



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη και Αποτίμηση Τεχνικών Χρόνο-Προγραμματισμού σε
ασύρματα δίκτυα τέταρτης γενιάς LTE.**

Πηλιχός Δημήτριος

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Θεόδωρος Ζυγκιρίδης, Επίκουρος Καθηγητής.

Παναγιώτης Σαρηγιαννίδης, Λέκτορας.

Κοζάνη (Οκτώβριος 2014)

Περίληψη

Το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η σύγκριση τεχνικών χρόνο-προγραμματισμού στα ασύρματα δίκτυα 4^{ης} γενιάς LTE (Long Term Evolution). Η εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο, στο βιβλιογραφικό μέρος, παρουσιάζεται η εξέλιξη των GSM (Global System for Mobile Telecommunication) ασύρματων δικτύων επικοινωνιών μέχρι τις τεχνολογίες 4^{ης} γενιάς και μερικά ιστορικά στοιχεία από τις παλαιότερες γενιές (0G, 1G). Επίσης η εργασία εστιάζει στα δίκτυα 4^{ης} γενιάς, στα οποία γίνεται εκτενής αναφορά της λειτουργίας της μεθόδου των δικτύων LTE καθώς επίσης και της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Τέλος, παρουσιάζονται οι πιο αξιόλογες τεχνικές-αλγόριθμοι χρόνο-προγραμματισμού που εμφανίζονται στην βιβλιογραφία και συνοδεύονται από πλείστα παραδείγματα.

Στο δεύτερο μέρος, στο ερευνητικό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενός πρότυπου δικτύου 4^{ης} γενιάς LTE. Επιπρόσθετα, παρατίθεται ο σχεδιασμός και η δομή του προσομοιωτή, το μοντέλο και ο αλγόριθμος σε κάθε σενάριο προσομοίωσης, από τα συνολικά πέντε, καθώς και η ενδελεχής ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Παράλληλα, στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται και ένα νέο σχήμα χρόνο-προγραμματισμού που εστιάζει στην παροχή δίκαιης κατανομής πόρων ανεξάρτητα από τον αριθμό των συνδεδεμένων συνδρομητών. Συγκεντρωτικά οι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι οι εξής:

- Παρουσίαση και ιστορική αναδρομή στα δίκτυα και στις τεχνολογίες των δικτύων κινητών επικοινωνιών.
- Εκτενής αναφορά στα δίκτυα 4^{ης} γενιάς και συγκεκριμένα στην τεχνολογία LTE.
- Παρουσίαση ενός νέου σχήματος δίκαιας διανομής πόρων.
- Μοντελοποίηση και προσομοίωση των βασικών προτύπων χρόνο-προγραμματισμού στα δίκτυα LTE.

- Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοίωσης διαφορετικών μεθόδων χρόνο-προγραμματισμού πόρων.
- Εισαγωγή και μελέτη συμπεριφοράς των μεθόδων χρόνο-προγραμματισμού με εισαγωγή πραγματικού φόρτου κίνησης όπως:
 - Real Media Streaming TCP.
 - Real Media Streaming UDP.
 - Live Streaming.
 - VoIP (Voice over Internet Protocol).
- Πιθανές προτάσεις και προκλήσεις για μελλοντική έρευνα.

Για την προσομοίωση των αλγορίθμων χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Matlab, και αναλυτικότερα η μέθοδος του γεγονοδηγούμενου προγραμματισμού (Event-Driven). Το τελευταίο κεφάλαιο αφιερώνεται στην ανάλυση των αποτελεσμάτων, στον σχολιασμό της απόδοσης των σχημάτων που μελετήθηκαν και στην πιθανές βελτιώσεις που μπορούν να προκύψουν από την βελτιστοποίηση των σχημάτων που προσομοιώθηκαν

Abstract

The purpose of this thesis is the study and comparison of various scheduling techniques related with fourth generation wireless networks LTE (Long Term Evolution). This thesis is separated in two parts. In the literature part the revolution of the GSM (Global System for Mobile Telecommunication) wireless communication networks up to fourth generation technologies and some historical elements from previous generations (0G, 1G) are presented. Moreover the fourth generation networks are classified, which mostly gain our interest, while an extensive report towards the LTE networks operation and features is included. A list of the most remarkable scheduling schemes and algorithms analyzed, while examples are given. The next part, the research part, involves modeling and simulation issues, i.e., the results of a designed simulation model 4G LTE are presented. Additionally, it includes design issues and structure features of the simulator, scenario details and objectives, out of five total simulation experiments and thorough interpretation of the results. Furthermore, a novel scheduling scheme is introduced that endeavors to provide fairness in the bandwidth allocation process for all subscribers in the network. The goals of this thesis are summarized as follows:

- Presentation and historical flashback to networks and technologies of mobile networks.
- Extensive report to fourth generation networks and specifically in LTE technology.
- Modeling and simulation of the most prestigious LTE scheduling schemes.
- Presentation of a novel fair scheduling scheme for LTE networks.
- Comparative simulation results including several scheduling LTE schemes.
- Extensive simulation experiments engaging real traffic traces such as:
 - Real Media Streaming TCP
 - Real Media Streaming UDP
 - Live Streaming

-VoIP (Voice over Internet Protocol).

- Challenges and future work towards the development of efficient LTE scheduling schemes.

Matlab was utilized in order to simulate the aforementioned environment. In addition, the method of Event – Driven programming was adopted. The last section is devoted to the discussion of the results, giving emphasis to the study of the schemes performance, the optimization and possible future improvements.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας και συγκεκριμένα την Αναπληρώτρια καθηγήτρια κα. Μαλαμάτη Λούτα και τον Λέκτορα κ. Σαρηγιαννίδη Παναγιώτη για την κατανόηση και την υπομονή τους, για τις γνώσεις και την βοήθεια που μου παρείχαν τόσο κατά την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της Διπλωματικής εργασίας όσο και κατά την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και τους καθηγητές μου, του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, για τις όμορφες αναμνήσεις όλα αυτά τα χρόνια αλλά και για τις προσπάθειες που καταβάλει ο κάθε ένας αλλά και όλοι συνολικά για την εύρυθμη λειτουργία ενός νεοσύστατου τμήματος σε αυτή την ατυχή χρονικά συγκυρία προκειμένου φοιτητές, όπως και εγώ, να βρίσκουν μια «ακαδημαϊκή στέγη» και να πετυχαίνουν τους στόχους τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την βοήθεια και την υποστήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

1. Η μετάβαση από το 0G στα 4G δίκτυα.....	12
1.1 Ιστορική αναδρομή στις Ασύρματες Επικοινωνίες.	12
1.2 Βασικές κατηγορίες διαχωρισμού ασύρματων δικτύων.	13
1.2.1 Με σημεία πρόσβασης - σταθμούς βάσης.	13
1.2.2 Χωρίς σημεία πρόσβασης (Ad hoc networks).....	14
1.3 Τα Κυψελωτά Δίκτυα NGN (Next Generation Network).....	15
1.4 Δίκτυα 0G.	18
1.4.1 <i>Push to talk (PTT)</i>	20
1.4.2 Mobile Telephone Service (MTS)	21
1.4.3 Η υπηρεσία IMTS.....	22
1.4.4 Προηγμένα συστήματα κινητής τηλεφωνίας (AMTS).....	23
1.5 Δίκτυα 1G.	23
1.5.1 Ιστορική αναδρομή των δικτύων 1ης Γενιάς (1G).	24
1.5.2 Σκανδιναβική Κινητή Τηλεφωνία (Nordic Mobile Telephone).....	24
1.5.3 Ιταλική Κινητή Τηλεφωνία RTMI.	26
1.5.4 Ράδιο Τηλεφωνικό Δίκτυο C.....	26
1.6 Δίκτυα 2G.	27
1.6.1 Μερικά από τα σημαντικότερα συστήματα στα δίκτυα 2G.	27
1.6.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των δικτύων 2G.	29
1.6.3 Εξελίξεις των συστημάτων 2G.....	30
1.7 Δίκτυα 3G.	33
1.7.1 Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών UMTS.	34
1.7.2 Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA).....	35
1.7.3 High Speed Packet Access (HSPA).	36
1.8 Δίκτυα 4G.	38
1.8.1 Απαιτήσεις συστημάτων 4G.....	40
1.8.2 Τεχνολογίες που ανήκουν στα δίκτυα 4G.....	42
1.8.3 Ορθογώνια πολυπλεξία πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (OFDMA).....	44
1.8.4 Δίκτυα LTE.	45
1.8.5 Δίκτυα UMB.....	46

1.8.6 Δίκτυα WiMAX.....	47
2. Η τεχνολογία LTE των δικτύων 4ης γενιάς.....	51
2.1 Περίληψη.....	51
2.2 Εισαγωγή.....	51
2.3 Χαρακτηριστικά τεχνολογίας LTE.....	57
2.4 Ποιότητα υπηρεσιών LTE.....	60
2.5 Πλεονεκτήματα του LTE.....	63
2.6 Εξοπλισμός τεχνολογίας LTE.....	65
2.7 Το δίκτυο πρόσβασης E – UTRAN.....	66
2.8 Το δίκτυο πυρήνα EPC.....	67
2.9 Πρωτόκολλα τεχνολογίας LTE.....	71
2.9.1 Χαρακτηριστικά Φυσικού Επιπέδου LTE.....	72
2.9.2 Χαρακτηριστικά του Στρώματος Ζεύξης Δεδομένων.....	74
2.10 Προγραμματιστής – Scheduler.....	79
2.10.1 Προγραμματιστής κατερχόμενης κίνησης.....	80
2.10.2 Προγραμματιστής ανερχόμενης κίνησης.....	80
2.11 Μελλοντικές Εξελίξεις.....	82
3. Η δομή του LTE πλαισίου.....	84
3.1 Περίληψη.....	84
3.2 Η Δομή Κίνησης στο Φυσικό Επίπεδο.....	84
3.3 Πολυπλεξία TDD.....	85
3.3.1 TDD frame.....	88
3.3.2 Η Δομή της Χρονοθυρίδας (Tslot).....	90
3.4 Πολυπλεξία FDD.....	92
3.5 Σύγκριση TDD – FDD.....	92
3.6 Πλέγμα Πόρων LTE (Resource Grid LTE).....	94
3.7 Φυσικά Κανάλια.....	96
3.8 Φυσικά Σήματα.....	97
3.9 Master Information Block (MIB).....	98
3.10 Ένδειξη ποιότητας καναλιού CQI.....	99
4. Παρουσίαση Μεθόδων (Αλγορίθμων) Χρόνο – Προγραμματισμού.....	101
4.1 Περίληψη.....	101
4.2 Απλή Διαίρεση Πόρων.....	101

4.3 Επίμονος Προγραμματισμός (Persistent Scheduling).....	104
4.4 Αλγόριθμος MAXMIN Fairness.....	107
5.Αποτίμηση Σχημάτων και Γραφήματα Απόδοσης.....	113
5.1 Εισαγωγή.....	113
5.2 Προσομοίωση στη Matlab.....	114
5.3 Σενάρια Προσομοίωσης.....	115
5.3.1 Σενάριο 1.....	115
5.3.2 Σενάριο 2.....	123
5.3.3 Σενάριο 3.....	127
5.3.4 Σενάριο 4.....	131
5.3.5 Σενάριο 5.....	136
5.4 Συμπεράσματα.....	139
Βιβλιογραφία.....	144
Παραρτήματα.....	155
1. Εικόνες.....	155
2. Σχήματα.....	156
3. Πίνακες.....	157
4. Γραφήματα.....	158
5. Γλωσσάρι.....	161

1. Η μετάβαση από το 0G στα 4G δίκτυα.

1.1 Ιστορική αναδρομή στις Ασύρματες Επικοινωνίες.

Ένα ασύρματο δίκτυο είναι ένα τηλεφωνικό ή υπολογιστικό δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιεί ραδιοκύματα ως φορείς ή ως το φυσικό επίπεδο. Στα δίκτυα αυτά η πληροφορία μεταφέρεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα που εξαρτάται κάθε φορά από το ρυθμό μετάδοσης που απαιτείται να έχει το δίκτυο. Η ασύρματη επικοινωνία έχει ως μέσο μετάδοσης την γήινη ατμόσφαιρα ή το διάστημα.

Για την καλύτερη κατανόηση των ασύρματων επικοινωνιών παρατίθενται ορισμένα σημαντικά ιστορικά γεγονότα που αφορούν την εξέλιξη αυτών:

- Ο Heinrich Rudolf Hertz (Χάινριχ Ρούντολφ Χερτς ή Χερτζ) 22 Φεβρουαρίου 1857 – 1894, έχοντας λάβει το διδακτορικό του δίπλωμα από το Πανεπιστήμιο του Βερολίνου αφιερώθηκε σε μια σειρά από πειράματα (1886-1889) στα οποία επιβεβαίωσε την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell, παρήγαγε και μελέτησε ηλεκτρομαγνητικά κύματα.
- Ο Nicola Tesla (Νίκολα Τέσλα) 10 Ιουλίου 1856 – 7 Ιανουαρίου 1943, κατασκεύασε το πρώτο ασύρματο σύστημα επικοινωνίας.
- Alexander Stepanovich Popov (Αλέξανδρος Στεπάνοβιτς Ποπόφ) 4/16 Μαρτίου 1859 – 31 Δεκεμβρίου/13 Ιανουαρίου 1905/1906, το 1882 ολοκλήρωσε τις σπουδές του στο φυσικομαθηματικό τμήμα του Πανεπιστημίου της Αγίας Πετρούπολης. Στη Ρωσία θεωρείται ο εφευρέτης του ραδιοφώνου και με απόφαση του υπουργικού συμβουλίου του 1945 γιορτάζεται προς τιμή του η 7^η Μαΐου ως «Μέρα Ραδιοφωνίας». Το 1894 κατασκεύασε δέκτη Η/Μ κυμάτων, το 1896 πέτυχε μετάδοση ραδιοκυμάτων μεταξύ

κοντινών κτιρίων, το 1898 η απόσταση μετάδοσης έφτασε τα 6 μίλια και τέλος το 1899 τα 30 μίλια.

- Guglielmo Marconi (Γουλιέλμο Μαρκόνι) 25 Απριλίου 1874 – 20 Ιουλίου 1937, το 1895 σε ηλικία 21 ετών ξεκίνησε τα πειράματα στο Πανεπιστήμιο της Μπολόνια πάνω στην ασύρματη τηλεγραφία και το 1901 έστειλε το πρώτο υπερατλαντικό σήμα.
- Reginald Fessenden 6 Οκτωβρίου 1866 – 22 Ιουλίου 1932, το 1906 πέτυχε την πρώτη αμφίδρομη ασύρματη υπερατλαντική επικοινωνία.
- Από το 1900 – 1940 .
 - Ευρεία χρήση ασύρματου τηλέγραφου κατά τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο.
 - Πλοήγηση Αεροσκαφών με χρήση ράδιο-βοηθημάτων (περί το 1920).
 - Διαμόρφωση FM (Frequency Modulation) το 1935.
- Από το 1980 – 2020.
 - Ανάπτυξη της ασύρματης τηλεφωνίας.
 - Προηγμένα συστήματα Τηλεειδοποίησης.
 - Αλματώδης ανάπτυξη στις δορυφορικές επικοινωνίες.

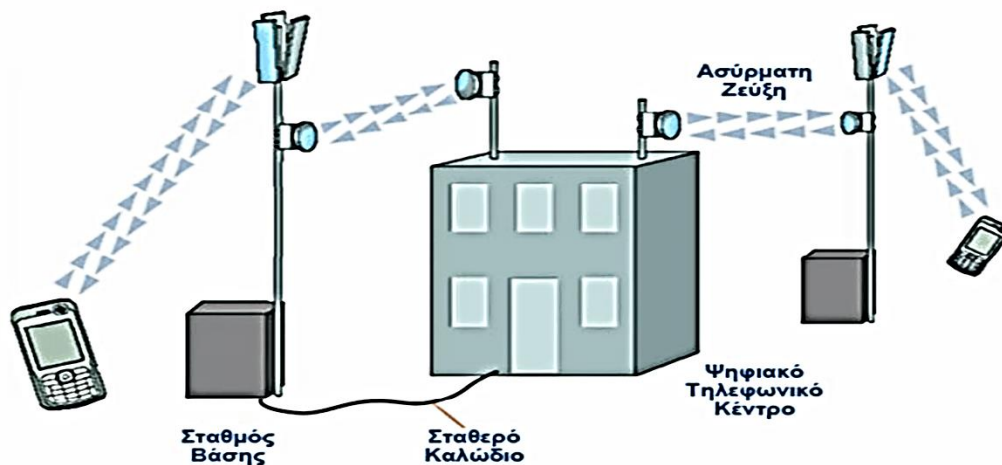
1.2 Βασικές κατηγορίες διαχωρισμού ασύρματων δικτύων.

1.2.1 Με σημεία πρόσβασης - σταθμούς βάσης.

Ως σταθμός βάσης ή σημείο πρόσβασης ορίζεται μια συσκευή που συνδέει μεταξύ τους ασύρματες συσκευές επικοινωνίας για τον σχηματισμό ενός ασύρματου δικτύου. Ο σταθμός βάσης συνήθως συνδέεται με ένα ενσύρματο δίκτυο και μέσω αυτού μεταφέρονται δεδομένα ανάμεσα στις ασύρματες και τις ενσύρματες συσκευές.

Παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι τα κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Η απευθείας επικοινωνία μεταξύ των τερματικών δεν είναι εφικτή και εξαρτάται από την ύπαρξη υποδομής (infrastructure). Ένα κυψελοειδές δίκτυο αποτελείται από κινητές

μονάδες, οι οποίες συνδέονται μέσω ραδιοσυχνοτήτων σε σταθερούς επίγειους σταθμούς. Οι σταθμοί αυτοί συνδέουν τα διάφορα μέρη του συστήματος και επιτρέπουν την πρόσβαση στο δημόσιο δίκτυο σταθερής τηλεφωνίας. Οι κινητές μονάδες μπορούν να είναι τηλέφωνα, φαξ ή προσωπικοί υπολογιστές οι οποίοι είναι εφοδιασμένοι με τις κατάλληλες τερματικές συσκευές ώστε να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο. Οι ραδιοσυχνότητες που χρησιμοποιούνται από το δίκτυο για τις επικοινωνίες δίνουν ευελιξία στις μετακινήσεις, αλλά ταυτόχρονα έχουν και τους περιορισμούς τους. **Εικόνα 1.1**

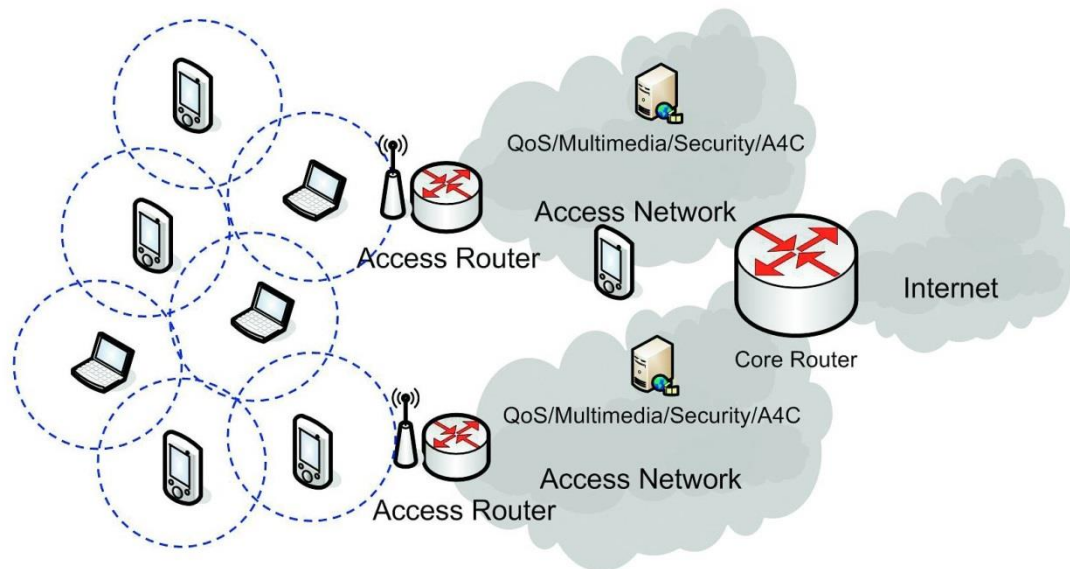


Εικόνα 1.1 Κυψελωτό Δίκτυο [1].

1.2.2 Χωρίς σημεία πρόσβασης (Ad hoc networks).

Η επικοινωνία ανάμεσα στα τερματικά επιτυγχάνεται χωρίς την ανάγκη προϋπαρξής κάποιας υποδομής και υπάρχει ζεύξη μεταξύ των τερματικών. Ένα ασύρματο ad hoc δίκτυο (αυτοοργανωμένο δίκτυο ή δίκτυο κατ' απαίτηση) είναι ένας αποκεντρωμένος τύπος ασύρματου δικτύου. Το δίκτυο είναι ad hoc επειδή δε βασίζεται σε κάποια προϋπάρχουσα υποδομή, όπως δρομολογητές στα ενσύρματα δίκτυα ή ασύρματα σημεία πρόσβασης στα διαχειριζόμενα ασύρματα δίκτυα. Αντίθετα, κάθε κόμβος λαμβάνει μέρος στη δρομολόγηση προωθώντας

τα δεδομένα προς τους άλλους κόμβους, κι έτσι ο καθορισμός του ποιου κόμβου προωθούν δεδομένα γίνεται δυναμικά με βάση τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Πέρα από την κλασική δρομολόγηση, τα ad hoc δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιήσουν την υπερχείλιση για να προωθήσουν τα δεδομένα. Τα πρώτα ασύρματα ad hoc δίκτυα ήταν τα PRNETs (δίκτυα "ραδιοφωνικών πακέτων") από τη δεκαετία του '70,



Εικόνα 1.2 Ad hoc Δίκτυο [2].

υπό την αιγίδα του DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) μετά το ALOHAnet project. **Εικόνα 1.2**

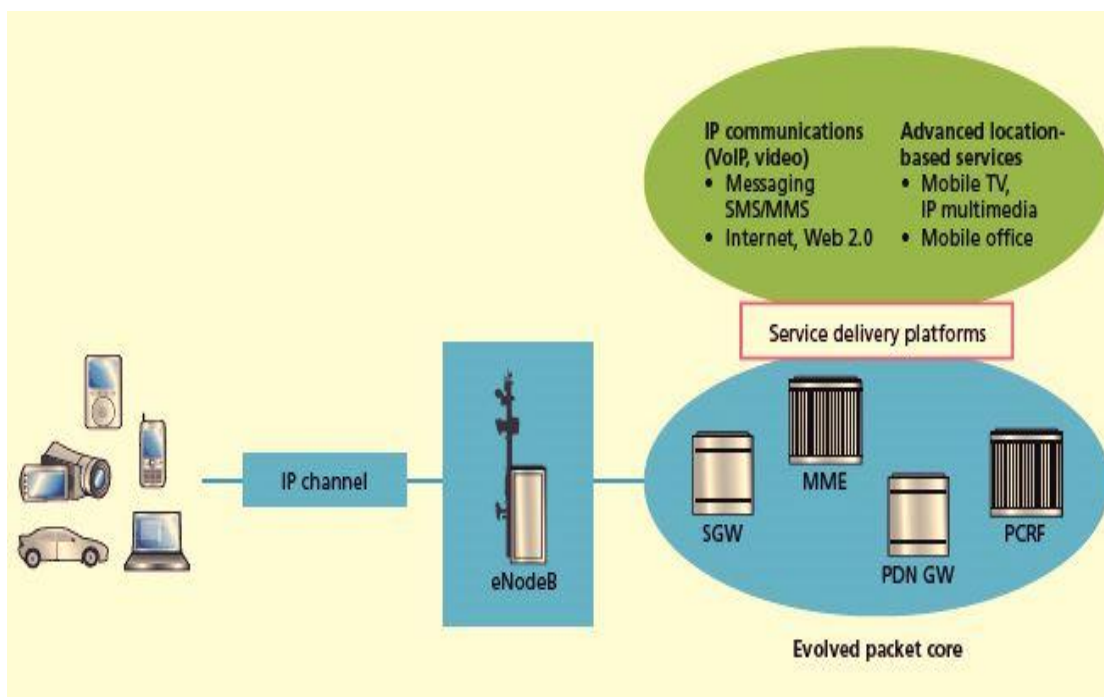
1.3 Τα Κυψελωτά Δίκτυα NGN (Next Generation Network).

Η ιδέα της κυψελωτής επικοινωνίας γεννήθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1947. Οι βασικές αρχές λειτουργίας αναφέρονταν σε ένα εσωτερικό, αδημοσίευτο κείμενο του Douglas H. Ring (28 Μαρτίου 1907 – 8 Σεπτεμβρίου 2000) των εργαστηρίων Bell τη χρονιά εκείνη. Το κείμενο διερευνούσε τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσαν να εξυπηρετηθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι κινητοί συνδρομητές, από το σύστημα που χρειάζονταν το λιγότερο δυνατό φάσμα

ραδιοσυχνοτήτων. Η λύση που προτάθηκε συνδύαζε τα εξής:

- Την υλοποίηση ενός δικτύου από μικρά γεωγραφικές περιοχές, οι οποίες αποκαλούνται «κυψέλες».
- Έναν μικρής ισχύος «σταθμό βάσης» για εκπομπή/λήψη σε κάθε κυψέλη.
- Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων λειτουργίας από σταθμούς βάσης που εξυπηρετούν κυψέλες, που δεν είναι γειτονικές.
- Διαδικασία μετάβασης του κινητού χρήστη από μία κυψέλη σε άλλη γειτονική, χωρίς διακοπή επικοινωνίας.
- Έλεγχο τηλεπικοινωνιακής κίνησης από ένα κεντρικό τηλεπικοινωνιακό κόμβο.

Οι παραπάνω αρχές παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1.1**. Κάθε κυψέλη μπορεί να εξυπηρετεί ένα συγκεκριμένο μέγιστο πλήθος χρηστών, ανάλογα με τους τεχνικούς περιορισμούς του σταθμού βάσης. Έτσι, σε πυκνοκατοικημένες περιοχές η χωρητικότητα του δικτύου μπορεί να μεγαλώνει μικραίνοντας τις κυψέλες και αυξάνοντας το πλήθος τους, ώστε να εξυπηρετούνται όσο το δυνατόν περισσότεροι συνολικά χρήστες. Έχει επικρατήσει να χωρίζονται οι κυψέλες ανάλογα με το μέγεθος τους στις κατηγορίες του **Πίνακα 1.1**. [3]



Σχήμα 1.1 Βασικές Αρχές Κυψελωτής Επικοινωνίας.

Όνομασία	Τύπος δικτύων	Τυπική ακτίνα κυψέλης	Τεχνολογίες (ενδεικτικά)
Global-cell	Δορυφορικά	>30 Km	Δορυφορικές Επικοινωνίες
Macro-cell	WWAN/WMAN	1-30 km	Δίκτυα κινητών επικοινωνιών 3GPP, WiMAX, TETRA
Micro-cell		200 m - 2 Km	Δίκτυα κινητών επικοινωνιών 3GPP, WiMAX
Pico-cell	WLAN	4-200 m	DECT, WiFi
Femto-cell	WPAN	<10 m	Φεμτοκυψέλες, Bluetooth

Πίνακας 1.1 Τύπος κυψελών σε κυψελωτά δίκτυα.

Παρότι οι αρχές των κυψελωτών δικτύων διατυπώθηκαν στα μέσα του 20^{ου} αιώνα, αρχικά εξελίχθηκαν με εξαιρετική βραδύτητα, και μόνο τα τελευταία 20 έτη η πορεία αυτή επιταχύνθηκε σημαντικά. Έχει επικρατήσει στη βιβλιογραφία να διαχωρίζετε η πορεία ανάπτυξης των κινητών επικοινωνιών σε «γενεές», οι οποίες ομαδοποιούν τεχνολογικά επιτεύγματα. Παράλληλα με τις τεχνικές εξέλιξης, σε κάθε γενιά εμφανίζονταν κανονιστικά ζητήματα εξασφάλισης ραδιοφάσματος για την λειτουργία των δικτύων και ρύθμισης του ανταγωνιστικού περιβάλλοντος στην αγορά, που οδήγησαν σε καθυστερήσεις στην ανάπτυξη και, κάποιες φορές, σε κλυδωνισμούς στον τηλεπικοινωνιακό κλάδο. Σήμερα τα κυψελωτά δίκτυα έχουν παγκόσμια εξάπλωση, βελτιώνοντας διαρκώς το είδος και την ποιότητα παρεχομένων υπηρεσιών φωνής και δεδομένων.[3]

1.4 Δίκτυα 0G.

Τα ασύρματα (κινητά) ράδιο τηλέφωνα προϋπήρξαν της σύγχρονης κυψελλωτής τεχνολογίας. Δεδομένου ότι ήταν προκάτοχοι της 1^{ης} γενιάς κυψελλωτών τηλεφώνων, συχνά θα αναφερόμαστε σε αυτά ως προ-κυψελλωτά συστήματα ή ακόμα και ως τεχνολογία 0 γενιάς (0g). Οι τεχνολογίες που υπάγονται σε αυτήν την κατηγορία, και οι οποίες θα αναπτυχθούν στην συνέχεια, είναι οι εξής: Push to Talk (PTT), Mobile Telephone System (MTS), Improved Mobile Telephone System (IMTS) καθώς και η Advanced Mobile Telephone System (AMTS).

Αυτά τα πρώτα συστήματα κινητής τηλεφωνίας μπορούν να διακριθούν από τα προηγούμενα κλειστά συστήματα ραδιοτηλεφωνίας στο ότι ήταν διαθέσιμα ως μια εμπορική υπηρεσία που ήταν μέρος του δημοσίου τηλεφωνικού δικτύου, με δικό τους αριθμό τηλεφώνου και όχι σαν μέρος ενός κλειστού δικτύου, όπως είναι το ραδιόφωνο της αστυνομίας ή το σύστημα αποστολής των ταξί.

Τα κινητά τηλέφωνα αυτής της τεχνολογίας είθισται να τοποθετούνται σε αυτοκίνητα ή φορτηγά αν και υπήρξε και μοντέλο χαρτοφύλακα επίσης. Ο πομποδέκτης τοποθετούνταν συνήθως στο πορτ-μπαγκάζ του οχήματος και συνδεόταν με τον βασικό εξοπλισμό (οθόνη, ακουστικό) που υπήρχε κοντά στο κάθισμα του οδηγού. **Εικόνα 1.3**



Εικόνα 1.3 Κινητό Τηλέφωνο 0G [4].

Ακολουθούν μερικά εμπορικά παραδείγματα της τεχνολογίας 0G.

Για την εμπέδωση της εμπορικής επιτυχίας και κατ' επέκταση της εφαρμογής της τεχνολογίας 0G, είναι άξια αναφοράς τα επιτεύγματα αυτής ανά την υφήλιο.

- Η εταιρία Motorola σε συνδυασμό με την Bell System θέτουν σε λειτουργία το πρώτο εμπορικό κινητό τηλέφωνο με υπηρεσία που ανήκει στην τεχνολογία Mobile Telephone System (MTS) και κατ' επέκταση στην ομάδα 0G.
- Το 1952 στην Δυτική Γερμανία ξεκινάει το A-Netz ως το πρώτο δημόσιο εμπορικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας της χώρας.
- Το 1972 στη Δυτική Γερμανία το B-Netz λανσάρετε ως το δεύτερο δημόσιο εμπορικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, αλλά είναι το πρώτο

δίκτυο που δεν απαιτείται ανθρώπινος φορέας για την διεκπεραίωση των κλήσεων.

- Το πρώτο (παγκοσμίως) αυτόματο τηλεφωνικό σύστημα ήταν το IMTS της Bell System's, το οποίο έγινε διαθέσιμο το 1962 προσφέροντας αυτόματες κλήσεις από και προς το κινητό τηλέφωνο.
- Το "Altai" σύστημα κινητής τηλεφωνίας λανσαρίστηκε για πειραματικές υπηρεσίες το 1963 στην πρώην Σοβιετική Ένωση, αν και έγινε πλήρως λειτουργικό το 1965, αποτέλεσε το πρώτο αυτόματο σύστημα κινητής τηλεφωνίας της Ευρώπης.
- Το 1966 στην Νορβηγία εμφανίστηκε – παρουσιάστηκε το Televerket, το πρώτο χειροκίνητο σύστημα κινητής τηλεφωνίας. Στην Νορβηγία αργότερα θα έχουμε την εμφάνιση του πρώτου αυτόματου κινητού τηλεφωνικού συστήματος στην Ευρώπη.

1.4.1 Push to talk (PTT)

Η τεχνολογία Push to talk (PTT) , γνωστή και ως «press to transmit», είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για συνομιλία ή ομιλία πάνω από ημι-αμφίδρομες (half - duplex) γραμμές επικοινωνίας με την χρήση αμφίδρομων (two way) συσκευών και πατώντας στιγμιαία ένα κουμπί για να ολοκληρωθεί η μετάβαση από την λειτουργία υποδοχής φωνής (δέκτης) στην λειτουργία μετάδοσης.

Για παράδειγμα, ένας ελεγκτής εναέριας κυκλοφορίας μιλά συνήθως σε μια ραδιοφωνική συχνότητα για όλα τα αεροσκάφη υπό την εποπτεία του. Εκείνοι κάτω από την ίδια συχνότητα μπορούν να ακούσουν τις μεταδόσεις του άλλου, ενώ με τη χρήση λέξεων κλειδιά όπως το "over" και το "out" παρέχουν την σειρά τους κατά τη διάρκεια της συνομιλίας. Με αυτόν τον τρόπο, έχουν επίγνωση των ενεργειών και τις προθέσεις του άλλου, και δεν προκύπτει κανένας θόρυβος υποβάθρου από αυτούς που δεν μιλούν. Παρόμοιες εκτιμήσεις ισχύουν στον αστυνομικό ασύρματο, τη χρήση των ασυρμάτων μπάντας των επιχειρήσεων στα εργοτάξια, και άλλα σενάρια που απαιτούν το συντονισμό των διαφόρων μερών.

1.4.2 Mobile Telephone Service (MTS)

Η υπηρεσία MTS είναι ένα προ-κυψελωτό σύστημα VHF ραδιοφώνου το οποίο συνδέεται με το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο μεταγωγής γνωστό και ως PSTN (Public Switched Telephone Network). Από το 2012 μόνο αγροτικές περιοχές και περιοχές άγριας φύσης εξακολουθούν να χρησιμοποιούν το σύστημα αυτό. Το MTS ήταν ένα από τα πρώτα πρότυπα κινητής τηλεφωνίας. Η λειτουργία του βοηθιόνταν και στις δύο κατευθύνσεις, αυτό σημαίνει πως αν κάποιος καλούνταν από σταθερή γραμμή η κλήση έπρεπε να δρομολογηθεί σε έναν ασύρματο χειριστή που θα την κατεύθυνε στο ανάλογο τηλέφωνο. Ομοίως για να ολοκληρωθεί μια κλήση εκτός εμβέλειας, κάποιος έπρεπε να την κατευθύνει μέσα από έναν ασύρματο χειριστή ο οποίος θα ζήτηγε και τους δύο αριθμούς των κινητών τηλεφώνων για να ολοκληρώσει την ζεύξη.

Η υπηρεσία αυτή ξεκίνησε από την Bell System, και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στο Σεντ Λούις, στις 17 Ιουνίου του 1946. Ο αρχικός εξοπλισμός ζύγιζε 36 kg, και αρχικά υπήρχαν μόνο 3 κανάλια για όλους τους χρήστες στην μητροπολιτική περιοχή, αργότερα περισσότερες άδειες προστέθηκαν ανεβάζοντας το σύνολο σε 32 κανάλια σε 3 ζώνες. Αυτή η υπηρεσία χρησιμοποιούνταν τουλάχιστον μέχρι και το 1980 σε μεγάλα τμήματα της Βορείου Αμερικής.

Λόγω του μικρού αριθμού των ραδιοφωνικών συχνοτήτων που διατίθενται, η υπηρεσία γρήγορα έφτασε το μέγιστο όριο που μπορούσε να ικανοποιήσει και εν συνεχεία αντικαταστάθηκε από την τεχνολογία IMTS την οποία και αναλύουμε στην συνέχεια.

1.4.3 Η υπηρεσία IMTS.

Η υπηρεσία IMTS ανήκει στην κατηγορία το προ-κυψελλωτών συστημάτων και είναι ένα VHF/UHF ράδιο το οποίο συνδέεται με το PSTN δίκτυο. Παρουσιάστηκε το 1964 ως αντικαταστάτης των συστημάτων MTS και βελτίωσε (αναβάθμισε) τα περισσότερα συστήματα MTS προσφέροντας απευθείας κλήση και όχι ζεύξεις – συνδέσεις με την βοήθεια ενός χειριστή. **Εικόνα 1.4**



Εικόνα 1.4 IMTS Τεχνολογίας Τηλέφωνο [5].

1.4.4 Προηγμένα συστήματα κινητής τηλεφωνίας (AMTS).

Τα προηγμένα συστήματα κινητής τηλεφωνίας (AMTS) είναι μια μέθοδος που ανήκει στην κατηγορία των προ – κυψελλωτών συστημάτων ραδιοεπικοινωνίας, που χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο στα ιαπωνικά φορητά συστήματα ραδιοεπικοινωνίας και λειτουργούσαν στην ζώνη (μπάντα) των 900 MHz.

1.5 Δίκτυα 1G.

Λέγοντας Δίκτυα 1G αναφερόμαστε στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών 1^{ης} Γενιάς. Αυτά είναι τα στάνταρ των αναλογικών τηλεπικοινωνιών όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην δεκαετία του 80 μέχρι και όταν αντικαταστάθηκαν από τα ψηφιακά δίκτυα τηλεπικοινωνιών της 2^{ης} Γενιάς (2G Networks).

Η βασικότερη διαφορά των δύο προαναφερθέντων συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας (1^{ης} και 2^{ης} Γενιάς) είναι πως τα σήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην πρώτη γενιά ήταν αναλογικά ενώ τα σήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην 2^η γενιά είναι ψηφιακά.

Παρά το γεγονός ότι και στα δύο αυτά συστήματα χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή σηματοδότηση για την ζεύξη των ραδιοφωνικών πύργων, στο υπόλοιπο τηλεφωνικό δίκτυο, για τα ίδια δεδομένα φωνής μιας κλήσης, στα δίκτυα 2G η κωδικοποίηση πραγματοποιείται με ψηφιακά σήματα ενώ αντίθετα στα δίκτυα 1G διαμορφώνεται απλά το πλάτος σε υψηλότερες συχνότητες των 150 MHz και άνω. Τα εγγενή πλεονεκτήματα της ψηφιακής τεχνολογίας σε αντίθεση με την αναλογική είναι ότι τελικά τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς αντικατέστησαν, σχεδόν παντού, τα δίκτυα 1^{ης} γενιάς.

Μερικές από τις τεχνολογίες και τα στάνταρ που ανήκουν στην κατηγορία της 1^{ης} γενιάς θα αναλυθούν στην συνέχεια.

1.5.1 Ιστορική αναδρομή των δικτύων 1ης Γενιάς (1G).

Τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών 1^{ης} Γενιάς αναπτύχθηκαν στην δεκαετία του 70 και αυτό γιατί έτυχαν κάποιων σημαντικών και βασικών βελτιώσεων για την εποχή. Αυτές οι βελτιώσεις ήταν η ανακάλυψη – εφεύρεση του μικροεπεξεργαστή και η ψηφιοποίηση του control link μεταξύ του κινητού τηλεφώνου και της τοποθεσίας των κυψελών στο δίκτυο. Σε σχέση με παλαιότερα συστήματα καινοτομούσαν στην χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας για την αποκατάσταση της κλήσης και στην ευέλικτη ανάθεση συχνοτήτων, που επέτρεπε την επαναχρησιμοποίηση φάσματος ελαχιστοποιώντας φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Η τεχνολογία AMPS (Advance Mobile Telephone System) ξεκίνησε από τις ΗΠΑ και είναι ένα κινητό σύστημα 1^{ης} Γενιάς . Βασισμένη στη μέθοδο πρόσβασης στο κανάλι Frequency Division Multiple Access (FDMA), επιτρέπει στους χρήστες να κάνουν φωνητικές κλήσεις.

1.5.2 Σκανδιναβική Κινητή Τηλεφωνία (Nordic Mobile Telephone).

Το δίκτυο NMT είναι το πρώτο πλήρες αυτόματο τηλεφωνικό σύστημα κυψέλης. Παρουσιάστηκε από τις Σκανδιναβικές διοικήσεις τηλεπικοινωνιών και προσέφερε για πρώτη φορά τις υπηρεσίες του από την 1^η Οκτωβρίου 1981, δίνοντας έτσι την απαιτούμενη απάντηση στην αυξανόμενη συμφόρηση και τις βαριές απαιτήσεις των εγχειριδίων στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας όπως: ARP (150 MHz), στη Φινλανδία, την MTD (450 MHz), στη Σουηδία και στη Δανία και OLT στη Νορβηγία.

Το δίκτυο NMT βασίζεται στην αναλογική τεχνολογία πρώτης γενιάς και υπάρχουν 2 παραλλαγές του: NMT-450 και NMT-900. Οι αριθμοί δείχνουν τις ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται. Το NMT-900 εισήχθη το 1986, επειδή μεταφέρει περισσότερα κανάλια από ό, τι το προηγούμενο δίκτυο NMT-450.[6]

Οι προδιαγραφές του Σκανδιναβικού δικτύου NMT ήταν ελεύθερες και ανοικτές, επιτρέποντας έτσι σε πολλές εταιρίες να παράγουν υλικό και βοηθώντας τον ανταγωνισμό να ωθήσει τις τιμές της αγοράς σε συνεχή μείωση. Πολλές εταιρίες επωφελήθηκαν από αυτό με γνωστότερες την Ericsson και την τότε Mobira, η οποία έγινε ευρέως γνωστή με την ονομασία Nokia.



Εικόνα 1.5 Mobira Cityman 150, Nokia's NMT – 900 mobile phone (1989) [7].

1.5.3 Ιταλική Κινητή Τηλεφωνία RTMI.

Η εταιρία RTMI (Radio Telefono Mobile Integrato) ήταν η πρώτη εταιρία κινητής τηλεφωνίας στην υπηρεσία της Ιταλίας και ξεκίνησε την λειτουργία της το 1973 και στην μπάντα των 160 MHz, ενώ χρησιμοποιήθηκε από λίγους ανθρώπους οι οποίοι εργάζονταν στον δημόσιο τομέα (δημόσιες διοικήσεις και υπάλληλοι της Εθνικής Άμυνας της Ιταλίας). Στη δεκαετία του 1980 αναπτύχθηκε η Radio Telephone Mobile (RTM) η οποία λειτουργούσε στην ζώνη συχνοτήτων των 450 MHz και προσέλκυσε 100.000 πελάτες.

1.5.4 Ράδιο Τηλεφωνικό Δίκτυο C.

Το Ράδιο Τηλεφωνικό Δίκτυο C (Radio Telephone Network C, Γερμανικά: Funktelefonnetz-C, χάριν συντομίας C-Netz), ήταν ένα πρώτης γενιάς αναλογικό κυψελοειδές τηλεφωνικό σύστημα το οποίο εγκαταστάθηκε και λειτουργούσε στην Γερμανία (αρχικώς στην Δυτική Γερμανία) από την DeTeMobi (πρώην της Deutsche Bundespost Telekom, σήμερα Deutsche Telekom). Χρησιμοποιούσε το πρότυπο C450 και ήταν η τρίτη και τελευταία ενημέρωση μιας σειράς αναλογικών κινητών τηλεφωνικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στο εσωτερικό της Γερμανίας, αντικαθιστώντας τους προκατόχους B-Netz και το A-Netz παλαιότερα. Την συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι μια παροπλισμένη τεχνολογία της κινητής τηλεφωνίας έχοντας δώσει την θέση του στις τεχνολογίες D-Netz (GSM-900) και τα συστήματα E-Netz (GSM-1800).[6]

1.6 Δίκτυα 2G.

Με την συντομογραφία 2G αναφερόμαστε στην ασύρματη τηλεφωνική τεχνολογία 2^{ης} γενιάς. Αυτά τα συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν δίκτυα κυψελών, χρησιμοποιούσαν ψηφιακή τεχνολογία και στο κομμάτι της επεξεργασίας, της κρυπτογράφησης και μετάδοσης φωνής, δηλαδή όχι μόνο για την σηματοδότηση όπως τα δίκτυα 1^{ης} γενιάς. Οι συνδρομητές απολάμβαναν υπηρεσίες που επιτύγχαναν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 9,6 Kbit/s.

Τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς ήρθαν για να αντικαταστήσουν οριστικά τα δίκτυα 1^{ης} γενιάς και μπορούν να διακριθούν σε 2 μεγαλύτερες υποκατηγορίες ανάλογα με το είδος της πολυπλεξίας που ακολουθούν για την πρόσβαση των χρηστών στον δίαυλο επικοινωνίας:

- Πολυπλεξία χρόνου: Time Division Multiple Access (TDMA).
- Πολυπλεξία κώδικα: Code Division Multiple Access (CDMA).

Η τεχνολογία των δικτύων 2^{ης} γενιάς στις κινητές επικοινωνίες εισήγαγε τις υπηρεσίες δεδομένων για κινητά, ξεκινώντας με τα ευρέως γνωστά μηνύματα κειμένου ή Short Message Service (SMS). Στην συνέχεια ακολούθησαν υπηρεσίες όπως τα εικονο-μηνύματα και τα μηνύματα πολυμέσων ή Multimedia Messaging Service (MMS).

1.6.1 Μερικά από τα σημαντικότερα συστήματα στα δίκτυα 2G.

Το 1982 το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο Τηλεπικοινωνιών (European Telecommunications Standards Institute - ETSI) ξεκίνησε την μελέτη για την δημιουργία ενός κοινού Ευρωπαϊκού ψηφιακού συστήματος κινητής τηλεφωνίας 2^{ης} γενιάς, καταλήγοντας στο σημαντικότερο κατηγορίας TDMA σύστημα το Group Special Mobile (GSM). Το GSM είναι ένα κυψελοειδές ψηφιακό σύστημα κινητής επικοινωνίας το οποίο έγινε Ευρωπαϊκό πρότυπο το 1990, το 1991 έγινε εμπορικά διαθέσιμο ξεκινώντας από την Φινλανδία και πριν το τέλος του 1993 αριθμούσε ένα εκατομμύριο χρήστες σε 48 χώρες.



