομοιωτή από κατασκευαστές και παρόχους για εξομοίωση σε ένα δοκιμαστικό περιβάλλον ακριβώς των ιδίων αλγορίθμων που θα αναπτυχθούν σε ένα πραγματικό σύστημα.

5. Η μονάδα εξομοίωσης LTE του εξομοιωτή θα πρέπει να περιλαμβάνει τη δική της υλοποίηση της διεπαφής που έχει δημοσιευτεί από το FemtoForum. Δεν προαπαιτείται καμιά συμβατότητα, ούτε στο επίπεδο αρχείων συστήματος ούτε στο επίπεδο δομών δεδομένων με εμπορικές υλοποιήσεις της ίδιας διεπαφής. Έτσι οποτεδήποτε κάποια εμπορική υλοποίηση του MAC χρονοδρομολογητή χρησιμοποιείται με τον εξομοιωτή θα πρέπει να παρεμβάλλεται ένα επίπεδο συμβατότητας. Αυτή η απαίτηση κρίθηκε απαραίτητη για να επιτρέψει στον εξομοιωτή να παραμένει ανεξάρτητος από εμπορικές λύσεις. Εξάλλου η διεπαφή που ορίζεται αποτελεί μόνο μια λογική προδιαγραφή και αφήνεται στους κατασκευαστές ο τρόπος με τον οποίο θα υλοποιηθεί σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού.
6. Αυτό το μοντέλο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της μετάδοσης πακέτων IP από τα ανώτερα στρώματα. Με γνώμονα αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι στο LTE η χρονοδρομολόγηση και η διαχείριση των πόρων στο ασύρματο μέσο δεν λειτουργούν με IP πακέτα άμεσα αλλά με RLC PDUs τα οποία λαμβάνονται από την κατάτμηση και συνένωση των IP πακέτων που γίνονται από τις RLC οντότητες. Ως εκ τούτου, αυτές οι λειτουργίες του RLC επιπέδου θα πρέπει να διαμορφωθούν με ακρίβεια.

5.3.2 Αρχές σχεδίασης του EPC

Το μοντέλο EPC παρέχει μέσα για την προσομοίωση της άκρο προς άκρο IP σύνδεσης στο LTE μοντέλο. Ειδικότερα υποστηρίζει την διασύνδεση πολλαπλών Ues στο διαδίκτυο, μέσω ενός δικτύου ασύρματης πρόσβασης πολλαπλών eNodeBs συνδεδεμένα μέσω ενός SGW/PGW κόμβου.

Οι σχεδιαστικές επιλογές που έγιναν για το EPC μοντέλο είναι οι παρακάτω:

1. Υποστηρίζεται μόνο η σύνδεση με δίκτυα πακέτων δεδομένων Ipv4(σε αντίθεση με το πρότυπο LTE που υποστηρίζει και Ipv6 δίκτυα).
2. Οι λογικοί κόμβοι S-GW και P-GW ενσωματώνονται σε έναν κόμβο S-GW/P-GW με αποτέλεσμα να μην υπάρχει υλοποίηση της διεπαφής S5/S8.
3. Η υλοποίηση δεν υποστηρίζει σενάρια κινητικότητας μεταξύ δυο η περισσότερων S-GW.
4. Ένας από τους βασικούς στόχους της έκδοσης LENA είναι η ακριβής εξομοίωση της απόδοσης από άκρο σε άκρο ρεαλιστικών εφαρμογών. Για αυτό είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε εφαρμογή που ορίζεται στη βασική έκδοση του ns-3 και χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα TCP ή UDP.
5. Για την ακριβή εξομοίωση σεναρίων με την παρουσία πολλαπλών κόμβων eNodeB μοντελοποιήθηκαν με ακρίβεια τα πρωτόκολλα επικοινωνίας δεδομένων χρήστη μεταξύ eNodeB και S-GW/P-GW.
6. Μια συσκευή UE θα πρέπει να μπορεί να χρησιμοποιεί διάφορες εφαρμογές με διαφορετικό επίπεδο QoS. Έτσι η υλοποίηση επιτρέπει την υποστήριξη πολλαπλών EPS φορέων ανά συσκευή και είναι εφικτή η κατηγοριοποίηση κίνησης TCP/UDP είτε στην UE κατά την ανοδική ζεύξη είτε στον P-GW στην καθοδική ζεύξη.
7. Το EPC μοντέλο του εξομοιωτή εστιάζει κυρίως στο επίπεδο δεδομένων

χρήστη. Έτσι η ακριβής μοντελοποίηση του επιπέδου ελέγχου δεν αποτελεί απαίτηση του συστήματος και οι απαραίτητες συναλλαγές αυτού του επιπέδου εξομοιώνονται με απλουστευμένο τρόπο με άμεση αλληλεπίδραση μεταξύ των αντικειμένων-κόμβων του μοντέλου.

8. Κύριο αντικείμενο του εξομοιωτή είναι η μοντελοποίηση ενεργών χρηστών σε κατάσταση ECM_CONNECTED. Γι αυτό το λόγο οι λειτουργίες που έχουν να κάνουν με την κατάσταση ECM_IDLE (όπως ανίχνευση και ειδοποίηση μιας UE συσκευής) δεν μοντελοποιούνται καθόλου.
9. Στο συγκεκριμένο στάδιο του εξομοιωτή η μοντελοποίηση της παράδοσης κατά τη μετακίνηση από eNodeB σε eNodeB δεν αποτελεί απαίτηση της σχεδίασης.

5.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων σεναρίων

Για την ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μιας εξομοίωσης ο ns-3 προσφέρει μία πλήρη σειρά εργαλείων και εφαρμογών.

Η πρώτη λειτουργία που παρέχει ο ns-3 είναι η λειτουργία συλλογής πακέτων. Υπάρχει η δυνατότητα συλλογής πακέτων για κάθε ροή δεδομένων, για κάθε κόμβο του δικτύου αλλά και για κάθε διεπαφή του κάθε κόμβου. Η συλλογή πακέτων έγκειται στην αποθήκευση αρχείων τύπου .pcap κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Τα αρχεία αυτά παρέχουν πλήθος πληροφοριών για τα πακέτα που έχουν συλλεχθεί. Μεταξύ άλλων περιλαμβάνονται:

- ➔ Ο χρόνος αποστολής του κάθε πακέτου
- ➔ Οι διευθύνσεις πηγής και προορισμού για το κάθε πακέτο
- ➔ Τα πρωτόκολλα κάθε πακέτου (για παράδειγμα UDP, TCP, IP κλπ)

- Το μέγεθος του κάθε πακέτου, καθώς και το μέγεθος του κάθε υποπλασίου.
- Η επεξεργασία των αρχείων αυτών γίνεται στη συνέχεια με ειδικό λογισμικό για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων και στατιστικών.

Το ns-3 LTE μοντέλο υποστηρίζει την εξαγωγή των level Key Performance Indicators (KPIs) των επιπέδων PHY,MAC,RLC και PDCP σε αρχεία σε κάθε περίπτωση ένα για το uplink και ένα για το downlink.