Εικόνα 1.6 logo GSM συστήματος [8].

Ένα άλλο σύστημα που ανήκει στην ομάδα των δικτύων 2^{ης} γενιάς και συγκεκριμένα στην υποκατηγορία TDMA είναι το αμερικανικής προέλευσης D-AMPS (Digital - AMPS) εξέλιξη του AMPS. Χρησιμοποιούνταν κυρίως στην Αμερικανική ήπειρο (ΗΠΑ-Καναδάς) και περί το 1999 αριθμούσε περισσότερους από 22 εκατομμύρια χρήστες παγκοσμίως. Αυτό το σύστημα αντικαταστάθηκε από το GSM/GPRS ή το CDMA2000 τα οποία θα αναφερθούν στην συνέχεια.

Παραμένοντας στην ίδια υποκατηγορία (TDMA) θα αναλυθεί στη συνέχεια και το σύστημα Personal Digital Cellular (PDC), το οποίο αν και αναπτύχθηκε μόνον στην Ιαπωνία πέτυχε ένα μέγιστο σχεδόν 80 εκατομμυρίων συνδρομητών, όμως σταδιακά εξασθένησε (46 εκατομμύρια το 2005) εξαιτίας του ανερχόμενου δικτύου της 3^{ης} γενιάς.

Από τους σημαντικότερους πρεσβευτές, και η μοναδική περίπτωση που θα αναλυθεί σε αυτήν την διπλωματική εργασία, της κατηγορίας πολυπλεξίας κώδικα (CDMA) στα δίκτυα 2^{ης} γενιάς είναι το Interim Standard 95 (IS-95 ή cdmaOne) το οποίο έτυχε καθολικής αναγνώρισης και γνώρισε μεγάλη ανάπτυξη στην Αμερική και στην Ασία. [9]

1.6.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των δικτύων 2G.

Αρχικά η χρήση των ψηφιακών σημάτων ανάμεσα στα τερματικά (συσκευές) και στους πύργους αυξάνει την ικανότητα του συστήματος 2G με δύο βασικούς τρόπους:

- 1^{ov}: Τα ψηφιακά πλέον δεδομένα φωνής μπορούν να επεξεργαστούν και να πολυπλεχθούν πιο αποτελεσματικά από τα αναλογικά με αποτέλεσμα περισσότερες κλήσεις να μπορούν να εξυπηρετηθούν στο ίδιο πάντα εύρος ζώνης.
- 2^{ov}: Οι κυψέλες καταλάμβαναν μικρότερο χώρο, επομένως ήταν περισσότερες στον αριθμό χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει το κόστος καθώς ο εξοπλισμός είχε γίνει λιγότερο δαπανηρός.

Μειονεκτήματα των 2G Δικτύων

Τα ασθενέστερα ψηφιακά σήματα, ενός κινητού τηλεφώνου κυψέλης, που εκπέμπονται στις πιο αραιοκατοικημένες περιοχές συχνά δεν είναι επαρκή σε ισχύ για να φτάσουν στην κεραία-πύργο. Αυτό είναι ένα πρόβλημα που συναντάται στα συστήματα 2^{ης} γενιάς που εκπέμπουν σε υψηλότερες συχνότητες και δεν αποτελεί πρόβλημα στα συστήματα που εκπέμπουν σε χαμηλές συχνότητες. Οι εθνικοί κανονισμοί διαφέρουν από χώρα σε χώρα και αυτό τείνει να λειτουργεί ως τροχοπέδη στα συστήματα τηλεπικοινωνιών υπονομεύοντας την ανάπτυξη τους και την ορθή λειτουργία τους κάτω από κανόνες κοινούς παγκοσμίως.

Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα των συστημάτων 2^{ης} γενιάς έχει να κάνει με την φύση των σημάτων καθώς και με τα καιρικά φαινόμενα. Αναλυτικότερα, το αναλογικό σήμα έχει μια ομαλή φθορά στην καμπύλη του σε αντίθεση με τον «βηματισμό» που ακολουθεί το ψηφιακό σήμα. Αυτό είναι και θετικό και αρνητικό. Όταν οι καιρικές συνθήκες είναι καλές το ψηφιακό σήμα θα ακούγεται καλύτερα από το αναλογικό. Σε λιγότερο καλές καιρικές συνθήκες, το αναλογικό σήμα θα

παραμένει στατικό σε αντίθεση με το ψηφιακό που θα έχει σταδιακά απώλειες δεδομένων. Σε ακόμα χειρότερες καιρικές συνθήκες το ψηφιακό σήμα θα έχει ολική αποτυχία μετάδοσης των δεδομένων, ενώ το αναλογικό, αν και θα χειροτερεύει σαν ποιότητα, θα επιτρέπει τουλάχιστον κάποια τμήματα του ήχου να μεταδίδονται και πιθανόν να γίνονται κατανοητά.

Πλεονεκτήματα των 2G Δικτύων

Ένα από τα πλεονεκτήματα των δικτύων 2^{ης} γενιάς είναι η αύξηση των κλήσεων που μπορούν να εξυπηρετηθούν στο ίδιο πάντα εύρος ζώνης, πράγμα που κάνει τις υπηρεσίες του δικτύου που το υποστηρίζουν προσιτές σε μεγαλύτερη βάση καταναλωτών.

Τέλος, ένα άλλο πλεονέκτημα που είναι άξιο αναφοράς είναι η σημαντική μείωση στον «λευκό θόρυβο» (white noise) καθώς επίσης και στον θόρυβο υπόβαθρου (background noise).

1.6.3 Εξελίξεις των συστημάτων 2G.

General Packet Radio Service (GPRS) 2.5G

Με ρυθμό μετάδοσης που από τα 9,6 Kbps των συστημάτων 2^{ης} γενιάς πηγαίνουν στο εύρος των 64-115 Kbps αποτελεί ένα σύνολο υπηρεσιών προσανατολισμένο στα πακέτα δεδομένων των κυψελοειδών συστημάτων επικοινωνιών 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς και αρχικά τυποποιήθηκε από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων.

Η χρέωση ακολουθεί μια διαφορετική πολιτική, σε αντίθεση με το κύκλωμα μεταγωγής πακέτων που η χρέωση γινόταν ανά λεπτό χρόνου σύνδεσης, στο GPRS η χρέωση γίνεται ανάλογα με τον όγκο των δεδομένων που μεταφέρονται. Επίσης, η χρήση πάνω από ένα ανώτατο

όριο επιφέρει πιθανές επιπρόσθετες ή μεγαλύτερες χρεώσεις και σε μερικές περιπτώσεις απαγορεύεται.

Στο κομμάτι της ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service, QoS), το GPRS είναι μια υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας (best - effort), το οποίο σημαίνει μια μεταβλητή τιμή στην απόδοση και στην καθυστέρηση του δικτύου, η οποία εξαρτάται (είναι ανάλογη) από τον συνολικό αριθμό των χρηστών που μοιράζονται την υπηρεσία. Αυτή η ποιότητα υπηρεσιών έρχεται σε αντίθεση με την εγγυημένη ποιότητα υπηρεσιών που παρείχε καθ' όλη την διάρκεια σύνδεσης το σύστημα μεταγωγής κυκλώματος. Ο συνδυασμός της τεχνολογίας 2G - GPRS περιγράφεται ως 2.5G, δηλαδή μια τεχνολογία μεταξύ της 2^{ης} και της 3^{ης} γενιάς κινητής τηλεφωνίας. Η τεχνολογία GPRS είναι ενσωματωμένη από το GSM Release 97 και έπειτα.

Υπηρεσίες που προσφέρονται στο GPRS

- Μετάδοση μηνυμάτων SMS.
- Μόνιμη πρόσβαση στο Internet.
- Μηνύματα πολυμέσων (MMS).
- Push to Talk μέσω δικτύου κυψελών (PoC).
- Point to Point (P2P) υπηρεσίες.
- Point to Multipoint (P2M) υπηρεσίες.

Υποστηριζόμενα πρωτόκολλα στο GPRS

- Internet Protocol, IPv4, IPv6.
- Point to Point Protocol (PPP).
- X.25 connections

Η τεχνολογία EDGE 2.75G

Η τεχνολογία EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) είναι μια ψηφιακή τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας που επιτρέπει βελτιωμένες τιμές ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και αποτελεί επέκταση του GSM της 2^{ης} γενιάς. Θεωρείται πρόδρομος της 3^{ης} γενιάς και σύμφωνα με τον ορισμό της 3^{ης} γενιάς, όπως αυτός ορίζεται από την ITU, αποτελεί μέρος της τεχνολογίας αυτής. Επίσης, σύμφωνα με το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) είναι μέρος της τεχνολογίας GSM.

Με την χρήση υπερσύγχρονων μεθόδων κωδικοποίησης και μετάδοσης δεδομένων, η τεχνολογία EDGE πέτυχε να παρέχει υψηλότερη ρυθμ-απόδοση bit ανά κανάλι, που είχε ως αποτέλεσμα τριπλάσια αύξηση στην χωρητικότητα και στις επιδόσεις συγκρινόμενο με μια συνηθισμένη σύνδεση GSM/GPRS.

Η τεχνολογία EDGE μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οιαδήποτε εφαρμογή μεταγωγής πακέτων, όπως για παράδειγμα μια σύνδεση στο Διαδίκτυο.

Μια εξελιγμένη μορφή της EDGE τεχνολογίας η Evolved EDGE όπως ονομάζεται συνεχίζει να εκπλήσσει στο Release 7 της 3GPP επιτυγχάνοντας μείωση στις καθυστερήσεις και υπερδιπλασιασμό στην απόδοση του δικτύου.

1.7 Δίκτυα 3G.

Μια νέα γενιά προτύπων εμφανίζεται στις ασύρματες κινητές επικοινωνίες κυψέλης κάθε περίπου 10 χρόνια. Από το 1981-1982 με την 1^η γενιά μέχρι και σήμερα. Κάθε γενιά χαρακτηρίζεται από νέες ζώνες συχνοτήτων, υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και μη συμβατή τεχνολογία μετάδοσης.

Έτσι, περί το 1999, εμφανίστηκε η τεχνολογία 3^{ης} γενιάς από την ITU, ως ένα σύνολο προτύπων με την επωνυμία IMT – 2000, παρέχοντας υπηρεσίες δεδομένων με ρυθμούς μετάδοσης 14,4 Mbps στο κατερχόμενο και ως 5,8 Mbps στο ανερχόμενο, σε έναν δίαυλο φάσματος 5 MHz .

Οι ρυθμοί που αναφέρθηκαν εξασφαλίζουν, στα συμβατά με 3^{ης} γενιάς τερματικά (συσκευές), την δυνατότητα κάλυψης ενός ευρύτερου φάσματος εφαρμογών όπως: ασύρματη φωνητική τηλεφωνία, κινητή πρόσβαση στο Διαδίκτυο, σταθερή ασύρματη πρόσβαση στο Διαδίκτυο, βίντεο – κλήσεις και κινητές τεχνολογίες Τηλεόρασης.

Άξιο αναφοράς είναι πως το πρώτο εμπορικό σύστημα παγκοσμίως ήταν το «i-mode» της εταιρίας NTT Docomo, το οποίο ξεκίνησε την λειτουργία του τον Φεβρουάριο του 1999 στην Ιαπωνία και έτυχε μεγάλης ανάπτυξης στην χώρα αυτή, με περισσότερους από 30 εκατομμύρια χρήστες – συνδρομητές πριν το τέλος του τρίτου χρόνου λειτουργίας του). Από την εφαρμογή αυτού του συστήματος έγινε εμφανές το μέγεθος και η δυνατότητα εκμετάλλευσης των υπηρεσιών δεδομένων στα κυψελωτά δίκτυα.[10]

Μερικά από τα πρότυπα που ανήκουν στην οικογένεια των συστημάτων 3^{ης} γενιάς, και τα οποία θα αναπτύξουμε στην συνέχεια:

- UMTS
- W-CDMA
- HSPA
 - HSDPA-HSUPA

1.7.1 Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών UMTS.

Το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών (Universal Mobile Telecommunication Systems - UMTS) ανήκει στις τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς και αφορά δίκτυα τα οποία βασίζονται στο πρότυπο GSM. Αναπτύχθηκε και συντηρείται από την 3GPP. Αποτελεί ένα μέρος του συνόλου προτύπων IMT – 2000 και συγκρίνεται με το σύνολο προτύπων CDMA 2000 για τα δίκτυα με βάση την ανταγωνιστική τεχνολογία cdmaOne.

Το UMTS χρησιμοποιεί ευρείας ζώνης διαίρεση κώδικα πολλαπλής πρόσβασης (Wideband Code Division Multiple Access W-CDMA) με τεχνολογία πρόσβασης ραδιοφώνου που προσφέρει μεγαλύτερη φασματική απόδοση και εύρος ζώνης στις εταιρίες που αναπτύσσονται στον χώρο των κινητών τηλεπικοινωνιών.

Το UMTS καθορίζει ένα πλήρες σύστημα δικτύου, το οποίο αποτελείται από το δίκτυο πρόσβασης (UMTS Terrestrial Radio Access Network, ή UTRAN), τον πυρήνα του δικτύου (Mobile Application Part, ή MAP) και την ταυτότητα των χρηστών που προκύπτει από την κάρτα SIM της τερματικής συσκευής τους.

Συχνά η τεχνολογία που περιγράφει το UMTS θα αναφερθεί και ως Freedom of Mobile Multimedia Access (FOMA).

Σε αντίθεση με τις τεχνολογίες EDGE (IMT-Single Carrier, βασισμένο στην τεχνολογία GSM) και CDMA2000 (IMT Multi-Carrier), το UMTS απαιτεί νέους σταθμούς βάσης και νέα κατανομή συχνοτήτων.[11]

Μερικές υποκατηγορίες του συνόλου προτύπων UMTS είναι:

- UMTS TDD.
- UMTS FDD.
- W-CDMA (η οποία θα αναπτυχθεί στην συνέχεια).
- TD-SCDMA
- TD-CDMA

1.7.2 Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA).

Η τεχνολογία W-CDMA αποτελεί μια διασύνδεση αέρος που ανήκει στην οικογένεια των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς . Περιλαμβάνει τις εξής υπηρεσίες:

- Συμβατικές υπηρεσίες φωνής, υποστηριζόμενες από δίκτυο κυψελών.
- SMS – MMS υπηρεσίες.
- Μπορεί να μεταφέρει δεδομένα σε υψηλές ταχύτητες.

Με τα ανωτέρω, οι εταιρίες κινητής τηλεφωνίας δύναται να παρέχουν ένα υψηλότερο εύρος ζώνης με πληθώρα εφαρμογών όπως streaming και ευρυζωνική πρόσβαση στο Διαδίκτυο.

Η W-CDMA είναι η βάση της Ιαπωνικής εταιρίας NTT DoCoMo στην υπηρεσία FOMA, και το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μέλος της οικογένειας προτύπων UMTS, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ως συνώνυμο του UMTS ή W-CDMA.

Ιστορική αναδρομή του W-CDMA

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 η τεχνολογία W-CDMA αναπτύχθηκε από την Ιαπωνική NTT DoCoMo εταιρία κινητής τηλεφωνίας, η οποία στην συνέχεια υπέβαλε τις προδιαγραφές της νέο-αναπτυχθείσας τεχνολογίας στην ITU για να συμπεριληφθούν στο διεθνές πρότυπο 3G ως μέρος της οικογένειας προτύπων IMT – 2000.

Η εταιρία όμως δεν ανέμενε της οριστικοποίηση των προδιαγραφών της τεχνολογίας 3G Release 99 και αρχικά το δίκτυό τους παρουσίαζε προβλήματα συμβατότητας με την τεχνολογία UMTS, η οποία βέβαια ρυθμίστηκε στην συνέχεια με αναβάθμιση του δικτύου της NTT DoCoMo.[9]

1.7.3 High Speed Packet Access (HSPA).

Προκύπτει από μια συγχώνευση 2 πρωτοκόλλων κινητής τηλεφωνίας High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) και High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) και επιτυγχάνει βελτιώσεις απόδοσης στα υπάρχοντα δίκτυα 3^{ης} γενιάς που χρησιμοποιούν τα πρωτόκολλα W-CDMA.

Οι αριθμοί για το HSPA μας δίνουν την συνολική και βελτιωμένη εικόνα της τεχνολογίας αυτής. Συγκεκριμένα, έως 14 Mbps στην κατερχόμενη ζεύξη και 5,76 Mbps στην ανερχόμενη ζεύξη, η καθυστέρηση μειώθηκε και η χωρητικότητα κατερχόμενης ζεύξης πενταπλασιάστηκε, ενώ της ανερχόμενης ζεύξης διπλασιάστηκε συγκριτικά πάντα με την τεχνολογία W-CDMA.[12]

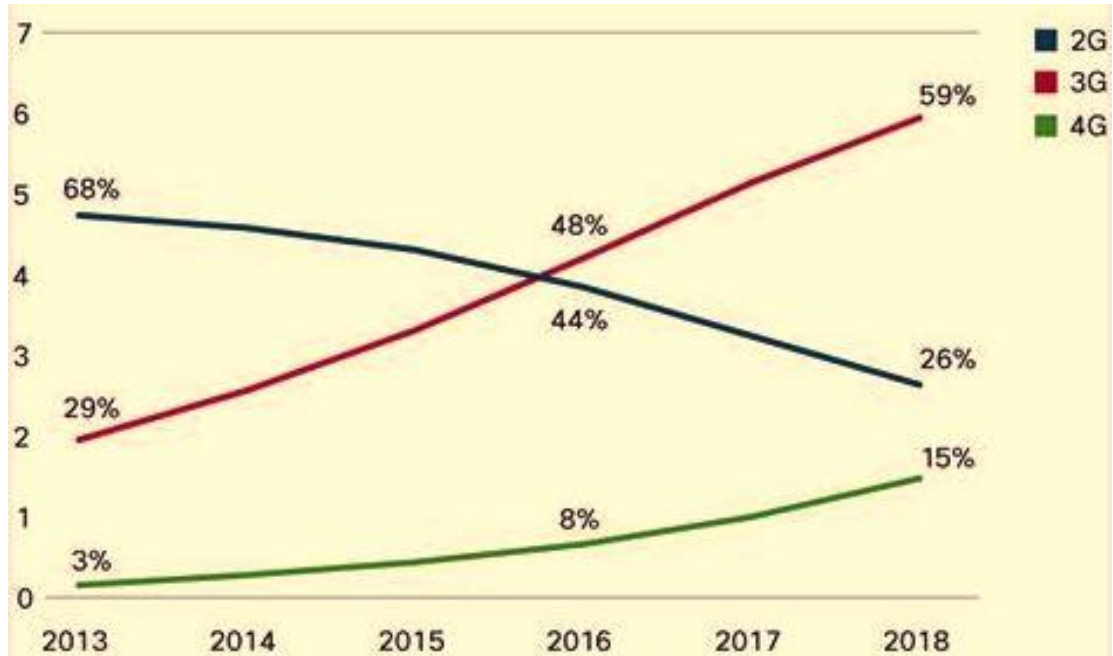
High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)

Η τεχνολογία HSDPA είναι ένα αναβαθμισμένο πρωτόκολλο κινητής τηλεφωνίας, το οποίο ανήκει στην οικογένεια των 3^{ης} γενιάς δικτύων επικοινωνιών. Είναι βασισμένη στο UMTS και παρέχει υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Από το 2013 μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς κατερχόμενης ζεύξης έως και 99,3 Mbps.[13]

High-Speed Uplink Packet Access (HSUPA)

Η τεχνολογία HSUPA είναι ένα αναβαθμισμένο πρωτόκολλο κινητής τηλεφωνίας, το οποίο ανήκει στην οικογένεια των 3^{ης} γενιάς δικτύων επικοινωνιών. Αποτελεί υποκατηγορία του πρωτοκόλλου HSPA με ρυθμούς ανερχόμενης ζεύξης έως και 5,76 Mbps.[13]

Οι προδιαγραφές για το HSUPA περιλαμβάνονται στο Universal Mobile Telecommunications System Release πρότυπο 6 που δημοσιεύθηκε από την 3GPP.[14,15]



Εικόνα 1.7 Αύξηση συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας ανά τεχνολογία (Δισεκατομμύρια συσκευών – συνδέσεων) [16].

1.8 Δίκτυα 4G.

Με την συντομογραφία 4G αναφερόμαστε στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών 4^{ης} γενιάς. Σε αυτή την τεχνολογία (πρότυπο) εκτός από τις συνηθισμένες υπηρεσίες φωνής που υπήρχαν και στα δίκτυα 3^{ης} γενιάς παρέχετε μια διευρυμένη λίστα υπηρεσιών όπως:

- Υπέρ – ευρυζωνική πρόσβαση στο Διαδίκτυο, μέσω της τερματικής συσκευής.
- Τηλεφωνία με IP ((Voice over Internet Protocol - VoIP).
- Υψηλή Ευκρίνεια (Full HD) στις πολυμεσικές εφαρμογές.
- Mobile TV.
- Τηλεδιάσκεψη.
- 3D TV.
- Cloud Computing.

Όμως το πρότυπο 4G δεν δημιουργήθηκε μόνο για να προσθέσει και να δημιουργήσει νέες ανάγκες αλλά και για να προσφέρει λύσεις σε προβλήματα που παρουσιάστηκαν και αντιμετωπίστηκαν στις παλαιότερες γενιές δικτύων επικοινωνιών. Μερικά από αυτά είναι:

- Το υποστηριζόμενο εύρος ζώνης στις νέες τερματικές συσκευές θα πρέπει να είναι ευρύ και να κυμαίνεται από μερικά Kbps μέχρι και 100 ή και περισσότερα Mbps, καθώς θα καλείται να εξυπηρετεί μια πληθώρα υπηρεσιών που είτε προϋπήρχαν είτε δημιουργήθηκαν στα πλαίσια της νέας τεχνολογίας.
- Η διασύνδεση αυτή των διαφορετικών δικτύων κάτω από μια κοινή βάση θα προκύπτει από μια ομάδα διαφορετικών και συνάμα επικαλυπτόμενων επιπέδων, τα οποία θα προσαρμόζονται στις ταχύτητες του κάθε χρήστη με βασικότερο παράγοντα την γεωγραφική του θέση. Μια πιθανή μορφή των επιπέδων αυτών είναι :

- Επίπεδο Διανομής: Το οποίο με μέτριους σχετικά ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων θα υποστηρίζει υπηρεσίες μεταδόσεων ψηφιακής τηλεόρασης και ραδιοφωνίας. Θα παρέχει πλήρη κάλυψη σε αραιοκατοικημένες περιοχές και σε χρήστες με μεγάλη κινητικότητα.
 - Επίπεδο Κυψελών: Θα αναπτύσσεται σε αστικές κυρίως περιοχές (πυκνοκατοικημένες), θα είναι ένα υπερσύνολο των δικτύων 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς, το οποίο με μικρότερες κυψέλες θα παρέχει πλήρη κάλυψη και κινητικότητα με ρυθμό μεταφοράς δεδομένων της τάξης των 2Mbps.
 - Επίπεδο «hot - spot»: Μικρότερη γεωγραφικά κάλυψη θα υποστηρίζεται σε αυτό το επίπεδο χωρίς να παρέχετε πλήρης κάλυψη, αλλά προσφέροντας υπηρεσίες που απαιτούν υψηλότερες τιμές ρυθμού μεταφοράς δεδομένων. Θα ενσωματώνει τα συστήματα ασύρματων τοπικών δικτύων IEEE 802.11 και High Performance Radio LAN 1 (HIPERLAN 1).
 - Προσωπικό επίπεδο: Θα παρέχει συνδέσεις σε πολύ μικρές αποστάσεις όπως το πρότυπο Bluetooth, αλλά η κινητικότητα θα είναι περιορισμένη.
 - Σταθερό επίπεδο: Θα περιλάβει τα σταθερά συστήματα πρόσβασης μέσω ασύρματων ζεύξεων.
- Η απαίτηση για ένα σταθερό δίκτυο μεταγωγής πακέτων στην οποία οδηγηθήκαμε μετά από μελέτες πάνω στην αρχιτεκτονική των δικτύων 4^{ης} γενιάς. Ένα ασυνδεδασμένο σταθερό δίκτυο μεταγωγής πακέτων με βάση το πρωτόκολλο IP θα καταφέρει να διασυνδέσει τα διαφορετικού τύπου ασύρματα δίκτυα.
 - Η ανάγκη τα τερματικά που θα πλαισιώσουν και θα υποστηρίξουν την νέα τεχνολογία να υποστηρίζουν πρωτόκολλα Internet νέας γενιάς (IPv6).
 - Η ομαλή διασύνδεση των διαφορετικών τεχνολογιών χάρη στην κοινή βάση που προσφέρει το IP πρωτόκολλο, με αποτέλεσμα ο χρήστης να έχει την ελευθερία εναλλαγής ανάμεσα στα

διαφόρων γενιών δίκτυα ανάλογα με την περίσταση και τις ανάγκες του.

- Τέλος, όλα τα ανωτέρω, συγκλίνουν σε έναν όρο την διαλειτουργικότητα. Η οποία είναι αναγκαία προκειμένου το σύνολο των εν ενεργεία δικτύων (δορυφορικά δίκτυα, δίκτυα κυψελών, ασύρματα τοπικά δίκτυα, προσωπικά δίκτυα και τα δίκτυα σταθερών ασύρματων ζεύξεων) να λειτουργούν αρμονικά και να παρέχουν τις υπηρεσίες τους στον καταναλωτή.

Τα συστήματα 4^{ης} γενιάς υπόσχονται την παροχή υπηρεσιών φωνής και δεδομένων σε ρυθμούς μετάδοσης υψηλότερους από αυτούς των δικτύων 3^{ης} γενιάς. Οι νέες υπηρεσίες, βασισμένες εξ ολοκλήρου στο IP πρωτόκολλο, θα οδηγήσουν σε σύγκλιση των διαφορετικών επιπέδων εφαρμογών. Απώτερος στόχος, στον τομέα της πρόσβασης, είναι η παγκόσμια περιαγωγή ,οποτεδήποτε και οπουδήποτε [3,17,18].

1.8.1 Απαιτήσεις συστημάτων 4G.

Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων

Στην προηγούμενη γενιά (3^η), οι συνδρομητές απολάμβαναν 2 Mbps σε περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου και ρυθμό μεταφοράς δεδομένων με κατώτατο κατώφλι τα 144 Kbps σε κινούμενα περιβάλλοντα. Ο χαμηλότερος ρυθμός που θέτουν ως στόχο τα συστήματα προκειμένου να θεωρείται ότι ανήκουν σε τεχνολογία 4^{ης} γενιάς είναι 10-20 Mbps στα ακίνητα περιβάλλοντα και 2Mbps στα κινούμενα περιβάλλοντα.

Μεγαλύτερη Χωρητικότητα (Capacity) και μικρότερο κόστος ανά bit.

Τα συστήματα 3^{ης} γενιάς αδυνατούσαν να εξυπηρετήσουν την όλο και αυξανόμενη κίνηση των πολυμέσων. Στα συστήματα 4^{ης} γενιάς είναι απαραίτητη η κάθετη αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, πολλές φορές φτάνει σε σημεία να είναι δεκαπλάσιο αυτού της 3^{ης} γενιάς, ενώ το κόστος ανά bit πρέπει να μειωθεί δραστικά κάνοντας την υπηρεσία προσιτή στο ευρύ κοινό και όχι ένα απαγορευτικό και άπιαστο όνειρο.

Υποστήριξη των τελευταίων πρωτοκόλλων IP

Ικανή και αναγκαία συνθήκη για τα συστήματα που θέλουν να ανήκουν στην οικογένεια της 4^{ης} γενιάς είναι η υποστήριξη των τελευταίων εκδόσεων πρωτοκόλλων Διαδικτύου (IPv6) και πολυεκπομπής (multicasting), σημαντικές αναβαθμίσεις ιδιαίτερα για τις εφαρμογές ηλεκτρονικού εμπορίου.

4G και ποιότητα υπηρεσιών

Το σύνολο των ασύρματων συστημάτων χρησιμοποιούν ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων και μεταδιδόμενης ισχύος, που έχει ως αποτέλεσμα τα συστήματα να υποφέρουν από συμφόρηση. Άλλη μια απαίτηση επομένως προκύπτει από την ανάγκη ύπαρξης εξαιρετικής ποιότητας προσφερόμενων υπηρεσιών προκειμένου να υποστηριχθούν οι διαφορετικές εφαρμογές που ένα σύστημα 4^{ης} γενιάς καλείται να εξυπηρετήσει, καθώς επίσης και για τις εφαρμογές που επεξεργάζονται δεδομένα πραγματικής κίνησης.

Συνύπαρξη σταθερών δικτύων, ασυρμάτων δικτύων υπολογιστών (WLAN), συστημάτων 3^{ης} γενιάς και συστημάτων 4^{ης} γενιάς.

Το γεγονός της δημιουργίας συστημάτων που ανήκουν στην 4^η γενιά δεν μεταφράζεται στην αυτόματη διακοπή λειτουργίας παλαιότερων τεχνολογιών. Κάτι τέτοιο είναι εξαιρετικά δαπανηρό για τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας και πρακτικά αδύνατο. Επομένως πρέπει να υπάρξει ομαλή διασύνδεση ανάμεσα στα ενεργά δίκτυα και τα συστήματα ασύρματων και μη επικοινωνιών. Γεγονός βέβαια που καθιστά εφικτό το πρωτόκολλο IP.

Καταλήγοντας, τα χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις των δικτύων 4^{ης} γενιάς συνοψίζονται σε 3 κατηγορίες:

- Μόνιμη κάλυψη υπηρεσιών: Ο χρήστης θα δύναται να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε υπηρεσία χωρίς τους περιορισμούς που υπάρχουν στο εκάστοτε δίκτυο.
- Βελτιωμένη συνδεσιμότητα: Ο χρήστης θα βρίσκεται σε συνεχή σύνδεση στο δίκτυο πρόσβασης που θεωρείται καταλληλότερο και επαρκέστερο, εξασφαλίζοντας την κινητότητα και την ποιότητα υπηρεσιών.
- Συνεχής σύνδεση: Ο χρήστης θα παραμένει μόνιμα συνδεδεμένος στο ετερογενές δίκτυο. Καθ' όλη την διάρκεια που η τερματική του συσκευή είναι σε λειτουργία θα έχει την δυνατότητα πρόσβασης στο δίκτυο τυγχάνοντας μικρής καθυστέρησης πρόσβασης σε αυτό [17].

1.8.2 Τεχνολογίες που ανήκουν στα δίκτυα 4G.

Οι ομάδες που ασχολήθηκαν με την τυποποίηση των δικτύων 4^{ης} γενιάς είναι 2 και προέρχονται από την ITU.

1. Working Party 8F (WP8F) στο τμήμα ITU-R και
2. Special Study Group (SSG) "IMT 2000" στο τμήμα ITU-T.

Στην ομάδα WP8F ασχολούνται με τις γενικές πτυχές των ράδιο – συστημάτων 4^{ης} γενιάς και συγκεκριμένα με ζητήματα όπως ράδιο – επαφές (radio interfaces) , ζητήματα φάσματος (spectrum) στα δίκτυα ράδιο – πρόσβασης (radio access networks), χαρακτηριστικά υπηρεσιών και κίνησης (traffic) και εκτιμήσεις – προβλέψεις της αγοράς.

Η ομάδα SSG είναι υπεύθυνη για το δίκτυο, τις ασύρματες πτυχές των νέων ασύρματων συστημάτων οι οποίες συμπεριλαμβάνουν το ασύρματο Διαδίκτυο (wireless Internet), τη σύγκλιση σταθερών και κινητών δικτύων επικοινωνιών, τη διαχείριση κινητικότητας (mobility management), τη σύνδεση μέσω δικτύων (internetworking), και την διαλειτουργικότητα (interoperability).

Σημαντικότερο θεωρείται το παραδοτέο της ομάδας WP8F είναι η σύσταση (recommendation) ITU-R M1645 η οποία θα περιλαμβάνει:

- Το πλαίσιο (framework) για τα συστήματα 4G. Ένα πλαίσιο το οποίο θα ικανοποιεί τους στόχους που έθεσαν τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς και θα είναι διαφανές στο χρήστη.
- Ρυθμούς μετάδοσης 100 Mbps για τους κινητούς χρήστες και 1 Gbps για τους σταθερούς χρήστες.
- Παγκόσμιο κοινό φάσμα και παγκόσμια τυποποίηση.

Οι σημαντικότερες εμπορικές μορφές, όπως αυτές προκύπτουν από την δημοσιοποίηση των προτύπων που αφορούν τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών 4^{ης} γενιάς, αναπτύσσονται στις 3 ακόλουθες κατηγορίες:

1. Long Term Evolution (LTE), powered by Ericsson.
2. Ultra Mobile Broadband (UMB), powered by Qualcomm.
3. 802.16m (WiMax), powered by Intel.[17]

Στον **Πίνακα 1.2** φαίνονται οι οργανισμοί τυποποίησης στα δίκτυα κυψελωτών επικοινωνιών με τις εμπορικές τεχνολογίες ανά γενιά.

Οργανισμός τυποποίησης	0G	1G	2G	2.5G	3G	3.5G	4G
3GPP			GSM DCS1800 PCS1900	GPRS, EDGE	UMTS	HSPA HSPA+	LTE
3GPP2			cdmaOne		CDMA2000		UMB
Δίκτυα κατασκευαστών	MTS IMTS	NMT AMPS	D-AMPS PDC				
IEEE						802.16d 802.16e	802.16m
ETSI			TETRA		TETRA2		

Πίνακας 1.2 Οργανισμοί τυποποίησης δικτύων κυψελωτών επικοινωνιών [3].

1.8.3 Ορθογώνια πολυπλεξία πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (OFDMA).

Η ορθογώνια πολυπλεξία πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access - OFDMA) είναι μια έκδοση της ορθογώνιας πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας (OFDM). Είναι αρκετά σημαντικό να δοθεί έμφαση στα θετικά και τα αρνητικά αυτής της πολυπλεξίας, καθώς θα απαντηθεί σε όλες σχεδόν τις τεχνολογίες που ανήκουν στα δίκτυα 4^{ης} γενιάς.

Πλεονεκτήματα OFDMA.

- Προσφέρει ευελιξία ανάπτυξης σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων με ελάχιστη αναγκαία τροποποίηση στην διεπαφή του αέρα.
- Μειώνει τις παρεμβολές από τις γειτονικές κυψέλες.

- Επίσης μειώνει τις παρεμβολές στο εσωτερικό της κυψέλης, χρησιμοποιώντας μια κατανομή με κυκλικές μεταθέσεις.
- Επιτρέπει την κάλυψη δικτύου απλής ποιότητας στις περιοχές με προβλήματα κάλυψης, προσφέροντας στους συνδρομητές καλύτερη κάλυψη από το δίκτυο.
- Παρέχει ποικιλομορφία συχνοτήτων.

Μειονεκτήματα OFDMA.

- Υψηλότερη ευαισθησία στην μετατόπιση συχνότητας και στον θόρυβο φάσης.
- Οι υπηρεσίες ασύγχρονης επικοινωνίας δεδομένων, όπως η πρόσβαση στο Διαδίκτυο, χαρακτηρίζονται από μικρές ριπές πακέτων σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.
- Μικρός αριθμός χρηστών σε μια κυψέλη βάσης (σταθμού), μπορεί να μεταφέρει ταυτόχρονα δεδομένα σε σταθερά χαμηλότερο ρυθμό.

1.8.4 Δίκτυα LTE.

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία στα κινητά δίκτυα τηλεφωνίας 4^{ης} γενιάς είναι το 3GPP Long Term Evolution ή για χάρη συντομίας LTE. Είναι μια τεχνολογία αιχμής που χρησιμοποιείται για την δικτύωση και την ασύρματη επικοινωνία κινητών συσκευών. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά τις απέναντι στις άλλες τεχνολογίες είναι ότι είναι βασισμένη στα υπάρχοντα δίκτυα GSM/EDGE και UMTS/HSPA, στα οποία με χαμηλό κόστος εξοπλισμού και νέες τεχνικές διαμόρφωσης επιτυγχάνετε αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου καθώς επίσης και στους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων του δικτύου.

Το πρώτο παγκοσμίως δημόσιο δίκτυο LTE τεχνολογίας που εγκαταστάθηκε, ήταν στο Όσλο και τη Στοκχόλμη και ανήκε στην

εταιρία TeliaSonera. Η εγκατάστασή του ολοκληρώθηκε στις 14 Δεκεμβρίου 2009.

Η τεχνολογία LTE προτάθηκε αρχικά στην Ιαπωνία το 2004, όμως το πρότυπο οριστικοποιήθηκε το 2008. Οι πρώτες εμπορικές απόπειρες ήταν το Samsung Galaxy Indulge (από τη MetroPCS) και το HTC Thunderbolt και σκόπευαν στην αγορά της Β. Αμερικής.



Εικόνα 1.8 Λογότυπο τεχνολογίας LTE [19].

1.8.5 Δίκτυα UMB.

Η τεχνολογία UMB (Ultra Mobile Broadband) αποτελεί την εμπορική ονομασία της προσπάθειας που κατέβαλε η ομάδα 3GPP2 στα πλαίσια της βελτίωσης του προτύπου της κινητής τηλεφωνίας CDMA2000 για την προσαρμογή του στις απαιτήσεις της επόμενης γενιάς. Τον Νοέμβριο του 2008, η εταιρία Qualcomm που ήταν και ο βασικότερος χορηγός στην έρευνα της τεχνολογία της, ανακοίνωσε πως θα αποχωρήσει από αυτό το project θέτοντας ως προτεραιότητα την τεχνολογία LTE.

Ομοίως με την τεχνολογία LTE, τα συστήματα UMB είναι βασισμένα σε τεχνολογίες Internet (TCP/IP), οι οποίες λειτουργούν στα νεότερης γενιάς ραδιοφωνικά συστήματα.

Τα Δίκτυα UMB εν συντομία

- Είναι βασισμένα στην τεχνολογία OFDMA.
- Χρησιμοποιούν Διπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDD).
- Έχουν ένα κλιμακούμενο εύρος ζώνης που κυμαίνεται μεταξύ 1,25-20 MHz.
- Υποστηρίζουν κυψέλες διαφόρων μεγεθών όπως:
 - macro-cellular.
 - micro-cellular.
 - pico-cellular.
- Αρχιτεκτονική δικτύου IP.
- Υποστηρίζουν επίπεδες, κεντρικοποιημένες και μεικτές τοπολογίες.
- Ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μεγαλύτερο από 275 Mbps σε κατερχόμενη ζεύξη και μεγαλύτερες από 75 Mbps σε ανερχόμενη ζεύξη.

1.8.6 Δίκτυα WiMAX.

Το WiMAX είναι μια τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης που ανήκει στην ομάδα τεχνολογιών της 4^{ης} γενιάς. Λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με αυτόν της WiFi τεχνολογίας με σημαντικότερη διαφορά – πλεονέκτημα αυτό της μεγαλύτερης εμβέλειας. Αναλυτικότερα, ενώ το WiFi περιορίζεται στην εμβέλεια των 100 μέτρων το WiMAX φτάνει ή και τις περισσότερες φορές ξεπερνάει τα 35 χιλιόμετρα.

Ενώ η πρόσβαση στο δίκτυο επιτυγχάνεται από τα διάφορα σημεία πρόσβασης (hotspots) που χρησιμοποιούν την τεχνολογία WiFi, όπως για παράδειγμα σε καταστήματα, συνεδριακούς χώρους, ξενοδοχεία και αεροδρόμια. Στα αντίστοιχα δεδομένα της τεχνολογίας

WiMAX το εύρος (γεωγραφικά) εξυπηρέτησης του δικτύου ξεπερνάει κατά πολύ το μέγεθος ενός καταστήματος και ανταπεξέρχεται στην εξυπηρέτηση μιας πόλης.

Πλεονεκτήματα τεχνολογίας WiMAX

- Οι εταιρίες που αναπτύσσονται στον χώρο των κινητών τηλεπικοινωνιών, θα μπορούν με μεγάλη ευκολία να εγκαταστήσουν ανεξάρτητα μεταξύ της ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών και υπηρεσιών Internet αυξάνοντας έτσι των ανταγωνισμό.
- Οι συνδρομητές θα απολαύσουν υπηρεσίες Internet καθώς η πρόσβαση θα είναι εφικτή σχεδόν από οπουδήποτε, ακόμα και αν είναι εν κινήσει. Δυνατότητα που δεν είχαν στην τεχνολογία τύπου WiFi με συνδέσεις ADSL, λόγω της περιορισμένης εμβέλειας.
- Ένα δίκτυο WiMAX το οποίο θα έχει την δυνατότητα να καλύπτει μια μεγαλούπολη μπορεί να εγκατασταθεί σε ελάχιστες μέρες, σε αντίθεση με τα αντίστοιχα ενσύρματα δίκτυα που χρειάζονται μήνες ή και μερικές φορές χρόνια για την εγκατάστασή τους.
- Ο χρήστης θα μπορεί να απολαμβάνει τις υπηρεσίες που του παρέχονται μέσα από ένα δίκτυο WiMAX, ακόμα και σε περίπτωση πιθανής μετακόμισης χωρίς να χρειαστεί να προβεί σε καμία ενέργεια ενεργοποίησης της ευρυζωνικής σύνδεσης, καθώς θα καλύπτεται από το ασύρματο σήμα του παρόχου WiMAX και θα μπορεί να ξεκινήσει άμεσα να χρησιμοποιεί την σύνδεσή του.
- Εξαιτίας των υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων τα δίκτυα WiMAX θα επιτρέπουν την πραγματοποίηση τηλεφωνικών κλήσεων ή ακόμα και βίντεο κλήσεων.



Εικόνα 1.9 Λογότυπο τεχνολογίας WiMAX [20].

2. Η τεχνολογία LTE των δικτύων 4ης γενιάς.

2.1 Περίληψη.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναπτυχθεί η τεχνολογία 4^{ης} γενιάς LTE που παρουσιάστηκε περιληπτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αναλυτικότερα, θα εστιάσουμε στο ποιες απαιτήσεις οδήγησαν στην εξέλιξη των παλαιότερων τεχνολογιών από τα οποία προέρχεται το LTE, ποια είναι τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας, τις ποιότητες υπηρεσίας που μπορεί να προσφέρει, τα πλεονεκτήματα που την «έχρισαν» φαβορί ανάμεσα στις τεχνολογίες της 4^{ης} γενιάς, τον εξοπλισμό καθώς επίσης και την αρχιτεκτονική του δικτύου, τα πρωτόκολλα και τα χαρακτηριστικά των διαφόρων επιπέδων, την λειτουργία του Προγραμματιστή και τέλος τις μελλοντικές εξελίξεις της τεχνολογίας αυτής.

2.2 Εισαγωγή.

Η σύσταση προδιαγραφών για την τεχνολογία του LTE ήρθε να συμπληρώσει την πετυχημένη τεχνολογία που είναι γνωστή ως Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (Universal Mobile Telecommunication System ή UMTS) καλύπτοντας τις μελλοντικές απαιτήσεις των χρηστών αλλά και των παρόχων κατ' επέκταση. Τα δίκτυα UMTS με την σειρά τους αποτελούν εξέλιξη του συστήματος GSM, που είναι μια τεχνολογία μεταγωγής κυκλωμάτων. Οι απαιτήσεις όμως από τα δίκτυα νέας γενιάς είναι αρκετά υψηλές και θέλουν τα δίκτυα να μεταφέρουν εκτός από υπηρεσίες φωνής, βίντεο αλλά και δεδομένα με την χρήση του πρωτοκόλλου IP, προσφέροντας σε όλους τους χρήστες την ελευθερία να μεταβαίνουν από σταθερά σε κινητά δίκτυα.

Η απαίτηση του χρήστη είναι να του παρέχεται η ικανότητα να ξεκινήσει και να τερματίσει μια υπηρεσία καθόσον αυτός βρίσκεται σε κίνηση. Τα κριτήρια με τα οποία αυτές οι υπηρεσίες πρέπει να παρέχονται στους χρήστες είναι τα εξής:

- Η ποιότητα των υπηρεσιών.
- Το εύρος ζώνης (Bandwidth).
- Η διαθεσιμότητα του δικτύου.
- Οι προτιμήσεις του χρήστη.

Το δίκτυο καθώς και οι χρήστες στο σύνολο τους χρίζουν προστασίας στο δίκτυο μετάδοσης και στο δίκτυο εφαρμογών. Αυτή η προστασία μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση συστημάτων πιστοποίησης και κρυπτογράφησης.

Η ικανοποίηση του χρήστη από την επίδοση των υπηρεσιών που του παρέχονται γίνεται δυνατή με την χρήση μηχανισμών που εξασφαλίζουν την κινητότητα μεταξύ των διαφόρων επιπέδων, από το φυσικό στρώμα έως το στρώμα εφαρμογών.

Το σύνολο των ανωτέρω απαιτήσεων έχει ικανοποιηθεί στην 8^η αναφορά (Release) της 3GPP στην οποία προδιαγράφουν την αρχιτεκτονική της τεχνολογίας LTE.

Από τον Δεκέμβριο του 2004 που ξεκίνησε η σύνταξη των προδιαγραφών του LTE, στην 7^η αναφορά της 3GPP, στόχος ήταν η καταγραφή των μακροπρόθεσμων εξελίξεων της κυψελοειδούς τεχνολογίας UMTS. Οι προδιαγραφές αυτές σχετίστηκαν από την πλευρά πρόσβασης με:

- Τις εξελίξεις της επίγειας ράδιο – πρόσβασης (Evolved – UTRA ή E - UTRA) του UMTS.
- Τις εξελίξεις του επίγειου δικτύου ράδιο – πρόσβασης του UMTS (Evolved – UTRAN ή E - UTRAN).

Και από την πλευρά του δικτύου με:

- Την εξέλιξη του δικτύου κορμού πακέτων (Evolved Packet Core ή EPC).

Το E – UTRAN είναι γνωστό LTE [13 -15] ενώ το EPC ονομάζεται και προηγμένη αρχιτεκτονική συστήματος (System Architecture Evolution ή SAE).