Η δεύτερη δυνατότητα που παρέχει ο ns-3 είναι η λειτουργία παρακολούθησης ροών που προσφέρεται μέσω του flowmonitor. Με την ενεργοποίηση της λειτουργίας του flowmonitor στο πρόγραμμα της εξομοίωσης καταγράφονται οι απ' άκρο σ' άκρο ροές των δεδομένων και συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο τα ακόλουθα στοιχεία για κάθε ροή:

- Χρόνος αποστολής για το πρώτο και το τελευταίο πακέτο
- Χρόνος λήψης για το πρώτο και το τελευταίο πακέτο
- Συνολική καθυστέρηση για όλα τα πακέτα που ελήφθησαν
- Συνολική διακύμανση της καθυστέρησης για όλα τα πακέτα που ελήφθησαν
- Συνολικός αριθμός πακέτων που εστάλησαν
- Συνολικός αριθμός πακέτων που ελήφθησαν
- Συνολικός αριθμός bytes αποστολής
- Συνολικός αριθμός bytes λήψης
- Συνολικός αριθμός πακέτων που χάθηκαν

Τα στοιχεία αυτά είναι άμεσα διαθέσιμα με τη λήξη της εξομοίωσης και μπορούν να τυπωθούν στην οθόνη να εγγραφούν σε αρχείο(αυξάνοντας τον χρόνο εξομοίωσης λόγω εγγραφής στο δίσκο). Με επεξεργασία μπορούν να εξαχθούν χρήσιμες

πληροφορίες όπως η καθυστέρηση, η ρυθμοαπόδοση και άλλες. Τρίτη και μεγαλύτερη ενότητα που παρέχεται για την αξιολόγηση μιας εξομοίωσης είναι η ενότητα καταγραφών (logging module). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ενεργοποιήσει διάφορα επίπεδα καταγραφών, τα οποία προσφέρουν κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης πληροφορίες για τη λειτουργία όλων των τμημάτων που χρησιμοποιούνται, τυπώνοντας τες στην οθόνη του τερματικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΕΝΑΡΙΑ και ΕΞΑΓΩΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για να δημιουργήσουμε LTE-EPC σενάρια χρειαζόμαστε φυσικά τους βασικούς μηχανισμούς. Κάθε σενάριο λοιπόν πρέπει να έχει τον LTE και EPC helper. Στην αρχή κάθε σεναρίου πρέπει να έχουμε τις εξής 2 γραμμές ώστε να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε τις κλάσεις του lte και epc.

```
#include "ns3/lte-helper.h"
```

```
#include "ns3/epc-helper.h"
```

Στη συνέχεια καλούμε τους helper για να δημιουργήσουμε το LTE-EPC.

```
Ptr<LteHelper> lteHelper = CreateObject<LteHelper>();
```

```
Ptr<PointToPointEpcHelper> epcHelper = CreateObject<PointToPointEpcHelper>;
```

```
lteHelper->SetEpcHelper(epcHelper);
```

Επίσης πρέπει να δώσουμε και λειτουργικότητα LTE στους κόμβους μας τα UE αλλά και τον eNodeB.

```
NetDeviceContainer enbLteDevs = lteHelper → InstallEnbDevice (enbNodes);
```

```
NetDeviceContainer ueLteDevs = lteHelper->InstallUeDevice(ueNodes);
```

Και τέλος συνδέουμε τα UE με τον eNodeB ή με τους eNodeB ανάλογα το σενάριο.

```
lteHelper->Attach (ueLteDevs.Ge(0), enbLteDevs.Get(0)); (ένα UE με ένα eNodeB)
```

Να σημειώσουμε ότι με τη σύνδεση αυτή ενεργοποιείται και ο default EPS bearer.

Παρ' όλα αυτά μπορούμε να δημιουργήσουμε και άλλους bearer για κάθε UE.

Όλα τα σενάρια που ακολουθούν έχουν τις παραπάνω εντολές για να δημιουργηθεί το LTE-EPC φυσικά για να δημιουργήσουμε κίνηση, να δώσουμε IP κτλ θα χρειαστούμε και κάποιες άλλες εντολές.

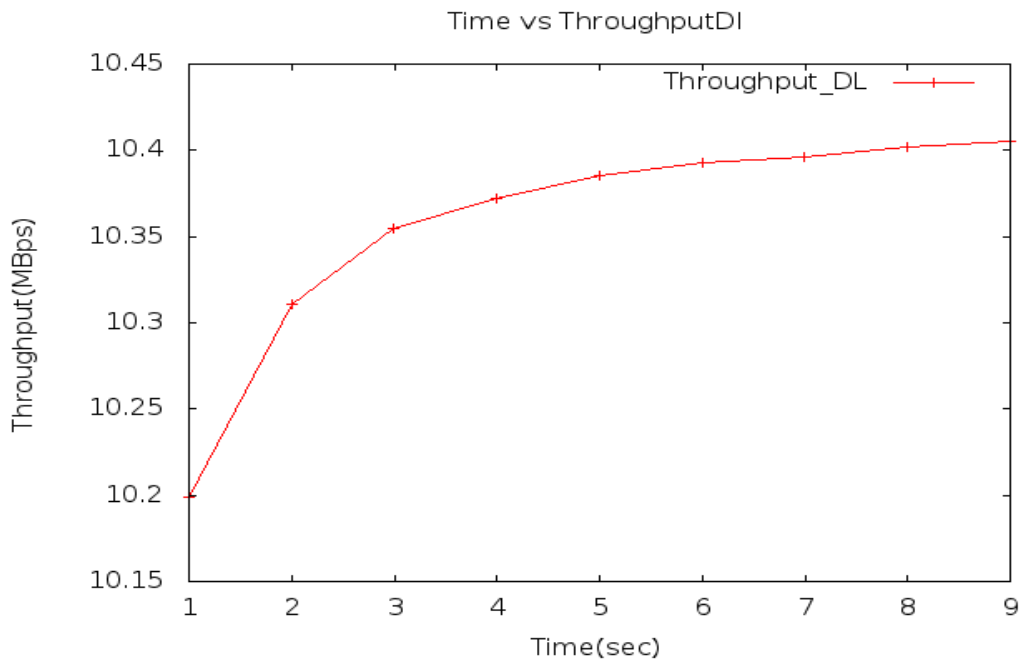
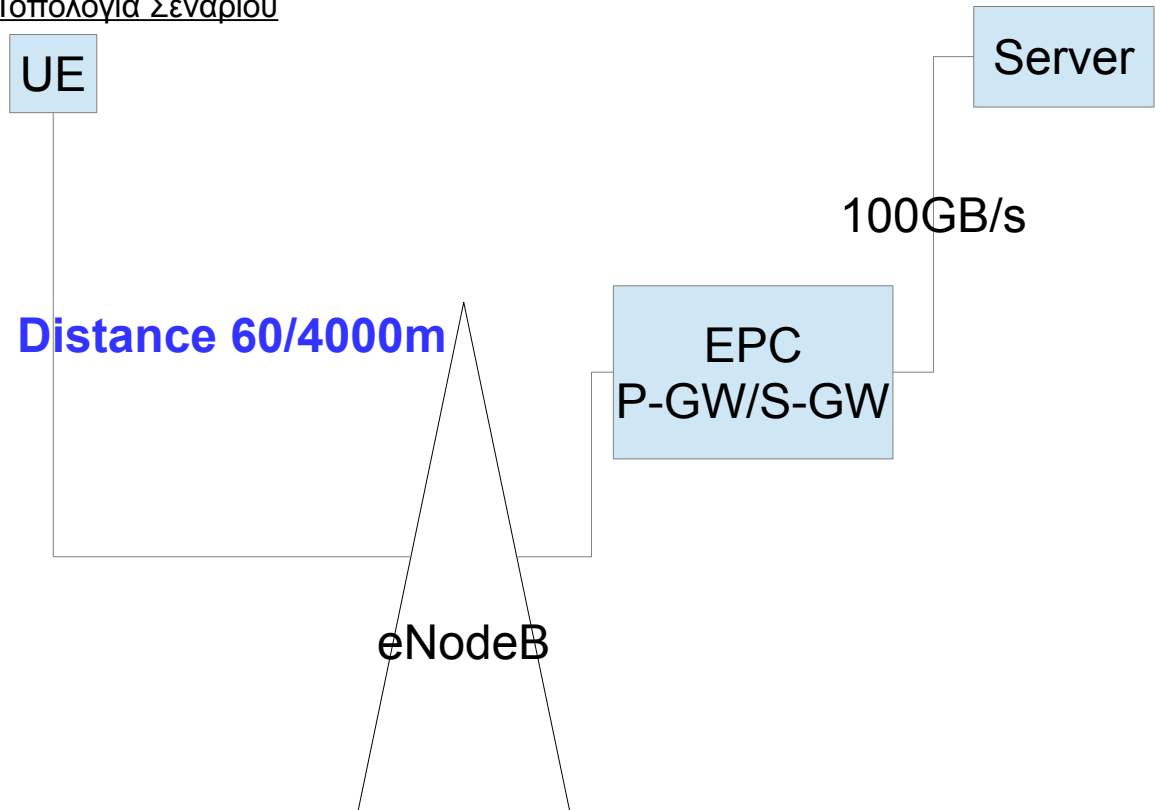
Για τη συλλογή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούμε το flow monitor module του ns-3 και τα traces MAC, RLC και PDCP.