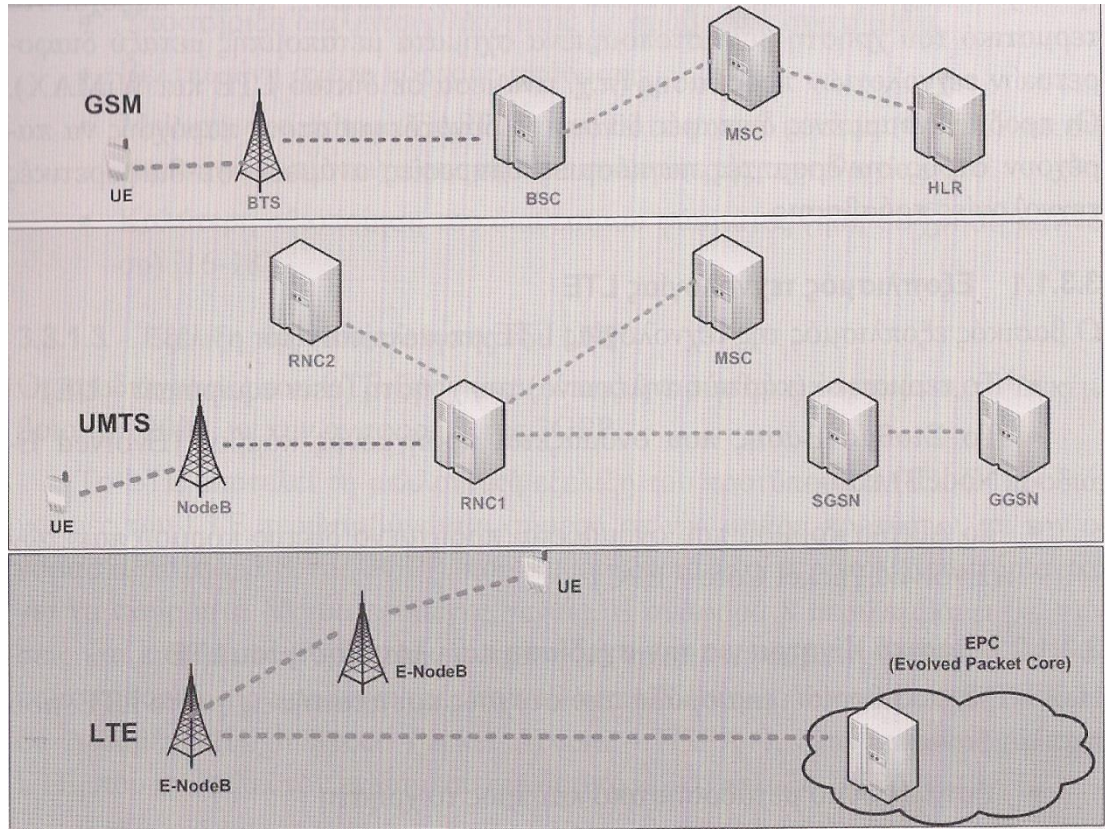
Με την ολοκλήρωση της 8^{ης} αναφοράς από την 3GPP, βλέπουμε τις προδιαγραφές του εξελιγμένου συστήματος δεδομένων (Evolved Packet System ή EPS). Ή είσοδος αυτού του συστήματος απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό την μέχρι τότε δομή του δικτύου καθώς ένα μεγάλο σύνολο από επιμέρους στοιχεία όπως:

- Ο κόμβος υπηρεσίας GPRS Εξυπηρέτησης (Serving GPRS Support Node ή SGSN).
- Ο Ράδιο – ελεγκτής Δικτύου (Radio Network Controller ή RNC).
- Το Κέντρο Μεταγωγής Κινητών υπηρεσιών (Mobile Switching Centre ή MSC).
- Ο Κόμβος Υποστήριξης Πύλης GPRS (Gateway GPRS Support Node ή GGSN).

Μετατρέπονται σε μία ενιαία οντότητα την SAE ή EPC.

Εν συγκρίσει με το UMTS το LTE παρουσιάζει μια απλουστευμένη αρχιτεκτονική καθώς τα RNC και NodeB έχουν αντικατασταθεί με το Evolved – NodeB ή E – NodeB και τα MSC, SGSN και GGSN αντικαταστάθηκαν με την σειρά τους από το EPC. Επομένως, το δίκτυο πρόσβασης αποτελείται πλέον από τους σταθμούς βάσης, οι οποίοι ονομάζονται E – NodeB's και θεωρούνται εξελιγμένοι (Evolved) σε σχέση με τους προκατόχους τους NodeB's του UMTS, καθώς περιέχουν έξυπνες λειτουργικότητες με γειτονικούς σταθμούς να επικοινωνούν μεταξύ τους για την σωστή διαχείριση της κινητότητας του χρήστη από κυψέλη σε κυψέλη για την αποφυγή παρεμβολών, αλλά και λειτουργικότητες του RNC. Μια απεικόνιση της μετάβασης από την

αρχιτεκτονική του GSM, σε αυτήν του UMTS και τέλος σε αυτή των LTE δικτύων φαίνεται και στο **Σχήμα 2.1**.



Σχήμα 2.1 Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής κινητού δικτύου από GSM σε UMTS και LTE. [3]

Ο σχεδιασμός του EPC δικτύου κορμού είναι τέτοιος που του επιτρέπει την σύνδεση με ένα ευρύ σύνολο διαφορετικών δικτύων που χρησιμοποιούν πρωτόκολλο διαδικτύου (IP), με αποτέλεσμα να επιτρέπει στους παρόχους να υλοποιούν και να λειτουργούν ένα κοινό δίκτυο κορμού πακέτων για:

- 3GPP δίκτυα πρόσβασης όπως:
 - LTE.
 - 3G.
 - 2G.
- Μη 3GPP δίκτυα πρόσβασης όπως:
 - WLAN.

- WiMAX.
- WiBRO.
- Αλλά και για σταθερά δίκτυα πρόσβασης όπως:
 - Ethernet.
 - DSL.
 - Χαλκός.
 - Οπτική Ίνα.

Οι προδιαγραφές του EPC εστιάζουν και έχουν αναπτυχθεί για να βελτιώσουν λειτουργίες όπως η κινητικότητα, η διαχείριση πολιτικής (policy management) καθώς επίσης και η ασφάλεια. Επίσης, το EPC δίνει την δυνατότητα στο τερματικό χρήστη να αξιοποιεί βελτιωμένα σχήματα μεταπομπής μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης. Οι προδιαγεγραμμένες διεπαφές δίνουν την δυνατότητα στους παρόχους να παρέχουν στους συνδρομητές παγκόσμιες υπηρεσίες ανάμεσα σε διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης [3].

Τα στάδια εξέλιξης του LTE.

- Μάρτιος 2000: Release 99 - UMTS/WCDMA.
- Μάρτιος 2002: Release 5 – HSDPA.
- Μάρτιος 2005: Release 6 – HSUPA.
- Έτος 2007: Release 7 - DL MIMO, IMS (IP Multimedia Subsystem).
- Νοέμβριος 2004: Ξεκινάνε οι εργασίες για τις προδιαγραφές του LTE.
- Ιανουάριος 2008: Οι προδιαγραφές τελειοποιούνται και εγκρίνονται με το 8^ο Release.
- Έτος 2010: Στόχος είναι πλέον η πρώτη εγκατάσταση.
- Μάρτιος 2011: 3GPP Release 10 και LTE Advanced [21].

Οι βασικότεροι στόχοι κίνητρα που οδήγησαν στην σχεδίαση και υλοποίηση του LTE.

Οι στόχοι απαιτήσεις που θέτει η 3GPP περιλαμβάνουν:

- Μείωση κόστους.
- Σημαντικά μειωμένη καθυστέρηση.
- Βελτιωμένη χωρητικότητα και κάλυψη συστήματος.
- Υψηλό ρυθμό μετάδοσης από και προς το χρήστη.

Οι βασικές απαιτήσεις για την ανάπτυξη τεχνολογίας LTE στοχεύουν ειδικότερα σε:

- Βελτιωμένη απόδοση φάσματος: 2-4 φορές καλύτερη από την απόδοση, που υποσχόταν η 6^η αναφορά (Release) και αφορούσε την τεχνολογία HSPA.
- Υψηλό ρυθμό μετάδοσης (Throughput), με κατερχόμενο ρυθμό μεγαλύτερο των 100Mbps (σε φάσμα 20MHz) για 4X4 MIMO, και ανερχόμενο ρυθμό μεγαλύτερο των 50 Mbps (σε φάσμα 20MHz) για 2X2 MIMO.
- Καθυστέρηση στην ράδιο – επαφή του δικτύου (από το τερματικό χρήστη User Equipment στο eNodeB και αντίστροφα) μικρότερη από 10 ms.
- Υποστήριξη κλιμακωτού εύρους ζώνης: 1, 3, 4, 5, 10, 15, 20 MHz.
- Υποστήριξη φάσματος για FDD και TDD συστήματα.
- Υποστήριξη διαλειτουργικότητας με συμβατικά συστήματα.
- Βελτιωμένη σχέση κόστους – απόδοσης.
- Μείωση στο πάγιο κόστος (Capital Expenditure - CAPEX) και λειτουργικό κόστος (Operating Expense - OPEX) σε σύγκριση με αντίστοιχα συστήματα παλαιότερης τεχνολογίας.
- Καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος [3].

2.3 Χαρακτηριστικά τεχνολογίας LTE.

Παραθέτονται μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά του LTE:

- Η τεχνολογία LTE μπορεί να υποστηρίξει πολυπλεξία (διπλεξία) διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Duplexing ή FDD) καθώς επίσης και πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (Time Division Duplexing ή TDD).
- Ο χρήστης μπορεί να κινείται με ταχύτητα έως και 350 Km/h.
- Ανάλογα με το εύρος του καναλιού έχουμε και τον αντίστοιχο αριθμό παραγόμενων ομάδων συγκεκριμένα:
 - 1,4 MHz → 6 ομάδες.
 - 3 MHz → 15 ομάδες.
 - 5 MHz → 25 ομάδες.
 - 10 MHz → 50 ομάδες.
 - 15 MHz → 75 ομάδες.
 - 20 MHz → 100 ομάδες.
- Η διαμόρφωση σήματος ποικίλει ανάλογα με το είδος της ζεύξης, αναλυτικότερα:
 - Στην κατερχόμενη ζεύξη έχουμε:
 - QPSK.
 - 16QAM.
 - 64QAM.
 - Στην ανερχόμενη ζεύξη έχουμε:
 - QPSK.
 - 16QAM.
 - 64QAM (προαιρετικά για τα τερματικά).
- Παρόμοια με την διαμόρφωση σήματος, τα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης έχουν τις εξής κατηγορίες ανάλογα με το είδος της ζεύξης:
 - Στην κατερχόμενη ζεύξη:
 - OFDMA.

- Στην ανερχόμενη ζεύξη:
 - SC – FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access).
- Στην τεχνολογία Πολλαπλών Κεραιών (Multiple Input Multiple Output ή MIMO) έχουμε:
 - Στην κατερχόμενη ζεύξη: Ευρεία επιλογή από σχήματα MIMO για μετάδοση με διαφορικότητα, χωρική πολυπλεξία.
 - Στην ανερχόμενη ζεύξη: Μέγιστος αριθμός κεραιών 4.
- Μέγιστος ρυθμός δεδομένων (οι ρυθμοί αυτοί είναι θεωρητικοί και δεν επιτυγχάνονται σε πραγματικά περιβάλλοντα που επηρεάζονται από εξωτερικές συνθήκες):
 - Κατερχόμενη ζεύξη:
 - 150 Mbps (Users Equipment κατηγορίας 4, 2 X 2 MIMO, 20 MHz).
 - 300Mbps (Users Equipment κατηγορίας 5, 4 X 4 MIMO, 20 MHz).
 - Ανερχόμενη ζεύξη:
 - 75 Mbps (20MHz).
- Βασικά σχήματα τεχνολογίας MIMO:
 - Στην ανερχόμενη ζεύξη:
 - 1 X 2, 1 X 4.
 - Στην κατερχόμενη ζεύξη:
 - 2 X 2, 4 X 2, 4 X 4.
- Κάλυψη δικτύου 5 - 100χλμ με ελαφρά υποβάθμιση μετά από τα 30 χιλιόμετρα.
- Καθυστέρηση μικρότερη από 10 ms.

Στον **Πίνακα 2.1** φαίνεται το εύρος των συχνοτήτων για τις πολυπλεξίες FDD και TDD όπως αυτές ορίζονται στο 3GPP Release 8.

E-UTRA Μπάντες Λειτουργίας	Λειτουργία μπάντας ανερχόμενης ζεύξης Λήψη σταθμού βάσης εκπομπή τερματικής συσκευής	Λειτουργία μπάντας κατερχόμενης ζεύξης Εκπομπή σταθμού βάσης λήψη τερματικής συσκευής	Μορφή διπλεξίας
	$F_{UL,low} - F_{UL,high}$ (MHz)	$F_{DL,low} - F_{DL,high}$ (MHz)	
1	1920 - 1980	2110 - 2170	FDD
2	1850 - 1910	1930 - 1990	FDD
3	1710 - 1785	1805 - 1880	FDD
4	1710 - 1755	2110 - 2155	FDD
5	824 - 849	869 - 894	FDD
6	830 - 840	875 - 885	FDD
7	2500 - 2570	2620 - 2690	FDD
8	880 - 915	925 - 960	FDD
9	1749.9 - 1784.9	1844.9 - 1879.9	FDD
10	1710 - 1770	2110 - 2170	FDD
11	1427.9 - 1447.9	1475.9 - 1495.9	FDD
12	698 - 716	728 - 746	FDD
13	777 - 787	746 - 756	FDD
14	788 - 798	758 - 768	FDD
17	704 - 716	734 - 746	FDD
...			
33	1900 - 1920	1900 - 1920	TDD
34	2010 - 2025	2010 - 2025	TDD
35	1850 - 1910	1850 - 1910	TDD
36	1930 - 1990	1930 - 1990	TDD
37	1910 - 1930	1910 - 1930	TDD
38	2570 - 2620	2570 - 2620	TDD
39	1880 - 1920	1880 - 1920	TDD
40	2300 - 2400	2300 - 2400	TDD

Πίνακας 2.1 Εύρος συχνοτήτων FDD – TDD [22].

Στην κατερχόμενη ζεύξη, η χρήση της τεχνικής OFDMA σε συνδυασμό με την χρήση του κυκλικού προθέματος (Cyclic Prefix - CP), επιτυγχάνει μια πιο ανθεκτική ως προς τις παρεμβολές στο ράδιο – κανάλι δομή δεδομένων κατά την μετάδοση.

Για την καλύτερη διαχείριση της εκπομπής ισχύος, κατά την διάρκεια της ανερχόμενης ζεύξης, χρησιμοποιείται μια τεχνική μίας φέρουσας SC – FDMA η οποία επιτυγχάνει, σε σχέση με την τεχνική OFDMA, καλύτερη (μικρότερη) τιμή στον λόγο ισχύος της μέγιστης ως προς τη μέση τιμή (Peak to Average Power Ratio - PAPR). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα τερματικά του δικτύου να είναι λιγότερο σύνθετα, με μικρότερους ενισχυτές χωρίς υψηλές απαιτήσεις στη γραμμικότητα που οδηγούν στην αύξηση του κόστους του τερματικού.

Το LTE βασίστηκε στην επιτυχημένη τεχνολογία HSPA και κατ' επέκταση χρησιμοποίησε τις ίδιες βασικές αρχές, όπως η χρήση του κοινού ράδιο - διαύλου και η γρήγορη προσαρμοστικότητα στις αλλαγές στην ποιότητα της επικοινωνίας. Το LTE κάνει χρήση μόνο ράδιο – διαύλων κοινής χρήσης τους οποίους μπορεί να διαμοιράσει οιαδήποτε χρονική στιγμή σε οποιονδήποτε χρήστη. Έτσι επιτυγχάνεται η αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου, καθώς η απόδοση των απαιτούμενων πόρων γίνεται δυναμικά και ανάλογα με την ζήτηση. Αυτό είναι το κυριότερο πλεονέκτημά του LTE και αυτό εξετάζεται σε αυτήν την διπλωματική εργασία.

2.4 Ποιότητα υπηρεσιών LTE .

Η τεχνολογία LTE δημιουργήθηκε όχι μόνο για την βελτίωση της ασύρματης παροχής στις ευρυζωνικές υπηρεσίες αλλά και για την εισαγωγή νέων υπηρεσιών σε αυτές. Αυτό θα επιτευχθεί με τις υψηλές ταχύτητες πρόσβασης, τόσο στην ανερχόμενη ζεύξη όσο και στην κατερχόμενη, με την δυναμική διαχείριση του φάσματος και των πόρων του δικτύου (όπως αυτή παρουσιάστηκε στην προηγούμενη

υποενότητα 2.3) αλλά και με τους νέους μειωμένους χρόνους καθυστέρησης. Στην τεχνολογία LTE δεν θα υποστηρίζονται υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος. Το γεγονός της μεταφοράς των υπηρεσιών και της κίνησης στο σύνολό τους σε μια ενιαία μορφή IP, μας οδηγεί στην επίτευξη της σύγκλισης όλων των υπηρεσιών που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία νέων επιχειρηματικών μοντέλων βασισμένων σε υπηρεσίες triple – play και quadruple – play. Ο χρόνος μετάδοσης θα μειωθεί και θα είναι μικρότερος των 10 ms, πράγμα που αποτελεί σημαντική βελτίωση στους υπάρχοντες χρόνους μετάδοσης που ισχύουν για το HSPA και κυμαίνονται από 40 μέχρι 50 ms. Αποτέλεσμα, η τεχνολογία LTE θα μπορεί να υποστηρίξει διαδραστικές εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως HD βίντεο, εφαρμογές τηλεδιάσκεψης, online gaming κ.α.

Ένα δίκτυο που υποστηρίζει τεχνολογίες LTE είναι ικανό να προσφέρει υπηρεσίες VoIP σε συνεργασία με μια πλατφόρμα IMS. Επίσης, το VoIP μπορεί να συνδυαστεί και με άλλες υπηρεσίες ευαίσθητες στις χρονοκαθυστερήσεις, προσφέροντας ακόμα περισσότερες δυνατότητες στον χρήστη. Οι χρήστες του LTE θα έχουν την δυνατότητα να προσθαφαιρούν υπηρεσίες IP σε πραγματικό χρόνο, κάνοντας την επικοινωνία τους πιο ευχάριστη με προσωποποιημένες υπηρεσίες. Μερικές από αυτές τις υπηρεσίες που οι χρήστες θα μπορούν να απολαμβάνουν παράλληλα με την φωνητική τους κλήση είναι η ανταλλαγή αρχείων μουσικής, βίντεο και φωτογραφιών. Επίσης θα έχουν την δυνατότητα της επιλογής στον τρόπο της επικοινωνίας όπως PTT, φωνητική κλήση και instant messaging ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του καλούμενου.

Νέες υπηρεσίες φωνής δύναται πλέον να αναπτυχθούν και να είναι διαθέσιμες με τα δίκτυα HSPA/LTE. Αυτές οι υπηρεσίες θα είναι συμμετρικές και θα απαιτούν χωρητικότητα ίση μεταξύ της ανερχόμενης και της κατερχόμενης ζεύξης. Η αύξηση της χωρητικότητας στο LTE είναι δυνατή με 2 τρόπους: Με την χρήση μιας υβριδικής προσέγγισης που λέγεται CS – Voice (Circuit Switched Voice)

μέσω HSPA ή μέσω VoIP. Είναι δυνατή η χρήση αυτής της υβριδικής προσέγγισης ακόμα και σε περιπτώσεις που το δίκτυο κορμού δεν δύναται να υποστηρίξει μετάδοση φωνής σε πακέτα, χωρίς σημαντικές αλλαγές στο ράδιο - δίκτυο που θα επιτρέψουν στις WCDMA συσκευές να λειτουργήσουν χρησιμοποιώντας αποκλειστικά κανάλια για φωνητική επικοινωνία.

Για την υποστήριξη υπηρεσιών VoIP απαιτείται σημαντική αναβάθμιση του δικτύου κορμού και επομένως θα είναι από τις τελευταίες υπηρεσίες που θα ικανοποιηθούν από την τεχνολογία LTE [3].

Επίσης, άξιο αναφοράς είναι ο διαχωρισμός που γίνεται ανάμεσα στις υπηρεσίες ανάλογα με το αν αυτές έχουν την απαίτηση μιας ελάχιστης τιμής bit – rate για να παρέχουν την υπηρεσία στον χρήστη. Έτσι, διαχωρίζονται στις Guaranteed Bit Rate (GBR) ή στις Non Guaranteed Bit Rate (Non GBR). Ο διαχωρισμός αυτός θα γίνει κατανοητός από τον **Πίνακα 2.2**.

QCI	Τύπος εγγυημένου ρυθμού bit (GBR)	Προτεραιότητα	Καθυστέρηση (ms)	Ρυθμός απώλειας πακέτων	Παραδείγματα υπηρεσιών
1	GBR	2	100	10^{-2}	Φωνή συνομιλίας
2	GBR	4	150	10^{-3}	Βίντεο συνομιλίας (live streaming)
3	GBR	5	300	10^{-6}	Ρυθμιστικό βίντεο ροής (buffered streaming)
4	GBR	3	50	10^{-3}	Παιχνίδι πραγματικού χρόνου
5	Non-GBR	1	100	10^{-6}	Σηματοδосία IMS
6	Non-GBR	7	100	10^{-3}	Φωνή, Βίντεο (live streaming), διαδραστικό παιχνίδι
7	Non-GBR	6	300	10^{-6}	Βίντεο (buffered streaming)
8	Non-GBR	8	300	10^{-6}	TCP – based (e.g WWW, e-mail) chat, FTP, p2p file sharing, progressive video, etc.
9	Non-GBR	9	300	10^{-6}	

Πίνακας 2.2 Υπηρεσίες LTE σταθερού και μη bit – rate (GBR – Non GBR).

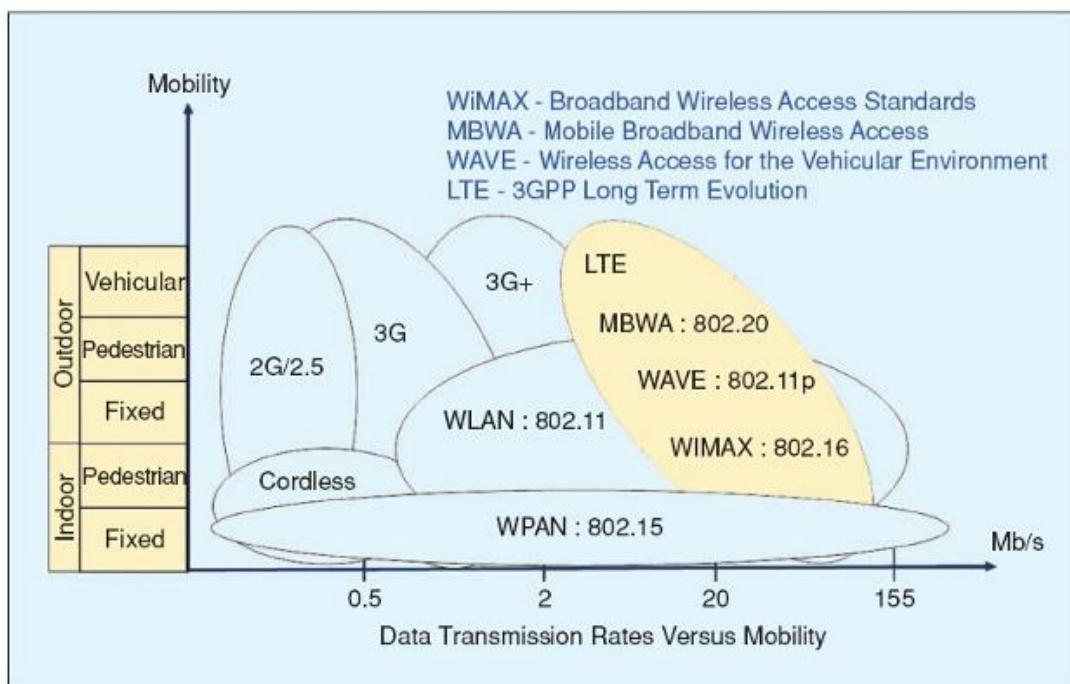
2.5 Πλεονεκτήματα του LTE.

Η τεχνολογία LTE παρουσιάζει μια πληθώρα από πλεονεκτήματα καθώς επίσης και από παροχές ως προς τον χρήστη αλλά και ως προς τον πάροχο επικοινωνιών. Αναλυτικότερα μερικά από τα πλεονεκτήματα είναι:

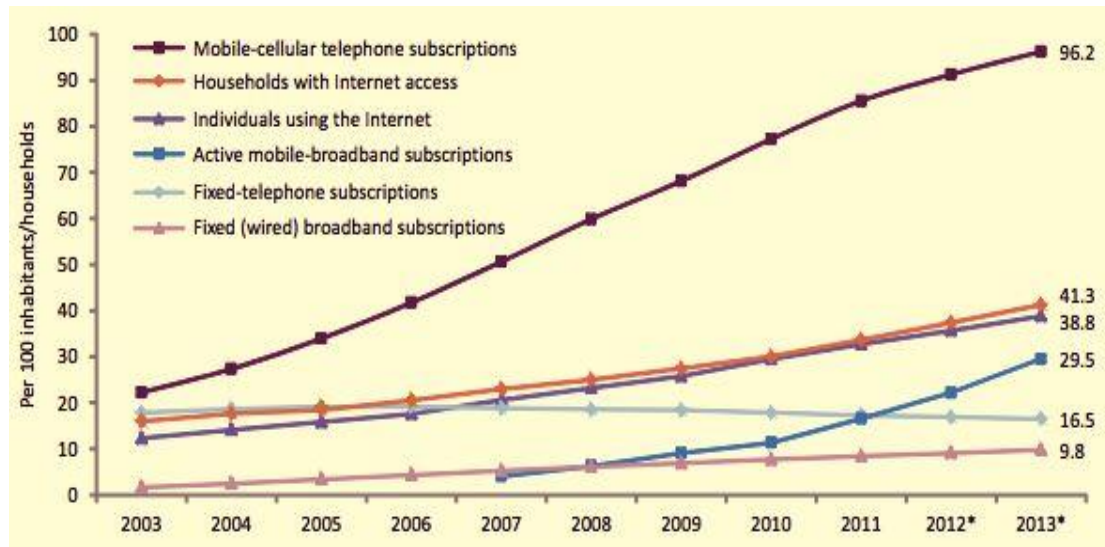
- Υψηλός ρυθμός απόδοσης (Throughput): έχει την δυνατότητα για υψηλούς ρυθμούς τόσο στην κατερχόμενη όσο και στην ανερχόμενη ζεύξη.
- Χαμηλότερη καθυστέρηση: Ο χρόνος που απαιτείται για την σύνδεση στο δίκτυο κυμαίνεται γύρω από ελάχιστες εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου καθιστώντας την μετάβαση από καταστάσεις εξοικονόμησης ενέργειας αμελητέα στον χρόνο εισόδου και εξόδου από την τερματική συσκευή.
- Δυνατότητα διπλεξίας FDD – TDD στην ίδια συσκευή: Είναι πλέον δυνατό η ίδια πλατφόρμα να λειτουργήσει και με FDD αλλά και με TDD διπλεξία.
- Απόλυτη εμπειρία του χρήστη: Μειωμένες καθυστερήσεις, βελτιστοποιημένη σηματοδότηση, καλύτερη διαχείριση κινητικότητας κ.α. καθιστούν την εμπειρία του χρήστη παραπάνω από ικανοποιητική.
- Ευκολία σύνδεσης: Ο χρήστης θα απολαμβάνει την ευκολία διασύνδεσης με τα υπάρχοντα δίκτυα όπως GSM, CDMA, WCDMA.
- Plug and play: Ο χρήστης δεν χρειάζεται να εγκαταστήσει κάποιο πρόγραμμα οδήγησης καθώς αυτόματα το σύστημα θα αναγνωρίζει την συσκευή και θα φορτώνει τους νέους οδηγούς που είναι απαραίτητοι σε περίπτωση που χρειάζεται.

- Η απλή αρχιτεκτονική: Εξαιτίας της απλής αρχιτεκτονικής του και σε αντίθεση με τα υφιστάμενα ασύρματα δίκτυα που λειτουργούν με μεταγωγή κυκλώματος ή πακέτου, το LTE λειτουργεί αποκλειστικά σε δίκτυο IP, καθιστώντας τα λειτουργικά του έξοδα – δαπάνες (OPEX) χαμηλά. Το οποίο συνεπάγεται για τον πάροχο μειωμένο κόστος και νέες υπηρεσίες που μπορεί να προσφέρει στον χρήστη κάνοντας το προϊόν του ανταγωνιστικό.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω πλεονεκτημάτων γίνονται κατανοητά και στην κλίμακα των αριθμών, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 2.2 και 2.3.



Σχήμα 2.2 Κάλυψη/κινητότητα ασύρματων και κινητών τεχνολογιών σε σχέση με το ρυθμό δεδομένων [23].

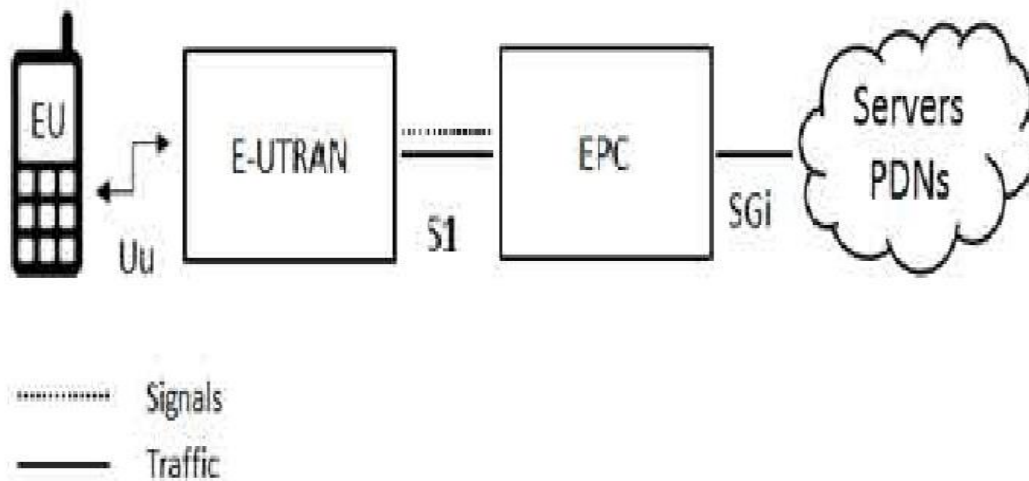


Σχήμα 2.3 Πρόσβαση σε σταθερή και κινητή ευρυζωνικότητα σε σχέση με τον αριθμό συνδέσεων [24].

2.6 Εξοπλισμός τεχνολογίας LTE.

Ο εξοπλισμός της τεχνολογίας LTE αποτελείται από:

- Το τερματικό (κάρτα ή τηλέφωνο) του χρήστη (Users Equipment - UE).
- Το σταθμό βάσης που ονομάζεται προηγμένος κόμβος (Evolved E - NodeB) και
- Το Δίκτυο Κορμού που ονομάζεται προηγμένο δίκτυο κορμού πακέτων EPC.
- Η USIM κάρτα, στην οποία αποθηκεύονται πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό του τηλεφώνου του χρήστη, την ταυτότητα του δικτύου του σπιτιού του καθώς και «κλειδιά» ασφαλείας.



Σχήμα 2.4 Γενικευμένη μορφή των μερών του δικτύου του LTE [25].

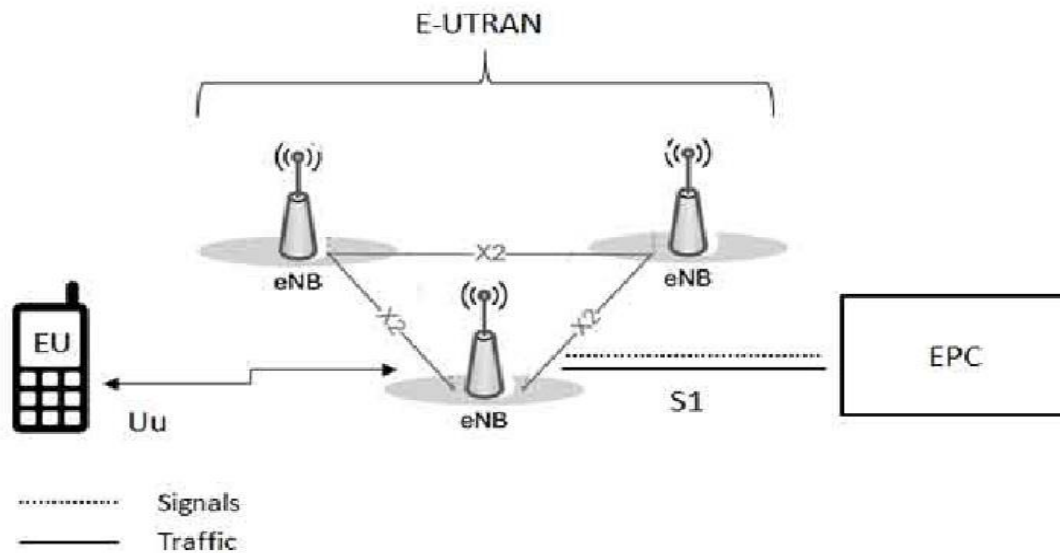
2.7 Το δίκτυο πρόσβασης E – UTRAN.

Το Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) χειρίζεται τις ραδιοεπικοινωνίες μεταξύ του κινητού και του EPC και αποτελείται από ένα στοιχείο, τους προηγμένους σταθμούς βάσης (E - NodeB). Κάθε E – NodeB ελέγχει τα κινητά τηλέφωνα σε μια ή περισσότερες κυψέλες.

Το κινητό τεχνολογίας LTE επικοινωνεί με έναν και μόνο έναν σταθμό βάσης και μια κυψέλη σε μια μονάδα χρόνου. Από τον σταθμό βάσης (E - NodeB) υποστηρίζονται οι εξής δύο λειτουργίες:

- Ο E – NodeB στέλνει και λαμβάνει ραδιοφωνικές μεταδόσεις σε όλα τα κινητά που βρίσκονται στην εμβέλεια του με την χρήση αναλογικών και ψηφιακών λειτουργιών επεξεργασίας σήματος μέσω της διεπαφής του αέρα.
- Ο E – NodeB ελέγχει την λειτουργία χαμηλού επιπέδου όλων των κινητών τηλεφώνων της εμβέλειάς του, με την αποστολή μηνυμάτων, όπως εντολές μεταβίβασης σηματοδότησης.

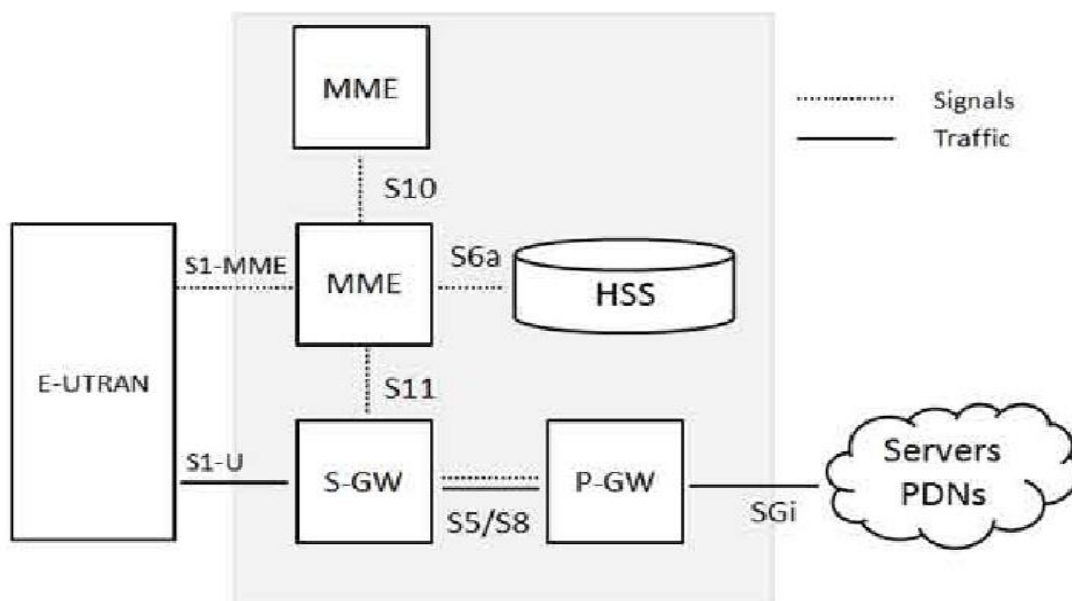
Κάθε E – NodeB συνδέεται με το EPC μέσω της διεπαφής S1 και μπορεί επίσης να συνδεθεί με τους κοντινούς σταθμούς βάσης από το περιβάλλον X2 όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.5**.



Σχήμα 2.5 Αρχιτεκτονική δικτύου LTE [25].

2.8 Το δίκτυο πυρήνα EPC.

Στο παρακάτω **Σχήμα 2.6** παρουσιάζεται απλουστευμένο το δίκτυο πυρήνα EPC.



Σχήμα 2.6 Το δίκτυο πυρήνα (Evolved Packet Core - EPC) [25].

Οι λειτουργίες των δομικών συστατικών του δικτύου πυρήνα EPC, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα είναι:

Home Subscriber Server (HSS)

Προέρχεται από τα παλαιότερης γενιάς δίκτυα όπως UMTS και GSM, και αποτελεί την κεντρική βάση δεδομένων, η οποία περιέχει σημαντικές πληροφορίες που αφορούν όλους τους συνδρομητές του παρόχου στο δίκτυο.

Packet Data Network (PDN) Gateway (P-GW)

Η πύλη του δικτύου των πακέτων δεδομένων είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία με τον έξω κόσμο (άλλα εξωτερικά δίκτυα PDN ή μια πλατφόρμα IP Multimedia Subsystem). Κάθε δίκτυο PDN έχει ένα χαρακτηριστικό όνομα σημείου πρόσβασης (Access Point Name - APN). Η πύλη αυτή είναι επίσης υπεύθυνη και για την απόδοση διευθύνσεων και προτεραιότητας, για την κατηγοριοποίηση των πακέτων καθώς και για τις διαδικασίες δρομολόγησης.

Serving Gateway (S-GW)

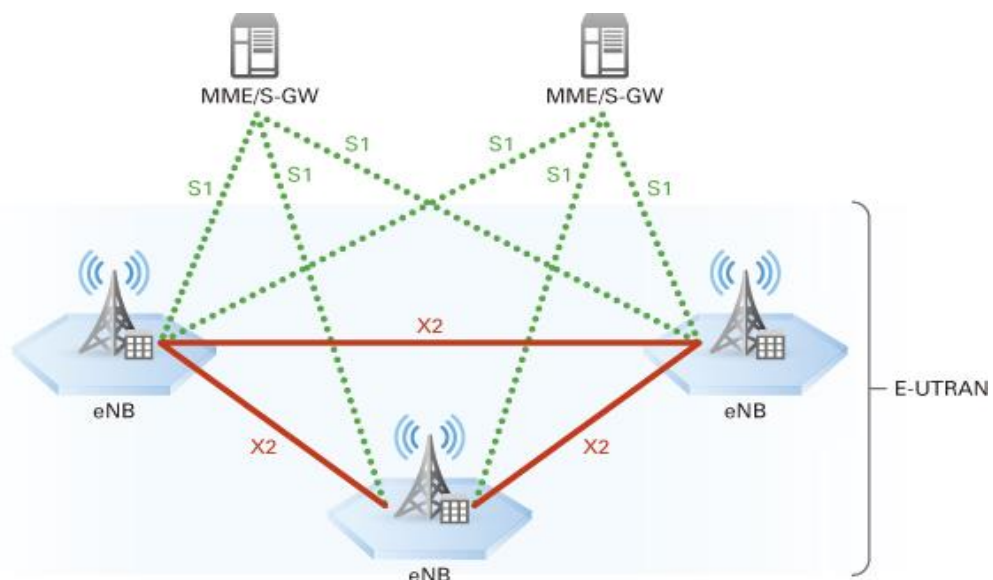
Η θύρα υπηρεσιών συμπεριφέρεται σαν router και προωθεί και λαμβάνει τα πακέτα ανάμεσα στους σταθμούς βάσης και στην θύρα δικτύου πακέτων δεδομένων (P - GW).

Mobility Management Entity (MME)

Ο φορέας διαχείρισης της κινητικότητας (MME) ελέγχει τη λειτουργία υψηλού επιπέδου του κινητού. Διαχειρίζεται την κινητικότητα του τελικού χρήστη και είναι υπεύθυνος για θέματα σηματοδότησης και ταυτοποίησης.

Policy Control and Charging Rules Function (PCRF)

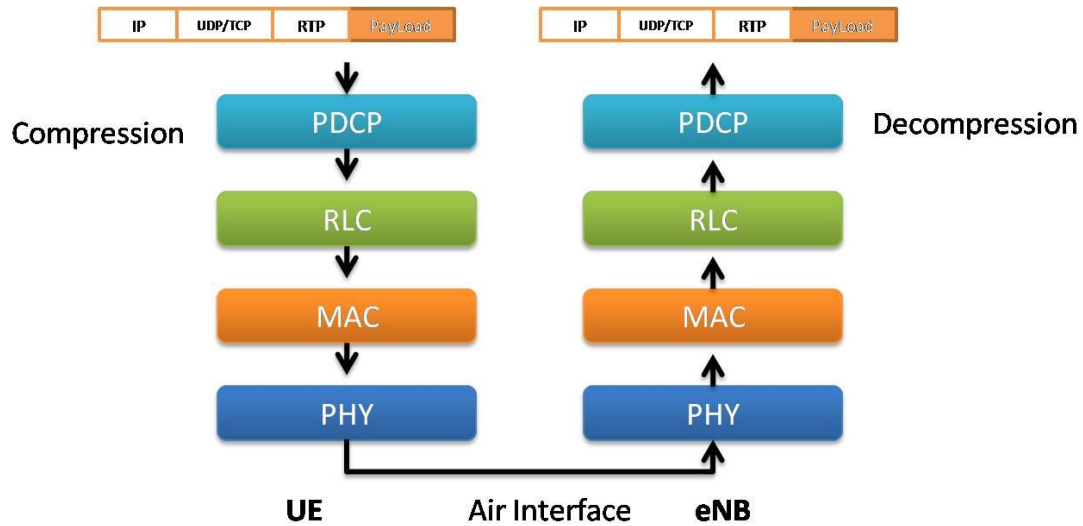
Η λειτουργία της πολιτικής ελέγχου και κανόνων φόρτισης είναι ένα συστατικό του δικτύου EPC, το οποίο όμως δεν φαίνεται στο **Σχήμα 2.6**, και είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο της πολιτικής διαδικασίας λήψης αποφάσεων, καθώς και για τον έλεγχο των λειτουργιών με βάση τη ροή φόρτισης στην λειτουργία Policy Control Enforcement Function (PCEF), η οποία βρίσκεται στο P-GW.



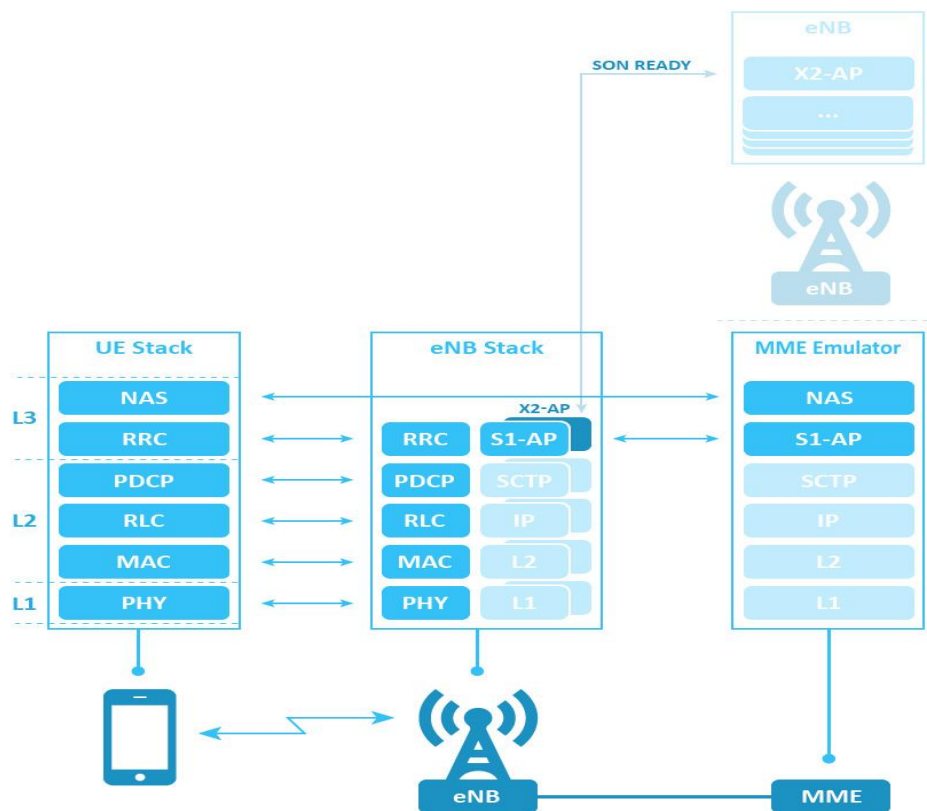
Σχήμα 2.7 Προηγμένη Αρχιτεκτονική Δικτύου 4G [26].

Στο δίκτυο κορμού (EPC) γίνεται η εκτέλεση συγκεκριμένων λειτουργιών, που του επιτρέπουν την σύνδεση με άλλα ετερογενή ασύρματα δίκτυα. Οι πάροχοι έχουν την δυνατότητα διαχείρισης σημαντικών λειτουργιών όπως την κινητικότητα, τη χρέωση, τη

μεταπομπή, τις διαδικασίες ασφαλείας και την πιστοποίηση. Η στοίβα πρωτοκόλλων για το επίπεδο χρήστη και το επίπεδο ελέγχου φαίνεται στο **Σχήμα 2.8** και **2.9** αντίστοιχα. Τα πρωτόκολλα θα αναλυθούν στην συνέχεια.



Σχήμα 2.8 Στοίβα πρωτοκόλλων για το επίπεδο χρήστη[27].