6.1 Σενάριο 1 μέτρηση ρυθμοαπόδοσης ενός σταθμού με σταθερή θέση σε 2 διαφορετικές αποστάσεις

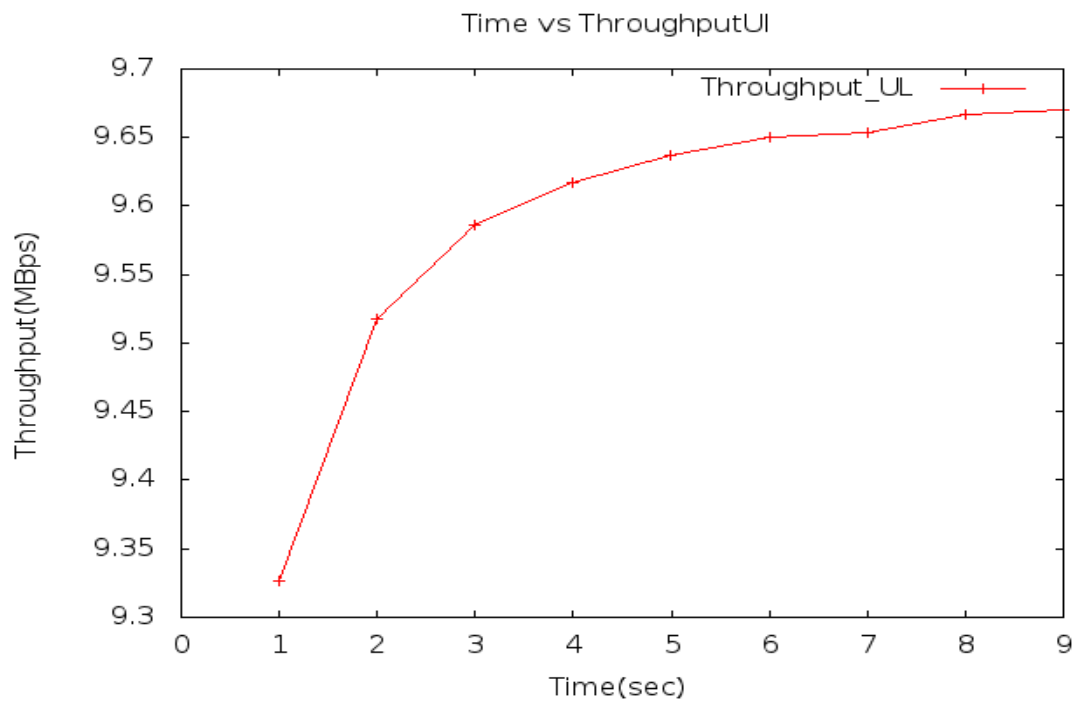
Στο πρώτο σενάριο μας έχουμε το LTE-EPC μοντέλο, ένα eNodeB, ένα UE και ένα remoteHost με τον οποίο επικοινωνεί το UE στέλνοντας η λαμβάνοντας δεδομένα.

Το UE τοποθετείται σε μια τυχαία θέση γύρω από την κεραία(eNodeB) μέσα σε ένα κύκλο με ακτίνα που έχουμε δηλώσει εμείς. Στη πρώτη περίπτωση 60 μέτρα και στη δεύτερη 4000. Επίσης έχουμε θέσει Proportional Fair mac scheduler, τύπο μετάδοσης MIMO Spatial Multiplexity, μοντέλο διάδοσης της κεραίας είναι FriisPropagationLossModel, AMC μοντέλο το PIROEW2010, ισοτροπική κεραία packet interval 1 ms (millisecond), μέγεθος πακέτου 1500bytes, η εφαρμογή είναι client-server τοποθετούμε τον client στον κόμβο που θα στείλει τα πακέτα και τον server στον κόμβο που θα τα δεχθεί (για παράδειγμα για το Downlink κανάλι ο server είναι στο UE και ο client στον eNodeB). Τέλος έχουμε εύρος ζώνης 100 Mbps για το downlink κανάλι και 50 Mbps για το uplink, και το transmit power στα 30db για τον eNodeB και στα 10 db για το UE(αυτό είναι σημαντικό για την απόσταση). Τέλος η προσομοίωση κρατά για 10δευτερόλεπτα.

Τοπολογία Σεναρίου

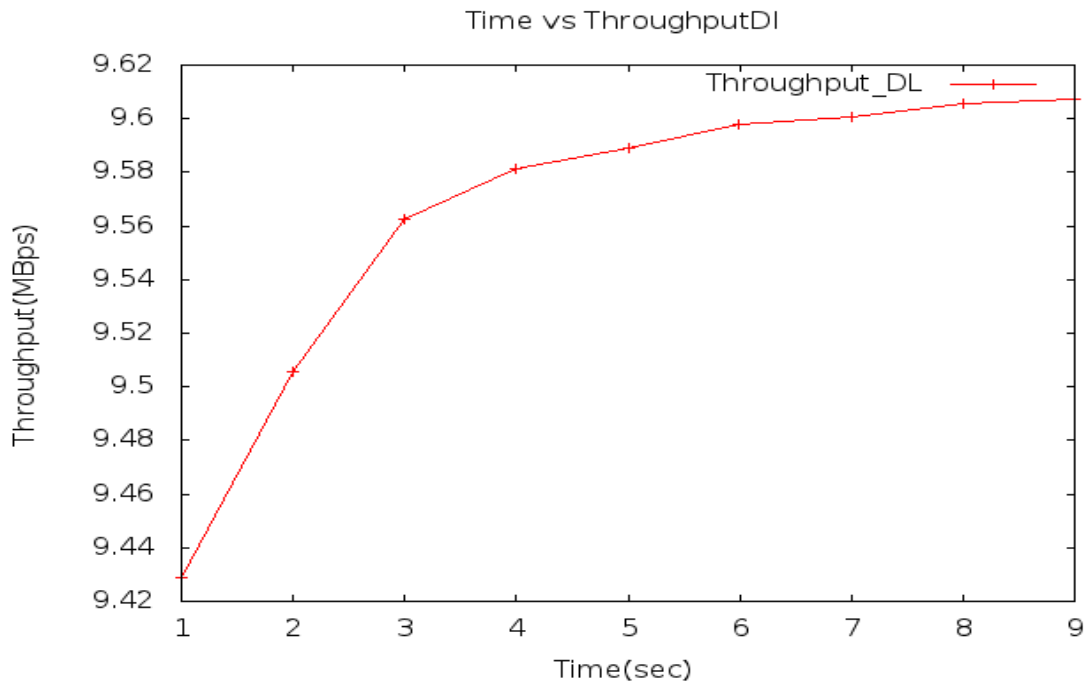


Γράφημα 6.1 ρυθμοαπόδοση στο Downlink Channel

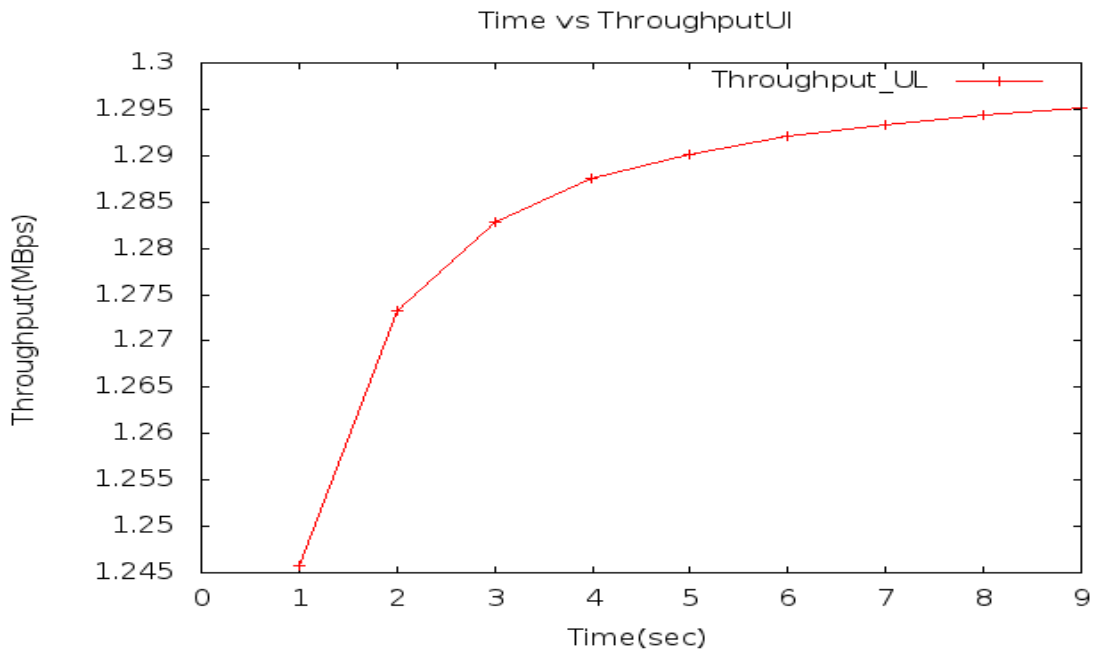


Γράφημα 6.2 ρυθμοαπόδοση στο Uplink Channel

Στα δυο παραπάνω γραφήματα βλέπουμε τη ρυθμοαπόδοση των downlink και uplink καναλιών, το UE βρίσκεται σε απόσταση από την κεραία μεταξύ 0 και 60 μέτρα. Ο άξονας time αντιπροσωπεύει το χρόνο που υπάρχει κυκλοφορία στο μέσο (η εφαρμογή μας στέλνει πακέτα για 9 δευτερόλεπτα).



Γράφημα 6.3 ρυθμοαπόδοση downlink channel



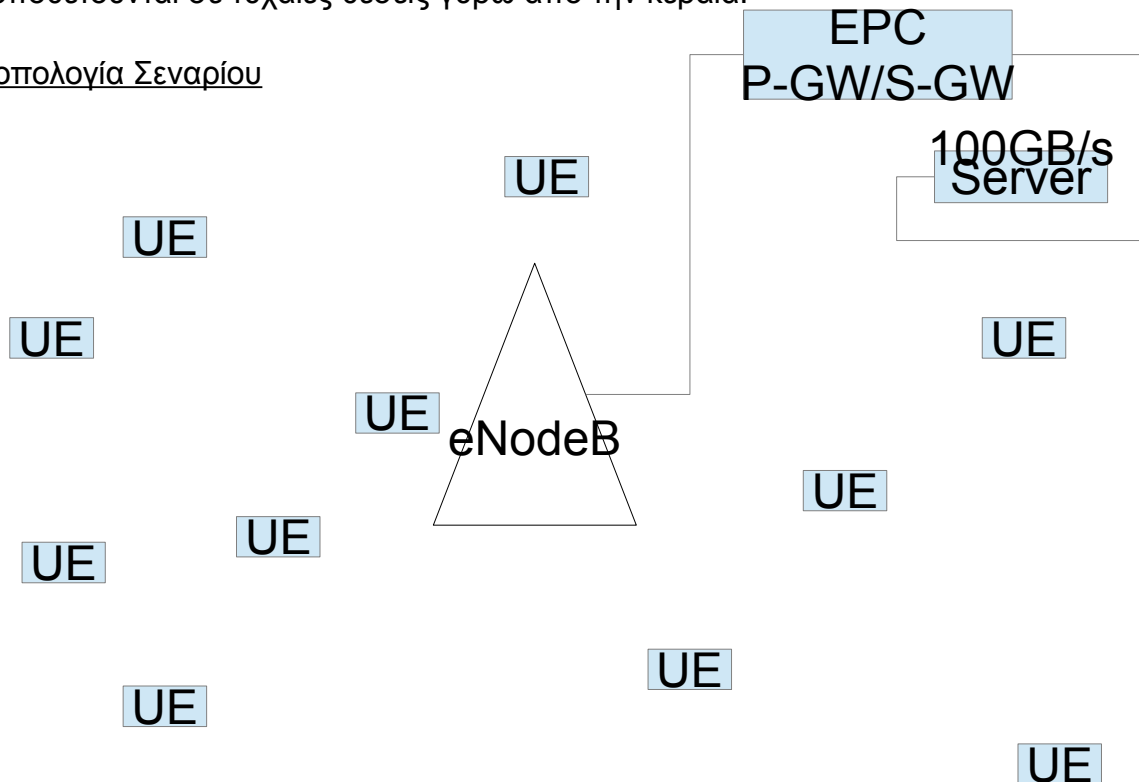
Γράφημα 6.4 ρυθμοαπόδοση uplink channel

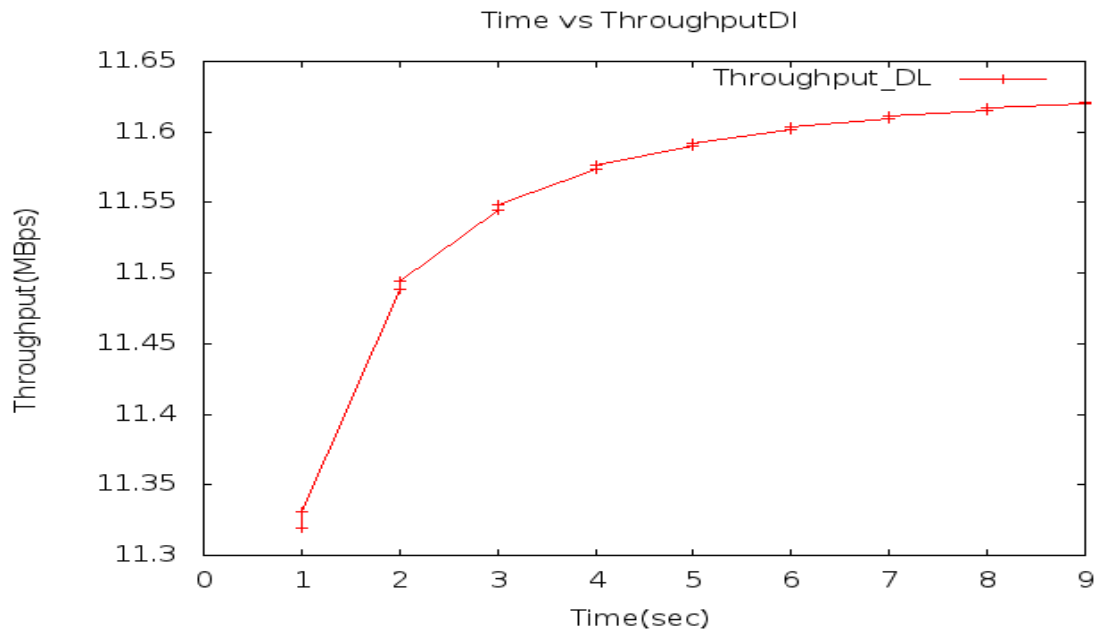
Τα γραφήματα 6.3 και 6.4 βλέπουμε τη ρυθμοαπόδοση αλλά αυτή τη φορά με το UE σε απόσταση 4000 μέτρα. Η διαφορά όσον αφορά το κανάλι καθοδικής ζεύξης είναι μικρή αυτό έχει να κάνει με τη ισχύς μετάδοσης της κεραίας (transmit power) η οποία έχει τη δυνατότητα να στείλει το σήμα σε μεγάλες αποστάσεις. Αντίθετα στο κανάλι ανοδικής ζεύξης βλέπουμε μεγάλη διαφορά λόγω ότι η ισχύς μετάδοσης είναι μικρή για τόσο μεγάλη απόσταση. Να τονίσουμε εδώ ότι η ρυθμοαπόδοση εξαρτάται και από το interpacketinterval όσο πιο μικρό ανεβαίνει η ρυθμοαπόδοση αλλά και το μέγεθος των πακέτων που στέλνουμε το οποίο στη περίπτωση μας είναι 1500 bytes.