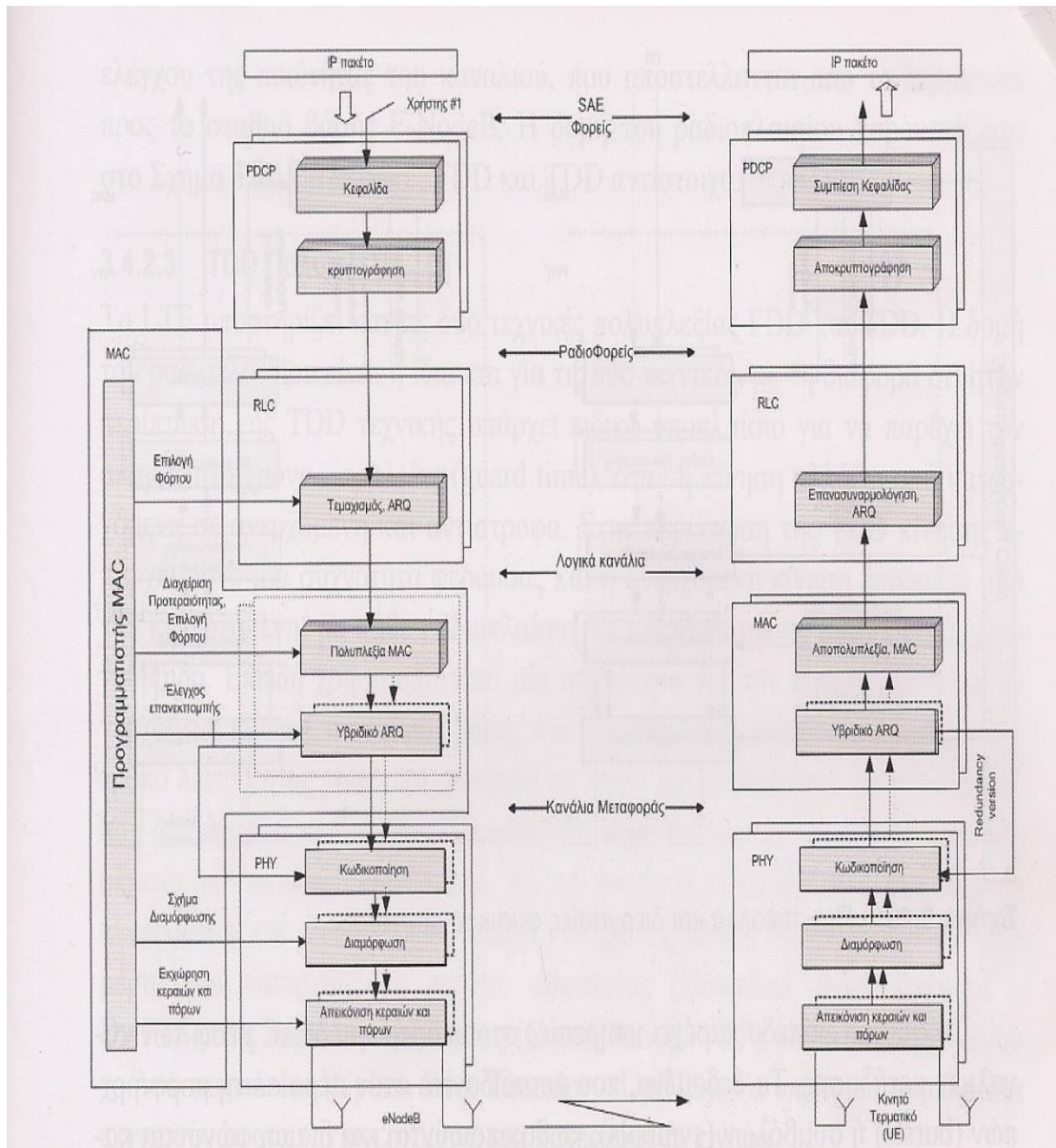
Σχήμα 2.9 Στοίβα πρωτοκόλλων για το επίπεδο ελέγχου.

Μια άλλη λειτουργία του EPC είναι να προβλέπει την δυνατότητα για απόδοση προτεραιότητας μεταξύ διαφόρων ειδών κίνησης. Εφαρμογές του τύπου VoIP, μετάδοση αρχείων ήχου και βίντεο έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας και πρέπει να διαχωρίζονται από την απλή μεταφορά δεδομένων.

Η απόδοση της προτεραιότητας γίνεται με την χρήση συνδέσεων ποιότητας υπηρεσιών μεταξύ του χρήστη και του P – GW. Έτσι, κάθε ροή ποιότητας υπηρεσιών συσχετίζεται με ένα συγκεκριμένο φορέα EPC. Με αυτόν τον τρόπο το δίκτυο μπορεί να κατηγοριοποιεί τα δεδομένα, καθώς κάθε φορέας έχει συγκεκριμένο προφίλ ποιότητας υπηρεσιών, το οποίο επιτρέπει στο P – GW, όταν λαμβάνει ένα πακέτο, να κατηγοριοποιεί τα δεδομένα του σε σύγκριση με τα στοιχεία του προφίλ EPC και στην συνέχεια να τα προωθεί με κατάλληλο τρόπο στο υπόλοιπο δίκτυο.

2.9 Πρωτόκολλα τεχνολογίας LTE.

Η τεχνολογία LTE αφορά τα πρώτα δύο στρώματα, δηλαδή το φυσικό στρώμα (physical layer) και το στρώμα ζεύξης δεδομένων (data link layer), του μοντέλου αναφοράς διασύνδεσης ανοικτών συστημάτων (Reference Model for Open System Interconnection - OSI). Η αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου, που περιγράφει τα δύο πρώτα επίπεδα του LTE για την κατερχόμενη ζεύξη παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.10** και είναι παρόμοια με την ανερχόμενη κίνηση του συστήματος.



Σχήμα 2.10 Δομή πρωτοκόλλων και διεργασίες στο LTE [3].

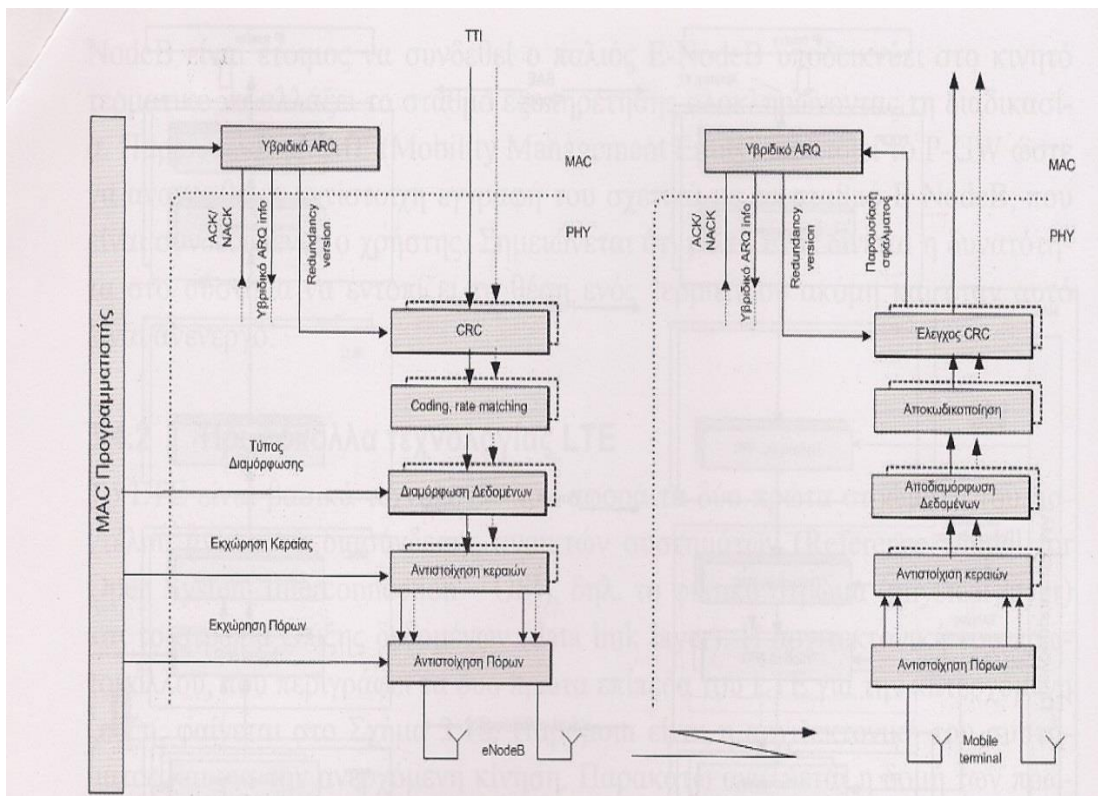
2.9.1 Χαρακτηριστικά Φυσικού Επιπέδου LTE.

Είναι γνωστό από την ενότητα 2.3 πως το LTE χρησιμοποιεί την τεχνική OFDMA για την κατερχόμενη κίνηση και την τεχνική SC – FDMA για την ανερχόμενη κίνηση. Τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν το φυσικό επίπεδο μιας οποιαδήποτε κινητής τεχνολογίας είναι ο

σημαντικότερος παράγοντας ο οποίος καθορίζει τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων, την καθυστέρηση και την ραδιοκάλυψη του σήματος.

Το στρώμα φυσικού επιπέδου είναι υπεύθυνο για τις εξής ενέργειες: την επεξεργασία του υβριδικού ARQ (Hybrid - ARQ), την επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης του σήματος και την αντιστοίχιση του σήματος στους κατάλληλους φυσικούς πόρους στα πεδία του χρόνου και των συχνοτήτων **Σχήμα 2.11**. Στο φυσικό επίπεδο γίνεται επίσης και η αντιστοίχιση των καναλιών μετάδοσης στα κανάλια φυσικού επιπέδου.

Με την χρήση των καναλιών μετάδοσης το φυσικό επίπεδο παρέχει υπηρεσίες στο υπόστρωμα MAC. Τα δεδομένα μεταδίδονται στον αέρα σε ριπές (bursts) ή σύμβολα (symbols), κωδικοποιούνται και διαμορφώνονται κατάλληλα, χρησιμοποιώντας δυναμικά, ανάλογα με την ποιότητα του φυσικού καναλιού, μια από τις διαμορφώσεις QPSK, 16 - QAM, 64 - QAM, ενώ στην συνέχεια ακολουθεί πολυπλεξία πλαισίων με την χρήση της τεχνικής OFDMA[3].



Σχήμα 2.11 Πρωτόκολλα και διεργασίες φυσικού επιπέδου[3].

2.9.2 Χαρακτηριστικά του Στρώματος Ζεύξης Δεδομένων.

Για την επέκταση των υπηρεσιών ασφαλείας, αξιοπιστίας και ποιότητας που παρέχουν τα ανώτερα στρώματα χρησιμοποιείται το δεύτερο επίπεδο του προτύπου OSI, το οποίο θα αναλύσουμε σε αυτήν την ενότητα.

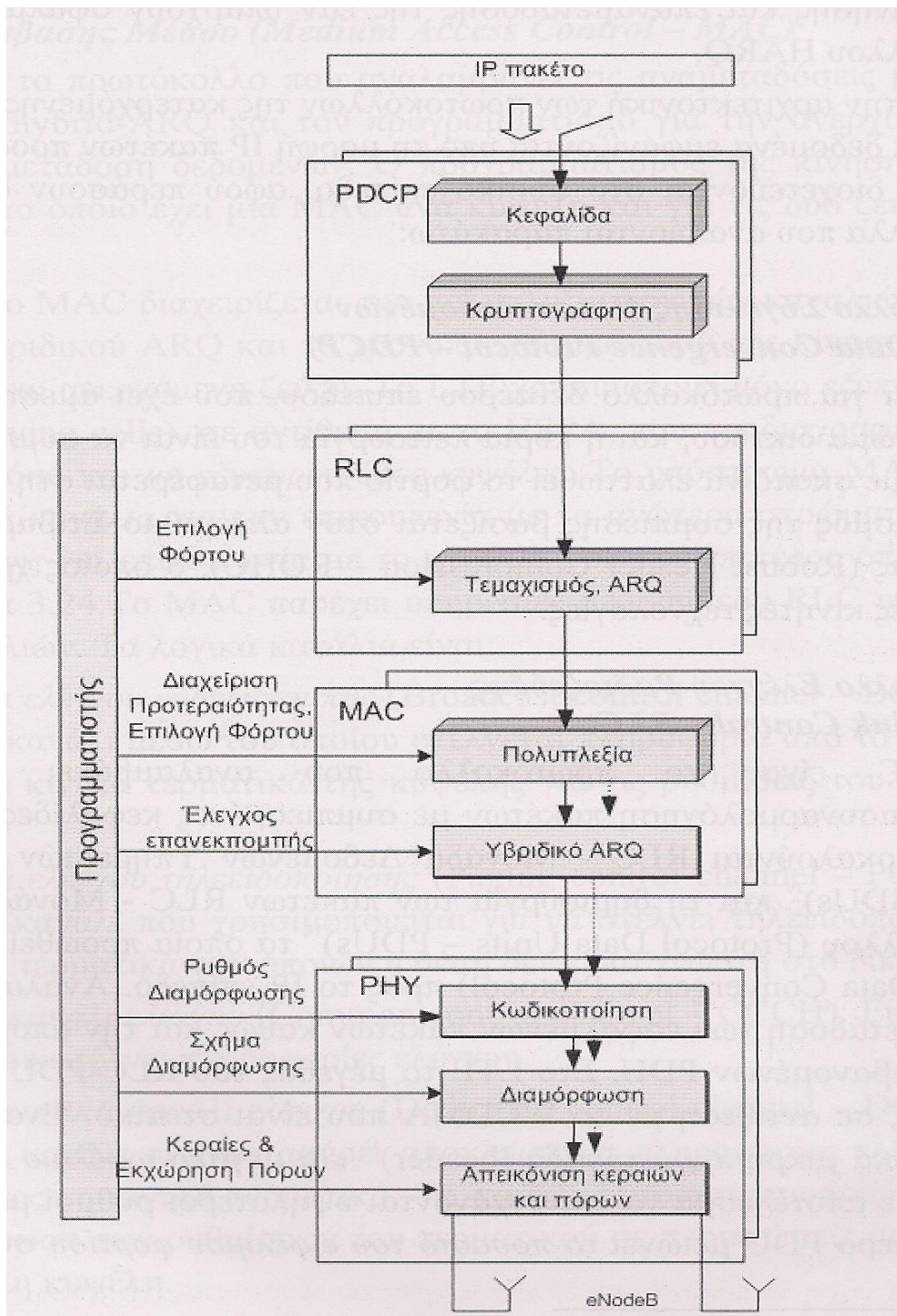
Το επίπεδο Στρώματος Ζεύξης Δεδομένων (Data Link Layer) είναι υπεύθυνο για την πρόσβαση και τον προγραμματισμό των χρηστών.

Από τις κυριότερες εργασίες του, είναι η προσφορά της απαραίτητης αξιοπιστίας στο IP επίπεδο για την παροχή της υπηρεσίας φωνής (VoIP) με χαμηλές καθυστερήσεις προκειμένου να μη χάνεται η ποιότητα.

Η δομή – αρχιτεκτονική αυτού του επιπέδου καθώς επίσης και η σύνδεσή του με το ανώτερο αλλά και με το κατώτερο επίπεδο φαίνεται στο **Σχήμα 2.12**.

Το Στρώμα Ζεύξης Δεδομένων αποτελείται από:

- Το πρωτόκολλο σύγκλισης πακετοδεδομένων (Packet Data Convergence Protocol - PDCP), το οποίο χρησιμοποιείται για την συμπίεση των κεφαλίδων (headers).
- Το Radio Link Control (RLC) Πρωτόκολλο, το οποίο χρησιμοποιείται για την ορθή μετάδοση κίνησης καθώς επιλέγει και ρυθμίζει το κατάλληλο μέγεθος πλαισίου για μετάδοση στα κατώτερα στρώματα.
- Ο Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου (Medium Access Control - MAC), ο οποίος εκτελεί τις λειτουργίες προγραμματισμού και προτεραιότητας της κίνησης. Επίσης ελέγχει την κίνηση και την επαναμετάδοση στην περίπτωση που προκύψουν σφάλματα.



Σχήμα 2.12 Δομή Πρωτοκόλλων του Στρώματος Ζεύξης σε Κατερχόμενη Ζεύξη στο LTE[3].

Είναι εμφανές από την αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων κατερχόμενης ζεύξης, πως τα δεδομένα τα οποία εμφανίζονται με την μορφή πακέτων IP μετακινούνται προς τους φορείς SAE (EPC) και

διοχετεύονται στο φυσικό επίπεδο περνώντας από πολλαπλά πρωτόκολλα τα οποία και θα αναλυθούν:

Πρωτόκολλο Σύγκλισης Πακετοδομημένων PDCP.

Είναι το πρωτόκολλο δευτέρου επιπέδου το οποίο έχει άμεση επαφή με το τρίτο στρώμα του δικτύου. Η βασικότερη λειτουργία του είναι η συμπίεση της πληροφορίας με σκοπό την μείωση του φορτίου που διοχετεύεται για μεταφορά στην ραδιοεπαφή μας.

Ο αλγόριθμος που είναι υπεύθυνος για την συμπίεση αυτή είναι ο αλγόριθμος Στιβαρής Συμπίεσης Κεφαλίδας (Robust Header Compression - ROHC) και είναι αρκετά διαδεδομένος στις κινητές τεχνολογίες.

Πρωτόκολλο Ελέγχου Ραδιοζεύξης RLC.

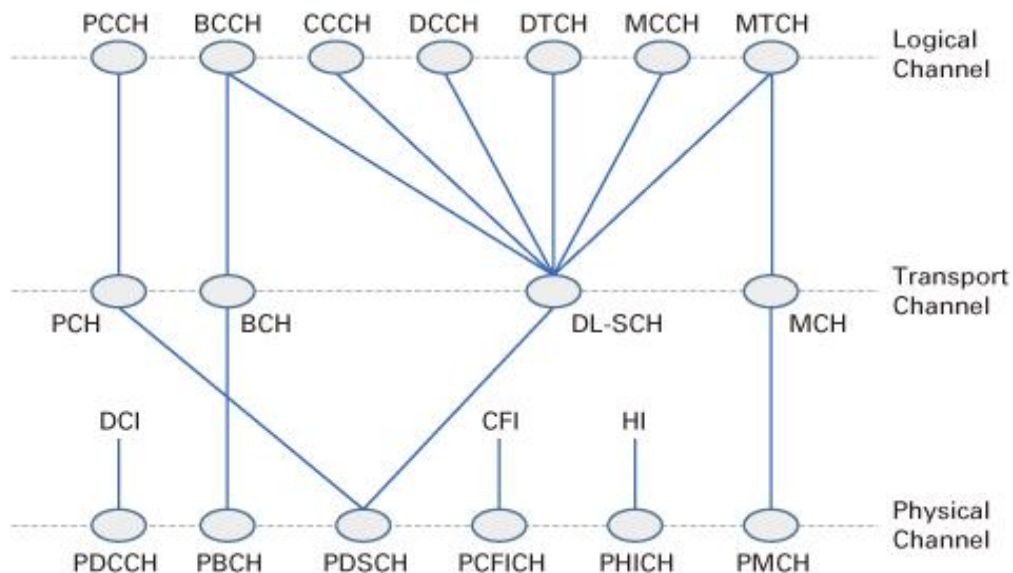
Οι λειτουργίες του πρωτοκόλλου RLC είναι ο τεμαχισμός και η επανασυναρμολόγηση πακέτων με συμπιεσμένες κεφαλίδες, τα αποκαλούμενα RLC – SDUs (Service Data Units ή Μονάδα Δεδομένων Υπηρεσιών), καθώς επίσης και για την δημιουργία των πακέτων RLC – PDUs (Protocol Data Units ή Μονάδα Δεδομένων Πρωτοκόλλου) τα οποία και προωθεί από το προαναφερόμενο PDCP προς το IP επίπεδο.

Άλλη μια λειτουργία του RLC είναι η αναμετάδοση των εσφαλμένων πακέτων και η απομάκρυνση των επαναλαμβανόμενων PDUs. Ένα μεγάλο PDU έχει μικρή κεφαλίδα και μεγάλο ωφέλιμο φορτίο πληροφορίας, με αποτέλεσμα το δίκτυο να επιτυγχάνει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, σε αντίθεση με ένα μικρό PDU που επαναλαμβάνεται και μειώνει το ποσοστό του ωφέλιμου φορτίου και κατ' επέκταση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων.

Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου MAC.

Το πρωτόκολλο MAC είναι υπεύθυνο για τις αναμεταδόσεις μέσω του πρωτοκόλλου Hybrid – ARQ και τον προγραμματισμό για την μετάδοση δεδομένων, ανερχόμενη και κατερχόμενη. Ο προγραμματισμός της κίνησης γίνεται στον σταθμό βάσης eNodeB, στον οποίο υπάρχει μια MAC ανά κυψέλη και για τις δύο ζεύξεις.

Το επίπεδο MAC διαχειρίζεται την πολυπλεξία των λογικών καναλιών, τις επαναμεταδόσεις Hybrid – ARQ καθώς επίσης και τον χρονοπρογραμματισμό της κίνησης, τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη. Για να το κάνει αυτό, το επίπεδο MAC, χρησιμοποιεί λογικά κανάλια για την επικοινωνία με τα ανώτερα στρώματα και κανάλια μετάδοσης για την επικοινωνία με το στρώμα φυσικού επιπέδου. **Σχήμα 2.13.**



Σχήμα 2.13 Απεικόνιση και συσχετισμός καναλιών κατερχόμενης ζεύξης [28].

Τα λογικά κανάλια είναι:

- Κανάλι Ελέγχου Ευρυεκπομπής (Broadcast Control Channel - BCCH): Δια μέσου αυτού του καναλιού στέλνεται η πληροφορία από το δίκτυο σε όλες τις τερματικές συσκευές της κυψέλης για τις ρυθμίσεις του συστήματος.
- Κανάλι Ελέγχου Τηλεειδοποίησης (Paging Control Channel - PCCH): Είναι το κανάλι που χρησιμοποιείται για να σταλούν ειδοποιήσεις προς τις τερματικές συσκευές των οποίων η θέση στο δίκτυο είναι άγνωστη.
- Κοινό Κανάλι Ελέγχου (Common Control Channel): Μέσα από αυτό το κανάλι στέλνονται πληροφορίες σχετικές με τον έλεγχο.
- Αποκλειστικό Κανάλι Ελέγχου (Dedicated Control Channel - DCCH): Μεταφέρει αποκλειστικά πληροφορίες από και προς τις τερματικές συσκευές. Χρησιμοποιείται για την διόρθωση των ρυθμίσεων του τερματικού σε περιπτώσεις μεταπομπής σε άλλη κυψέλη.
- Κανάλι Ελέγχου Πολυεκπομπής (Multicast Control Channel - MCCH): Μεταφέρει πληροφορίες ελέγχου για την λήψη πληροφοριών σχετικών με την πολυεκπομπή.
- Αποκλειστικό Κανάλι Κίνησης (Dedicated Traffic Channel - DTCH): Αυτό το κανάλι χρησιμοποιείται για να μεταδώσει κίνηση δεδομένων από και προς την τερματική συσκευή του χρήστη.
- Κανάλι Πολυεκπομπής Κίνησης (Multicast Traffic Channel - MTCH): Χρησιμοποιείται για την μετάδοση υπηρεσιών ευρυεκπομπής και πολυεκπομπής στην κατερχόμενη ζεύξη.

Το επίπεδο MAC επικοινωνεί με το φυσικό επίπεδο με την χρήση των καναλιών μεταφοράς (μετάδοσης). Στα κανάλια μετάδοσης εμπεριέχονται πληροφορίες σχετικές με τα χαρακτηριστικά των δεδομένων που μεταφέρονται με την ραδιοεπαφή.

Τα κανάλια μεταφοράς (μετάδοσης) είναι:

- Κανάλι Ευρυεκπομπής (Broadcast Channel - BCH): Χρησιμοποιείται για να μεταδίδει προς όλους τους χρήστες βασικά μέρη του BCCH.
- Κανάλι Τηλεειδοποίησης (Paging Channel - PCH): Χρησιμοποιείται για την μετάδοση πληροφορίας από το λογικό κανάλι PCCH.
- Μεριζόμενο Κανάλι Κατερχόμενης Ζεύξης (Downlink Shared Channel – DL- SCH): Το κυριότερο κανάλι μεταφοράς δεδομένων στην κατερχόμενη ζεύξη. Υποστηρίζει δυναμικά προσαρμοζόμενους ρυθμούς μετάδοσης, προγραμματίζει την κίνηση ανάλογα με την ποιότητα του καναλιού στα πεδία χρόνου και συχνοτήτων, υποστηρίζει Hybrid – ARQ και χωρική πολυπλεξία.
- Κανάλι Πολυεκπομπής (Multicast Channel - MCH): Υποστηρίζει υπηρεσίες MBMS.
- Κανάλι τυχαίας πρόσβασης (Random Access Channel - RACH): Ορίζεται ως κανάλι μετάδοσης.

2.10 Προγραμματιστής – Scheduler.

Ο Προγραμματιστής είναι ένα μέρος του επιπέδου MAC που αναλύσαμε στην προηγούμενη ενότητα. Βρίσκεται στον σταθμό βάσης eNodeB και η λειτουργία του είναι η διαχείριση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη κίνηση. Συγκεκριμένα, η βασική λειτουργία του είναι ο δυναμικός προγραμματισμός της κίνησης που μεταδίδεται σε συγκεκριμένα τερματικά σε διαστήματα χρόνου μετάδοσης (Transmission Time Interval - TTI) 1ms.

Ο προγραμματισμός είναι διαφορετικός για την ανερχόμενη και την κατερχόμενη κίνηση καθώς οι αποφάσεις παίρνονται ανεξάρτητα και μετά από ανταλλαγή μηνυμάτων ελέγχου μεταξύ της τερματικής συσκευής και του eNodeB.

2.10.1 Προγραμματιστής κατερχόμενης κίνησης.

Η λειτουργία του Προγραμματιστή κατερχόμενης κίνησης είναι να ελέγχει δυναμικά τις τερματικές συσκευές στις οποίες έχει να μεταδώσει κίνηση αλλά και το πλήθος των πλαισίων που θα αποσταλούν μέσω του καναλιού DL – SCH.

Κάθε τερματική συσκευή αποστέλλει πληροφορίες που αφορούν την ποιότητα του καναλιού στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας, αυτές τις πληροφορίες επεξεργάζεται ο Προγραμματιστής και παρέχει πόρους για την κατερχόμενη κίνηση στα κινητά τερματικά.

Επομένως, οι λειτουργίες του Προγραμματιστή κατερχόμενης κίνησης συνοψίζονται στον έλεγχο του ρυθμού μετάδοσης και στην ευθύνη που φέρει για τον τεμαχισμό της πληροφορίας στο υπόστρωμα RLC αλλά και την πολυπλεξία στο υπόστρωμα MAC.

2.10.2 Προγραμματιστής ανερχόμενης κίνησης

Ομοίως με τον Προγραμματιστή κατερχόμενης κίνησης, ο Προγραμματιστής ανερχόμενης κίνησης επιλέγει δυναμικά τα τερματικά που θα εκπέμπουν μέσα από το κανάλι UL – SCH, προκειμένου να τους αναθέσει τους απαραίτητους πόρους στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας.

Ο Προγραμματιστής ανερχόμενης κίνησης είναι υπεύθυνος για το ωφέλιμο φόρτο του τερματικού, ενώ το τερματικό είναι υπεύθυνο για την επιλογή του πλέον κατάλληλου ραδιοκομιστή (radio bearer) για την

αποστολή της κίνησης με την χρήση της τεχνικής χωρικής πολυπλεξίας. Με την μέθοδο αυτή οι ραδιοκομιστές χρησιμοποιούνται με προτεραιότητα, σύμφωνα με την επιλεγμένη ποιότητα υπηρεσίας ή τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης.

Δεδομένου ότι στο πρότυπο του LTE δεν ορίζεται ακριβώς η λειτουργία του Προγραμματιστή (και της ανερχόμενης αλλά και της κατερχόμενης κίνησης), υπάρχει μεγάλος βαθμός ελευθερίας στον τρόπο υλοποίησης του, κάτι το οποίο επαφίεται στην κρίση και στις επιλογές του κατασκευαστή παρόχου.

2.11 Μελλοντικές Εξελίξεις.

Η τεχνολογία του LTE, από την στιγμή της δημιουργίας της μέχρι και σήμερα, έχει επιβεβαιώσει όσους αναμένανε να την δουν ως την τεχνολογία που θα κυριαρχήσει στις κινητές επικοινωνίες. Οι νέες υπηρεσίες και οι εφαρμογές που προκύπτουν και που θα προκύψουν από την σύγκλιση των δικτύων σε ένα ενιαίο δίκτυο IP θα απαιτούν όλο και υψηλότερες ταχύτητες πρόσβασης.

Αργά η γρήγορα η απαίτηση νέου φάσματος από τα νέα δίκτυα προκειμένου να καλυφθεί ο όγκος της διαδικτυακής κίνησης θα αποτελεί γεγονός και για τον λόγο αυτό η ITU έχει ήδη οργανώσει ομάδες εργασίες, όπως η ITU – R WP5D, οι οποίες θα οδηγήσουν στην νέα τεχνολογία LTE – Advanced. Με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που θα προσεγγίζουν τα 100 Mbps για χρήστες υψηλής κινητικότητας και 1 Gbps για χρήστες χαμηλής κινητικότητας, οι δυνατότητες για ανάπτυξη νέων υπηρεσιών και νέων εφαρμογών που μέχρι τώρα φάνταζαν αδύνατες θα είναι γεγονός.



Εικόνα 2.1 Logo LTE Advanced 3GPP [29].

3. Η δομή του LTE πλαισίου.

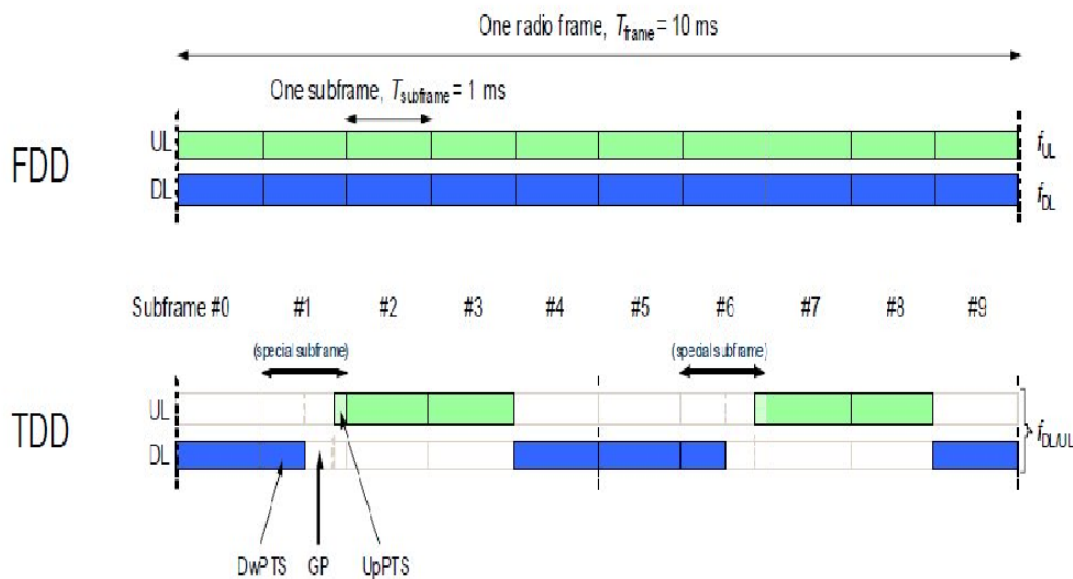
3.1 Περίληψη.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την δομή κίνησης του φυσικού επιπέδου και συγκεκριμένα με την μορφή του ράδιο – πλαισίου (radio frame) τόσο στην TDD πολυπλεξία όσο και στην FDD πολυπλεξία. Στην συνέχεια θα αναφερθούμε στο πλέγμα των πόρων (Resource Grid) και την συσχέτισή του με το υποπλαίσιο (subframe) και την χρονοθυρίδα (Time Slot - Tslot). Θα αναπτύξουμε τα φυσικά κανάλια (physical channels) που παρατηρήσαμε στο 2^ο κεφάλαιο, καθώς επίσης και τα σημαντικότερα σήματα (signals), πακέτα ελέγχου (control packets) και επαναλαμβανόμενα πακέτα πληροφοριών (όπως τα MIB), τα οποία είναι απαραίτητα για την μετάδοση και λήψη δεδομένων.

3.2 Η Δομή Κίνησης στο Φυσικό Επίπεδο.

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται το πλαίσιο (frame) και το υποπλαίσιο (subframe). Ακολουθούν την τεχνική πολυπλεξίας OFDMA, σύμφωνα με την οποία αποστέλλεται ταυτόχρονα ένα μεγάλο πλήθος υποφερουσών με απόσταση μεταξύ τους $\Delta f = 15\text{KHz}$. Το κάθε πλαίσιο έχει συνολική διάρκεια 10 ms και αποτελείται από συνολικά 10 υποπλαίσια διάρκειας 1 ms το κάθε ένα. Κάθε υποπλαίσιο αποτελείται από 12-14 σύμβολα αναλόγως με την διάρκεια του κυκλικού προθέματος (Cyclic Prefix), η διάρκεια του οποίου κυμαίνεται από 4,7 μs μέχρι 16,7 μs ανάλογα με την περίπτωση και τις περιβάλλοντες παρεμβολές. Το μέγεθος (διάρκεια 1ms) τώρα του υποπλαισίου, προκαλεί καθυστερήσεις όχι μόνο στα πλαίσια δεδομένων αλλά και στα πλαίσια τα οποία μεταφέρουν μηνύματα ελέγχου και σηματοδοσίας, όπως το Hybrid – ARQ, το οποίο χρησιμοποιείται για την επανεκπομπή

απολεσθέντων πακέτων, και για τα πλαίσια ελέγχου της ποιότητας του καναλιού (CQI – θα αναλυθεί στην συνέχεια), που αποστέλλονται από τα τερματικά (UE) προς τους σταθμούς βάσης eNodeB[1]. Η δομή του ραδιοπλαίσιου για τις τεχνικές FDD και TDD αντίστοιχα φαίνεται στο **Σχήμα 3.1**.



Σχήμα 3.1 Δομή ραδιοπλαίσιου [30].

3.3 Πολυπλεξία TDD.

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα η δομή που ακολουθούν τα δύο πλαίσια είναι ίδια και για τις δύο τεχνικές. Η σημαντικότερη αλλαγή είναι πως στην περίπτωση της TDD πολυπλεξίας υπάρχει ένα ειδικό υποπλαίσιο (special subframe) το οποίο παρέχει τον απαιτούμενο χρόνο ασφαλείας (guard time), όταν η κίνηση αλλάζει από κατερχόμενη σε ανερχόμενη.

Στην περίπτωση της TDD κίνησης έχουμε μόνο μια φέρουσα συχνότητα και ο διαχωρισμός της ανερχόμενης από την κατερχόμενη κίνηση επιτυγχάνεται όταν κάθε ραδιοπλαίσιο τοποθετείται σε διαφορετική χρονοθυρίδα. Δεδομένου ότι χρησιμοποιείται μια

συχνότητα τόσο για την ανερχόμενη όσο και για την κατερχόμενη κίνηση, ο σταθμός βάσης και το κινητό τερματικό εναλλάσσουν τον τρόπο λειτουργίας (Downlink/Uplink configuration) τους από εκπομπή σε λήψη και αντίστροφα. Υπάρχουν 7 διαφορετικά είδη configuration για τις εναλλαγές στα υποπλαίσια του πλαισίου όπως φαίνονται στον **Πίνακα 3.1**.

1 πλαίσιο = 10ms

1 υποπλαίσιο = 1ms

DL - Υποπλαίσιο Κατερχόμενης Ζεύξης
UL - Υποπλαίσιο Ανερχόμενης Ζεύξης
SS - Υποπλαίσιο Ειδικής Μεταγωγής

0	DL	SS	UL	UL	UL	DL	SS	UL	UL	UL
1	DL	SS	UL	UL	DL	DL	SS	UL	UL	DL
2	DL	SS	UL	DL	DL	DL	SS	UL	DL	DL
3	DL	SS	UL	UL	UL	DL	DL	DL	DL	DL
4	DL	SS	UL	UL	DL	DL	DL	DL	DL	DL
5	DL	SS	UL	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DL
6	DL	SS	UL	UL	UL	DL	SS	UL	UL	DL

Πίνακας 3.1 Εναλλαγή από ανερχόμενη σε κατερχόμενη κίνηση σύμφωνα με το Configuration [31].

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κίνηση είναι απαραίτητη η χρήση του χρόνου ασφαλείας, που παρέχεται από το ειδικό υποπλαίσιο, προκειμένου να αποφευχθούν παρεμβολές ανάμεσα στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη κίνηση. Ο χρόνος αυτός αποτελείται από 3 τμήματα:

1. Κατερχόμενος χρόνος ασφαλείας (Downlink Pilot Timeslot - DwPTS).
2. Περιόδου ασφαλείας (Guard Period - GP).
3. Ανερχόμενου χρόνου ασφαλείας (Uplink Pilot Timeslot - UpPTS).

Το σύνολο των υπόλοιπων υποπλαισίων παρέχονται για την ανερχόμενη και την κατερχόμενη κίνηση, όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 3.1.** [3].

Οι μπάντες και το εύρος συχνοτήτων στα οποία λειτουργεί η TDD πολυπλεξία, καθώς επίσης και οι γεωγραφικές περιοχές που αυτές εφαρμόζονται φαίνονται στον **Πίνακα 3.2.**

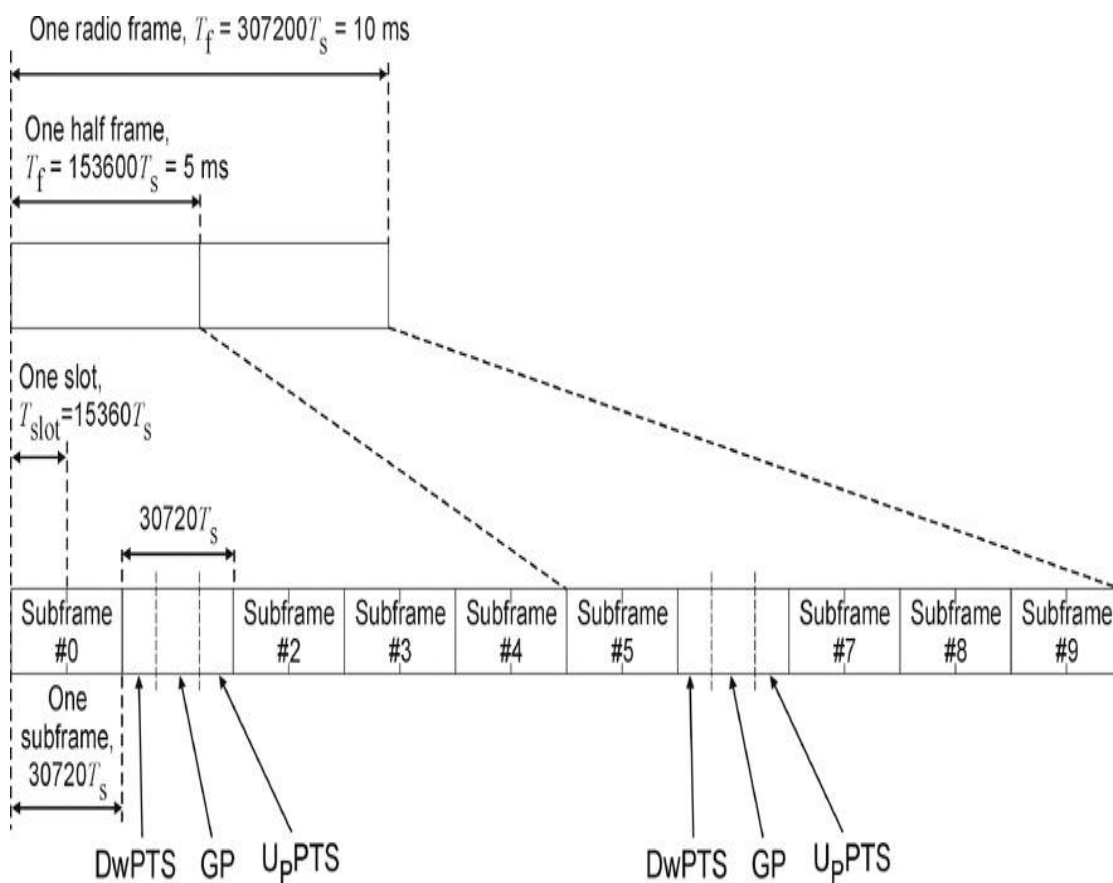
Αριθμός μπάντας LTE	Κατανομή (MHz)	Κύριες περιοχές χρήσης
33	1900 - 1920	Ασία (εκτός Ιαπωνίας), Ευρώπη
34	2010 - 2025	Ασία, Ευρώπη
35	1850 - 1910	Αμερική
36	1930 - 1990	Αμερική
37	1910 - 1930	
38	2570 - 2620	Ευρώπη
39	1880 - 1920	Κίνα
40	2300 - 2400	Ασία, Ευρώπη
41	2496 - 2690	ΗΠΑ

Πίνακας 3.2 LTE TDD Frequency bands [32].

3.3.1 TDD frame.

Στην πολυπλεξία TDD η δομή του πλαισίου, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.2**, αποτελείται από δέκα υποπλαίσια (subframes) των 1ms το κάθε ένα. Το κάθε υποπλαίσιο μπορεί να παραχωρηθεί για ανερχόμενη ή για κατερχόμενη κίνηση ή θα είναι το ειδικό υποπλαίσιο που αναλύσαμε στην αρχή της ενότητας.

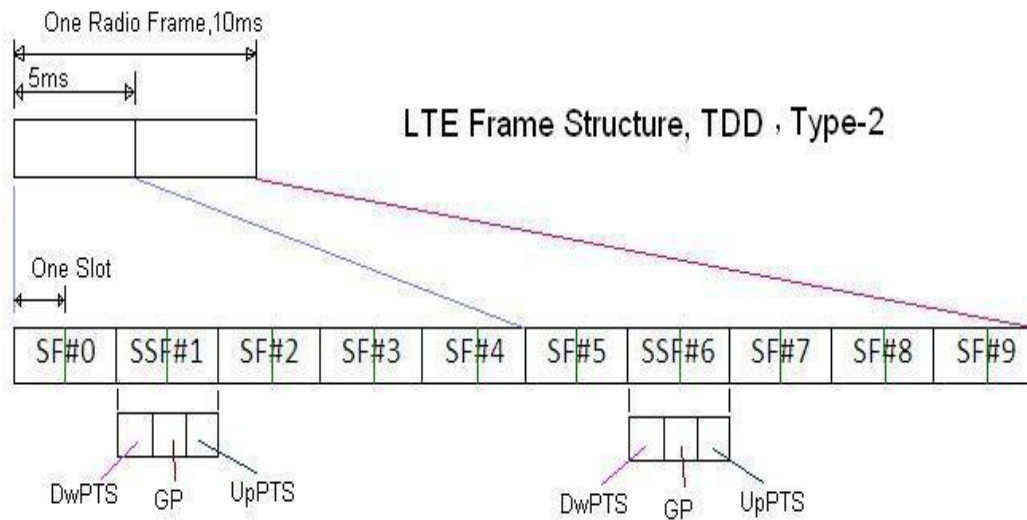
Μια χρονοθυρίδα ορίζεται ως το χρονικό διάστημα των 0.5 ms, είναι ίση δηλαδή με το μισό υποπλαίσιο. Για αυτό δύο συνεχόμενες χρονοθυρίδες αποτελούν ένα υποπλαίσιο[33].



Σχήμα 3.2 TDD radioframe [34].

Για την καλύτερη κατανόηση των μέχρι τώρα αναφορών θα παραθέσουμε ένα παράδειγμα σύμφωνα με τα configuration του

Πίνακα 3.1. Το αποτέλεσμα θα είναι το πλαίσιο που φαίνεται στο **Σχήμα 3.3**.



Σχήμα 3.3 Παράδειγμα υποπλαισίων διαμόρφωσης πλαισίου 2 [35].

Όπως παρατηρούμε το πλαίσιο των 10 ms αναλύθηκε στα υποπλαίσια σύμφωνα με τον Πίνακα 3.1. Συγκεκριμένα, τα υποπλαίσια 1 και 6 είναι ειδικά υποπλαίσια, τα υποπλαίσια 2 και 7 έχουν παραχωρηθεί για ανερχόμενη κίνηση και τέλος τα υποπλαίσια 0,3,4,5,8 και 9 έχουν παραχωρηθεί για κατερχόμενη κίνηση.

3.3.2 Η Δομή της Χρονοθυρίδας (Tslot).

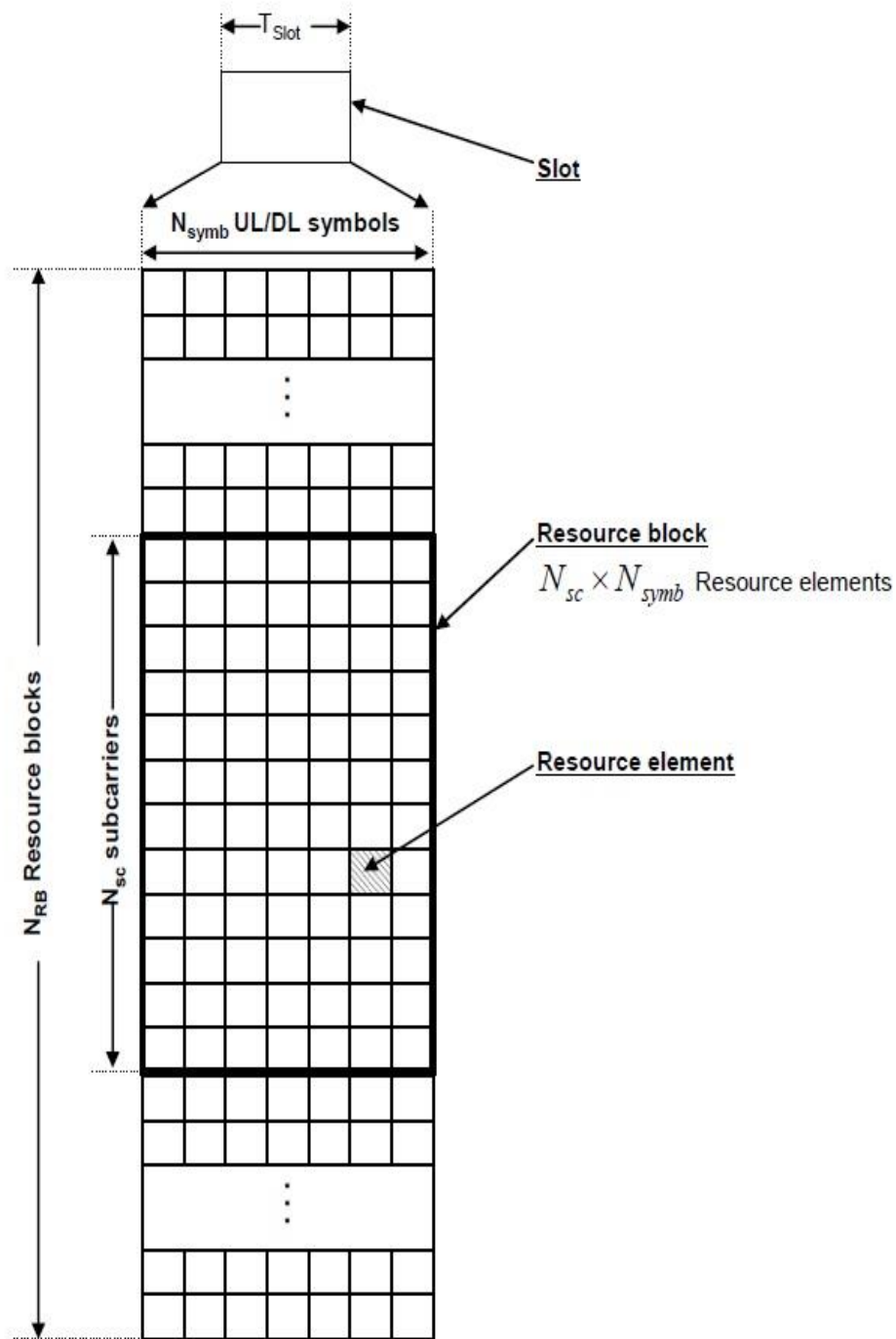
Για να κατανοήσουμε πλήρως την συσχέτιση των πόρων του δικτύου με την χρονοθυρίδα στην TDD πολυπλεξία, θα μελετήσουμε την δομή της χρονοθυρίδας και την ανάλυσή της σε πόρους δικτύου.