6.2 Σενάριο 2 σύγκριση proportional fair, round robin (RR) και blind equal throughput (BET) mac schedulers

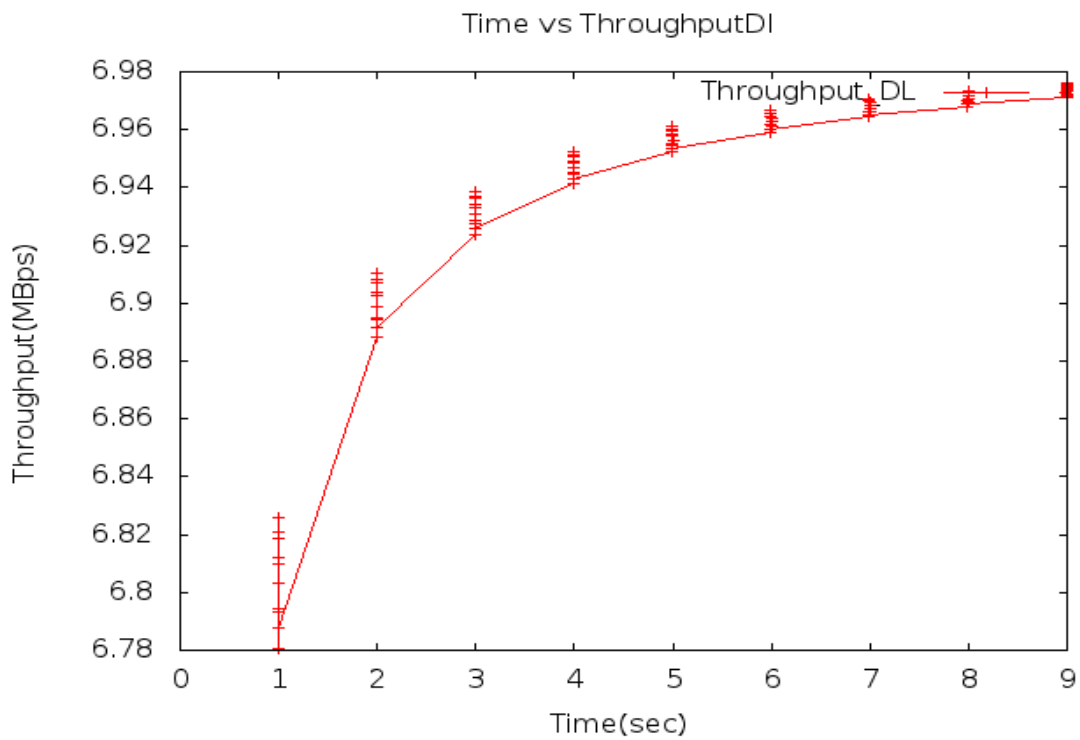
Σ αυτό το σενάριο έχουμε 10 UE σε ένα eNodeB με τις ίδιες παραμέτρους με το σενάριο πρώτο με τη μόνη διαφορά ότι αλλάζουμε τους mac schedulers ώστε να δούμε τις διαφορές στο downlink. Η απόσταση είναι 60 μέτρα και πάλι οι σταθμοί τοποθετούνται σε τυχαίες θέσεις γύρω από την κεραία.

Τοπολογία Σεναρίου

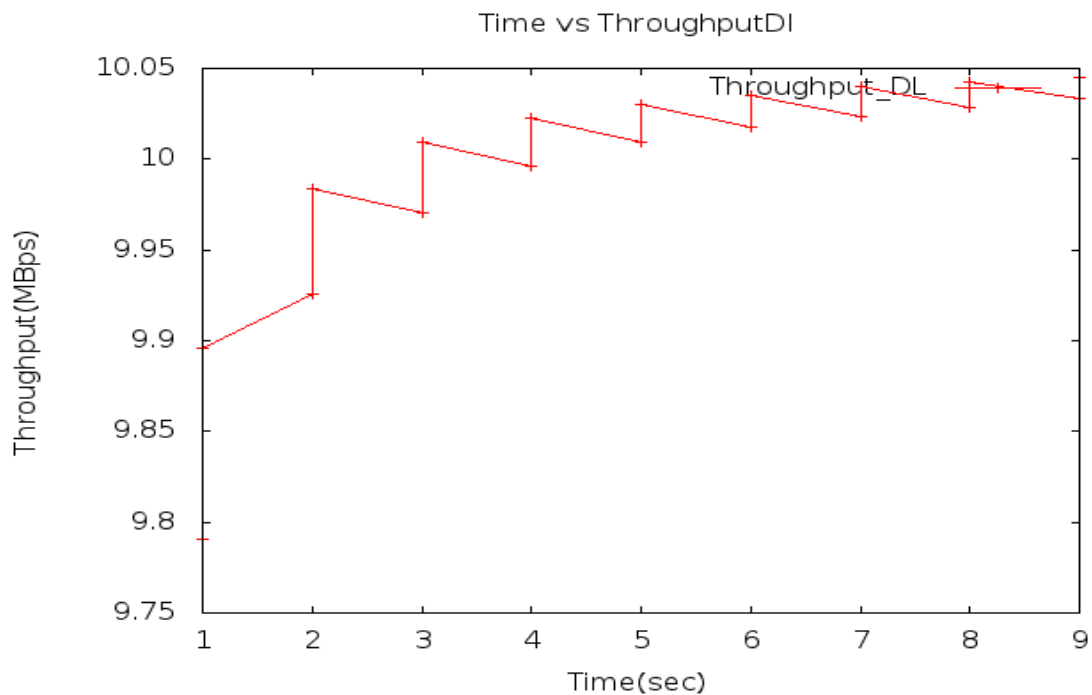




Γράφημα 6.5 Ρυθμοαπόδοση BET scheduler DL

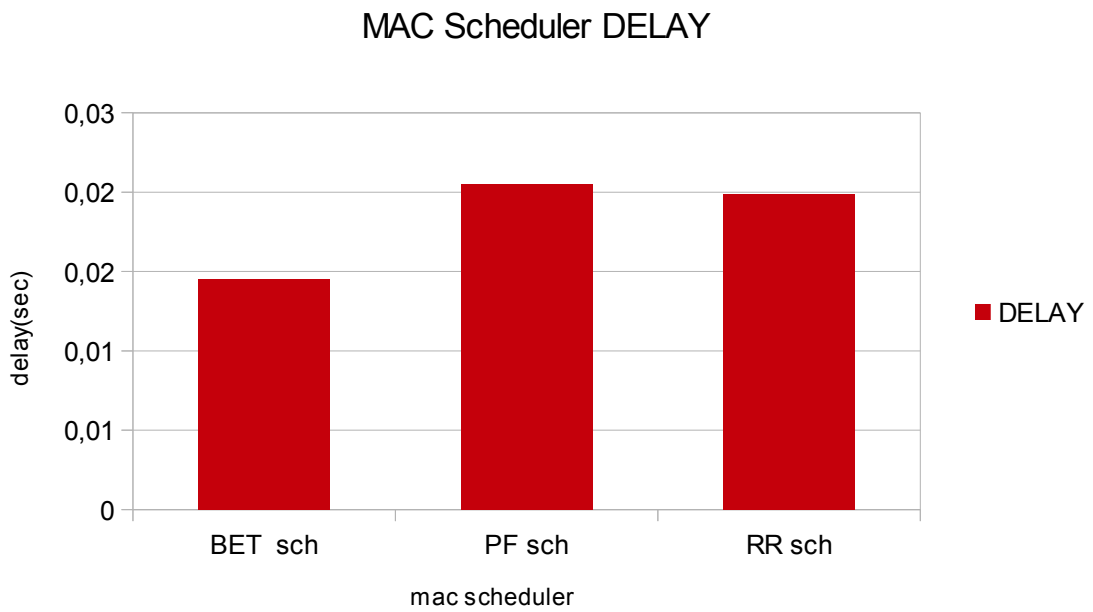


Γράφημα 6.6 Ρυθμοαπόδοση PF scheduler DL

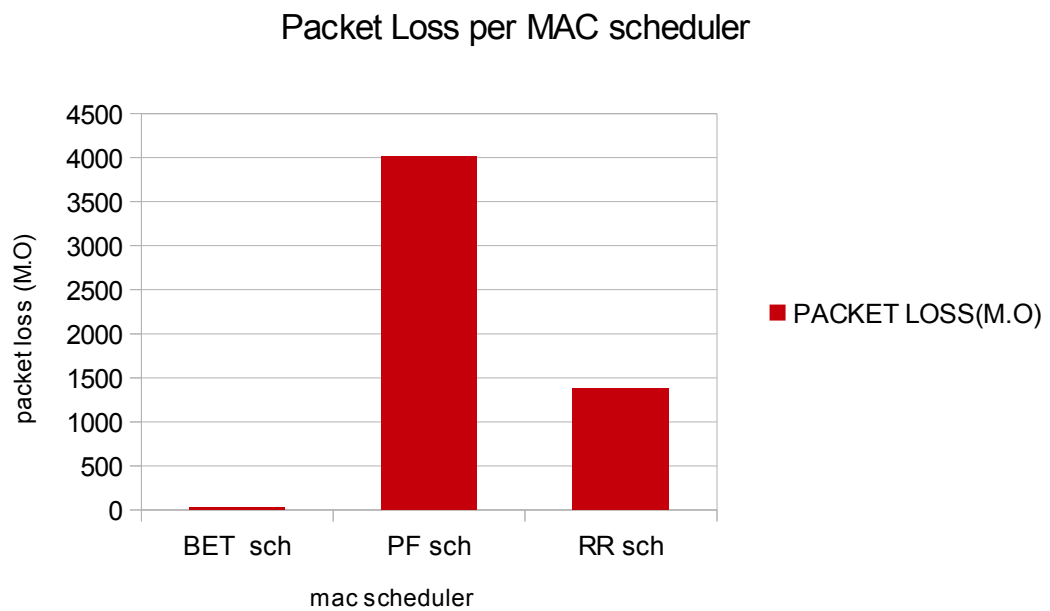


Γράφημα 6.7 Ρυθμοαπόδοση RR scheduler DL

Βλέπουμε ότι από τους τρεις schedulers ο BET δίνει το μεγαλύτερο throughput και μάλιστα το μοιράζει ισόποσα (οι οριζόντιες γραμμές αντιστοιχούν στο κάθε data flow 10 UE -> 10 flow). Ο round robin δίνει την επόμενη καλύτερη ρυθμοαπόδοση κι αυτό διότι δεν υπάρχει κάποια διαφορά μεταξύ των UE όσων αφορά το μέγεθος των πακέτων εκτός ίσως της απόστασης η οποία διαφορά είναι ελάχιστη όμως για να δημιουργήσει κάποια διαφορά. Έτσι όλα τα UE χρησιμοποιούν το μέσο πρακτικά τον ίδιο χρόνο. Ο τελευταίος scheduler έχει τη μικρότερη ρυθμοαπόδοση διότι προσπαθεί να δώσει σε όλα τα UE τουλάχιστον το μικρότερο επίπεδο υπηρεσίας αλλά παράλληλα και να χρησιμοποιήσει το συνολικό εύρος όσο περισσότερο γίνεται. Στη περίπτωση μας ο καλύτερος είναι ο BET διότι προσφέρει τη καλύτερη ρυθμοαπόδοση, χαμηλότερη καθυστέρηση και λιγότερη απώλεια πακέτων. Τα διαγράμματα καθυστέρησης και απώλεια πακέτων θα τα δούμε παρακάτω(σχήμα 6.8 και 6.9).