Αναλυτικότερα, πρέπει να μελετήσουμε τον **Πίνακα 3.3** στον οποίο φαίνονται ο αριθμός των υποφορών και των συμβόλων OFDMA ανά θυρίδα, ανάλογα με το αν έχουμε ανερχόμενη ή κατερχόμενη κίνηση καθώς και αν έχουμε φυσικό η επεκτάσιμο κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix).

	Διαμόρφωση	Απόσταση υπό φορέα	N_{cs}	N_{symb}
Κατερχόμενη ζεύξη	Κανονικό κυκλικό πρόθεμα	$\Delta f=15\text{kHz}$	12	7
	Διευρυμένο κυκλικό πρόθεμα	$\Delta f=15\text{kHz}$	12	6
		$\Delta f=7\text{kHz}$	24	3
Ανερχόμενη ζεύξη	Κανονικό κυκλικό πρόθεμα	$\Delta f=15\text{kHz}$	12	7
	Διευρυμένο κυκλικό πρόθεμα	$\Delta f=15\text{kHz}$	12	6

Πίνακας 3.3 Subcarriers and OFDMA Symbols[33].

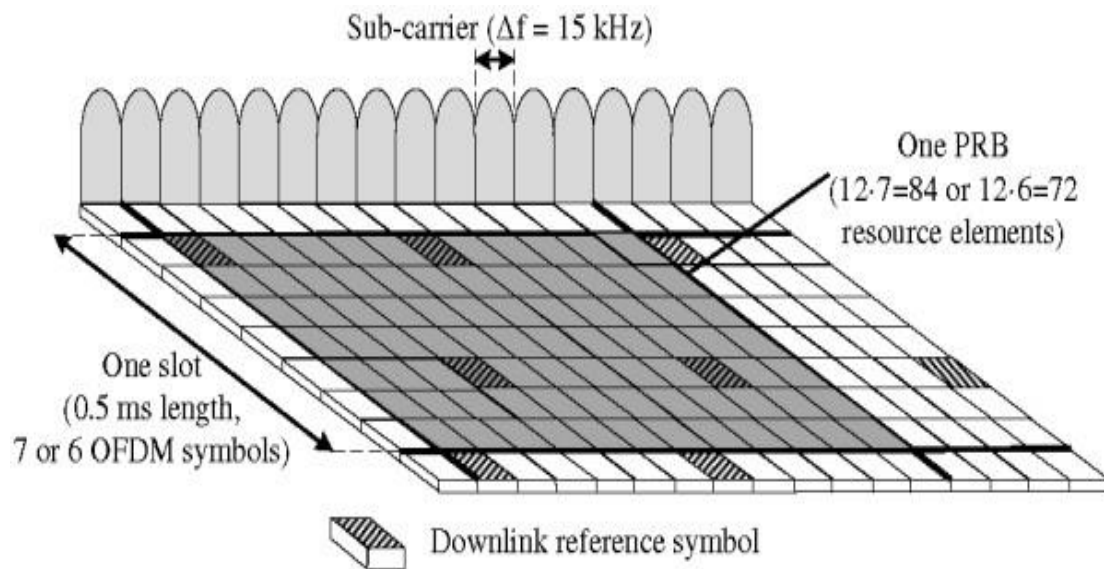
Την χρησιμότητα του Πίνακα 3.3 την αντιλαμβανόμαστε στην προσπάθεια να υπολογίσουμε των αριθμό των resource elements του κάθε resource block από τον τύπο $N_{sc} \times N_{symb}$ όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.4**.



Σχήμα 3.4 Δομή Χρονοθυρίδας[33].

3.4 Πολυπλεξία FDD.

Στην πολυπλεξία FDD, η τερματική συσκευή έχει την επιλογή να δουλεύει με αμφίδρομο (full duplex) ή με ημι – αμφίδρομο (half duplex) τρόπο. Όταν λειτουργεί με αμφίδρομο τρόπο, το τερματικό λαμβάνει και αποστέλλει ταυτόχρονα, ενώ στην περίπτωση που λειτουργεί με ημι – αμφίδρομο το τερματικό μπορεί μόνο να στέλνει ή να λαμβάνει.[1]



Σχήμα 3.5 Ραδιοδιάυλος Κατερχόμενης Ζεύξης [36].

3.5 Σύγκριση TDD – FDD.

Οι πάροχοι κινητών επικοινωνιών ξοδεύουν αρκετά χρήματα για την έκδοση των αδειών παροχής υπηρεσιών. Αναμένεται ότι η TDD πολυπλεξία θα προσφέρεται σε χαμηλότερες τιμές εν συγκρίσει με την FDD πολυπλεξία. Επίσης το φάσμα της TDD πολυπλεξίας είναι διαθέσιμο σε μεγαλύτερο αριθμό κρατών. Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα πως η τεχνολογία TDD πολυπλεξίας θα παρέχει πιο ανταγωνιστικό προϊόν, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερο ενδιαφέρον

τους παρόχους. Ορισμένοι παράγοντες που οδήγησαν σε αυτό το αποτέλεσμα αναλύονται στην συνέχεια.

Μειονεκτήματα FDD πολυπλεξίας.

- Το σύστημα δυπλεξίας απαιτεί έναν συνδυασμό φάσματος, που σημαίνει πως η κατερχόμενη και η ανερχόμενη ζεύξη θα μεταδίδονται σε διαφορετικό φάσμα συχνοτήτων.
- Παρατηρείται μεγάλη σπατάλη πόρων αν οι χρήστες των UE χρησιμοποιούν περισσότερες φορές το φάσμα κατερχόμενης ζεύξης ή αντίστροφα.
- Δεδομένου ότι διαφορετικό εύρος συχνοτήτων χρησιμοποιείται σε ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη, τα χαρακτηριστικά του διαύλου θα είναι διαφορετικά και στις δύο κατευθύνσεις. Επομένως τα τερματικά θα πρέπει να αναφέρουν τα χαρακτηριστικά του καναλιού κατερχόμενης ζεύξης στον σταθμό βάσης στα ανερχόμενης ζεύξης κανάλια επικοινωνίας.
- Τέλος, για την FDD πολυπλεξία προαπαιτείται ένας εξοπλισμός τόσο στις τερματικές συσκευές όσο και στους σταθμούς βάσης του δικτύου, κάτι που προσθέτει κόστος τόσο στον χρήστη όσο και στον πάροχο.

Πλεονεκτήματα TDD πολυπλεξίας.

- Δεν απαιτείται διπλό φάσμα, καθώς τόσο οι ανερχόμενες όσο και οι κατερχόμενες ζεύξης χρησιμοποιούν ένα ενιαίο κανάλι συχνοτήτων.
- Τα χαρακτηριστικά του καναλιού παραμένουν ίδια για ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη.
- Το κόστος παραμένει χαμηλό καθώς δεν είναι απαραίτητο duplexer ούτε στον σταθμό βάσης αλλά ούτε και στην τερματική συσκευή.

- Το φάσμα χρησιμοποιείται πιο αποτελεσματικά καθώς αν δεν υπάρχει ανερχόμενη ζεύξη οι τερματικές συσκευές μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλους τους πόρους για κατερχόμενη ζεύξη και αντίστροφα.

3.6 Πλέγμα Πόρων LTE (Resource Grid LTE).

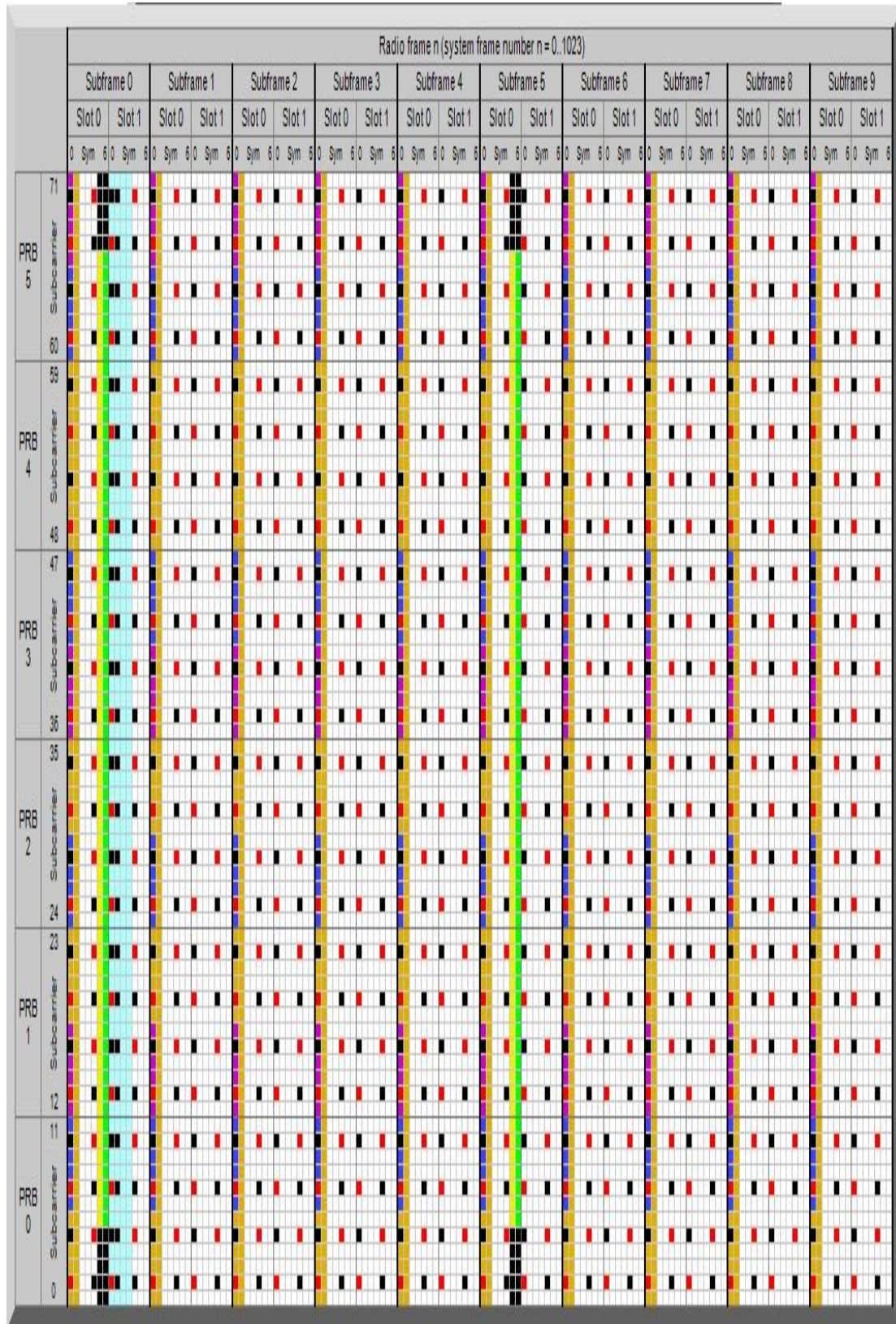
Όπως αναλύθηκε και στην ενότητα 3.3.2, το πλαίσιο των 10 ms αναλύεται σε υποπλαίσια του 1ms, τα οποία στην συνέχεια αναλύονται σε χρονοθυρίδες (Tslots) των 0.5 ms. Έγινε κατανοητή η μετατροπή των χαρακτηριστικών του καναλιού ($N_{\text{symb}}, N_{\text{sc}}$) σε διάθεση πόρων (RE, RB) ανά χρονοθυρίδα.

Με την βοήθεια του **Πίνακα 3.4** που μας δίνει τον αριθμό των Physical Resource Block ανά κανάλι, θα μεταβούμε από την ανάλυση της χρονοθυρίδας που είδαμε προηγουμένως στο συνολικό πλέγμα πόρων του δικτύου μας **Εικόνα 3.1**.

Εύρος Καναλιού (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
N_{RB}	6	15	25	50	75	100

Πίνακας 3.4 Αριθμός RB ανά κανάλι [37].

Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε την μορφή και τα δεδομένα που λαμβάνουμε από το Resource Grid του LTE καθώς αυτούς του πόρους θα προσπαθήσουμε να μοιράσουμε στους χρήστες του δικτύου με τον πιο αποδοτικό τρόπο στην συνέχεια.



Εικόνα 3.1 LTE Resource Grid 1,4MHz[38].

Βλέπουμε 7 OFDMA σύμβολα επί 12 υποφορείς σε κάθε χρονοθυρίδα στο κάθε υποπλάισιο. Τα μικρότερα τετράγωνα αναφέρονται στα RE του δικτύου ενώ τα χρωματισμένα σε μια πληθώρα από control packets που μεταδίδονται τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη μέσω των φυσικών καναλιών που θα αναλύσουμε στην συνέχεια.

3.7 Φυσικά Κανάλια.

Τα φυσικά κανάλια μεταδίδουν πληροφορίες του υψηλότερο στρώματος. Δεν διαφέρουν στην πολυπλεξία FDD και TDD, πάραυτα έχουν διαφορά στην τοποθεσία που καταλαμβάνουν στο πλαίσιο ανάλογα με την πολυπλεξία.

Κανάλια κατερχόμενης ζεύξης

- **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH):** για μετάδοση του DL-SCH καναλιού μεταφοράς.
- **Physical Downlink Control Channel (PDCCH):** για τη μεταφορά σηματοδοσίας κατερχόμενης ζεύξης ελέγχου L1/L2.
- **Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH):** δείχνει το PDCCH στην κατερχόμενη ζεύξη.
- **Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH):** για μεταφορά HARQ πληροφορίας.
- **Physical Broadcast Channel (PBCH):** downlink μεταφέρει το BCH κανάλι μεταφοράς.
- **Physical Multicast Channel (PMCH):** κάνει την μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης του MCH καναλιού μεταφοράς.

Κανάλια ανερχόμενης ζεύξης

- **Physical Uplink Shared Channel (PUSCH):** για μετάδοση του UL-SCH καναλιού μεταφοράς.
- **Physical Uplink Control Channel(PUCCH):** για τη μεταφορά ανερχόμενης ζεύξης σηματοδοσίας ελέγχου L1/L2.
- **Physical Random Access Channel (PRACH):** κάνει την μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης του τυχαίας πρόσβασης προενισχυτή όπως δίνεται από το RACH κανάλι μεταφοράς.

3.8 Φυσικά Σήματα.

Σήματα κατερχόμενης ζεύξης

- **Σήματα Αναφοράς RS (Reference Signal):** υποστηρίζουν μετρήσεις και σύμφωνες (coherent) αποδιαμορφώσεις σε ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη.
- **Primary και Secondary Synchronization Signals (P-SCH και S-SCH):** χρησιμοποιείται μόνο στη διαδικασία κατερχόμενης ζεύξης και χρησιμοποιείται στις διαδικασίες αναζήτησης κυψελών.

Σήματα ανερχόμενης ζεύξης

- **Sounding Reference Signals (SRS):** υποστηρίζει ανερχόμενης ζεύξης μετρήσεις σχεδιασμού.
- **Αποδιαμόρφωση Σήματος Αναφοράς(Demodulation Reference Signal - DRS):** αυτό το σήμα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του καναλιού στο σταθμό βάσης προκειμένου να ανιχνευθούν τυχόν λάθη και να αποδιαμορφωθούν τα δεδομένα που λαμβάνονται σωστά.

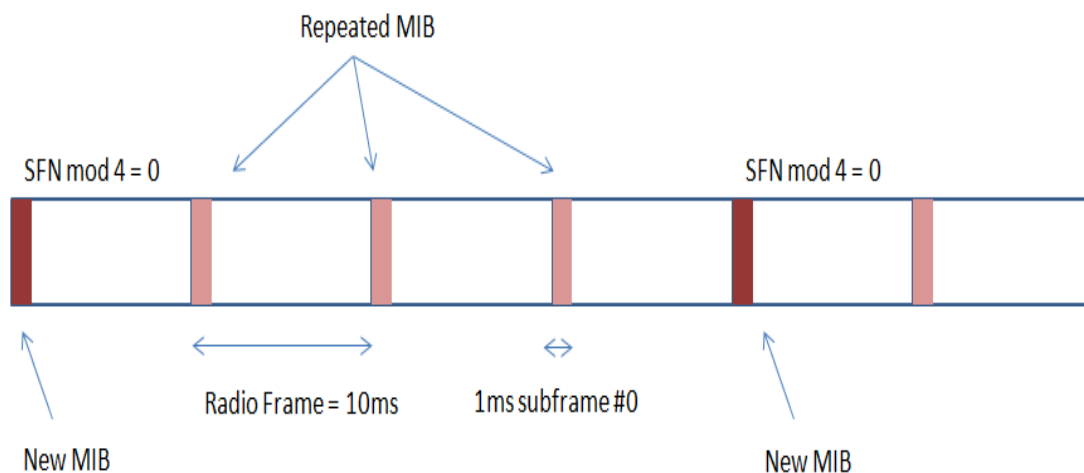
3.9 Master Information Block (MIB).

Το πρώτο βήμα για την τερματική συσκευή για να αποκτήσει πρόσβαση στο δίκτυο, αφού ολοκληρώσει τον αρχικό συγχρονισμό των κυψελών, είναι να διαβάσει το MIB στο BCCH (Λογικό κανάλι), BCH (Κανάλι μεταφοράς) και PBCH (Φυσικό κανάλι). Τα RE που χρησιμοποιούνται από το MIB είναι τα πρώτα 4 OFDMA σύμβολα από το δεύτερο slot του πρώτου υποπλαισίου. Το MIB στο πεδίο της συχνότητας καταλαμβάνει 72 υποφορείς. Το MIB φέρει πολύ μικρή αλλά αρκετά σημαντική πληροφορία για το κινητό τερματικό που θέλει να έχει πρόσβαση στο δίκτυο.

Το περιεχόμενο το MIB αποτελείται:

- Το μέγεθος του καναλιού κατερχόμενης ζεύξης μετρούμενο σε μέγεθος RB.
- Τη διαμόρφωση PHICH (διάρκεια και πόρους).
- System Frame Number.

Το πακέτο MIB εκπέμπεται κάθε 4 πλαίσια (40ms) ενώ αντίγραφα του επαναλαμβάνονται κάθε πλαίσιο όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3.2**.



Εικόνα 3.2 Master Information Block [39].

3.10 Ένδειξη ποιότητας καναλιού CQI.

Η ένδειξη της ποιότητας του καναλιού (Channel Quality Indicator - CQI) είναι μια μέτρηση της ποιότητας του ραδιοκαναλιού που εκτελεί η τερματική συσκευή στην κατερχόμενη ζεύξη. Η τερματική συσκευή προτείνει στον σταθμό βάσης ένα βελτιστοποιημένο σχήμα διαμόρφωσης και ρυθμό κωδικοποίησης για μία δεδομένη ποιότητα καναλιού, ώστε ο ρυθμός σφαλμάτων του πλαισίου μετάδοσης να μην υπερβαίνει το 10%. Το CQI μπορεί να πάρει 16 διαφορετικές τιμές που εξαρτώνται από το συνδυασμό του σχήματος διαμόρφωσης και του ρυθμού κωδικοποίησης[3].

4. Παρουσίαση Μεθόδων (Αλγορίθμων) Χρόνο – Προγραμματισμού.

4.1 Περίληψη.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις του πειραματικού μέρους της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση της λειτουργίας του αλγορίθμου και θα ακολουθεί σχετικό παράδειγμα. Έπειτα θα εξεταστεί η εφαρμογή τους στα δεδομένα της προσομοίωσης του δικτύου και θα ακολουθεί η λειτουργία του αλγορίθμου σε μορφή ψευδοκώδικα. Μια θεωρητική τοποθέτηση θα συνοδεύει την περιγραφή του αλγορίθμου, στην οποία θα παρουσιάζονται τα θετικά αλλά και τα αρνητικά του γνωρίσματα καθώς και οι δυσκολίες υλοποίησης του, γεγονός που θα μας οδηγήσει σε πιθανές εκτιμήσεις, οι οποίες πρέπει να επαληθευτούν από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

4.2 Απλή Διαίρεση Πόρων.

Σε αυτήν την μέθοδο διάθεσης πόρων, την οποία χρησιμοποιήσαμε ως βασική για την λειτουργία της προσομοίωσης οι διαθέσιμοι πόροι το δικτύου διαιρούνται και διανέμονται εξίσου στους χρήστες του ασύρματου δικτύου αφού πρώτα στρογγυλοποιηθούν. Να αναφέρουμε πως ως πόρους θεωρούνται τα RE που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και πως το μέγεθος της πληροφορίας που δύναται να μεταφέρουν εξαρτάται από διαφορετικές παραμέτρους, κυρίως κωδικοποίησης και συχνότητας, τις οποίες θα αναλύσουμε στο επόμενο κεφάλαιο και στο οποίο θα αναφερθούμε στις προσομοιώσεις. Επίσης, τα πακέτα ελέγχου, τα οποία και δεν μεταφέρουν δεδομένα αλλά πληροφορίες για την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου, όπως

γίνεται κατανοητό δεν υπολογίζονται στους προς διάθεση πόρους του δικτύου.

Παράδειγμα Εφαρμογής της Μεθόδου

Αν υποθέσουμε πως σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή ένα δίκτυο με σταθερούς και γνωστούς σε εμάς πόρους καλείται να εξυπηρετήσει 10 τερματικές συσκευές χρηστών. Έστω ότι το δίκτυο, σε κάθε χρονοθυρίδα διαθέτει 615 RE προς διάθεση. Έχουμε:

RE: 615

UE: 10

Resources per User: $615/10 = 61.5$

Ψευδοκώδικας

Είσοδοι:

RE: 615

UE: 10

Resources_per_User = RE/UE %d //Ακέραιο μέρος

Έξοδοι:

Resources_per_User

Περιγραφή Αλγορίθμου

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό αυτή η μέθοδος είναι αρκετά εύκολη στην υλοποίηση. Μερικά θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά του αλγορίθμου ακολουθούν. Αυτός ο αλγόριθμος παρέχει γρήγορη υλοποίηση, χωρίς την απαίτηση κάποιας σύνθετης εκπαίδευσης σε ρουτίνα, και είναι αρκετά δίκαιος καθώς παρέχει σε όλους τους

χρήστες τον ίδιο αριθμό πόρων και τις ίδιες δυνατότητες. Στα αρνητικά χαρακτηριστικά του αλγορίθμου, καταλογίζεται η μη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου. Για παράδειγμα, σε ένα μεγάλο σύνολο χρηστών, έχει γίνει ανάθεση πόρων τους οποίους δεν αξιοποιούν, είτε γιατί γίνεται χρήση μιας υπηρεσίας που η ποιότητα που απαιτείται δεν είναι υψηλή (πχ περιήγηση στο Διαδίκτυο), είτε γιατί δεν χρησιμοποιείται την συγκεκριμένη χρονική στιγμή το δίκτυο. Στον αντίποδα τώρα, υπάρχουν χρήστες του δικτύου που χρειάζονται περισσότερους πόρους καθώς χρησιμοποιούν μια εφαρμογή που η ποιότητα υπηρεσιών της απαιτεί καλύτερες τιμές ρυθμαπόδοσης δικτύου ή μικρότερες καθυστερήσεις.

Ο πάροχος δεν έχει στην διάθεση του απεριόριστους πόρους προς διάθεση, προκειμένου να καλυφθεί ένα ανώτατο όριο χρηστών του δικτύου για υπηρεσίες με υψηλή ποιότητα υπηρεσιών, καθώς δεν δύναται υλοποίησης με βασικότερο τροχοπέδη του εγχειρήματος το κόστος του δικτύου.

Ανοικτά Θέματα στην Υλοποίηση του Αλγορίθμου και τρόποι Αντιμετώπισης.

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, η μέθοδος απλής διαίρεσης πόρων δεν είχε κάποια δυσκολία στην υλοποίησή της. Όμως είναι άξιο αναφοράς κάτι που γίνεται εύκολα αντιληπτό από το παράδειγμα της λειτουργίας του αλγορίθμου και αυτό είναι η απώλεια πόρων από την φύση της διαίρεσης. Αναλυτικότερα, δεν μπορούμε να διαθέσουμε σε έναν χρήστη 6,3 RE καθώς δεν μπορεί να διασπαστεί πέραν της μονάδος. Αν όμως η στρογγυλοποίηση για να κρατήσουμε το ακέραιο μέρος μας δώσει μια τιμή με αρκετά μεγάλο δεκαδικό μέρος αντιλαμβανόμαστε πως όσο μεγαλύτερο είναι το σύνολο των τερματικών συσκευών τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ανεκμετάλλευτων πόρων που μπορεί να μεταφράζεται σε αρκετά μεγάλες απώλειες αναφορικά με την προσφερόμενη ρυθμοαπόδοση δικτύου.

4.3 Επίμονος Προγραμματισμός (Persistent Scheduling).

Αν θεωρήσουμε την μέθοδο Απλής Διαίρεσης Πόρων ως μια βάση πάνω στην οποία θα επεκταθούμε μπορούμε να κατανοήσουμε ευκολότερα την λειτουργία του Επίμονου Προγραμματισμού. Όπως γνωρίζουμε δεν κάνουν όλοι οι χρήστες του δικτύου την ίδια χρήση στο δίκτυο και αυτό εξαρτάται από την ποιότητα υπηρεσιών της εφαρμογής που χρησιμοποιούν και τα χαρακτηριστικά του. Μικρού μεγέθους πακέτα (και όχι μόνο) που επαναλαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα ανάμεσα στο UE και στον eNodeB, χρειάζονται πακέτα που μεταφέρουν πληροφορίες ελέγχου (control packets) και τα οποία οδηγούν στο λεγόμενο overhead και κατ' επέκταση στην μη αξιοποίηση του εύρους ζώνης του δικτύου. Ο Επίμονος Προγραμματισμός εντοπίζει αυτά τα πακέτα και τους χρήστες που τα μεταδίδουν και τους προ-εκχωρεί πόρους ανά n – οστό αριθμό SF αποφεύγοντας τον φόρτο από τα control packets και μειώνοντας δραστικά το overhead, πράγμα που οδηγεί στην καλύτερη αξιοποίηση του δικτύου.

Παράδειγμα

Σε ένα δίκτυο N χρηστών ο αλγόριθμος ελέγχει στην ουρά του κάθε χρήστη το συνολικό μέγεθος (άθροισμα) των δεδομένων προς αποστολή (Uplink / Downlink). Στην συνέχεια υπολογίζει με την απλή μέθοδο των τριών το αντίστοιχο ποσοστό επί της εκατό και το κρατάει σε έναν πίνακα. Σύμφωνα με τους διαθέσιμους πόρους ανά περίπτωση (Uplink / Downlink), υπολογίζει με την βοήθεια του πίνακα σε τι πόρους μεταφράζεται το ποσοστό επί της εκατό. Τέλος με την ανάλογη στρογγυλοποίηση προ-εκχωρεί αυτούς τους πόρους για έναν συγκεκριμένο αριθμό πλαισίων (5).

Κώδικας σε Matlab

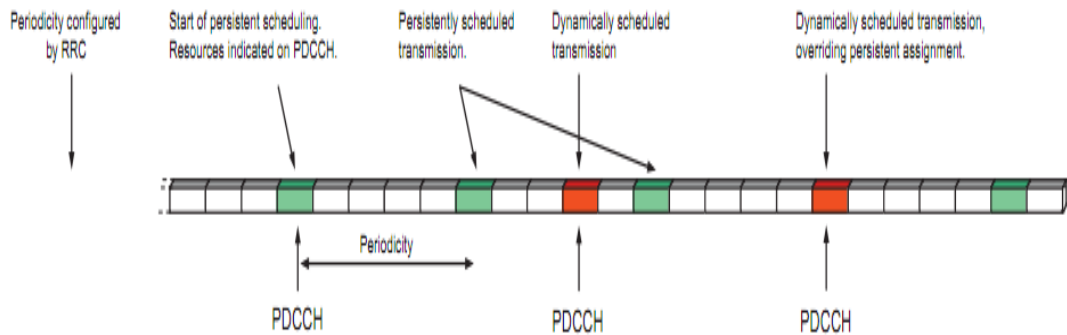
```
166 %Γεγονός 3 - Γίνεται ο έλεγχος για την ανάθεση των πόρων στους χρήστες και για το downlink και για το uplink.
167 elseif event==3
168
169 %Εύρεση συνολικού αθροίσματος των bytes δεδομένων όλων των χρηστών στις ουρές της κεραίας:
170 d0=[]; d1=[]; d0=sum(Q_antenna(2,,:)); d1=sum(d0);
171 %Εύρεση συνολικού αθροίσματος των bytes δεδομένων όλων των χρηστών στις ουρές των χρηστών:
172 u0=[]; u1=[]; u0=sum(Q_users(2,,:)); u1=sum(u0);
173
174 %Έλεγχος ανάθεσης πόρων στους χρήστες για το downlink κανάλι:
175 if d1==0 %Αν η κεραία δεν έχει δεδομένα να στείλει προς κανένα χρήστη:
176     Resources_percent_downlink(1,1:Users)=1/Users;
177 else %Αν η κεραία έχει δεδομένα να στείλει έστω και προς έναν χρήστη:
178     for User_id=1:Users
179         Resources_percent_downlink(1,User_id)=sum(Q_antenna(2,:,User_id))/d1;
180     end
181 end
182 %Έλεγχος ανάθεσης πόρων στους χρήστες για το uplink κανάλι:
183 if u1==0 %Αν κανένας χρήστης δεν έχει δεδομένα να στείλει:
184     Resources_percent_uplink(1,1:Users)=1/Users;
185 else %Αν έστω και ένας χρήστης έχει δεδομένα να στείλει:
186     for User_id=1:Users
187         Resources_percent_uplink(1,User_id)=sum(Q_users(2,:,User_id))/u1;
188     end
189 end
```

Εικόνα 4.1 Persistent Function Matlab.

Περιγραφή Αλγορίθμου

Η λειτουργία αυτής της μεθόδου γίνεται εύκολα κατανοητή και γνωρίζουμε, σε αντίθεση με την μέθοδο Απλής Διάρθρωση Πόρων, πως εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπως το Voice over LTE (Semi – Persistent **Σχήμα 4.1**). Είναι ένας αλγόριθμος που παρέχει δικαιοσύνη καθώς οι πόροι μοιράζονται με ποσοστά ανάλογα με το μέγεθος των προς αποστολή δεδομένων και αυτό μαζί με την καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης και την μείωση του overhead συνοψίζει τα θετικά του

χαρακτηριστικά. Στα αρνητικά τώρα είναι το γεγονός πως ομοίως με την Απλή Διαίρεση Πόρων θα οδηγηθούμε με την στρογγυλοποίηση στην απώλεια πόρων.



Σχήμα 4.1 Semi Persistent Scheduling [40].

Ανοικτά Θέματα στην Υλοποίηση του Αλγορίθμου και τρόποι Αντιμετώπισης.

Στην πραγματική εφαρμογή του αλγορίθμου προκύπτουν 2 βασικά προβλήματα:

1. Τα δεδομένα που υπάρχουν στις ουρές (είτε του χρήστη είτε της κεραίας) δεν είναι δυνατόν να τα γνωρίζουμε πολύ νωρίτερα και στο σύνολό τους, όπως τα γνωρίζουμε στην προσομοίωση είτε γιατί τα δημιουργήσαμε εμείς είτε γιατί τα καταγράψαμε από πραγματική επικοινωνία. Επομένως είναι αναγκαίο το στοιχείο της πρόβλεψης από κάποιον αλγόριθμο (στην περίπτωση εφαρμογής του από κάποια εταιρία – πάροχο).
2. Δεν είναι δυνατόν να γνωρίζουμε ποια επανάληψη, δηλαδή ανά πόσα SF θα επαναλαμβάνεται ο αλγόριθμος, θα μας δώσει τα καλύτερα αποτελέσματα καθώς αυτό ποικίλει ανάλογα με το είδος των πακέτων (μέγεθος και χρόνος δημιουργίας) αλλά και από το εκάστοτε δίκτυο και τα χαρακτηριστικά του. Μπορούμε να

καταλήξουμε προσεγγιστικά και μετά από πειραματισμό σε μία τουλάχιστον θετική τιμή.

4.4 Αλγόριθμος MAXMIN Fairness.

Ο αλγόριθμος MaxMin Fairness επεξεργάζεται το σύνολο των αιτήσεων των χρηστών του δικτύου για ρυθμό μετάδοσης μέσα από ένα κανάλι. Ο αλγόριθμος MaxMin Fairness λειτουργεί ως εξής:

- Η μικρότερη ζήτηση για ρυθμό μεγιστοποιείται.
- Αφού έχει ικανοποιηθεί η χαμηλότερη ζήτηση για πόρους δικτύου, και μόνο τότε, η δεύτερη χαμηλότερη ζήτηση πρέπει να μεγιστοποιείται.
- Ομοίως και για την Τρίτη και ούτω καθεξής.

Αναλυτικότερα ο αλγόριθμος MaxMin Fairness λειτουργεί σε βήματα και κάνει τα εξής:

- Υπολογίζει το δίκαιο μερίδιο (μέση τιμή) για κάθε αίτηση πόρων από τους χρήστες.
- Τους διανέμει σε κάθε χρήστη (πόρους).
- Οι χρήστες που έχουν λάβει περισσότερους πόρους από όσους αιτήθηκαν επιστρέφουν την διαφορά.
- Η διαφορά μοιράζεται στους υπολειπόμενους χρήστες εξίσου.
- Τα δύο τελευταία βήματα επαναλαμβάνονται μέχρις ότου να μην υπάρχει υπολειπόμενη διαφορά.

Παραδείγματα

Πρώτο παράδειγμα

Ας υποθέσουμε πως έχουμε να μοιράσουμε ένα κέικ ανάμεσα σε 4 παιδιά. Το δίκαιο και ηθικό θα ήταν κάθε παιδί να λάβει το $\frac{1}{4}$ του κέικ. Αν όμως ένα από τα παιδιά γνωρίζουμε ότι μπορεί να φάει μόνο το $\frac{1}{10}$ του κέικ θα ήταν επιπόλαιο να του δώσουμε $\frac{2,5}{10}$ καθώς θα

πήγαινε χαμένο το 1,5/10 που δεν μπορεί να καταναλώσει. Έτσι θα του δώσουμε το 1/10 που θέλει και θα μοιράσουμε το υπόλοιπο στα 3 παιδιά τα οποία θα λάβουν 3/10 και έτσι όλοι θα είναι ικανοποιημένοι και δεν θα πάει χαμένο το κέικ.

Δεύτερο Παράδειγμα

Έχοντας κατανοήσει περίπου την λειτουργία του αλγορίθμου στο προηγούμενο απλό καθημερινό παράδειγμα θα προσπαθήσουμε να το αναγάγουμε σε ένα πρόβλημα δικτύων.

Συγκεκριμένα, 4 χρήστες αιτούνται από τον αλγόριθμο τις εξής τιμές ρυθμών μετάδοσης:

1. 2 Mbps.
2. 2.6 Mbps.
3. 4 Mbps.
4. 5 Mbps.

Γνωρίζουμε όμως πως το κανάλι μας μπορεί να υποστηρίξει μόνο 10 Mbps και έτσι ο αλγόριθμος μας μπαίνει σε λειτουργία.

Βήμα 1^ο: Υπολογίζει το δίκαιο μερίδιο (μέση τιμή).

$$10/4 = 2.5 \text{ Mbps}$$

Βήμα 2^ο: Εκχωρεί – αναθέτει σε κάθε χρήστη αυτήν την τιμή

1^{ος} : 2.5 Mbps (παρατηρούμε πως έχει λάβει 0,5 Mbps παραπάνω).

2^{ος} : 2.5 Mbps.

3^{ος} : 2.5 Mbps.

4^{ος} : 2.5 Mbps.

Βήμα 3^ο: Η διαφορά (0,5 Mbps) μοιράζεται εξίσου στους υπόλοιπους).

$$0.5/3 = 0.166666 \text{ Mbps έκαστος.}$$

1^{ος} : 2Mbps.

2^{ος} : 2.6 Mbps (όσο αιτήθηκε).

3^{ος} : 2.6666 Mbps.

4^{ος} : 2.6666 Mbps.

4^ο Βήμα: Ανάθεση πόρων

Τελικά έχουμε

1^{ος} : 2 Mbps.

2^{ος} : 2.6 Mbps.

3^{ος} : 2.7 Mbps.

4^{ος} : 2.7 Mbps.

(Σε περιπτώσεις με περισσότερες αιτήσεις τα βήματα τρία και τέσσερα επαναλαμβάνονται)

Τελικώς, αν παρατηρήσουμε να δούμε αν ικανοποιούνται οι συνθήκες του αλγορίθμου θα δούμε πως:

- Η μικρότερη ζήτηση για ρυθμό μεγιστοποιείται.
- Αφού η μικρότερη τιμή μεγιστοποιήθηκε, η αμέσως επόμενη μεγιστοποιείται επίσης.
- Ομοίως μεγιστοποιείται η 3^η μικρότερη τιμή.
- Ομοίως μεγιστοποιείται η 4^η μικρότερη τιμή.[41]

Κώδικας σε Matlab

```
1 function fr = maxmin( y,t )
2 %UNTITLED Summary of this function goes here
3 % Detailed explanation goes here
4
5 .....
6 users = length(y);
7 fr = zeros(users,1);
8 for i = 1 : users
9     fr(i:users) = fr(i:users) + ( t / (users - i +1));
10    t = max([0, (fr(i) - y(i))]);
11    fr(i) = fr(i) - t ;
12    if(t == 0)
13        break;
14    end
15 end
16
17
18 end
```

Εικόνα 4.2 Κώδικας Maxmin σε Matlab.

Περιγραφή Αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος Maxmin Fairness είναι ένας αλγόριθμος που όπως προκύπτει ετυμολογικά εμπεριέχει το στοιχείο της δικαιοσύνης. Αξιοποιεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τους πόρους του δικτύου και προσπαθεί να ικανοποιήσει τις αιτήσεις των χρηστών του δικτύου. Χρήστες με χαμηλότερες απαιτήσεις σε ροή δεδομένων θα ικανοποιηθούν και οι χρήστες με μεγάλο μέγεθος πακέτων ή απότομη ριπή πολλών πακέτων θα «τιμωρηθούν» για αυτήν τους τη συμπεριφορά. Είναι αποδεδειγμένο πως αν και οι πολιτικές με χαμηλότερο επίπεδο δικαιοσύνης πετυχαίνουν καλύτερες τιμές μέσης απόδοσης δικτύου δεν έχουν σταθερή ποιότητα υπηρεσιών και αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η ποιότητα των υπηρεσιών που έχει επιτευχθεί μεταβάλλεται στον χρόνο ανάλογα με την συμπεριφορά των

χρηστών. Αν αυτή η αστάθεια είναι σοβαρή, μπορεί να οδηγήσει σε δυσαρεστημένους χρήστες που ίσως οδηγηθούν σε μια πιο σταθερή υπηρεσία επικοινωνίας.

Ανοικτά Θέματα στην Υλοποίηση του Αλγορίθμου και τρόποι Αντιμετώπισης.

Ο αλγόριθμος Maxmin Fairness είναι ένας αλγόριθμος που γίνεται εύκολα κατανοητός μέσα από παραδείγματα. Δεν προέκυψαν ιδιαίτερες δυσκολίες κατά την υλοποίησή του, όμως αξίζει να αναφερθεί και να δώσουμε προσοχή πως όπως και σε όλα τα προαναφερθέντα παραδείγματα οι είσοδοι είναι ταξινομημένοι με αύξουσα σειρά. Επομένως, οι πίνακες έπρεπε να ταξινομηθούν (sort) σύμφωνα με το μέγεθος που αιτούνταν ο κάθε χρήστης και στην συνέχεια αφού έχουν λάβει τις τιμές που θέλαμε να επανέλθουν στην αρχική τους μορφή με τις νέες πλέον τιμές.

5.Αποτίμηση Σχημάτων και Γραφήματα Απόδοσης.

5.1 Εισαγωγή.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί το σημαντικότερο ερευνητικό – πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας και αυτό δεν είναι άλλο από την μελέτη της συμπεριφοράς των αλγορίθμων, που παρουσιάστηκαν στο 4^ο κεφάλαιο, σε διαφορετικά (5 συνολικά) σενάρια. Ο ορθότερος επιστημονικά τρόπος για να καταλήξουμε σε παρατηρήσεις και συνεπώς σε συμπεράσματα είναι οι γραφικές παραστάσεις που εξήχθησαν από τις προσομοιώσεις. Αναλυτικότερα τα στοιχεία που μελετήθηκαν είναι η μέση καθυστέρηση πακέτων (Mean Packet Delay) τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη, καθώς και η ρυθμαπόδοση (Throughput) του δικτύου ομοίως για ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη. Οι αλγόριθμοι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, δοκιμάστηκαν σε διαφορετικά σενάρια κίνησης. Αρχικά μέσω της κατανομής Poisson μελετήσαμε το πώς συμπεριφέρονται σε πακέτα συγκεκριμένων χαρακτηριστικών που δημιουργήθηκαν από εμάς, και στην συνέχεια σε δεδομένα πραγματικής κίνησης (real traffic), τα οποία καταγράφηκαν με την βοήθεια του προγράμματος **Wireshark**, όπως πακέτα Real Media Streaming UDP πρωτοκόλλου τα οποία χρησιμοποιούνται για streaming ήχου και εικόνας (πχ η παρακολούθηση ενός βίντεο μέσα από το Youtube), πακέτα Real Media Streaming TCP πρωτοκόλλου τα οποία μπορούν να εξυπηρετήσουν τον ίδιο σκοπό με χαμηλότερες τιμές ρυθμαπόδοσης αλλά με μεγαλύτερη ασφάλεια λόγω του TCP πρωτοκόλλου, πακέτα Live Streaming για να γίνεται ζωντανή μετάδοση κάποιου γεγονότος (πχ εκπομπής τηλεοπτικής ή ραδιοφώνου) και τέλος VoIP πακέτα τα οποία συναντώνται σε εφαρμογές μετάδοσης φωνής μέσω του Διαδικτύου (πχ Skype Call). Για κάθε σενάριο έγινε ξεχωριστή προσομοίωση στον κάθε αλγόριθμο και σύγκριση των ομοίων γραφημάτων προκειμένου να καταλήξουμε στον προτιμώμενο για κάθε περίπτωση αλγόριθμο.

5.2 Προσομοίωση στη Matlab.

Η προσομοίωση του δικτύου μας στα διαφορετικά σενάρια κίνησης και αλγορίθμων έγινε στο περιβάλλον της **Matlab**. Το σύγχρονο περιβάλλον εργασίας της Matlab είναι αρκετά φιλικό προς τον χρήστη και μπορεί να διακριθεί σε τέσσερα υποτμήματα την Επιφάνεια Εργασίας στην οποία ο χρήστης εκτελεί τις εντολές (κεντρικό τμήμα), το Directory στο οποίο εργαζόμαστε- αποθηκεύουμε τα αρχεία M – files με επέκταση .m (πάνω αριστερά τμήμα), το ιστορικό των πρόσφατων εντολών που χρησιμοποιήσαμε (κάτω δεξιά τμήμα) που βοηθάει τον χρήστη να ελέγχει ακριβώς τις εντολές που έδωσε αλλά και να τις επαναλάβει όπου χρειαστεί και τέλος οι τιμές των μεταβλητών αλλά και οι πίνακες που παράγουν τα αρχεία που εκτελούμε μπορούν να παρατηρηθούν αλλά και να ελεγχθούν ως προς το περιεχόμενό τους (πάνω δεξιά τμήμα). Η Matlab παρέχει στον χρήστη της μια πληθώρα από εργαλεία αλλά και έτοιμες συναρτήσεις για την διευκόλυνση του έργου του, συναρτήσεις που ξεκινούν από τις στοιχειώδες μαθηματικές συναρτήσεις υπολογισμού της εφαπτόμενης και της συνεφαπτομένης και καταλήγουν στους πιο σύνθετους μαθηματικούς υπολογισμούς όπως πολυώνυμα Lagrange και σειρές Taylor.

Η γλώσσα προγραμματισμού της Matlab ανήκει στις γλώσσες υψηλού επιπέδου και είναι βασισμένη στην λογική των πινάκων και αυτό αποτελεί και το σημαντικότερο πλεονέκτημα που μας παρείχε στην υλοποίηση των προσομοιώσεων, καθώς το κυριότερο μέρος της προσομοίωσης του δικτύου LTE τεχνολογίας είναι οι πράξεις ανάμεσα σε πίνακες αλλά και στα δεδομένα των πινάκων ξεχωριστά. Επίσης η γλώσσα προγραμματισμού της Matlab περιλαμβάνει έλεγχο ροής προγράμματος και αντικειμενοστραφείς προγραμματιστικές τεχνικές που δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη να προγραμματίσει εύκολα και γρήγορα προγράμματα αλλά και μεγάλες εφαρμογές.