Γράφημα 6.8 Schedulers delay



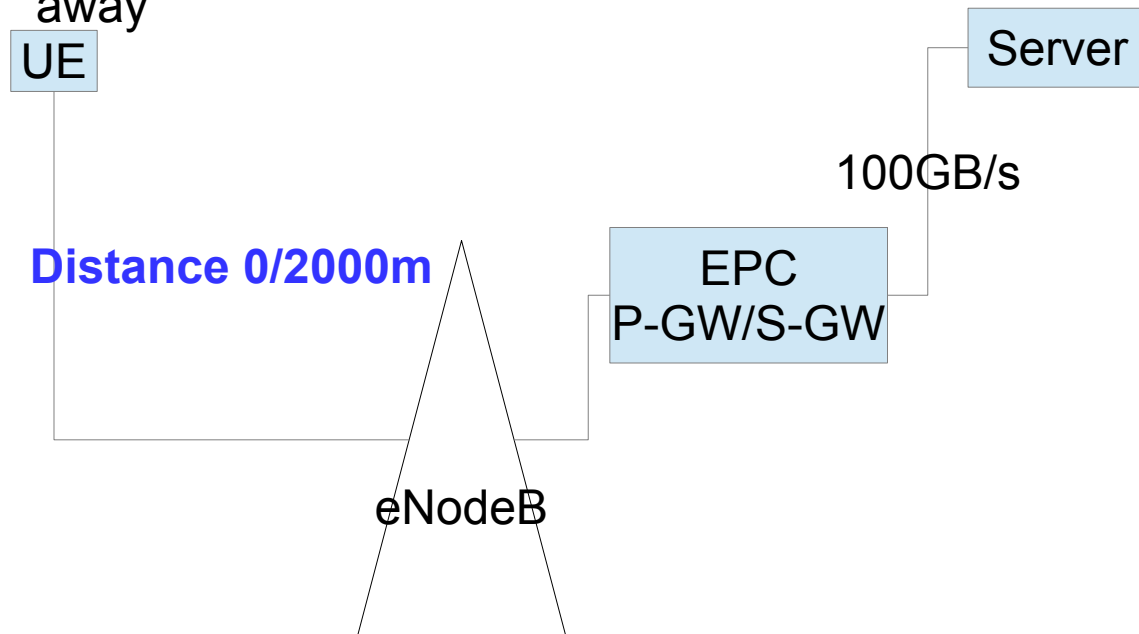
Γράφημα 6.9 Schedulers packet loss

6.3 Σενάριο 3 προσομοίωση LTE-EPC με κινούμενο σταθμό

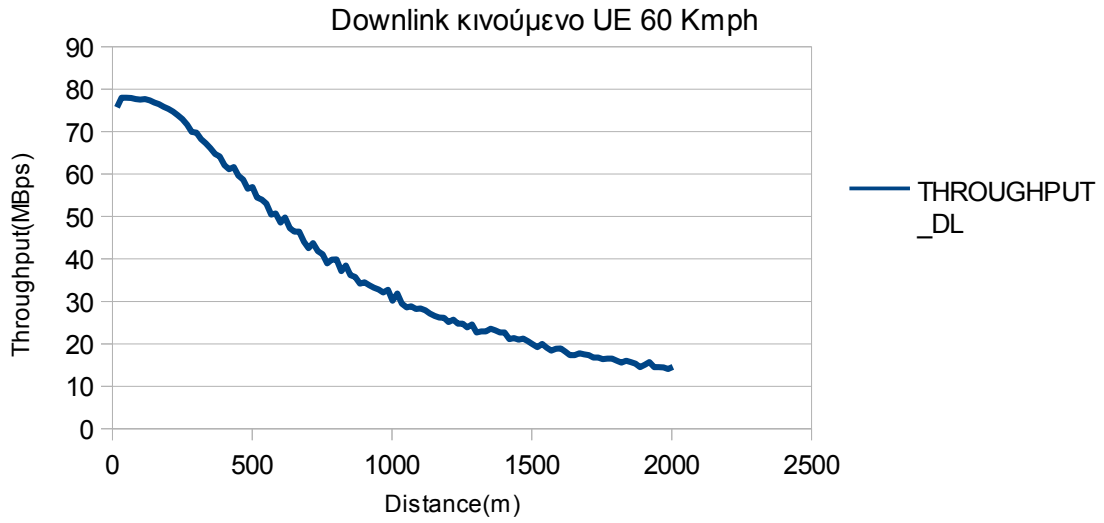
Στο συγκεκριμένο σενάριο έχουμε μια κεραία και ένα UE το οποίο κινείται με ταχύτητα 60 Km/h(χρησιμοποιούμε ένα fading trace αρχείο που προσομοιώνει τη κατάσταση αυτή). Το UE διανύει κάθε δευτερόλεπτο 16.7 μέτρα μέχρι να φτάσει τα 2000 μέτρα στα οποία τελειώνει και η προσομοίωση. Χρησιμοποιούμε τις ίδιες παραμέτρους με τα προηγούμενα σενάρια δηλαδή Proportional Fair mac scheduler, τύπο μετάδοσης MIMO Spatial Multiplexity, μοντέλο διάδοσης της κεραίας είναι FriisPropagationLossModel, AMC μοντέλο το PIROEW2010, ιστροπική κεραία, με μόνη διαφορά το packet interval 1 μ s (microsecond) και το μέγεθος πακέτου 1250bytes, η εφαρμογή είναι UDP client-server. Παρακάτω θα δούμε τα διαγράμματα ρυθμοαπόδοση - απόσταση και καθυστέρησης απόσταση.

Τοπολογία Σεναρίου

16.7m/s moving to 2km
away

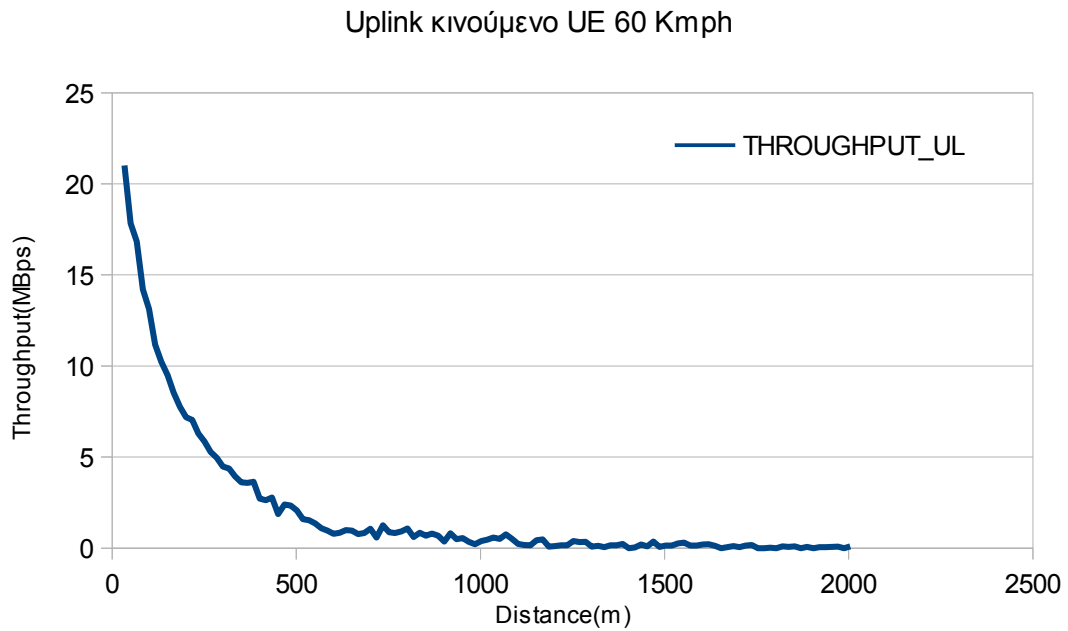


Throughput vs Distance

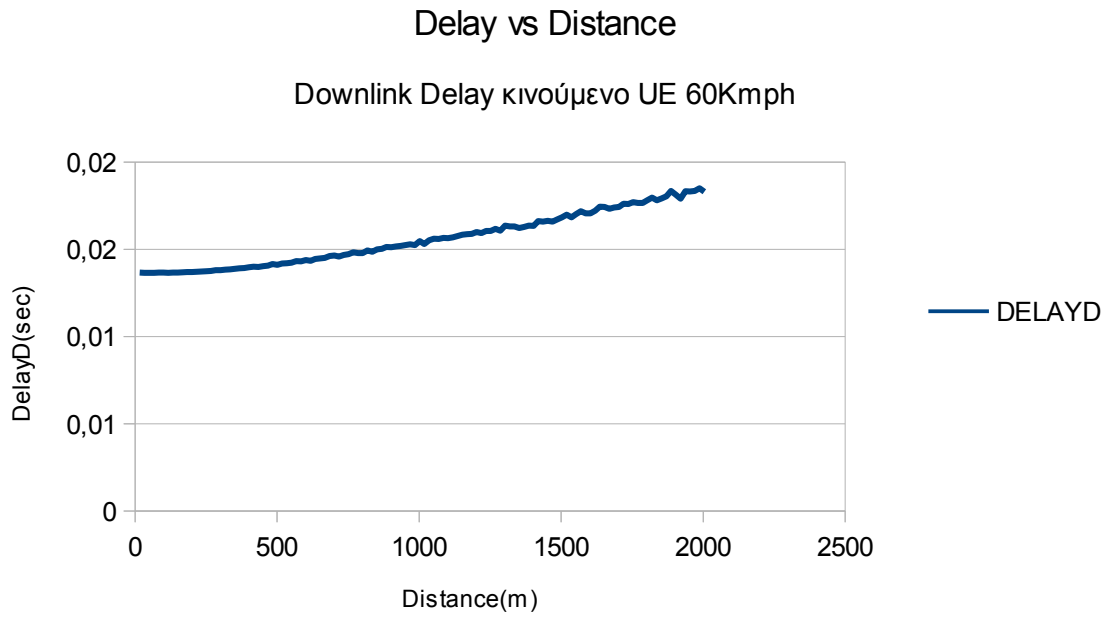


Γράφημα 6.10 ρυθμοαπόδοση downlink σε σχέση με την απόσταση

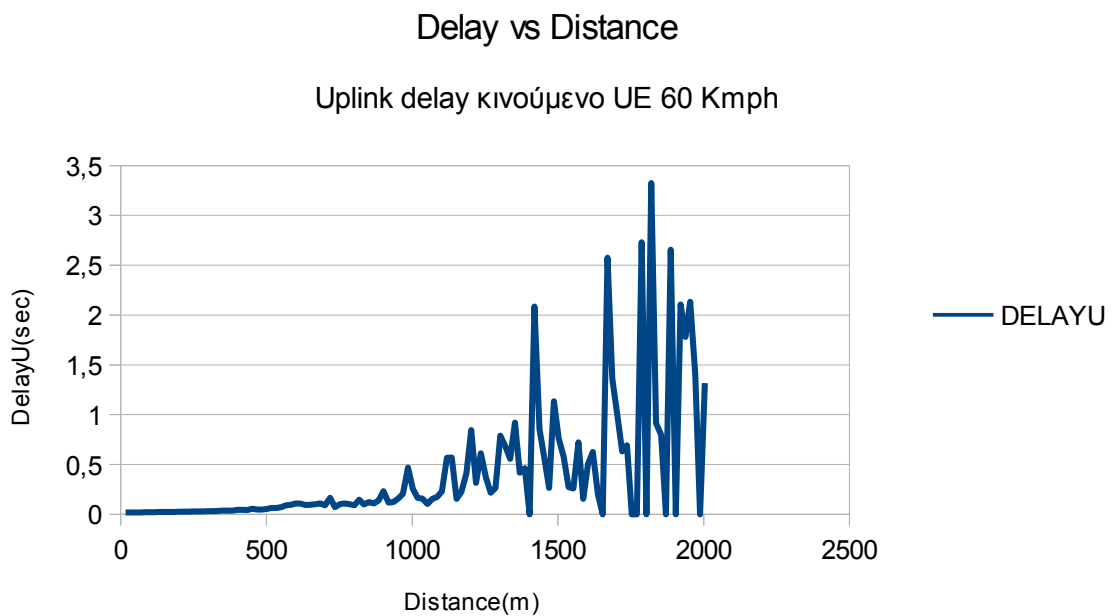
Throughput vs Distance



Γράφημα 6.11 ρυθμοαπόδοση uplink σε σχέση με την απόσταση



Γράφημα 6.12 καθυστέρηση downlink σε σχέση με την απόσταση



Γράφημα 6.13 καθυστέρηση uplink σε σχέση με την απόσταση

Στα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε πως επηρεάζεται η ρυθμοαπόδοση και η καθυστέρηση σε σχέση με την απόσταση που αλλάζει συνεχώς με σταθερό ρυθμό.