Ένα ακόμα μεγάλο πλεονέκτημα της γλώσσας προγραμματισμού Matlab είναι το γραφικό της σύστημα καθώς περιλαμβάνει υψηλού

επιπέδου εντολές για δισδιάστατες αλλά και για τρισδιάστατες αναπαραστάσεις δεδομένων καθώς και για επεξεργασία εικόνων. Η επεξεργασία των γραφημάτων μπορεί να γίνει ακόμα ευκολότερη με την χρήση των απλών εντολών της Matlab.

Εκτός από τα θετικά στοιχεία που μας παρείχε η γλώσσα προγραμματισμού της Matlab αξίζει να αναφέρουμε και το σημαντικότερο μειονέκτημα της χρήσης της που είναι οι μεγάλοι χρόνοι προσομοίωσης εν συγκρίσει με άλλες γλώσσες προγραμματισμού. Αναμενόμενο μειονέκτημα, καθώς όπως προαναφέρθηκε η Matlab αποτελεί μια γλώσσα υψηλού επιπέδου άμεσα συνδεδεμένη με την γλώσσα C. [42]

5.3 Σενάρια Προσομοίωσης.

5.3.1 Σενάριο 1.

Δεδομένα Προσομοίωσης

Σε αυτό το σενάριο έχουμε παραγωγή κίνησης μέσω μιας κατανομής Poisson. Η υλοποίηση του σεναρίου αποσκοπεί στον έλεγχο συμπεριφοράς των αλγορίθμων και του μοντέλου προσομοίωσης του δικτύου 4^{ης} γενιάς LTE.

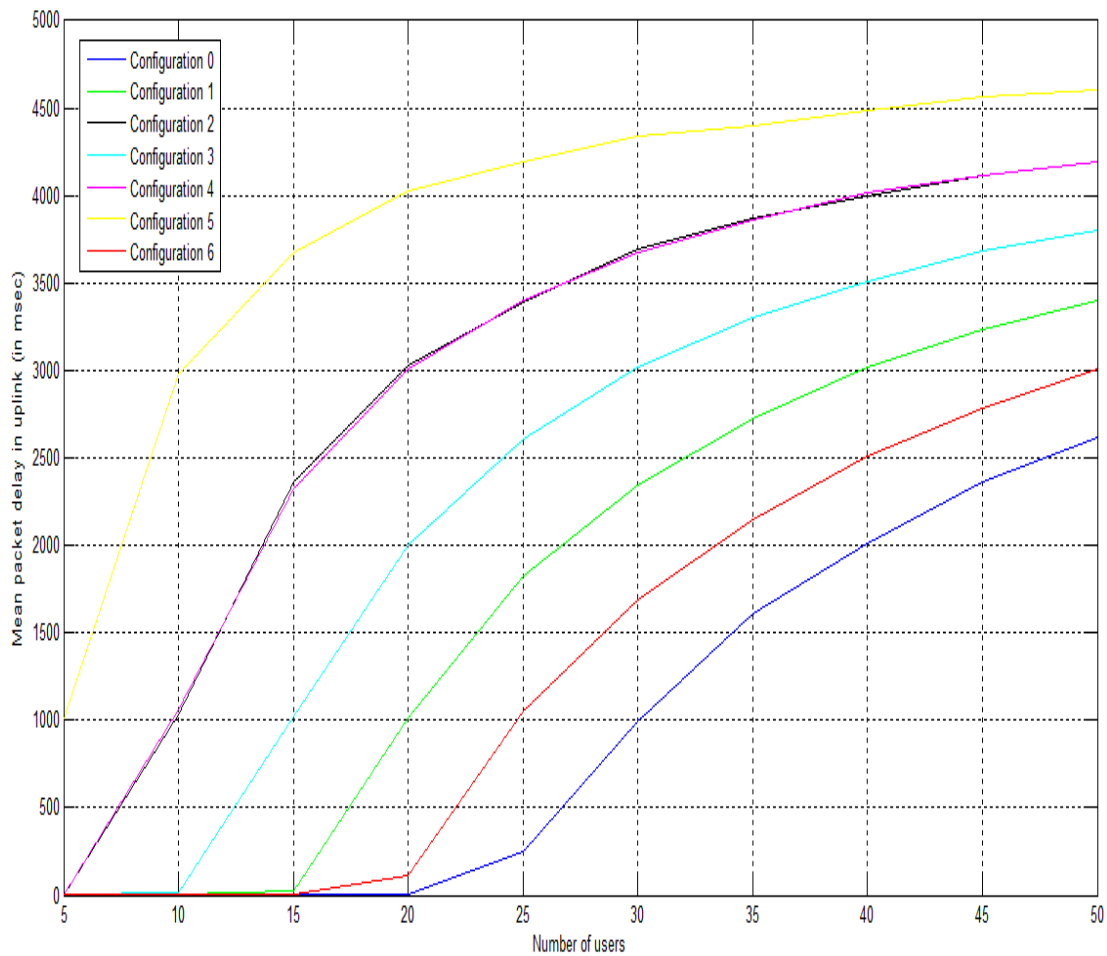
Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των δεδομένων της προσομοίωσης αξίζει να αναφερθούν μερικά βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου όπως η συχνότητα λειτουργίας (20MHz) και η διαμόρφωση (64 QAM), τα οποία παραμένουν σταθερά στο σύνολο των σεναρίων προσομοίωσης. Επίσης, για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ισχύει πως κάθε RE μεταφέρει 6 bit πληροφορίας.

Αναλυτικότερα:

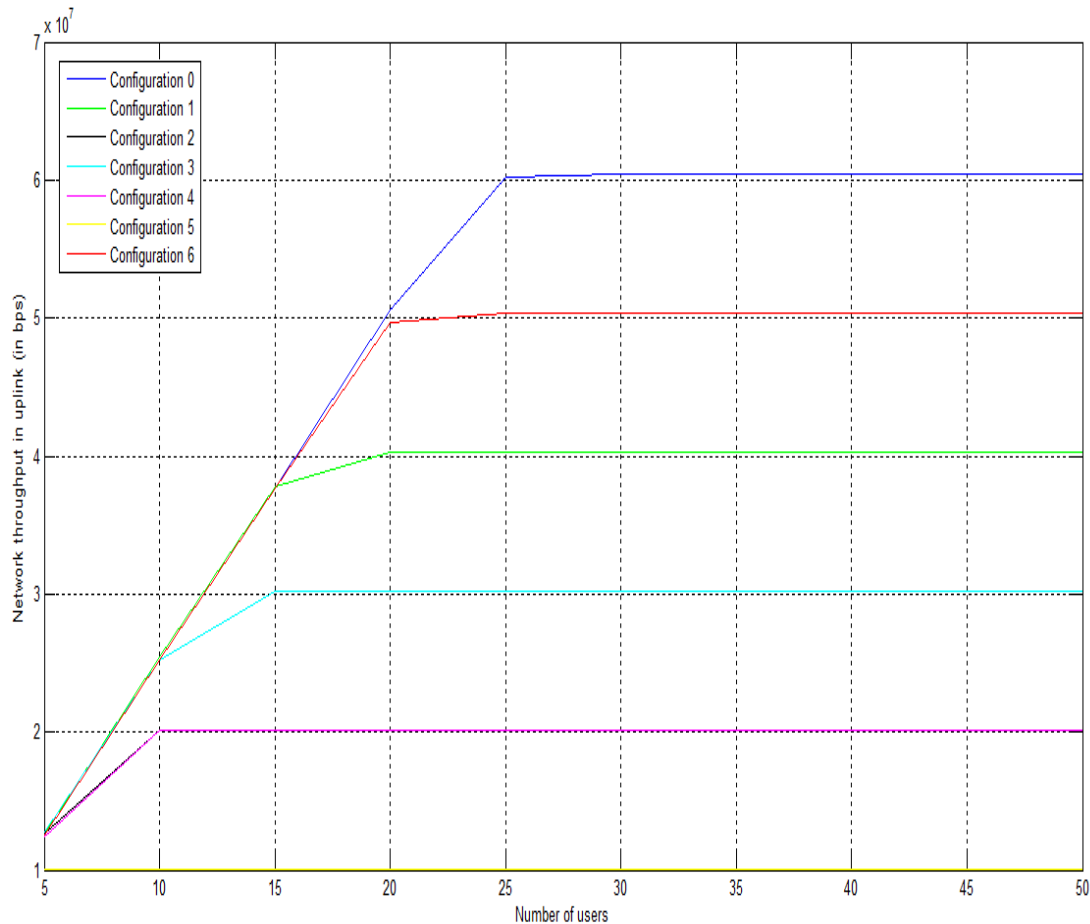
- Μέση τιμή Poisson λάμδα = 0.4 πακέτα/msec.
- Simulation_time = 10000 msec.
- Αριθμός χρηστών/τερματικών στο δίκτυο = 5:5:50.

Παρουσίαση γραφημάτων:

Για το αλγόριθμο Persistent Scheduling.

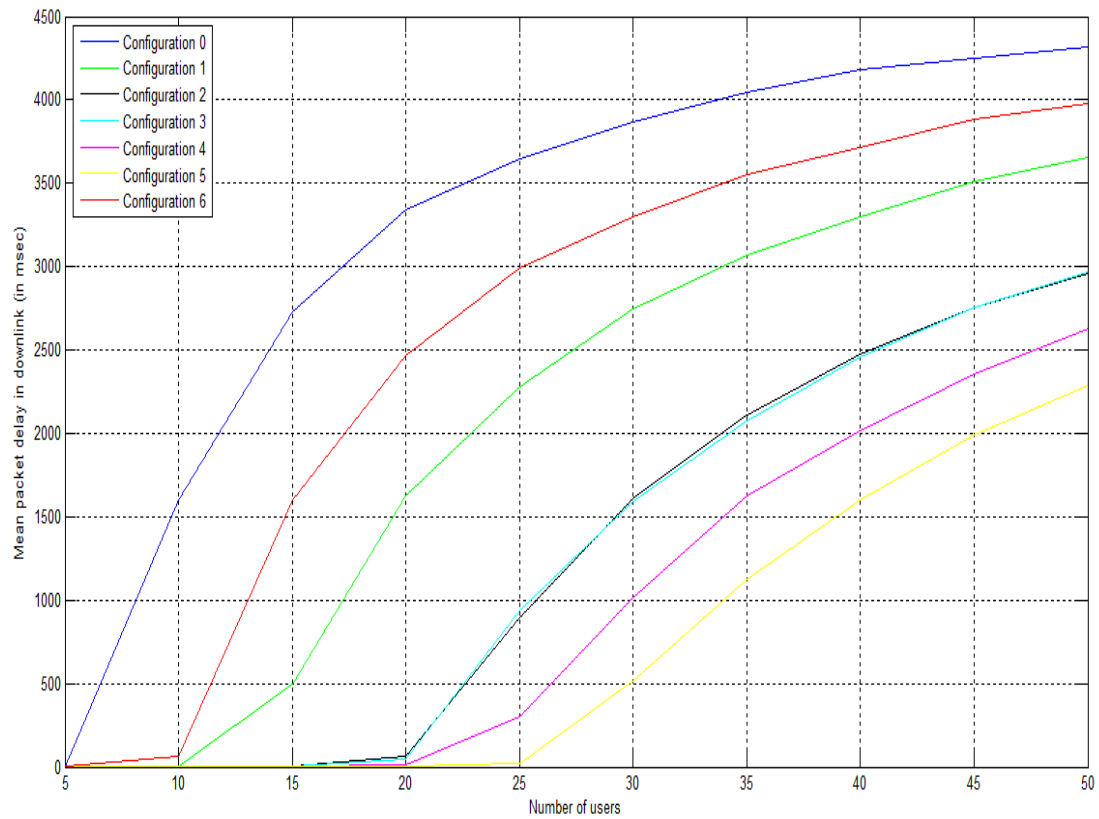


Γράφημα 5.1 Μέση καθυστέρηση πακέτων στην ανερχόμενη ζεύξη και για τις επτά διαμορφώσεις του αλγορίθμου Persistent Scheduling.

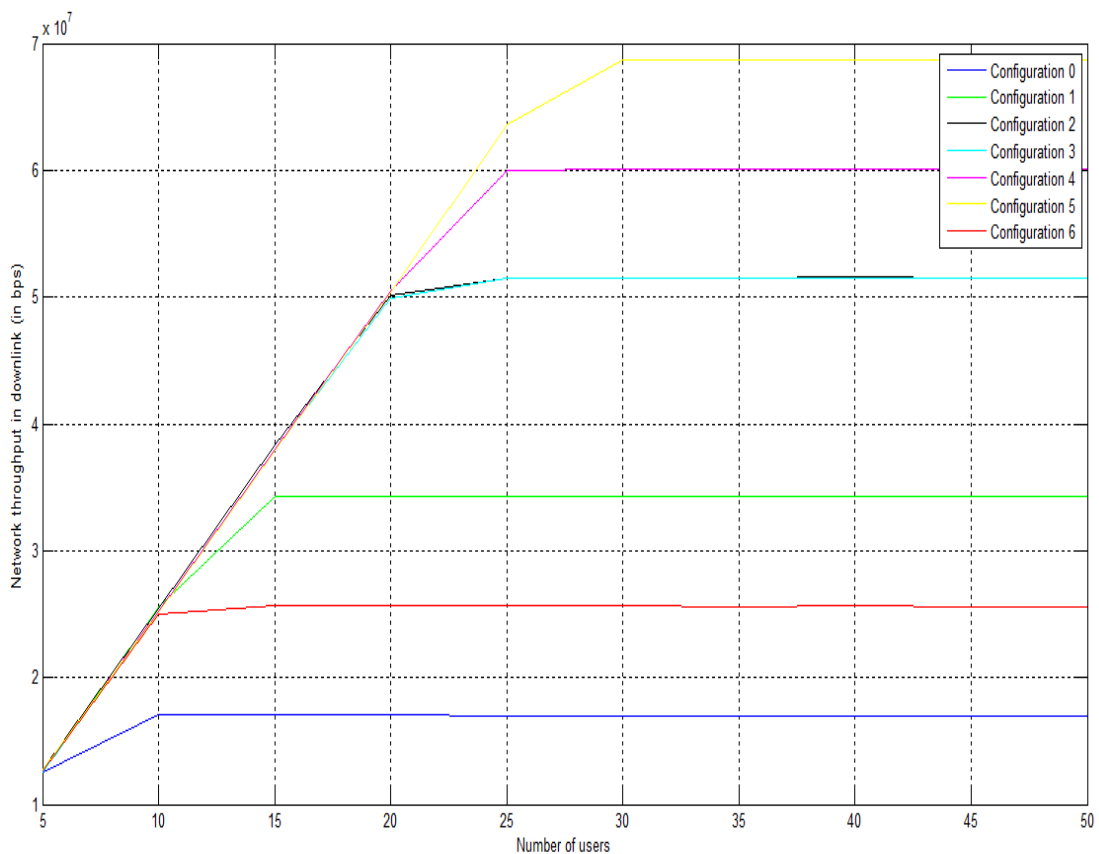


Γράφημα 5.2 Ρυθμαπόδοση δικτύου στο σύνολο των διαμορφώσεων, για την ανερχόμενη ζεύξη.

Έχοντας τα γραφήματα για την μέση καθυστέρηση πακέτων και για την ρυθμαπόδοση του δικτύου στην ανερχόμενη ζεύξη αλλά και με την βοήθεια του **Πίνακα 3.1** του 3^{ου} κεφαλαίου μπορούμε να δούμε την σχέση ανάμεσα στις 7 διαφορετικές διαμορφώσεις του πλαισίου. Αναλυτικότερα, παρατηρούμε πως τις μικρότερες καθυστερήσεις αλλά και τις καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά την ρυθμαπόδοση της ανερχόμενης ζεύξης, τις επιτυγχάνει πολύ λογικά, η διαμόρφωση 0, με μέγιστη τιμή τα 60 Mbps. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι η διαμόρφωση που διαθέτει τα περισσότερα υποπλαίσια για την ανερχόμενη ζεύξη. Με την ίδια μέθοδο σκέψης αναγνωρίζεται και η χειρότερη επίδοση που ανήκει στην διαμόρφωση 5 η οποία διαθέτει μόλις 1 υποπλάισιο για την ανερχόμενη ζεύξη.



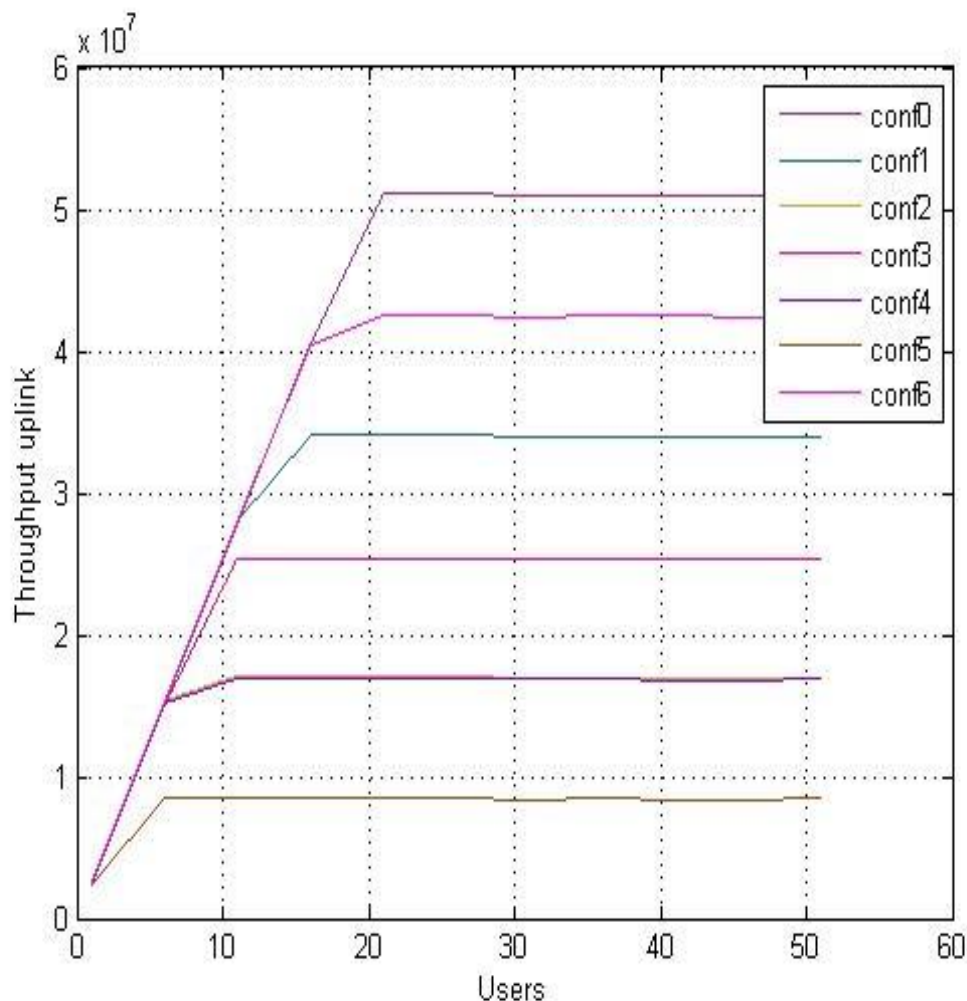
Γράφημα 5.3 Μέση καθυστέρηση πακέτων στην κατερχόμενη ζεύξη.



Γράφημα 5.4 Ρυθμαπόδοση δικτύου για την κατερχόμενη ζεύξη.

Στα γραφήματα για την μέση καθυστέρηση αλλά και την ρυθμαπόδοση του δικτύου για την κατερχόμενη ζεύξη παρατηρούμε την καλύτερη απόδοση της διαμόρφωσης 5 η οποία διαθέτει 7 υποπλάισια για την κατερχόμενη ζεύξη. Ακολουθεί στα γραφήματα η απόδοση 4 (μωβ χρώμα) και οι διαμορφώσεις 2 και 3 που διαθέτουν τον ίδιο αριθμό υποπλαισίων για κατερχόμενη ζεύξη (5). Παρατηρείται πως όσον αφορά την ρυθμαπόδοση του δικτύου, τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη, η κάθε διαμόρφωση μετά από την αύξηση των χρηστών στον οριζόντιο άξονα επιτυγχάνει αύξηση μέχρις ότου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή τιμή που μπορεί να επιτύχει ο αλγόριθμος (peak ή κορυφή). Αυτή η συμπεριφορά συναντάται στο σύνολο των σεναρίων προσομοίωσης με διαφορετικό φόρτο κίνησης.

Για τον αλγόριθμο Maxmin Fairness.

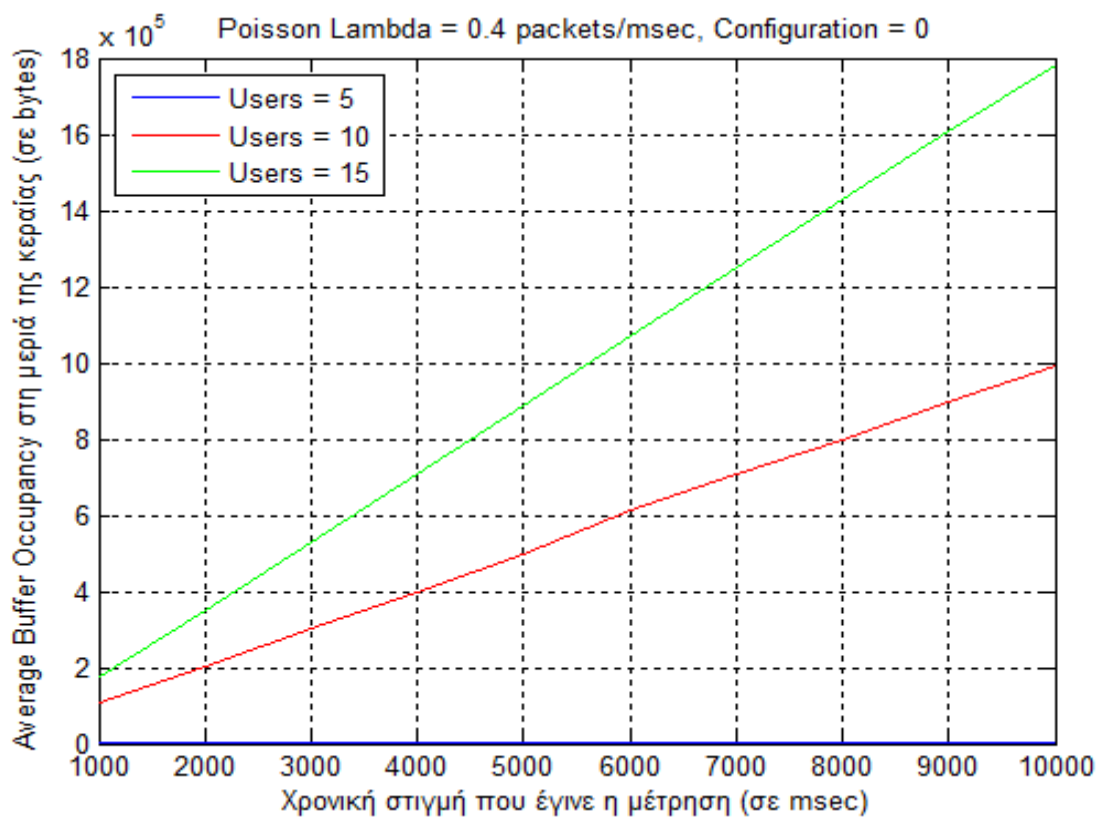


Γράφημα 5.5 Ρυθμαπόδοση δικτύου για την ανερχόμενη ζεύξη.

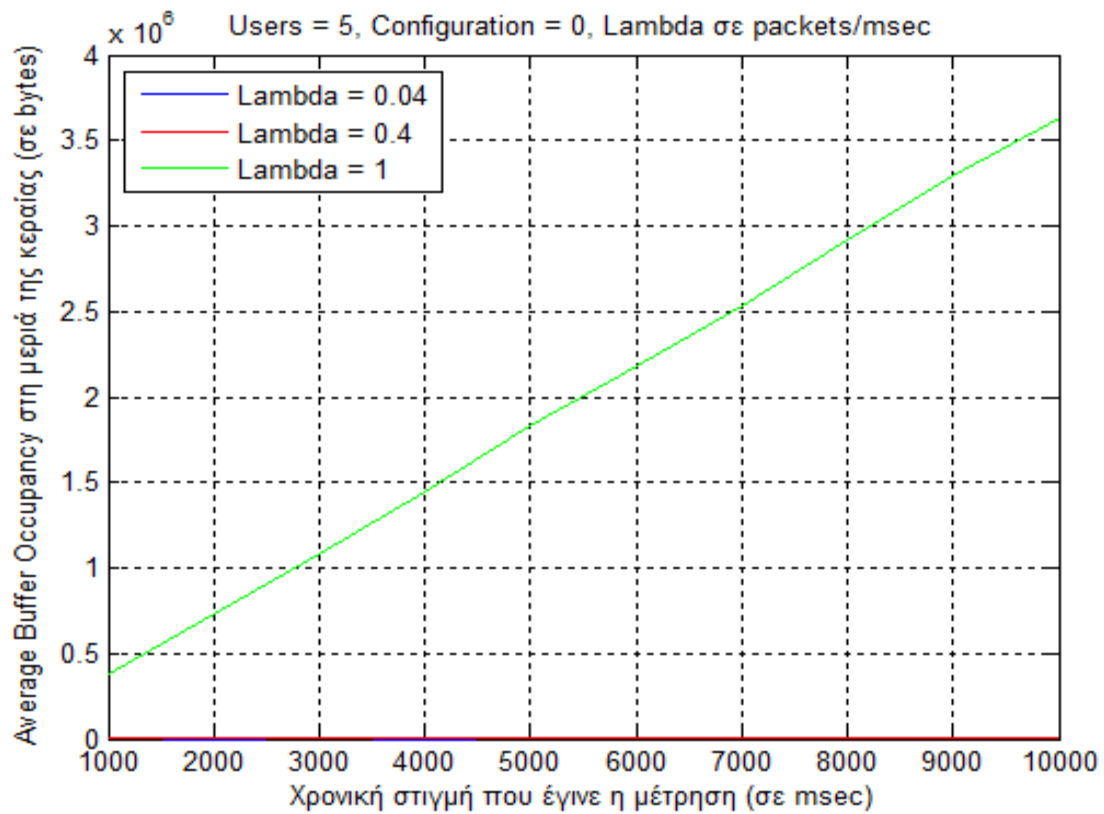
Για την συμπεριφορά του αλγορίθμου Maxmin Fairness δεν είναι απαραίτητη η παρουσίαση των υπόλοιπων γραφημάτων καθώς έχουν μεγάλη ομοιότητα με αυτά του αλγορίθμου Persistent Scheduling εκτός από την ρυθμαπόδοση στην ανερχόμενη ζεύξη της οποίας τα γραφήματα και παραθέσαμε.

Αν θέλαμε να καταλήξουμε στην επιλογή ενός αλγόριθμου για την καλύτερη εξυπηρέτηση αυτού του σεναρίου (αν και δεν είναι απαραίτητο καθώς δεν μιλάμε για πραγματική κίνηση), θα καταλήγαμε στον αλγόριθμο Persistent Scheduling καθώς επιτυγχάνει καλύτερη ρυθμαπόδοση στην ανερχόμενη ζεύξη δεδομένων.

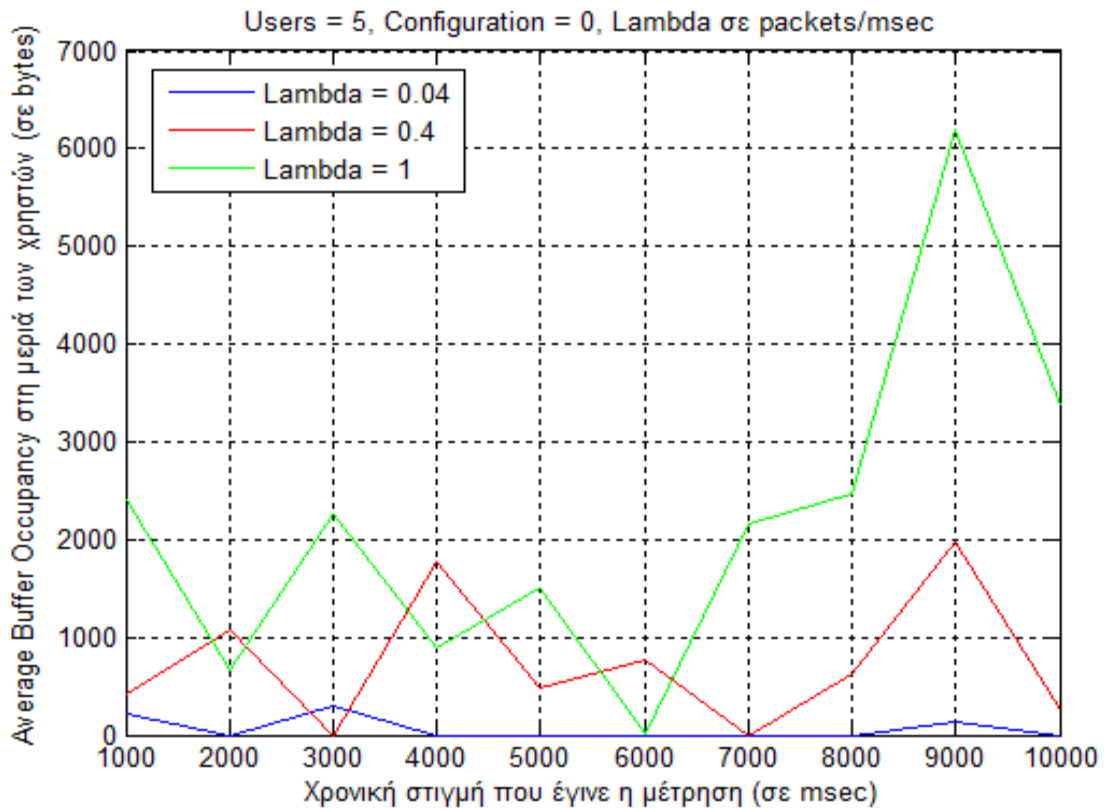
Σε αυτό το σημείο θα παραθέσουμε μερικά γραφήματα που θα μας δώσουν πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος της ουράς της κεραίας αλλά και των χρηστών (αθροιστικά) ανάλογα με την αύξηση της τιμής λάμδα καθώς και με την προσθήκη περισσότερων τερματικών στο δίκτυό μας.



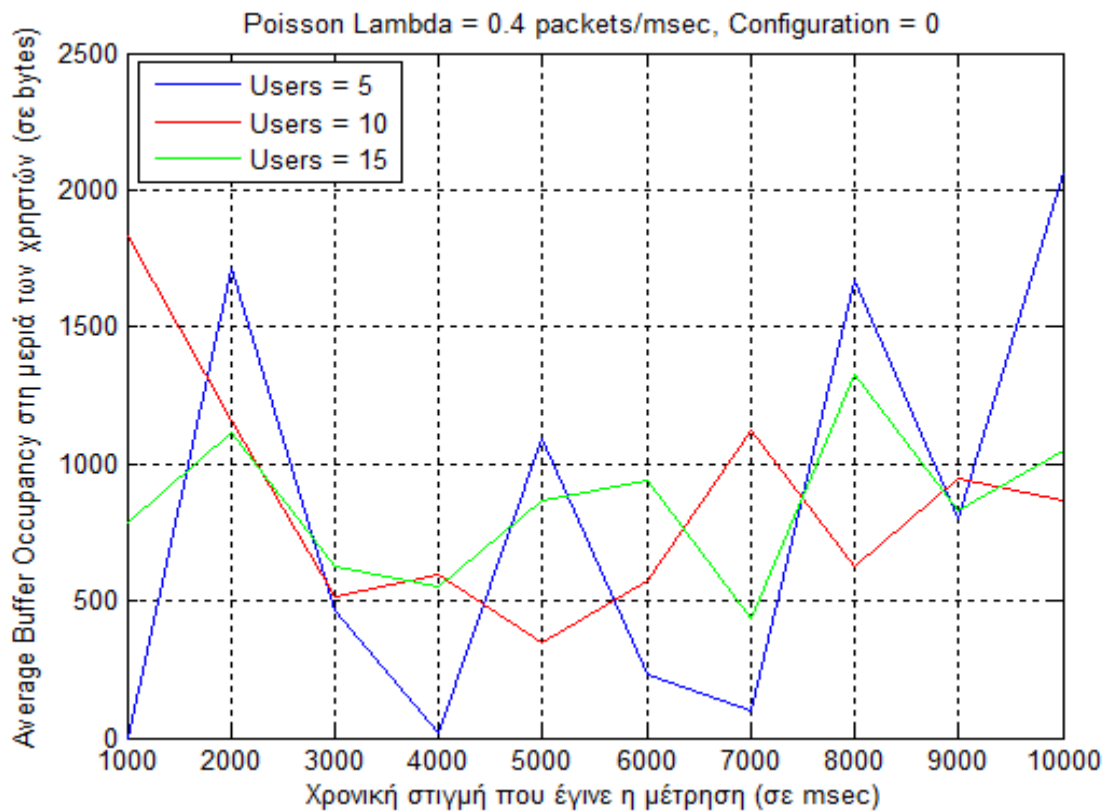
Γράφημα 5.6 Average Buffer Occupancy στη μεριά της κεραίας, με σταθερό λάμδα και μεταβλητό αριθμό χρηστών.



Γράφημα 5.7 Average Buffer Occupancy στην μεριά της κεραίας, με σταθερούς χρήστες και μεταβλητό λάμδα.



Γράφημα 5.8 Average Buffer Occupancy στην μεριά των χρηστών, με σταθερούς χρήστες και μεταβλητό λάμδα.



Γράφημα 5.9 Average Buffer Occupancy στην μεριά των χρηστών, με σταθερό λάμδα και μεταβλητό αριθμό χρηστών.

Από τα παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε πώς αυξάνοντας των αριθμό των χρηστών ή την τιμή λάμδα στην κατανομή Poisson αυξάνεται το πλήθος των πακέτων στην εκάστοτε ουρά (χρηστών/κεραίας). Όσο η ρυθμαπόδοση του δικτύου εξυπηρετεί τις ανάγκες του δικτύου με μεγαλύτερο ρυθμό τα πακέτα δεν αυξάνονται στις ουρές. Τα ανωτέρω γραφήματα μπορούν να μας δώσουν σημαντικά συμπεράσματα καθώς στην πραγματικότητα οι ουρές των τερματικών καθώς και των σταθμών βάσης eNodeB έχουν περιορισμένο μέγεθος.

5.3.2 Σενάριο 2.

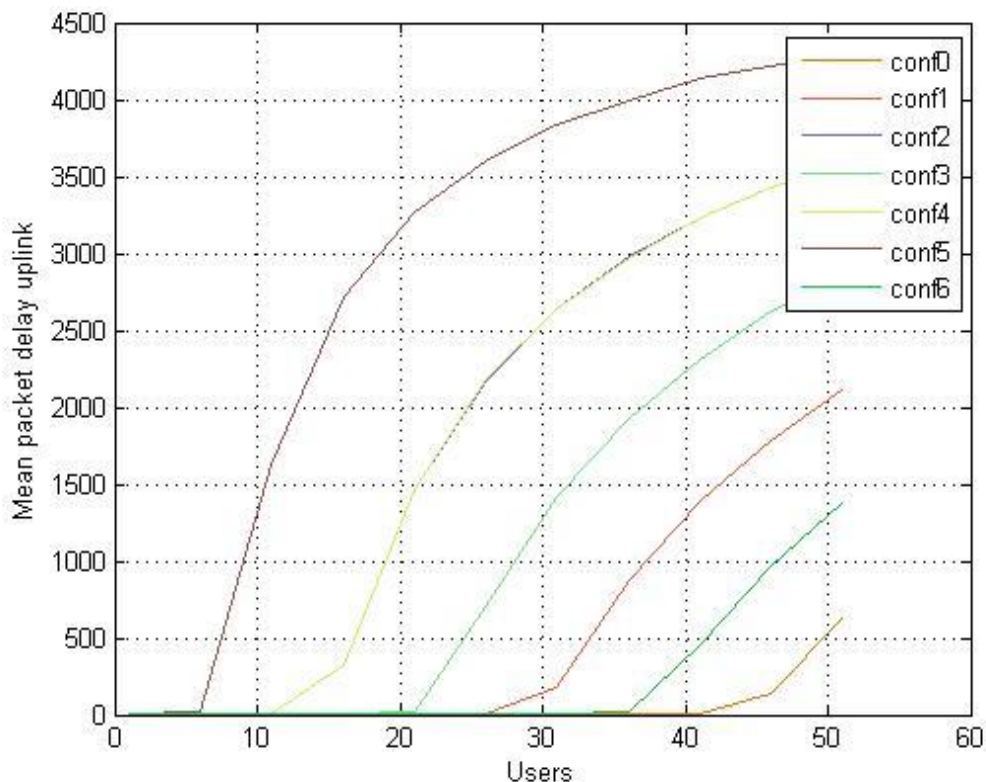
Δεδομένα Προσομοίωσης

Σε αυτό το σενάριο ο προσομοιωτής μας επεξεργάζεται πακέτα πραγματικής κίνησης Real Media Streaming TCP. Επομένως τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν από αυτό το σενάριο θα είναι μια πιθανή βέλτιστη λύση για εφαρμογές που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους δεδομένα όπως η παρακολούθηση ενός βίντεο στο διαδίκτυο.

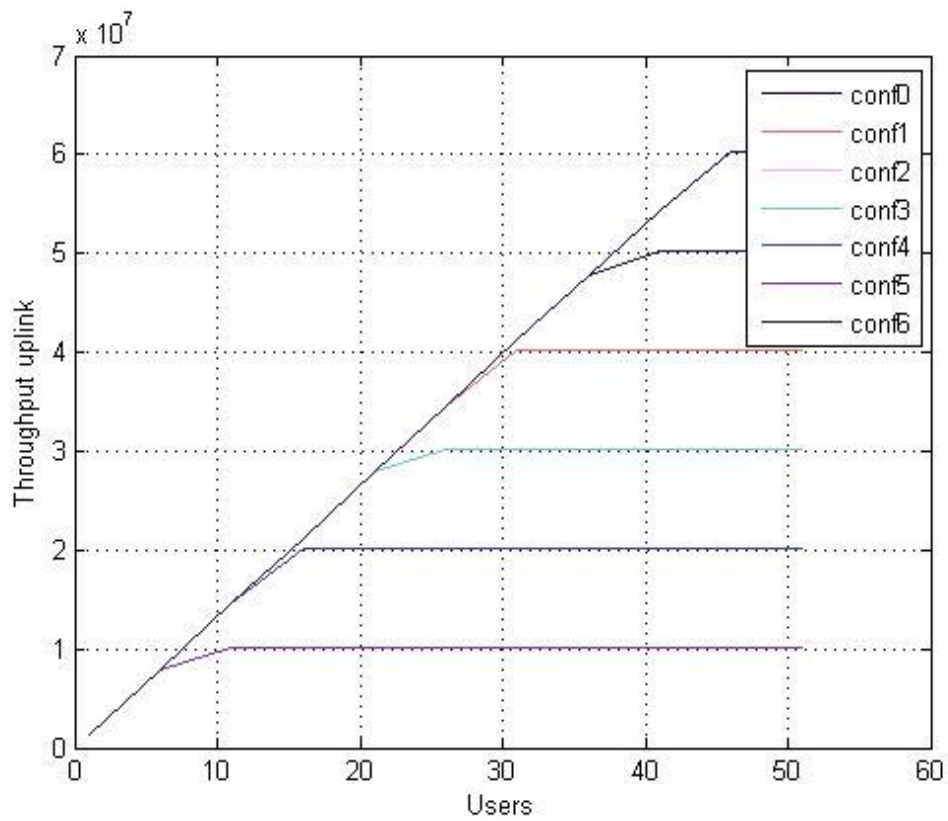
Αναλυτικότερα:

- Simulation_time = 10000 msec.
- Αριθμός χρηστών/τερματικών στο δίκτυο = 1:5:51.

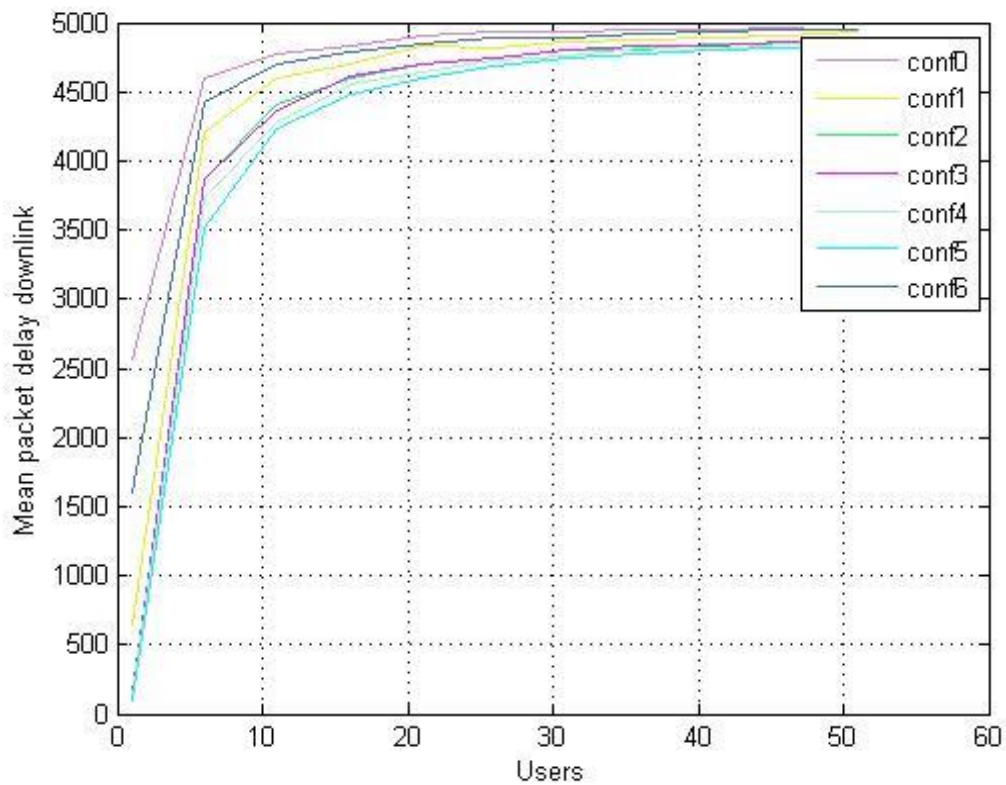
Για τον αλγόριθμο Persistent Scheduling.



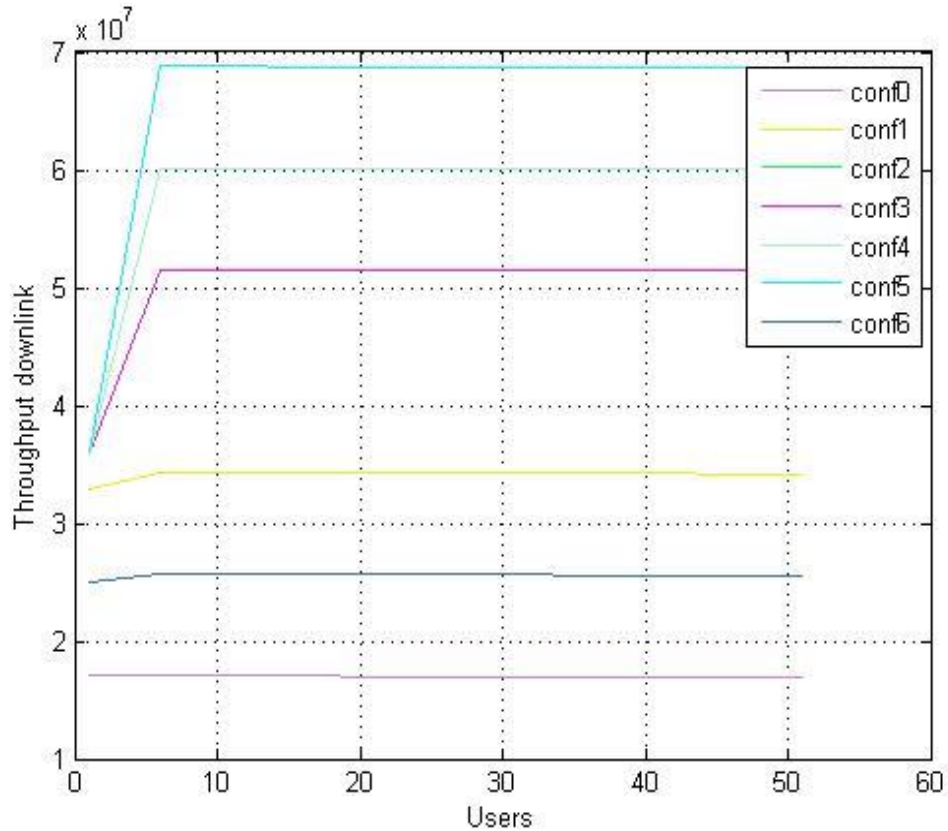
Γράφημα 5.10 Μέση καθυστέρηση πακέτων για την ανερχόμενη ζεύξη, σε φόρτο πραγματικής κίνησης Real Media Streaming TCP.



Γράφημα 5.11 Ρυθμαπόδοση δικτύου για την ανερχόμενη ζεύξη, σε φόρτο πραγματικής κίνησης Real Media Streaming TCP.

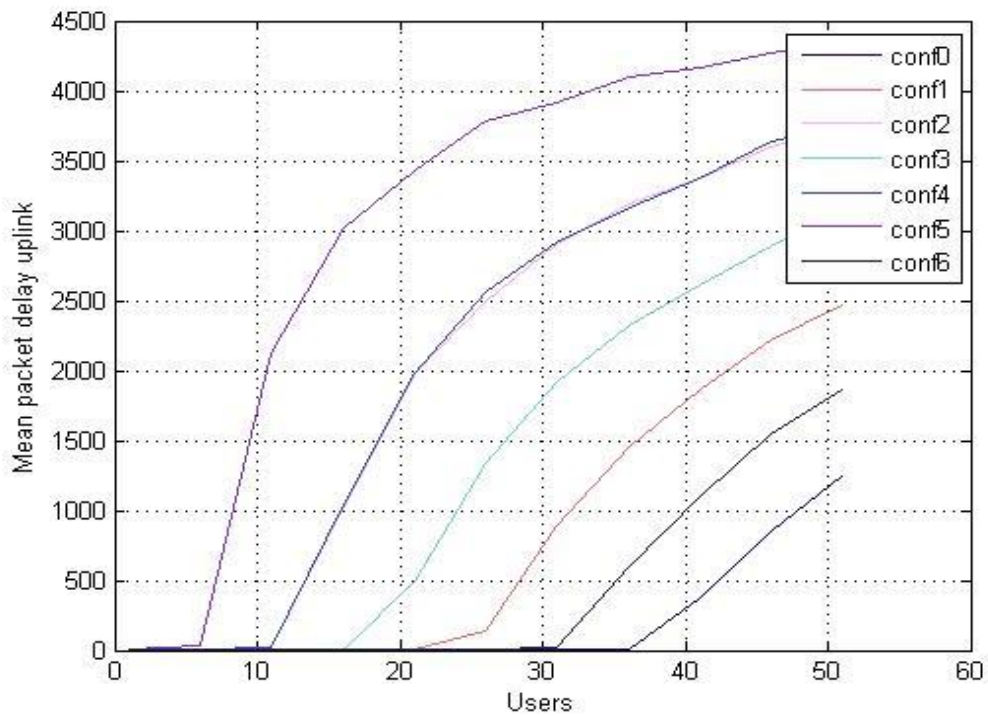


Γράφημα 5.12 Μέση καθυστέρηση πακέτων για την κατερχόμενη ζεύξη, σε φόρτο πραγματικής κίνησης Real Media Streaming TCP.

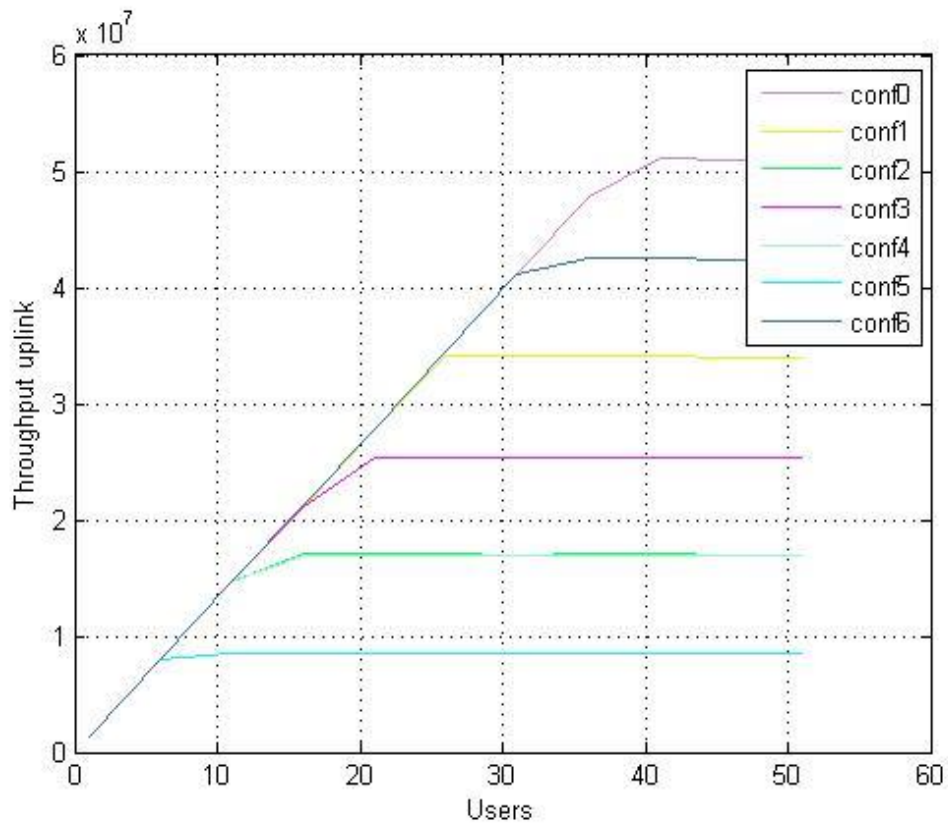


Γράφημα 5.13 Ρυθμαπόδοση δικτύου για την κατερχόμενη ζεύξη, σε φόρτο πραγματικής κίνησης Real Media Streaming TCP.

Για τον αλγόριθμο Maxmin Fairness.



Γράφημα 5.14 Μέση καθυστέρηση πακέτων για την ανερχόμενη ζεύξη, σε φόρτο πραγματικής κίνησης Real Media Streaming TCP.



Γράφημα 5.15 Ρυθμαπόδοση δικτύου για την ανερχόμενη ζεύξη, σε φόρτο πραγματικής κίνησης Real Media Streaming TCP.

Με την παρατήρηση στα ανωτέρω γραφήματα μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα πως ο αλγόριθμος Persistent Scheduling σε σύγκριση με τον αλγόριθμο Maxmin Fairness παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει καθώς στην ανερχόμενη ζεύξη αν και η κορυφή στην μέση καθυστέρηση πακέτων είναι κοινή, και κυμαίνεται στα 4000 – 4500 ms, στο σύνολο των διαμορφώσεων παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές και αυτό γίνεται αντιληπτό στην ρυθμαπόδοση της ανερχόμενης ζεύξης που ο αλγόριθμος Persistent Scheduling παρουσιάζει ανώτερη τιμή κατά 10 Mbps σε σύγκριση με τον αλγόριθμο Maxmin Fairness. Η συμπεριφορά στην κατερχόμενη ζεύξη είναι κοινή και παρατηρείται, όπως και στο σενάριο 1 ίδιες συμπεριφορές ανάμεσα στις διαμορφώσεις με ίδιο αριθμό υποπλαισίων για ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη.

5.3.3 Σενάριο 3.

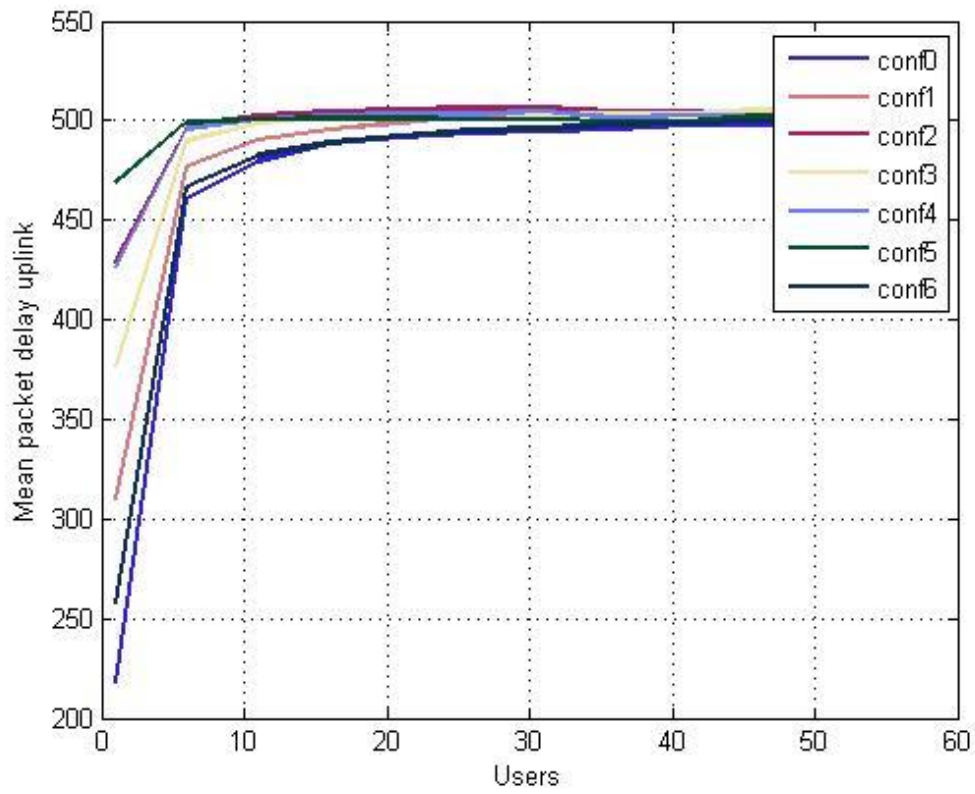
Δεδομένα Προσομοίωσης

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης πραγματευόμαστε πακέτα για VoIP υπηρεσίες. Το χαρακτηριστικό τους είναι το μικρότερο μέγεθος και ο μικρότερος χρόνος δημιουργίας του πακέτου. Οι προσομοιώσεις στην Matlab για αυτό το σενάριο ήταν οι πιο χρονοβόρες, μέχρι και 14 ώρες προσομοίωσης, καθώς για να έρθει εις πέρας η προσομοίωση απαιτούνταν αλληπάλληλες προσθέσεις ελάχιστων, σε μέγεθος, χρόνων δημιουργίας πακέτου. Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από αυτά τα σενάρια προσομοίωσης μπορούν να οδηγήσουν σε ένα πιθανό βέλτιστο αλγόριθμο για υπηρεσίες VoIP (όπως Skype Call). Σε αυτό το σενάριο, και σύμφωνα πάντα με την βιβλιογραφία μας, αναμένουμε ο αλγόριθμος Persistent Scheduling να παρουσιάσει καλύτερη συμπεριφορά συγκριτικά με τον Maxmin Fairness. Οδηγούμαστε σε αυτό το συμπέρασμα από το γεγονός ότι αυτή ήταν η αιτία της ανάπτυξης του επίμονου και του ημι – επίμονου προγραμματισμού, για να βρει εφαρμογή σε υπηρεσίες τύπου VoIP μειώνοντας το overhead από τα control packet του δικτύου.

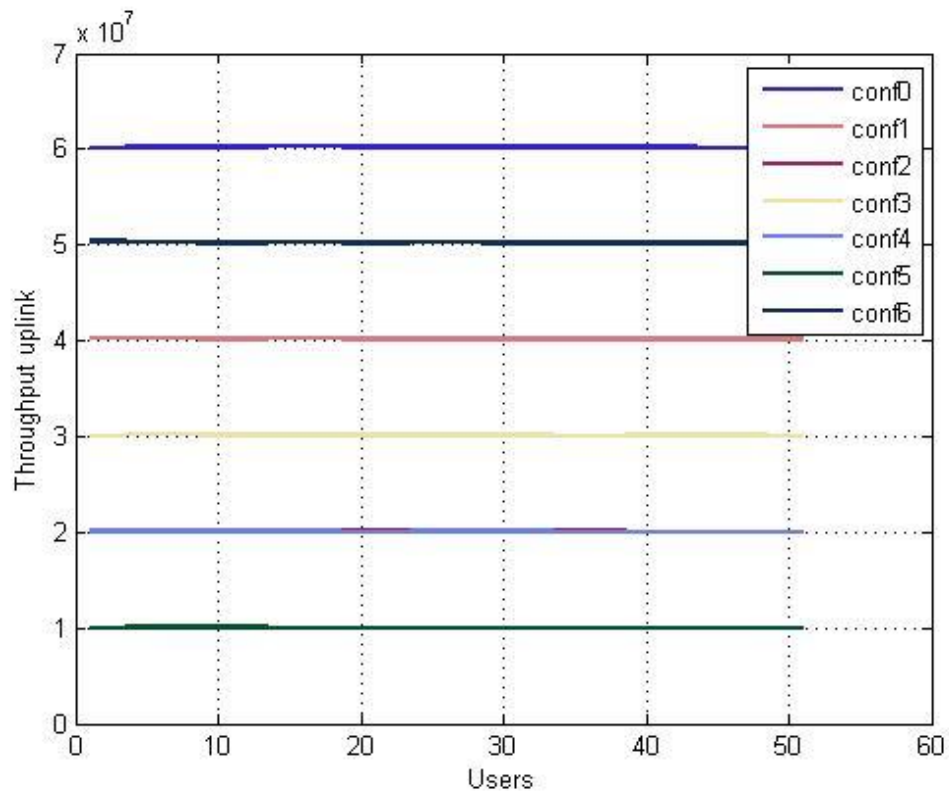
Αναλυτικότερα:

- Simulation_time = 1000 msec.
- Αριθμός χρηστών/τερματικών στο δίκτυο = 1:5:51.

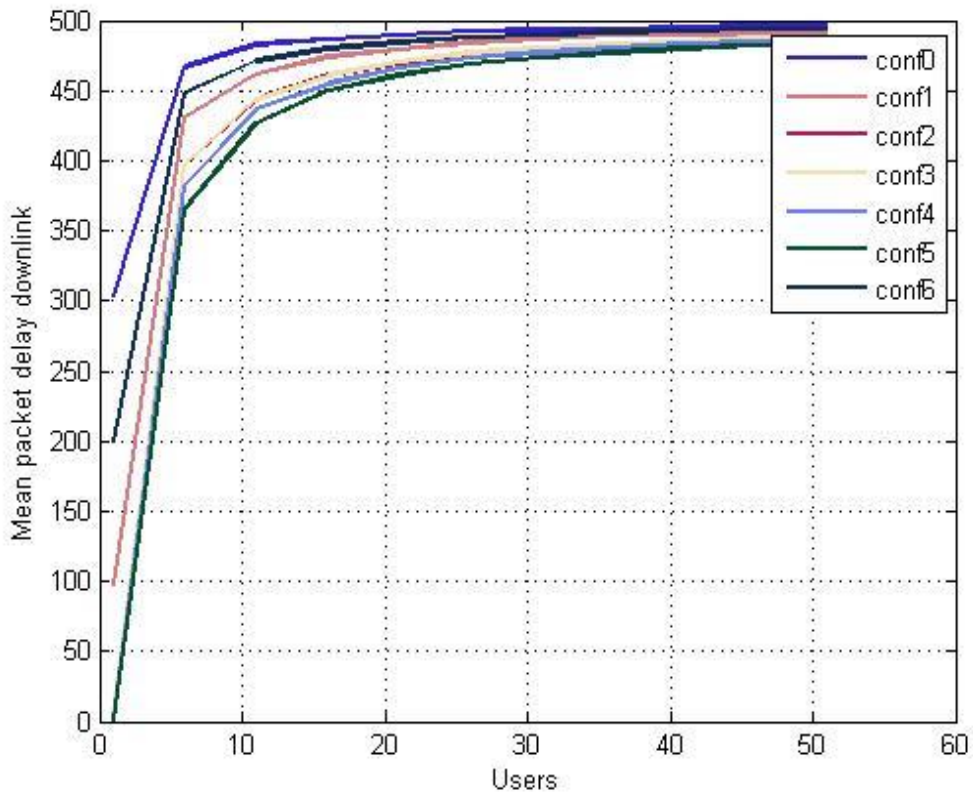
Για τον αλγόριθμο Persistent Scheduling.



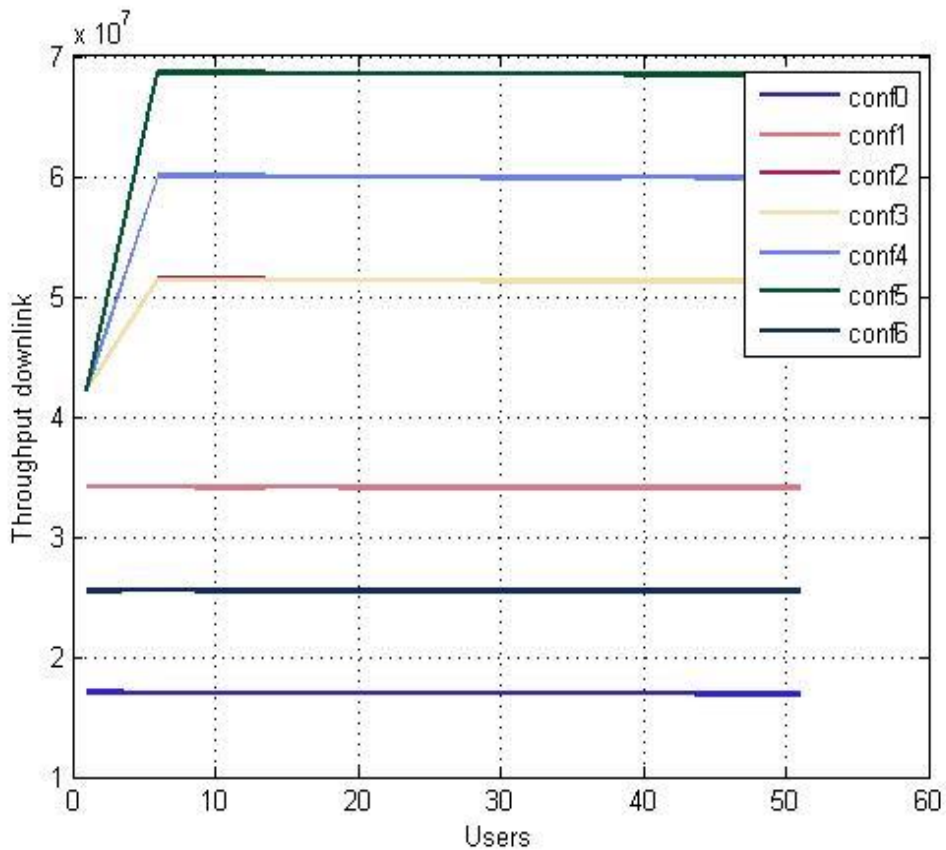
Γράφημα 5.16 Μέση καθυστέρηση πακέτων στην ανερχόμενη ζεύξη, για φόρτο κίνησης VoIP.



Γράφημα 5.17 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης VoIP.

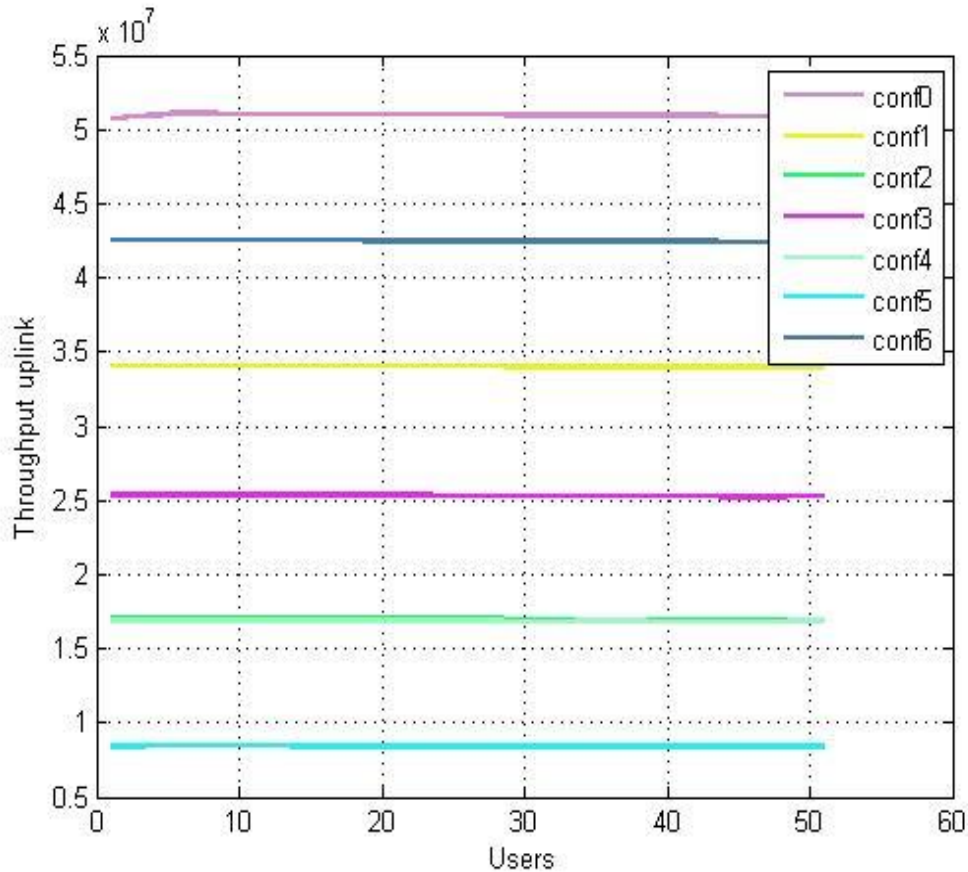


Γράφημα 5.18 Μέση καθυστέρηση πακέτων κατερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης VoIP.



Γράφημα 5.19 Ρυθμαπόδοση κατερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης VoIP.

Για τον αλγόριθμο Maxmin Fairness.



Γράφημα 5.20 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης VoIP.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως ο αλγόριθμος Persistent Scheduling επιτυγχάνει καλύτερη επίδοση εν συγκρίσει με τον Maxmin Fairness. Παρατηρούμε πως η μέση καθυστέρηση πακέτων τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη έχει πολύ μικρές τιμές (μικρότερες από μισό δευτερόλεπτο), καθώς επίσης και πως η ρυθμαπόδοση του δικτύου έχει σταθερές τιμές, γεγονός που είναι απαραίτητο για να εξυπηρετηθεί μια υπηρεσία τύπου VoIP. Μεγάλες διακυμάνσεις θα καθιστούσαν αδύνατη την ζεύξη υπό τις απαιτούμενες προϋποθέσεις για την ποιότητα υπηρεσιών. Ο αλγόριθμος Persistent Scheduling επιτυγχάνει 10 Mbps καλύτερη ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης σε σύγκριση με τον Maxmin Fairness.

5.3.4 Σενάριο 4.

Δεδομένα Προσομοίωσης

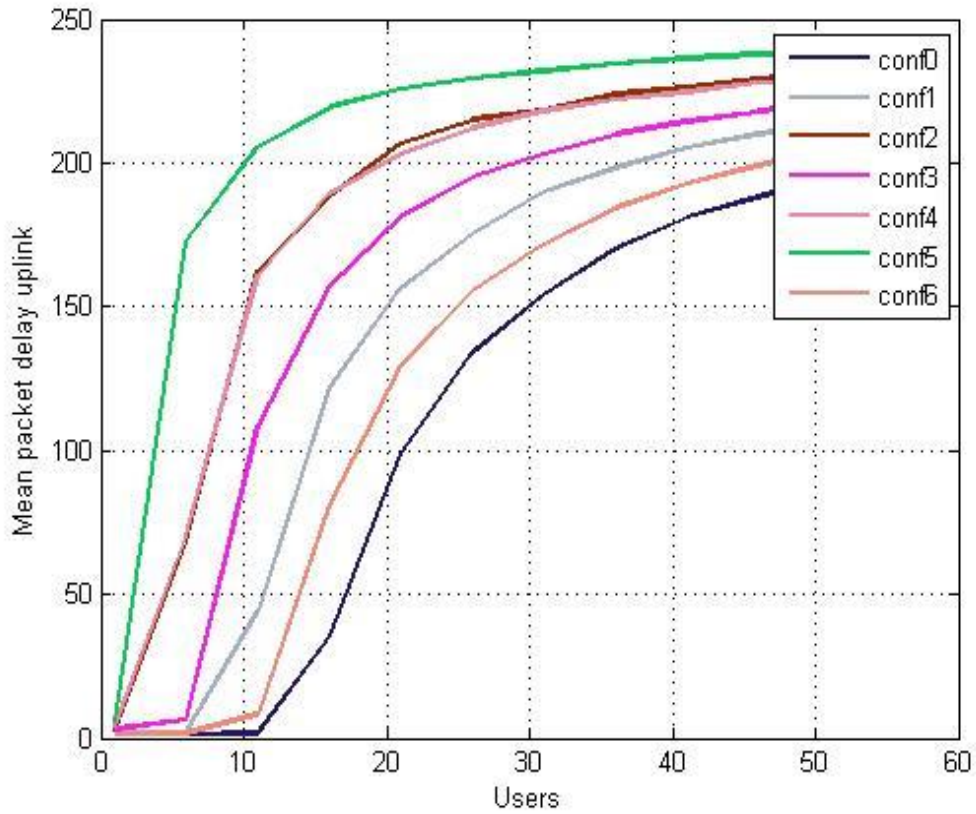
Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης χρησιμοποιούμε πραγματικό φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP. Η διαφορά σε σύγκριση με τον φόρτο κίνησης Real Media Streaming TCP βρίσκεται στο πρωτόκολλο που τα δύο αυτά είδη χρησιμοποιούν. Το TCP παρέχει καλύτερη ασφάλεια αλλά υψηλότερους χρόνους καθυστέρησης, ενώ το UDP δεν παρέχει ασφάλεια αλλά επιτυγχάνει χαμηλότερους χρόνους καθυστέρησης.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τα γραφήματα των προσομοιώσεων μπορούν να μας οδηγήσουν σε ένα πιθανό βέλτιστο αλγόριθμο για τις υπηρεσίες που χρησιμοποιούν παρόμοιο φόρτο κίνησης.

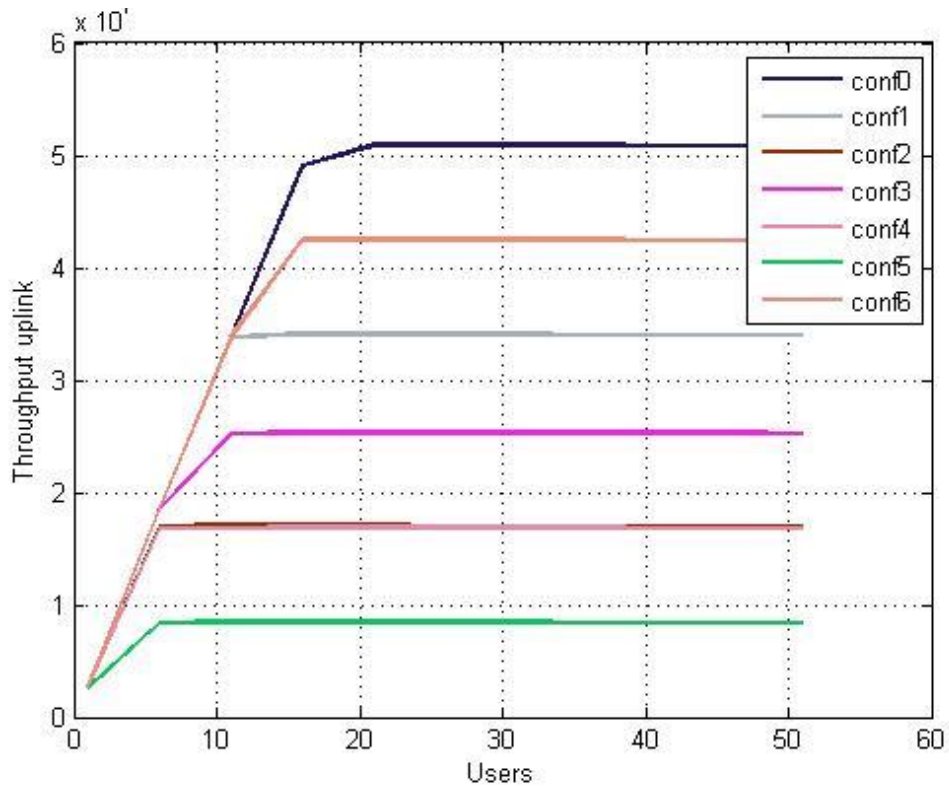
Αναλυτικότερα:

- Simulation_time = 1000(-500) msec.
- Αριθμός χρηστών/τερματικών στο δίκτυο = 1:5:51.

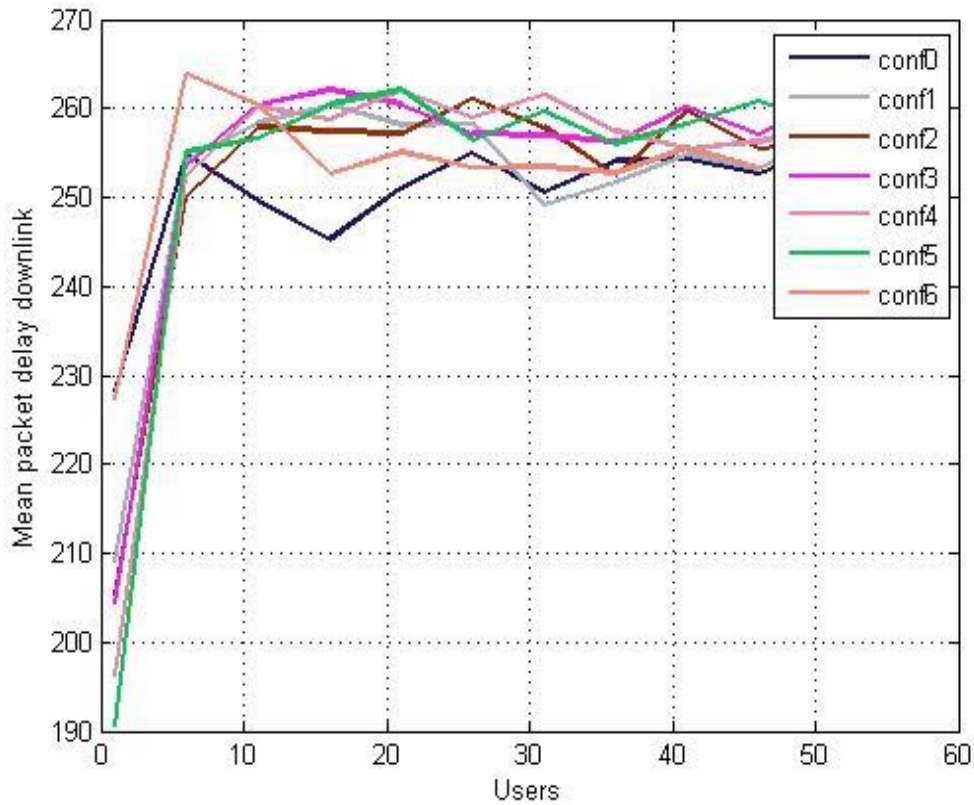
Για τον αλγόριθμο Maxmin Fairness.



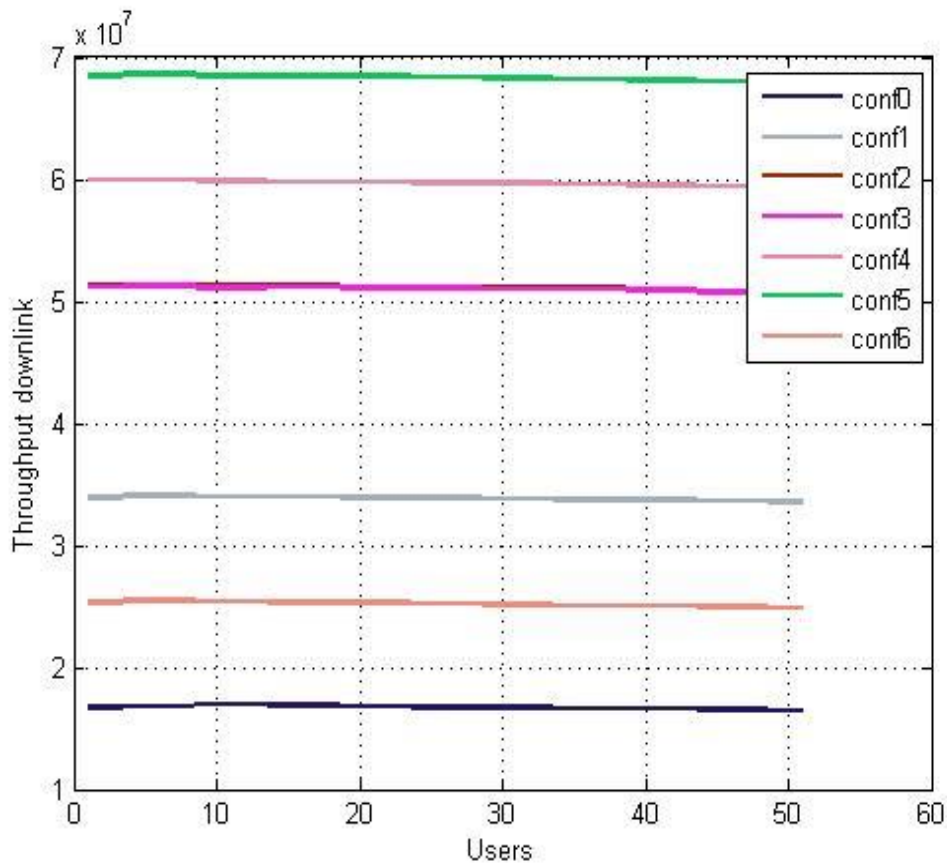
Γράφημα 5.21 Μέση καθυστέρηση πακέτων ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP.



Γράφημα 5.22 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP.

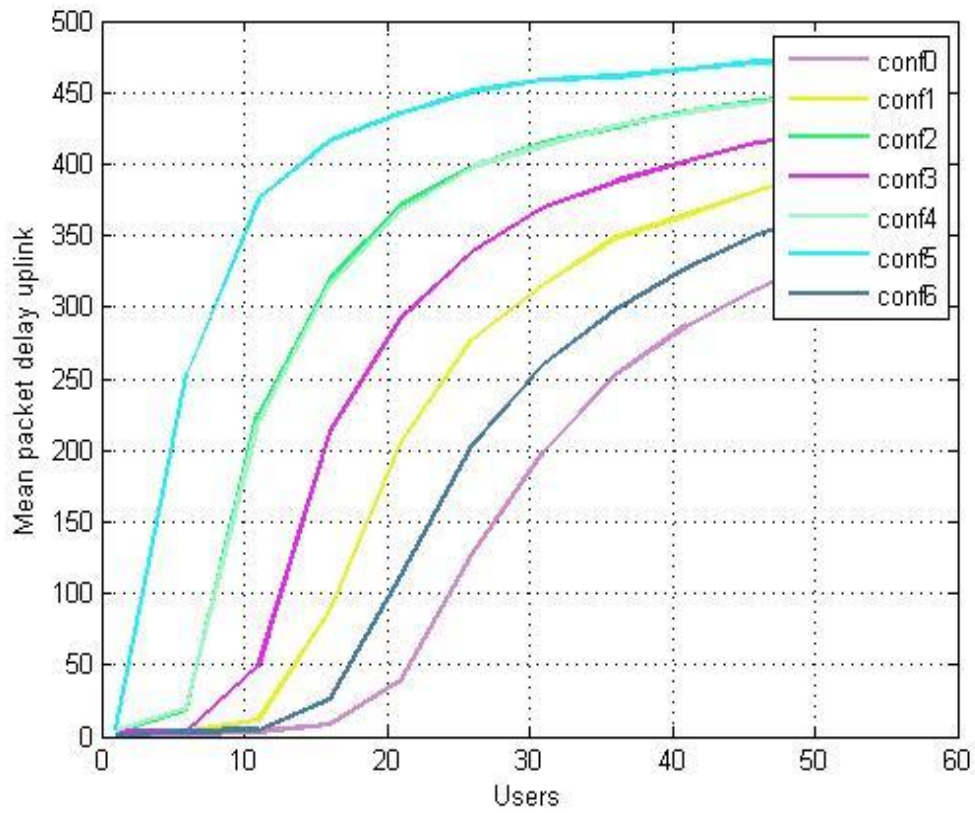


Γράφημα 5.23 Μέση καθυστέρηση πακέτων κατερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP.

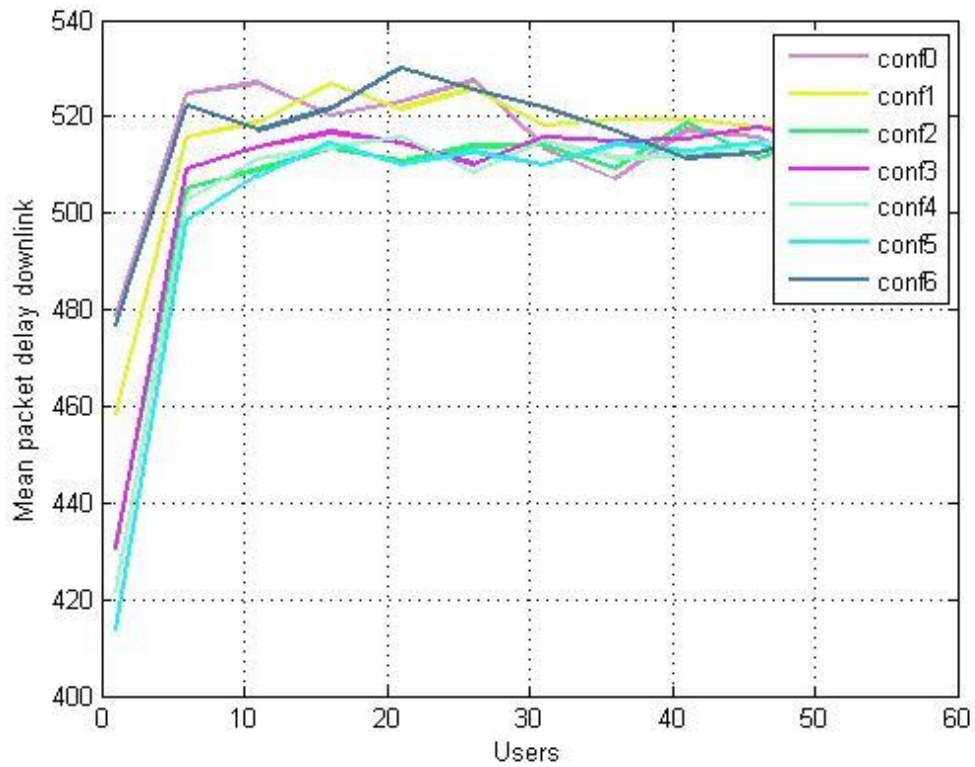


Γράφημα 5.24 Ρυθμαπόδοση κατερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP.

Για τον αλγόριθμο Persistent Scheduling.

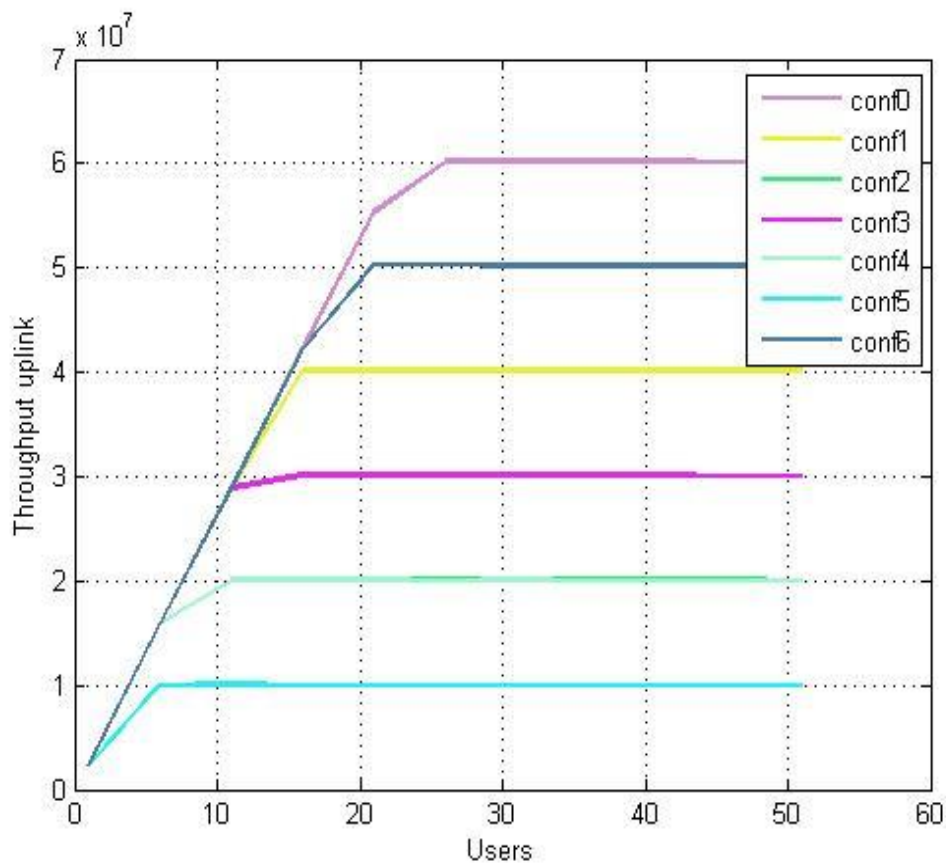


Γράφημα 5.25 Μέση καθυστέρηση πακέτων ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP.



Γράφημα 5.26 Μέση καθυστέρηση πακέτων ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP.

Με γνώμονα τα παραπάνω γραφήματα μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα πως ο αλγόριθμος Maxmin Fairness επιτυγχάνει μικρότερες μέσες καθυστερήσεις πακέτων σε σύγκριση με τον αλγόριθμο Persistent Scheduling ο οποίος παρουσιάζει υπερδιπλάσιες τιμές στην μέση καθυστέρηση πακέτων. Δεδομένου ότι ζητούμενο για τα δεδομένα που χρησιμοποιούν φόρτο κίνησης με Real Media Streaming UDP, καλύτερες αποκρίσεις στις καθυστερήσεις ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης είναι απαραίτητες. Λαμβάνοντας υπόψιν τα ανωτέρω καταλήγουμε στην επιλογή του Maxmin Fairness παρά το γεγονός ότι ο αλγόριθμος Persistent Scheduling επιτυγχάνει μεγαλύτερες τιμές ρυθμαπόδοσης στην ανερχόμενη ζεύξη όπως φαίνεται και στο **Γράφημα 5.27**.



Γράφημα 5.27 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP (Persistent Scheduling Algorithm).

5.3.5 Σενάριο 5.

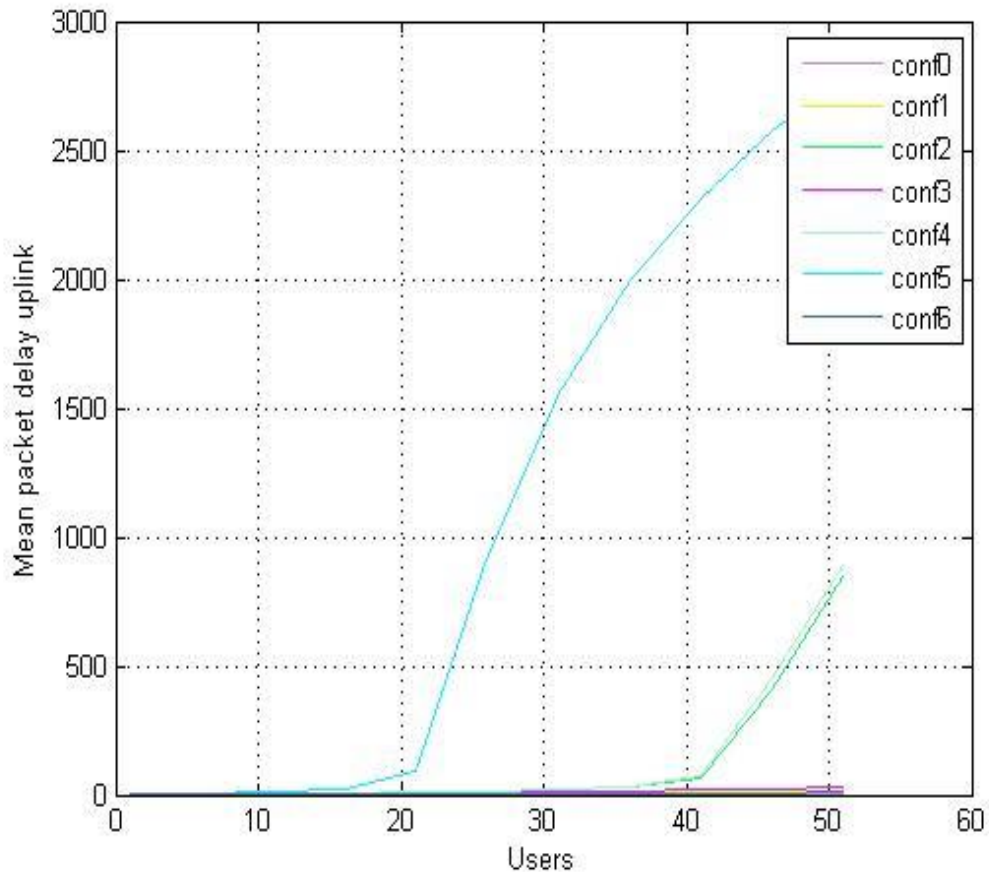
Δεδομένα Προσομοίωσης.

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης ο φόρτος κίνησης προέρχεται από πραγματικά πακέτα Live Streaming υπηρεσιών όπως αυτά κατεγράφησαν στο Wireshark.

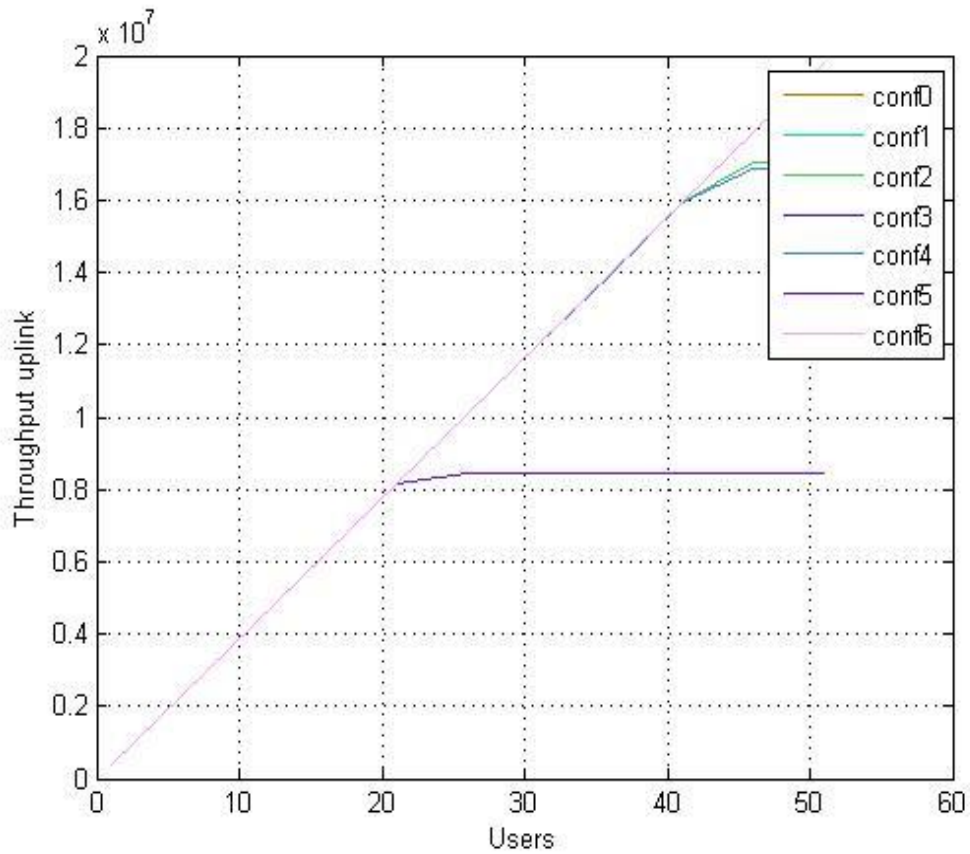
Αναλυτικότερα:

- Simulation_time = 10000 msec.
- Αριθμός χρηστών/τερματικών στο δίκτυο = 1:5:51.