Στο downlink η μέση ρυθμοαπόδοση είναι 38,1161 Mbps , στο γράφημα 6.10 βλέπουμε τη μείωση της ρυθμοαπόδοσης από 77,9932Mbps που είναι η ανώτερη που φτάνουμε έως τη σταδιακή της μείωση στα 14,5865 Mbps. Η μέση καθυστέρηση στο downlink είναι 0,0148261 δευτερόλεπτα, στο γράφημα 6.11 βλέπουμε τη σταδιακή της αύξηση που όμως δε ξεπερνά τα 0,0183028 δευτερόλεπτα.

Στο uplink πάλι έχουμε μεγαλύτερη πτώση της ρυθμοαπόδοσης και αύξηση της καθυστέρησης σε σχέση με την απόσταση όπως φαίνεται και στα γραφήματα 6.12 και 6.13. Η μέση ρυθμοαπόδοση είναι στα 2,19652 Mbps ενώ η καθυστέρηση στα 0.0499751 δευτερόλεπτα. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης η ανώτερη τιμή της ρυθμοαπόδοσης είναι 21,0023 Mbps με κατώτερη τα 0.107254 Mbps. Η καθυστέρηση κυμαίνεται μεταξύ 0,0181803 δευτερόλεπτα και 3,32503 δευτερόλεπτα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τα παραπάνω γραφήματα είδαμε πως η απόσταση επηρεάζει τη ρυθμοαπόδοση και τη καθυστέρηση τόσο σε σταθερό σταθμό αλλά και σε σταθμό που κινείται. Ακόμα πως αυτά επηρεάζονται από τον mac scheduler που ορίζουμε αλλά και από την ισχύ διάδοσης της κεραίας και των σταθμών όπως επίσης και από το μοντέλο διάδοσης που χρησιμοποιούμε. Αν και στη περίπτωση μας επικεντρωνόμαστε στην απόσταση και τη κινητικότητα του σταθμού από τον eNodeB.

Απ όλα τα παραπάνω βλέπουμε ότι ο προσομοιωτής ns-3 μπορεί να μας δώσει μια καλή εικόνα για το LTE-EPC και να διερευνήσουμε διάφορες συμπεριφορές με διαφορετικές παραμέτρους. Παρ' όλα τα bugs που είναι φυσικό να υπάρχουν αυτά λύνονται και συνεχώς προστίθενται και καινούργιες λειτουργίες όπως το handover που υπάρχει στην έκδοση ns-3.19. Το κύριο πλεονέκτημα του προσομοιωτή είναι ότι ως λογισμικό ανοιχτού κώδικα μπορούμε να γράψουμε τα δικά μας module τα οποία μπορούμε να μοιραστούμε και με την κοινότητα των χρηστών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Άρης Αλεξόπουλος, Γιώργος Λαγογιάννης, Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών, έκτη έκδοση, 2003
- [2] Alcatel-Lucent Strategic White Paper, The LTE Network Architecture-A comprehensive tutorial
- [3] Douglas E. Comer, Διαδίκτυα με TCP/IP Αρχές Πρωτόκολλα και Αρχιτεκτονικές, Τόμος 1, Τέταρτη Αμερικανική Έκδοση
- [4] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, and P. Beming, 3G Evaluation HSPA and LTE for mobile Broadband. , Elsevier,2008
- [5] E. Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, 4G LTE LTE-Advanced for Mobile Broadband, Elsevier,2011
- [6] Amitabha Ghosh ,Rapeepat Ratasuk M, Essentials of LTE and LTE-A, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS,2011
- [7] Harri Holma, Antti Toskala , LTE for UMTS Evolution to LTE-Advanced Second Edition , John Wiley & Sons Ltd,2011
- [8] Pierre Lescuyer ,Thierry Lucidarme ,Evolved Packet System(EPS) The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS, John Wiley & Sons Ltd ,2008
- [9] Motorola White Paper ,Real-World LTE Performance for Public Safety,2009
- [10] Roke Manor Research Ltd,LTE MAC Scheduler & Radio Bearer Qos,2001
- [11] Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco, Gennaro Boggia, and Pietro Camarda, A Two-level Scheduling Algorithm for QoS Support in the Downlink of LTE cellular networks , European Wireless Conference, 2010
- [12] Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco, Gennaro Boggia, Francesco Capozzi and Pietro Camarda ,Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework , IEEE transactions on vehicular technology,vol 60,no 2,2011
- [13] Giuseppe Piro,Nicola Baldo,Marco Miozzo,An LTE module for the ns-3 Network simulator ,GsoC,2010
- [14] Stefania Sesia,Issam Toufik,Matthew Baker,LTE-The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practise Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, 2011
- [15]<https://www.nsnam.org/>
- [16]http://en.wikipedia.org/wiki/LTE_%28telecommunication%29
- [17]<http://en.wikipedia.org/wiki/E-UTRA>

- [18]<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>
- [19]<https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/home>
- [20]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [21]<https://www.nsnam.org/>
- [22]http://www.nsnam.org/wiki/Main_Page
- [23]<http://www.nsnam.org/wiki/index.php/GSOC2012LTEScheduling>
- [24]<http://www.nsnam.org/docs/release/3.19/doxygen/index.html>
- [25]<https://groups.google.com/forum/#!forum/ns-3-users>
- [26]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [27]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [28]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [29]Alcatel-Lucent Strategic White Paper, The LTE Network Architecture-A comprehensive tutorial
- [30]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [31]Alcatel-Lucent Strategic White Paper, The LTE Network Architecture-A comprehensive tutorial
- [32]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [33]Alcatel-Lucent Strategic White Paper, The LTE Network Architecture-A comprehensive tutorial
- [34]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [35]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [36]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [37]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [38]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [39]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [40]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [41]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>
- [42]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>

[43]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>

[44]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>

[45]Alcatel-Lucent Strategic White Paper, The LTE Network Architecture-A comprehensive tutorial

[46]Alcatel-Lucent Strategic White Paper, The LTE Network Architecture-A comprehensive tutorial

[47]Alcatel-Lucent Strategic White Paper, The LTE Network Architecture-A comprehensive tutorial

[48]Alcatel-Lucent Strategic White Paper, The LTE Network Architecture-A comprehensive tutorial

[49]Alcatel-Lucent Strategic White Paper, The LTE Network Architecture-A comprehensive tutorial

[50]Alcatel-Lucent Strategic White Paper, The LTE Network Architecture-A comprehensive tutorial

[51]Alcatel-Lucent Strategic White Paper, The LTE Network Architecture-A comprehensive tutorial

[52]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>

[53]Alcatel-Lucent Strategic White Paper, The LTE Network Architecture-A comprehensive tutorial

[54]Alcatel-Lucent Strategic White Paper, The LTE Network Architecture-A comprehensive tutorial

[55]<http://www.tutorialspoint.com/lte/>

[56]<http://lena.cttc.es/manual/lte-design.html>

Πτυχιακή Εργασία του φοιτητή Αγγελή Αλέξανδρου