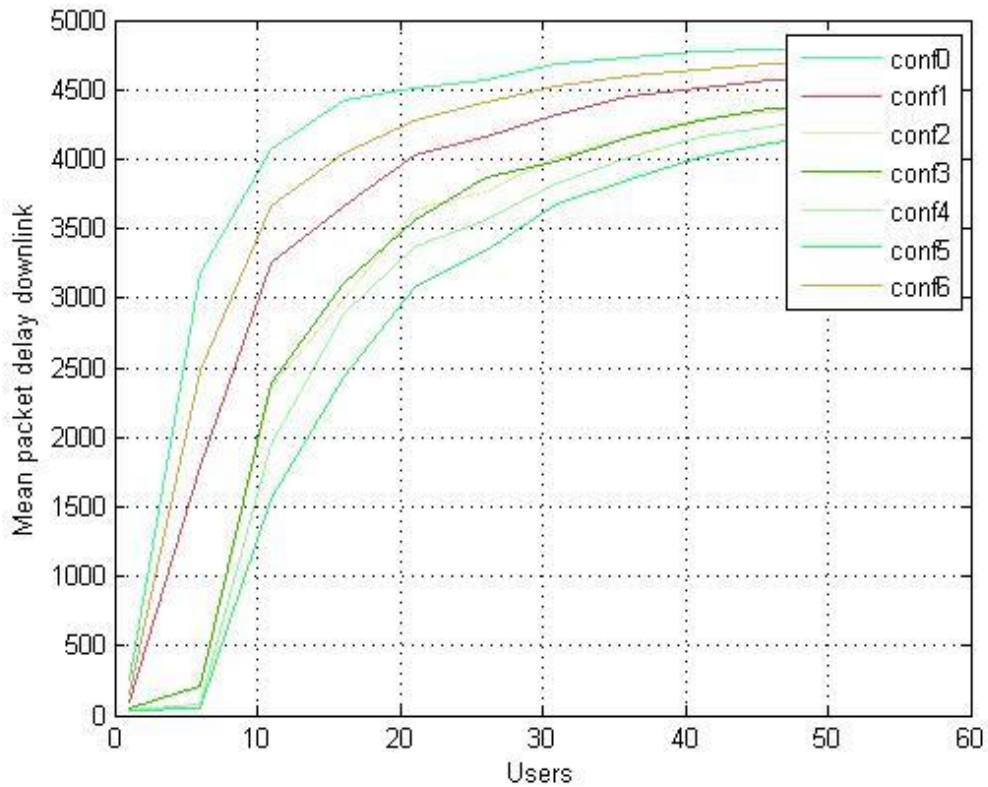
Για τον αλγόριθμο Maxmin Fairness.



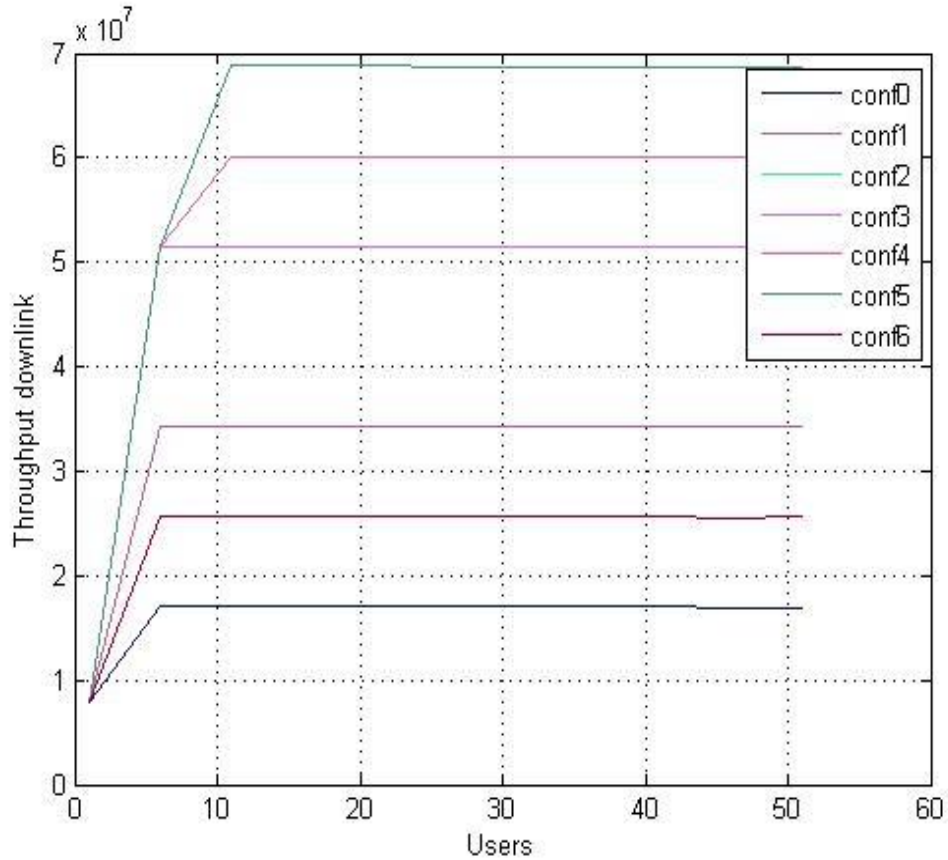
Γράφημα 5.28 Μέση καθυστέρηση πακέτων ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Live Streaming.



Γράφημα 5.29 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Live Streaming.

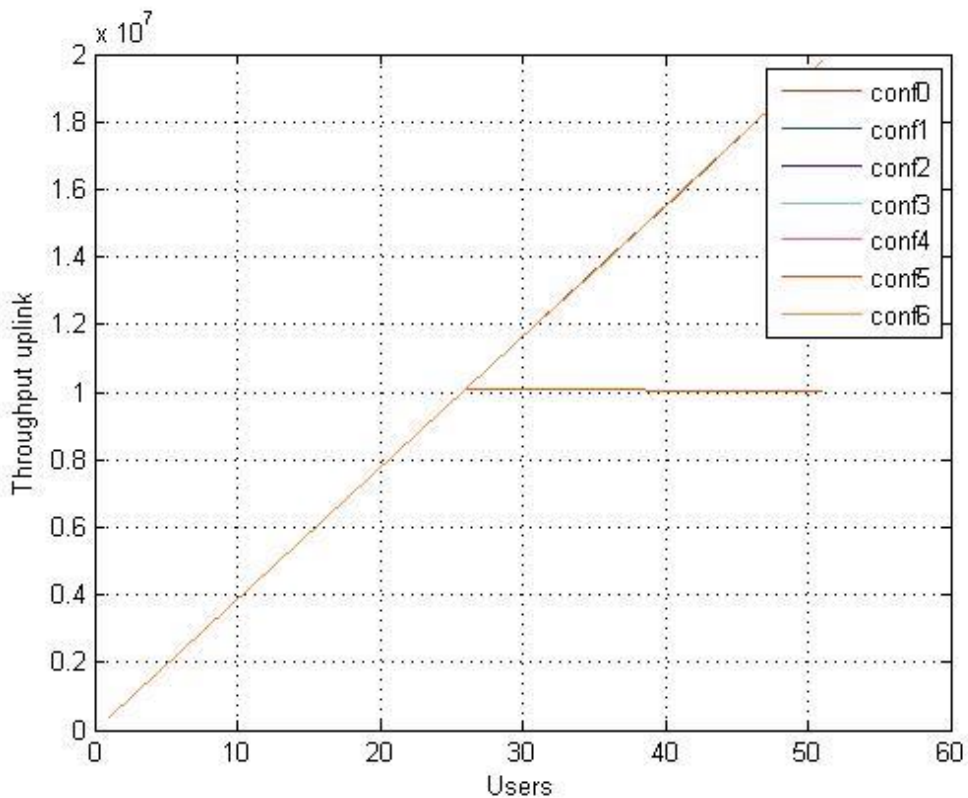


Γράφημα 5.30 Μέση καθυστέρηση πακέτων κατερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Live Streaming.



Γράφημα 5.31 Ρυθμαπόδοση κατερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Live Streaming.

Για τον αλγόριθμο Persistent Scheduling.



Γράφημα 5.32 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Live Streaming.

Στα παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε πως ο αλγόριθμος Maxmin Fairness επιτυγχάνει καλύτερες επιδόσεις στην ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης και αυτό αποτελεί το βασικό του πλεονέκτημα σε σχέση με τον αλγόριθμο Persistent Scheduling, του οποίου αν παραβλέψουμε την κορυφή στη μέση καθυστέρηση πακέτων ανερχόμενης ζεύξης παρουσιάζει καλύτερες τιμές σε σχέση με τον αλγόριθμο Maxmin Fairness.

5.4 Συμπεράσματα.

Τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς LTE δεν είναι τυχαία η εμπορική επιτυχία της ομάδας τεχνολογιών 4^{ης} γενιάς. Υψηλότερες τιμές ρυθμαπόδοσης ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, χαμηλότερες τιμές μέσης καθυστέρησης πακέτων, δεν επετεύχθησαν μόνο για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες του καταναλωτικού κοινού αλλά και για να δημιουργήσουν καινούργιες. Οι δυνατότητες που παρέχουν στους παρόχους κινητών επικοινωνιών για αναβαθμίσεις των δικτύων τους με χαμηλό κόστος και νέες υπηρεσίες για να προσφέρουν στο καταναλωτικό κοινό δημιουργούν ένα ανταγωνιστικό πεδίο εύφορο για μελλοντικές εξελίξεις αλλά και για τον καταναλωτή που θα έχει την δυνατότητα να απολαμβάνει τις νέες τεχνολογίες σε χαμηλές τιμές.

Οι επτά διαφορετικές διαμορφώσεις πλαισίου που προσφέρει η τεχνολογία LTE είναι το μεγαλύτερο πλεονέκτημά της στην άμεση προσαρμογή στις απαιτήσεις του δικτύου, χωρίς την περαιτέρω μελέτη με την βοήθεια κάποιων αλγορίθμων, όπως στην παρούσα Διπλωματική εργασία, παρέχει μεγάλες δυνατότητες στον τρόπο λειτουργίας της τεχνολογίας αλλά και στους στόχους που θέτει.

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία μελετήσαμε συνολικά τρεις αλγορίθμους και πειραματιστήκαμε με συνολικά έξι διαφορετικούς αλγορίθμους. Η ακρίβεια που μας προσφέρει το γεγονός ότι οι αλγόριθμοι δοκιμάστηκαν σε συνολικά τέσσερα διαφορετικά σενάρια

πραγματικής κίνησης, τα οποία καταγράψαμε με την βοήθεια του προγράμματος Wireshark, μας οδηγεί σε ασφαλή συμπεράσματα για την συμπεριφορά των αλγορίθμων σε δεδομένα πραγματικής κίνησης.

Μπορούμε, με έναν μεγάλο βαθμό ασφαλείας, να καταλήξουμε στις προτάσεις συγκεκριμένων αλγορίθμων για τα τέσσερα διαφορετικά σενάρια πραγματικής κίνησης. Στα σενάρια κίνησης των Real Media Streaming TCP πρωτοκόλλου καθώς επίσης και στο Voice over Internet Protocol, παρατηρήθηκε πως ο αλγόριθμος Persistent Scheduling προσαρμόζεται καλύτερα στις ανάγκες του δικτύου επιτυγχάνοντας τιμές ρυθμαπόδοσης κατερχόμενης ζεύξης μεγαλύτερες των 70 Mbps και ανερχόμενης ζεύξης μεγαλύτερες των 60 Mbps. Η μέση καθυστέρηση των πακέτων τόσο την ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη, στο σενάριο VoIP φόρτου κίνησης, δεν ξεπερνά το μισό δευτερόλεπτο. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφέρουμε πως δεν έχουμε την χρήση της τεχνολογίας MIMO με πολλαπλές κεραιές, το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως ακόμα καλύτερες τιμές ρυθμαπόδοσης και μέσης καθυστέρησης πακέτων ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης μπορούν να επιτευχθούν. Στα σενάρια πραγματικού φόρτου κίνησης Live Streaming καθώς και Real Media Streaming UDP πρωτοκόλλου, ο αλγόριθμος Maxmin Fairness παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα με οριακά καλύτερες επιδόσεις στην ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης στο σενάριο Live Streaming και με υπο - διπλάσιες τιμές στους μέσους χρόνους καθυστέρησης ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης στο σενάριο Real Media Streaming UDP.

Στις τερματικές συσκευές νέας τεχνολογίας συχνά συναντάται το φαινόμενο της παράλληλης χρήσης διαφορετικών εφαρμογών με επίσης διαφορετική ποιότητα υπηρεσιών. Ο χρήστης μπορεί να μιλάει με την χρήση μιας VoIP εφαρμογής (πχ Skype, Viber), να στέλνει ένα mail (Simple Mail Transfer Protocol - SMTP) και να βλέπει ένα βίντεο στο Youtube (Real Media Streaming TCP-UDP), επομένως το δίκτυο θα πρέπει να μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του με γρήγορη εναλλαγή ανάμεσα στους αλγορίθμους – μεθόδους που ικανοποιούν με

τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα εκάστοτε διαφορετικά χαρακτηριστικά των πακέτων και των διαφορετικών απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσιών, επιτυγχάνοντας τις καλύτερες δυνατές τιμές ρυθμαπόδοσης και μέσης καθυστέρησης πακέτων αλλά και την δίκαιη και ορθότερη αξιοποίηση των πόρων του κάθε δικτύου.

Οι ενέργειες και κατά συνέπεια οι ευθύνες που επιβαρύνουν τον Προγραμματιστή του σταθμού βάσης πρέπει να αντιμετωπιστούν ως βαθμοί ελευθερίας και πάνω σε αυτούς με έρευνα να μπορέσει ο Μηχανικός Τηλεπικοινωνιών να προβεί σε νέες προτάσεις και καλύτερα αποτελέσματα.

Οι στόχοι για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη της παρούσας Διπλωματικής εργασίας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 3 ευρύτερες περιοχές όπου:

- Στην πρώτη, νέες μέθοδοι – αλγόριθμοι, κυρίως από την κατηγορία αλγορίθμων πρόβλεψης (πχ Random Forest, Support Vector Machines), θα εξετασθούν για τις επιδόσεις που επιτυγχάνουν στο δίκτυο. Σημαντική παρατήρηση, σε αυτήν την περίπτωση περαιτέρω έρευνας, είναι πως πρέπει να δοθεί μεγάλο βάρος στην κατηγοριοποίηση των δεδομένων, θα πρέπει δηλαδή να αναζητηθεί η καλύτερη προσεγγιστικά συμπεριφορά των δεδομένων (πχ και αυτό αποτελεί πρόταση K-means clustering).
- Στην δεύτερη, απαραίτητο και αναγκαίο κρίνεται ένα αρκετά εκτενές αρχείο καταγραφής πακέτων δικτύου, το οποίο θα βοηθήσει στην καλύτερη μελέτη της συμπεριφοράς ενός πραγματικού φόρτου κίνησης και θα αποφευχθούν τα κλασικά προβλήματα που παρουσιάζουν οι αλγόριθμοι πρόβλεψης, όπως είναι το over – training, με αποτέλεσμα καλύτερες επιδόσεις.
- Τέλος, στην τελευταία περιοχή μελλοντικής έρευνας και ανάπτυξης, κρίνεται αναγκαία η μετάβαση από την γλώσσα προγραμματισμού Matlab σε κάποια γλώσσα χαμηλότερου επιπέδου καθώς οι προσομοιώσεις, όπως βέβαια ήταν αναμενόμενο, ήταν αρκετά χρονοβόρες (περισσότερες από 200

ώρες προσομοιώσεων για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία) και παρουσιάστηκαν αρκετοί περιορισμοί όσον αφορά το συνολικό μέγεθος των χρηστών του δικτύου αλλά και τον χρόνο της προσομοίωσης για συγκεκριμένα είδη κίνησης.

Βιβλιογραφία.

- [1]https://sites.google.com/site/plirkaiekp/yliko/Diktya_Kinitis_Tilefwni_as.ppt?attredirects=0.
- [2]http://archive.eurescom.eu/message/messageMar2005/images/Daidalos_figure.jpg.
- [3]C. Vasilopoulos, D. Kotoulas, D. Xenikos, P. Voudas, G. Heliotis, G. Agapiou and T. Doukoglou, “Wireless Access Networks New Generation”, “Future Implementations on Access Networks” in New Generation Access Networks, 1st edition, Athens 2010, ch.2,3, pp. 163-376.
- [4]<http://coolspotters.com/files/photos/957230/mobile-radio-telephone-profile.jpg>.
- [5]<http://www.gizmodo.fr/wp-content/uploads/2010/10/imts.jpg>.
- [6]<http://www.teliasonerahistory.com/sources/svenolof-karlssons-the-pioneers/the-pioneers-page-2/>.
- [7] http://cache.osta.ee/iv2/auctions/1_1_17544790.jpg.
- [8]http://static.knowyourmobile.com/sites/knowyourmobilecom/files/styles/gallery_wide/public/6/15/128578.jpg?itok=jeQmVt5r
- [9]3GPP2 C.R1002-0 Version 1.0, “CDMA2000 evaluation methodology,” <http://www.3gpp2.org/>.
- [10] S. Z. Asif, “Wireless Communications Evolution to 3G and Beyond,” Artech House, Inc. 2007.
- [11] H. Holma and A. Toskala, “LTE for UMTS, OFDMA andSC-FDMA Based Radio Access,” John Wiley & Sons, 2009.
- [12] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, P. Beming, “3G Evolution – HSPA and LTE for Mobile Broadband”, 2nd ed., Academic Press, 2008.

- [13] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, and P. Beming, 3G HSPA and LTE for Mobile Broadband. New York: Academic, 2007.
- [14] 3GPP, “Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical channels and modulation,” Tech. Spec. 36.211 v8.7.0, Jun. 2009. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org>
- [15] 3GPP, “Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN);overall description,” Tech. Spec. 36.300 v8.0.0, Mar. 2007. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org>.
- [16] Cisco BNI Mobile 2014.
- [17]A. Courtelis and F. Paulidou , “4th Generation Networks”, M.S. thesis, Dept. Elect. Eng., Aristoteleio Univ., Thessaloniki, Jul. 2009.
- [18]E. Bourgani, G. Oikonomou and S. Louvros, “Simulation of Physical Downlink Channel in LTE Technology”, M.S. thesis, Dept. Electronics and Information Process, Patras Univ., Patra 2011.
- [19] <http://www.3gpp.org/ftp/Inbox/Marcoms/Logos/LTE-Logo-digital-formats/PNG/LTE-Logo/>.
- [20] <http://multi-ip.pl/strona/wimax-dynamiczna-limitowana.html>.
- [21]<http://www.tutorialspoint.com/lte/> ... (August 2014).
- [22]http://patentimages.storage.googleapis.com/WO2013022310A2/PC_TKR2012006393-appb-T000002.png.
- [23] <http://www.intechopen.com/source/html/9484/media/image2.jpg>.
- [24] ITU World Telecommunication/ ICT Indicators DataBase.
- [25] http://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm.
- [26] http://www.artizanetworks.com/lte_tut_what_lteenb.html.
- [27] http://4g-lte-world.blogspot.gr/2012_06_01_archive.html.
- [28] http://www.artizanetworks.com/img/lte_tut_lte_fig18.jpg.

[29] <http://danielwireless.com/wcet/wp-content/uploads/2012/10/LTE-Advanced-Logo-RGB-L.png>.

[30] http://2.bp.blogspot.com/-fPIIE2qEovE/TrJEhMU16I/AAAAAAAAADh0/jgX1N9C0ehY/s1600/LTE_TDD_FDD_FrameStructure.jpg.

[31] http://1.bp.blogspot.com/-Egnf9iTYP_w/Ujvay5zP1XI/AAAAAAAAAHs4/CxQcgd6wZj4/s1600/TDD+subframe.jpg.

[32] <http://www.techonlineindia.com/IMG/610/6610/aero2b2.jpg>.

[33] M. Djanatliev, in “LTE TDD Technology Overview”.

[34] http://2.bp.blogspot.com/FfUFnIXp5u4/TwnCDginZwI/AAAAAAAAAES A/kZ_DVHmxlis/s1600/d.jpg.

[35] <http://rfwireless-world.com/images/LTE-frame-structure-TDD.jpg>.

[36] http://www.tutorialspoint.com/images/lte_ofdm.jpg.

[37] http://www.evaluationengineering.com/features/2009_february/images/wireless_tbl1.jpg.

[38] http://www.paul.wad.homepage.dk/LTE/lte_resource_grid.html.

[39] http://4g-lteworld.blogspot.gr/2012_06_01_archive.html.

[40] <http://communicationanddsp.blogspot.gr/2013/07/3gpp-lte-dynamic-scheduling-persistent.html>.

[41] <http://www.mathcs.emory.edu/~cheung/Courses/558/Syllabus/11-Fairness/Fair.html>.

[42] K. Aprikidis, P. Aggelidis and P. Sarigiannidis, “Study and Comparison of Prediction Algorithms in WiMAX access networks”, Dept. Informatics on Computer Science and Telecommunication Engineering, University of Western Macedonia, Kozani, October 2013.

[43] R. Piqueras Jover, “LTE PHY Fundamentals” .

- [44]T. Lunttila, J. Lindholm, K. Pajukoski, E. Tiirola, and A. Toskala, “EUTRAN Uplink Performance,” International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC) 2007, February 2007.
- [45]E. Yaacoub and Z. Dawy, “A Game Theoretical Formulation for Proportional Fairness in LTE Uplink Scheduling,” IEEE WCNC 2009, April 2009.
- [46]E. Yaacoub and Z. Dawy, “Low Complexity Scheduling Algorithms for the LTE Uplink,” submitted to IEEE ISCC 2009, July 2009.
- [47]G. Song and Y. Li, “Cross-Layer Optimization for OFDM Wireless Networks-Part I: Theoretical Framework,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 4, no. 2, pp. 614–624, March 2005.
- [48]X. Qiu and K. Chawla, “On the Performance of Adaptive Modulation in Cellular Systems,” IEEE Transactions on Communications, vol. 47, no. 6, pp. 884–895, June 1999.
- [49]J. Lim, H.G. Myung, K. Oh, and D.J. Goodman, “Channel-Dependent Scheduling of Uplink Single Carrier FDMA Systems,” IEEE VTC Fall 2006, September 2006.
- [50]M. Wernersson, S. Wanstedt, and P. Synnergren, “Effects of QOS scheduling strategies on performance of mixed services over LTE,” in Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '07), pp. 1–5, September 2007.
- [51]A. Pokhariyal, G. Monghal, K. I. Pedersen, et al., “Frequency domain packet scheduling under fractional load for the UTRAN LTE downlink,” in Proceedings of the 65th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '07), pp. 699–703, April 2007.
- [52]M. Andrews, K. Kumaran, K. Ramanan, A. Stolyar, R. Vijayakumar, and P. Whiting, “Scheduling in a queuing system with asynchronously varying service rates,” Probability in the Engineering and Informational Sciences, vol. 18, no. 2, pp. 191–217, 2004.

[53]S. Shakkottai and A. Stolyar, “Scheduling for multiple flows sharing a time-varying channel: the exponential rule,” in *Analytic Methods in Applied Probability*, vol. 207 of *American Mathematical Society Translations, Series 2, A Volume in Memory of F. Karpelevich*, pp. 185–202, American Mathematical Society, Providence, RI, USA, 2002.

[54]S. Shakkottai and T. Rappaport, “Research challenges in wireless networks: a technical overview,” in *Proceedings of the 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC '02)*, vol. 1, pp.12–18, October 2002.

[55]L. Georgiadis, M. J. Neely, and L. Tassiulas, “Resource allocation and cross-layer control in wireless networks,” *Foundations and Trends in Networking*, vol. 1, no. 1, pp. 1–144, 2006.

[56]F. P. Kelly, A. K. Maulloo, and D. Tan, “Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 49, no. 3, pp. 237–252, 1998.

[57]H. J. Kushner and P. A. Whiting, “Convergence of proportional-fair sharing algorithms under general conditions,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 4, pp. 1250–1259, 2004.

[58]J. Huang, V. G. Subramanian, R. Agrawal, and R. Berry, “Downlink scheduling and resource allocation for OFDM systems,” in *Proceedings of the Conference on Information Sciences and Systems (CISS '06)*, 2006.

[59] R. Madan, S. P. Boyd, and S. Lall, “Fast algorithms for resource allocation in cellular networks,” to appear in *IEEE/ACM Transactions on Networking*.

[60]L. Tassiulas and A. Ephremides, “Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks,” in *Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control (CDC '90)*, vol. 4, pp. 2130–2132, December 1990. rks,” to appear in *IEEE/ACM Transactions on Networking*.

- [61]V. J. Venkataramanan and X. Lin, “On wireless scheduling algorithms for minimizing the queue-overflow probability,” submitted to IEEE/ACM Transactions on Networking.
- [62] R. Agarwal, V. Majjigi, R. Vannithamby, and J. M. Cioffi, “Efficient scheduling for heterogeneous services in OFDMA downlink,” in Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '07), pp.3235–3239, November 2007.
- [63]M. Lerida, Adaptive radio resource management for VoIP and data traffic in 3GPP LTE networks, M.S. thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2008.
- [64]M. Gidlund and J.-C. Laneri, “Scheduling algorithms for 3GPP longterm evolution systems: from a quality of service perspective,” in Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA '08), pp. 114–117, August 2008.
- [65]H. Lei, M. Yu, A. Zhao, Y. Chang, and D. Yang, “Adaptive connection admission control algorithm for LTE systems,” in Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '08), pp. 2336–2340, May 2008.
- [66]D. Jiang, H. Wang, E. Malkamaki, and E. Tuomaala, “Principle and performance of semi-persistent scheduling for VoIP in LTE system,” in Proceedings of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM '07), pp. 2861–2864, September 2007.
- [67]S. Choi, K. Jun, Y. Shin, S. Kang, and B. Choi, “MAC scheduling scheme for VoIP traffic service in 3G LTE,” in Proceedings of the 66th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '07), pp.1441–1445, Baltimore, Md, USA, September-October 2007.
- [68]H. Wang and D. Jiang, “Performance comparison of control-less scheduling policies for VoIP in LTE UL,” in Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '08), pp. 2497–2501, Las Vegas, Nev, USA, March- April 2008.

[69]X. Ning, Z. Ting, W. Ying, and Z. Ping, “A MC-GMR scheduler for shared data channel in 3GPP LTE system,” in Proceedings of the 64th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '06), pp. 1–5, Montreal, Canada, September 2006.

[70]P. Kela, J. Puttonen, N. Kolehmainen, T. Ristaniemi, T. Henttonen, and M. Moision, “Dynamic packet scheduling performance in UTRA long term evolution downlink,” in Proceedings of the 3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC '08), pp. 308–313, May 2008.

[71]M. Assaad and A. Mourad, “New frequency-time scheduling algorithms for 3GPP/LTE-like OFDMA air interface in the downlink,” in Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '08), pp. 1964–1969, May 2008.

[72]K. C. Beh, S. Armour, and A. Doufexi, “Jointtime-frequency domain proportional fair scheduler with HARQ for 3GPP LTE systems,” in Proceedings of the 68th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '08), pp. 1–5, September 2008.

[73]M. Al-Rawi, R. Jantti, J. Torsner, and M. Sagfors, “Opportunistic uplink scheduling for 3G LTE systems,” in Proceedings of the 4th International Conference on Innovations in Information Technology (IIT '07), pp. 705–709, November 2007.

[74]F. D. Calabrese, P. H. Michaelsen, C. Rosa, et al., “Search- tree based uplink channel aware packet scheduling for UTRAN LTE,” in Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '08), pp. 1949–1953, May 2008.

[75]C. U. Castellanos, D. L. Villa, C. Rosa, et al., “Performance of uplink fractional power control in UTRAN LTE,” in Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '08), pp. 2517–2521, May 2008.

[76]M. Anas, C. Rosa, F. D. Calabrese, P. H. Michaelsen, K. I. Pedersen, and P. E. Mogensen, “QoS-aware single cell admission control for UTRAN

LTE uplink,” in Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '08), pp. 2487–2491, May 2008.

[77]3GPP TR 25.814, “Physical layer aspects for evolved universal terrestrial radio access (UTRA),” <http://www.3gpp.org/>.

[78]3GPP TR 25.848, “Physical layer aspects of ultra high speed downlink packet access,” <http://www.3gpp.org/>.

[79]3GPP 25.896, “Feasibility study for enhanced uplink for UTRA FDD,” <http://www.3gpp.org/>.

[80]S. Patil and G. de Veciana, “Managing resources and quality of service in heterogeneous wireless systems exploiting opportunism,” IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 15, no. 5, pp. 1046–1058, 2007.

[81]S. Parkvall, E. Dahlman, A. Furuskar, Y. Jading, M. Olsson, S. Wanstedt, and K. Zangi, “LTE-Advanced – Evolving LTE towards IMT-Advanced,” in Proc. IEEE VTC, pp. 1-5, Sept. 2008.

[82]Recommendation ITU-R M.1645, “Framework and overall objectives of the future development of IMT 2000 and systems beyond IMT 2000,” June, 2003.

[83]3GPP TR 36.913 v8.0.0, “Requirements for further advancements for E- UTRA (LTE-Advanced),” June, 2008.

[84]3GPP TR 36.814 v1.0.0, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA Physical layer aspects,” Feb. 2009.

[85]3GPP TR 25.825 v1.0.0, “Dual-cell High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) operations,” June, 2008.

[86]K. Johansson, J. Bergman, D. Gerstenberger, M. Blomgren, and A. Wallén, “Multi-Carrier HSPA Evolution,” in Proc. IEEE VTC, Apr. 2009.

- [87]A. Pokhariyal, T. E. Kolding, and P. E. Mogensen, “Performance of downlink frequency domain packet scheduling for the UTRAN long term evolution,” in Proc. IEEE PIMRC, pp. 1-5, Sept. 2006.
- [88]J. M. Holtzman, “Asymptotic Analysis of Proportional Fair Algorithm,” in Proc. IEEE PIMRC, vol. 2, pp. F-33-F-37, Oct. 2001.
- [89]Y. Wang, K. I. Pedersen, M. Navarro, P. E. Mogensen, and T. B. Sørensen, “Uplink Overhead Analysis and Outage Protection for Multi-Carrier LTE-Advanced Systems,” in Proc. IEEE PIMRC, Sept. 2009.
- [90]3GPP TS 36.300 v8.0.0, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description,” Mar. 2007.
- [91]S. Parkvall et al., “LTE-advanced - evolving LTE towards IMT-advanced,” in Proc. IEEE VTC, Sep. 2008, pp. 1–5.
- [92]R. Kwan, C. Leung, and J. Zhang, “Multiuser scheduling on the downlink of an LTE cellular system,” Res. Lett. Commun., 2008.
- [93] K. R. Santhi and G. S. Kumaran, “Migration to 4G: Mobile IP based Solutions, ”Proc. Advanced Int’l. Conf. Telecommun. and Int’l. Conf. Internet and Web Apps. And Svcs., French Caribbean, 2006, pp. 76–81.
- [94] 3GPP. Spatial channels for MIMO simulations, v6.1.0. TR 25.996. September 2003.
- [95] T. Kim and J. Andrews. Optimal pilot-to-data power ration for MIMO-OFDM. Proceedings of IEEE Globecom, December 2005.
- [96] Y. Song, C. Zhang, and Y. Fang, “Stochastic Traffic Engineering in Multihop Cognitive Wireless Mesh Networks,” IEEE Trans. Mobile Computing, vol. 9, no. 3, Mar. 2009, pp. 305–16.
- [97] P. Vidales, J. Baliosian, J. Serrat, G. Mapp, F. Stajano, A. Hopper, “Autonomic System for Mobility Support in 4G Networks”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 23, 2005, pp.2288-2304.

- [98] D. Charilas, O. Markaki, D. Nikitopoulos, M. Theologou, “Packetswitched network selection with the highest QoS in 4G networks”, *Computer Networks*, Vol. 52, 2008, pp. 248-258.
- [99] C. Yiping, Y. Yuhang, “A New 4G Architecture Providing Multimode Terminals Always Best Connected Services”, *IEEE Wireless Communications*, vol. 14, 2007, pp. 36-41.
- [100] E. Dahlman et al., *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*, 2nd ed., Academic Press, 2008.
- [101] 3GPP TS36.300, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN): Overall Description.”
- [102] D. Astély et al., “A Future Radio-Access Framework,” *IEEE JSAC*, vol. 24, no. 3, Mar. 2006.
- [103] A. Larmo et al., “The LTE Link Layer Design,” *IEEE Commun. Mag.*, Apr. 2009.
- [104] 3GPP TR 25.913, “Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN),” v. 7.0.0.
- [105] NGMN, “NGMN Radio Access Performance Evaluation Methodology,” v. 1.2, June 2007; www.ngmn.org.
- [106] NGMN, “Next Generation Mobile Networks Beyond HSPA and EVDO,” v. 1.3, Dec. 2006; www.ngmn.org.
- [107] Recommendation ITU-R Rec. M.1645.
- [108] ITU-R IMT.[REST], “Requirements, evaluation criteria and submission templates for the development of IMT-Advanced”, <http://www.itu.int/md/R07-SG05-C-0068/en>.
- [109] TR 36.913 V8.0.0, “Requirements for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced)”, <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36913.htm>.

Παραρτήματα.

1. Εικόνες.

- Εικόνα 1.1 Κυψελωτό Δίκτυο. Σελίδα 14
- Εικόνα 1.2 Ad hoc Δίκτυο. Σελίδα 15
- Εικόνα 1.3 Κινητό Τηλέφωνο 0G. Σελίδα 19
- Εικόνα 1.4 IMTS Τεχνολογίας Τηλέφωνο. Σελίδα 22
- Εικόνα 1.5 Mobira Cityman 150, Nokia's NMT – 900 mobile phone (1989). Σελίδα 25
- Εικόνα 1.6 logo GSM συστήματος. Σελίδα 28
- Εικόνα 1.7 Αύξηση συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας ανά τεχνολογία (Δισεκατομμύρια συσκευών – συνδέσεων). Σελίδα 37
- Εικόνα 1.8 Λογότυπο τεχνολογίας LTE. Σελίδα 46
- Εικόνα 1.9 Λογότυπο τεχνολογίας WiMAX. Σελίδα 49
- Εικόνα 2.1 Logo LTE Advanced 3GPP. Σελίδα 82
- Εικόνα 3.1 LTE Resource Grid 1,4MHz. Σελίδα 95
- Εικόνα 3.2 Master Information Block. Σελίδα 98
- Εικόνα 4.1 Persistent Function Matlab. Σελίδα 105
- Εικόνα 4.2 Κώδικας Maxmin σε Matlab. Σελίδα 110

2. Σχήματα.

- Σχήμα 1.1 Βασικές Αρχές Κυψελωτής Επικοινωνίας. Σελίδα 16
- Σχήμα 2.1 Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής κινητού δικτύου από GSM σε UMTS και LTE. Σελίδα 54
- Σχήμα 2.2 Κάλυψη/κινητότητα ασύρματων και κινητών τεχνολογιών σε σχέση με το ρυθμό δεδομένων. Σελίδα 64
- Σχήμα 2.3 Πρόσβαση σε σταθερή και κινητή ευρυζωνικότητα σε σχέση με τον αριθμό συνδέσεων. Σελίδα 65
- Σχήμα 2.4 Γενικευμένη μορφή των μερών του δικτύου του LTE. Σελίδα 66
- Σχήμα 2.5 Αρχιτεκτονική δικτύου LTE. Σελίδα 67
- Σχήμα 2.6 Το δίκτυο πυρήνα (Evolved Packet Core - EPC). Σελίδα 67
- Σχήμα 2.7 Προηγμένη Αρχιτεκτονική Δικτύου 4G. Σελίδα 69
- Σχήμα 2.8 Στοιβά πρωτοκόλλων για το επίπεδο χρήστη. Σελίδα 70
- Σχήμα 2.9 Στοιβά πρωτοκόλλων για το επίπεδο ελέγχου. Σελίδα 70
- Σχήμα 2.10 Δομή πρωτοκόλλων και διεργασίες στο LTE . Σελίδα 72
- Σχήμα 2.11 Πρωτόκολλα και διεργασίες φυσικού επιπέδου. Σελίδα 73
- Σχήμα 2.12 Δομή Πρωτοκόλλων του Στρώματος Ζεύξης σε Κατερχόμενη Ζεύξη στο LTE. Σελίδα 75
- Σχήμα 2.13 Απεικόνιση και συσχετισμός καναλιών κατερχόμενης ζεύξης. Σελίδα 77
- Σχήμα 3.1 Δομή ραδιοπλαισίου. Σελίδα 85
- Σχήμα 3.2 TDD radioframe. Σελίδα 88
- Σχήμα 3.3 Παράδειγμα υποπλαισίων διαμόρφωσης πλαισίου 2. Σελίδα 89
- Σχήμα 3.4 Δομή Χρονοθυρίδας. Σελίδα 91
- Σχήμα 3.5 Ραδιοδιάυλος Κατερχόμενης Ζεύξης. Σελίδα 92
- Σχήμα 4.1 Semi Persistent Scheduling. Σελίδα 106

3. Πίνακες.

- Πίνακας 1.1 Τύπος κυψελών σε κυψελωτά δίκτυα. Σελίδα 17
- Πίνακας 1.2 Οργανισμοί τυποποίησης δικτύων κυψελωτών επικοινωνιών . Σελίδα 44
- Πίνακας 2.1 Εύρος συχνοτήτων FDD - TDD. Σελίδα 59
- Πίνακας 2.2 Υπηρεσίες LTE σταθερού και μη bit – rate (GBR – Non GBR). Σελίδα 62
- Πίνακας 3.1 Εναλλαγή απο ανερχόμενη σε κατερχόμενη κίνηση σύμφωνα με το Configuration. Σελίδα 86
- Πίνακας 3.2 LTE TDD Frequency bands. Σελίδα 87
- Πίνακας 3.3 Subcarriers and OFDMA Symbols. Σελίδα 90
- Πίνακας 3.4 Αριθμός RB ανά κανάλι. Σελίδα 94

4. Γραφήματα.

- Γράφημα 5.1 Μέση καθυστέρηση πακέτων στην ανερχόμενη ζεύξη και για τις επτά διαμορφώσεις του αλγορίθμου Persistent Scheduling. Σελίδα 116
- Γράφημα 5.2 Ρυθμαπόδοση δικτύου στο σύνολο των διαμορφώσεων, για την ανερχόμενη ζεύξη. Σελίδα 117
- Γράφημα 5.3 Μέση καθυστέρηση πακέτων στην κατερχόμενη ζεύξη. Σελίδα 118
- Γράφημα 5.4 Ρυθμαπόδοση δικτύου για την κατερχόμενη ζεύξη. Σελίδα 118
- Γράφημα 5.5 Ρυθμαπόδοση δικτύου για την ανερχόμενη ζεύξη. Σελίδα 119
- Γράφημα 5.6 Average Buffer Occurance στη μεριά της κεραίας, με σταθερό λάμδα και μεταβλητό αριθμό χρηστών. Σελίδα 120
- Γράφημα 5.7 Average Buffer Occurance στην μεριά της κεραίας, με σταθερούς χρήστες και μεταβλητό λάμδα. Σελίδα 121
- Γράφημα 5.8 Average Buffer Occurance στην μεριά των χρηστών, με σταθερούς χρήστες και μεταβλητό λάμδα. Σελίδα 121
- Γράφημα 5.9 Average Buffer Occurance στην μεριά των χρηστών, με σταθερό λάμδα και μεταβλητό αριθμό χρηστών. Σελίδα 122
- Γράφημα 5.10 Μέση καθυστέρηση πακέτων για την ανερχόμενη ζεύξη, σε φόρτο πραγματικής κίνησης Real Media Streaming TCP. Σελίδα 123
- Γράφημα 5.11 Ρυθμαπόδοση δικτύου για την ανερχόμενη ζεύξη, σε φόρτο πραγματικής κίνησης Real Media Streaming TCP. Σελίδα 124
- Γράφημα 5.12 Μέση καθυστέρηση πακέτων για την κατερχόμενη ζεύξη, σε φόρτο πραγματικής κίνησης Real Media Streaming TCP. Σελίδα 124
- Γράφημα 5.13 Ρυθμαπόδοση δικτύου για την κατερχόμενη ζεύξη, σε φόρτο πραγματικής κίνησης Real Media Streaming TCP. Σελίδα 125

- Γράφημα 5.14 Μέση καθυστέρηση πακέτων για την ανερχόμενη ζεύξη, σε φόρτο πραγματικής κίνησης Real Media Streaming TCP. Σελίδα 125
- Γράφημα 5.15 Ρυθμαπόδοση δικτύου για την ανερχόμενη ζεύξη, σε φόρτο πραγματικής κίνησης Real Media Streaming TCP. Σελίδα 126
- Γράφημα 5.16 Μέση καθυστέρηση πακέτων στην ανερχόμενη ζεύξη, για φόρτο κίνησης VoIP. Σελίδα 128
- Γράφημα 5.17 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης VoIP. Σελίδα 128
- Γράφημα 5.18 Μέση καθυστέρηση πακέτων κατερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης VoIP. Σελίδα 129
- Γράφημα 5.19 Ρυθμαπόδοση κατερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης VoIP. Σελίδα 129
- Γράφημα 5.20 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης VoIP. Σελίδα 130
- Γράφημα 5.21 Μέση καθυστέρηση πακέτων ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP. Σελίδα 132
- Γράφημα 5.22 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP. Σελίδα 132
- Γράφημα 5.23 Μέση καθυστέρηση πακέτων κατερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP. Σελίδα 133
- Γράφημα 5.24 Ρυθμαπόδοση κατερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP. Σελίδα 133
- Γράφημα 5.25 Μέση καθυστέρηση πακέτων ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP. Σελίδα 134
- Γράφημα 5.26 Μέση καθυστέρηση πακέτων ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP. Σελίδα 134
- Γράφημα 5.27 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Real Media Streaming UDP (Persistent Scheduling Algorithm). Σελίδα 135
- Γράφημα 5.28 Μέση καθυστέρηση πακέτων ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Live Streaming. Σελίδα 136

- Γράφημα 5.29 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Live Streaming. Σελίδα 137
- Γράφημα 5.30 Μέση καθυστέρηση πακέτων κατερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Live Streaming. Σελίδα 137
- Γράφημα 5.31 Ρυθμαπόδοση κατερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Live Streaming. Σελίδα 138
- Γράφημα 5.32 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης, για φόρτο κίνησης Live Streaming. Σελίδα 138

5. Γλωσσάρι.

- **UMTS = Universal Mobile Telecommunication Systems.**
- **E – UTRAN = evolved UMTS Radio Access Network.**
- **AMC = Adaptive Modulation and Coding.**
- **BLER = Block Error Rate.**
- **BET = Blind Equal Throughput.**
- **CQI = Channel Quality Indicator.**
- **DCI = Downlink Control Information.**
- **eNB = evolved Node B.**
- **FDPS = Frequency Domain Packet Scheduler.**
- **FLS = Frame Level Scheduler.**
- **GBR = Guaranteed Bit Rate.**
- **HARQ = Hybrid Automatic Retransmission Request.**
- **LTE = Long Term Evolution.**
- **LWDF = Largest Weighted Delay First.**
- **MCS = Modulation and Coding Scheme.**
- **M – LWDF = Modified LWDF.**
- **MT = Maximum Throughput.**
- **OFDM = Orthogonal Frequency Division Multiplexing.**
- **OFDMA = OFDM Access.**
- **PDCCH = Physical Downlink Control Channel.**
- **PDSCH = Physical Downlink Shared Channel.**

- **PUSCH = Physical Uplink Shared Channel.**
- **PUCCH = Physical Uplink Control Channel.**
- **PSCH = Primary Synchronization Channel.**
- **SSCH = Secondary Synchronization Channel.**
- **PBCH = Physical Broadcast Channel.**
- **RS = cell – specific Reference Signal.**
- **PCFICH = Physical Control Format Indicator Channel.**
- **PHICH = Physical Hybrid ARQ Indicator Channel.**
- **PRACH = Physical Random Access Channel.**
- **P – SYNC = Primary Synchronization Channel.**
- **PF = Proportional Fair.**
- **PLR = Packet Loss Rate.**
- **PSS = Priority Set Scheduler.**
- **QoS = Quality of Service.**
- **QCI = QoS Class Identifier.**
- **RB = Resource Block.**
- **RLC = Radio Link Control.**
- **RR = Round Robin.**
- **RRM = Radio Resource Management.**
- **SC – FDMA = Single Carrier Frequency Division Multiple Access.**
- **SGW = Serving Gateway.**
- **TDPS = Time Domain Packet Scheduler.**
- **TTA = Throughput to Average.**

- **TTI = Transmission Time Interval.**
- **UE = User Equipment.**
- **VoIP = Voice over Internet Protocol.**
- **VPM = VoIP Priority Mode.**
- **MBSFN = Multicast Broadcast Single – Frequency Network (FDD).**
- **SFN = Single Frequency Network.**
- **CP = Cyclic Prefix.**
- **ISI = Inter Symbol Interference.**
- **SIR = Signal to Interference Ratio.**
- **PRB = Physical Resource Block.**
- **CFI = Control Format Indicator.**
- **REG = Resource Element Group.**
- **CCE = Control Channel Element.**
- **MIB = Master Information Block.**
- **PSS = Primary Synchronization Signals.**
- **SSS = Secondary Synchronization Signals.**
- **DwPTS = Downlink Pilot Time Slot.**
- **UpPTS = Uplink Pilot Time Slot.**
- **GP = Guard Period.**
- **3GPP = 3rd Generation Partnership Project.**
- **ARQ = Automatic Repeat Request.**
- **BS = Base Station.**
- **EPC = Evolved Packet Core.**

- **FDD = Frequency Division Duplex.**
- **TDD = Time Division Duplex.**
- **HSPA = High Speed Packet Access.**
- **MAC = Medium Access Control.**
- **MIMO = Multiple Input Multiple Output.**
- **MS = Mobile Station.**
- **QAM = Quadrature Amplitude Modulation.**
- **QPSK = Quadrature Phase Shift Key.**
- **SAE = System Architecture Evolution.**
- **SRS = Sound Reference Signal.**
- **WCDMA = Wideband Code Division Multiple Access.**
- **SMTP = Simple Mail Transfer Protocol.**
- **PSTN = Public Switched Telephone Network.**
- **OPEX = Operating Expense.**
- **CAPEX = Capital Expenditure.**

