



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Συγκριτική μελέτη της προσφερόμενης Ποιότητας Εμπειρίας
αλγορίθμων ράδιο-χρονοπρογραμματισμού σε δίκτυα LTE**

Ευγενία Ι. Παπαγεωργίου (Evgenia I. Papageorgiou)

Επιβλέπον: **Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής ΕΚΠΑ**

ΑΘΗΝΑ

Νοέμβριος 2015

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συγκριτική μελέτη της προσφερόμενης Ποιότητας Εμπειρίας αλγορίθμων ράδιο-
χρονοπρογραμματισμού σε δίκτυα LTE

Ευγενία Ι. Παπαγεωργίου (Evgenia I. Papageorgiou)

A.M.: M1230

Επιβλέπον: **Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής ΕΚΠΑ**

Νοέμβριος 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα δίκτυα LTE δίνεται μεγάλη έμφαση στην έννοια του QoE, μια παράμετρος υποκειμενική καθώς εκφράζει την εμπειρία του χρήστη συνολικά από την υπηρεσία του και δεν μπορεί να μετρηθεί με τις παραδοσιακές μετρικές της ποιότητας υπηρεσίας. Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη της προσφερόμενης Ποιότητας Εμπειρίας αλγορίθμων ράδιο-χρονοπρογραμματισμού σε δίκτυα LTE. Αρχικά γίνεται μια σύντομη αναφορά σε βασικές έννοιες των LTE δικτύων ιδιαίτερα σε αυτές που σχετίζονται με την λειτουργία του δικτύου για την εξασφάλιση της αναμενόμενης ποιότητας στο χρήστη. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία του χρονοπρογραμματισμού και των παραμέτρων που λαμβάνει υπόψιν για τον διαμοιρασμό των πόρων. Αναλύονται αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού που είναι διαθέσιμοι στη βιβλιογραφία. Οι αλγόριθμοι αυτοί χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες αυτοί που λαμβάνουν υπόψιν την ποιότητα του καναλιού και αυτοί που είναι ανεξάρτητοι. Γίνεται αναφορά και περιγραφή αλγορίθμων και από τις δύο κατηγορίες για να αποκτηθεί μια πιο σφαιρική άποψη για τον τρόπο λειτουργίας τους και τους στόχους που έχουν οι κατασκευαστές τους σε κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια, στα πλαίσια της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με την χρήση του Vienna LTE Simulator για τον οποίο γίνεται μια περιγραφή. Επιπλέον παρουσιάζονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για υπολογισμό του QoE. Τέλος για την εξαγωγή αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις εξετάζοντας την εμπειρία του χρήστη σε υπηρεσίες Video, VoIP και FTP από την χρήση βασικών αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού, και συγκεκριμένα των Round Robin, Best CQI, Max TP και Alpha Fair.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Δίκτυα Κινητής Επικοινωνίας

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: LTE, Scheduling, Quality of Experience (QoE), Resource Blocks, Vienna LTE Simulator

ABSTRACT

In LTE networks, great emphasis is placed on the Quality of Experience (QoE), a parameter which is subjective, since the overall experience of the user is expressed and it can't be measured with traditional quality of service metrics. In this dissertation radio scheduling algorithms for the provided Quality of Experience of LTE networks are examined. At first, there is a short reference to fundamental notions of LTE networks, especially for these that are related to the network operation and ensure the expected quality for the user. Then the scheduling procedure is described as well as the parameters that are taken into account for the allocation of the resources. Scheduling algorithms that are available, are being analyzed. The algorithms fit into two categories, those that take into account the channel quality and those that are independent. Reference and analysis is made for algorithms from both categories for a wider perception of the way they work and additionally the aims of their developers in each case are made clear. The Vienna LTE Simulator is thoroughly described and simulations have been performed. Additionally, the models used for the calculation of the QoE are presented. Finally, simulations have been performed, examining the user's experience in Video, VoIP and FTP services using the basic scheduling algorithms, Round Robin, Best CQI, Max TP and Alpha Fair, and results and conclusions are described.

SUBJECT AREA: Mobile Communication Networks

KEYWORDS: LTE, Scheduling, Quality of Experience (QoE), Resource Blocks, Vienna LTE Simulator

Στην πολυαγαπημένη μου οικογένεια και στο Γιώργο.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή κ. Λάζαρο Μεράκο για την ευκαιρία που μου έδωσε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Υποψήφια Διδάκτορα Ειρήνη Λιώτου, για τις χρήσιμες οδηγίες και συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας αλλά και για την ώθηση που μου έδινε για να συνεχίσω την προσπάθειά μου και την ολοκλήρωση της εργασίας μου. Η συνεχής παρακολούθηση της προόδου της διπλωματικής εργασίας, οι εύστοχες επισημάνσεις της καθώς και η αμεσότητά της για την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος προέκυπτε συνετέλεσαν στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος. Τέλος, ευχαριστώ πολύ την οικογένεια μου και ιδιαίτερα τον Γιώργο για την αμέριστη συμπαράσταση και κατανόηση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	15
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
1.1 Επισκόπηση LTE αρχιτεκτονικής	19
1.2 Διαχείριση ράδιο φορέα (radio bearer) και η στοίβα πρωτοκόλλων	24
1.3 Φυσικό επίπεδο - τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης	28
1.3.1 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) και Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)	29
1.4 LTE frame structure.....	30
1.5 Radio Resource Management - RRM	33
2. BASICS OF SCHEDULING IN LTE	38
2.1 Δυναμική δέσμευση πόρων στα LTE δίκτυα	41
2.2 Channel-unaware strategies	43
2.2.1 First In First Out (FIFO)	43
2.2.2 Round Robin (RR)	43
2.2.3 Blind Equal Throughput (BET)	45
2.2.4 Weighted Fair Queuing (WFQ).....	45
2.3 Channel-aware/QoS-unaware Strategies	46
2.3.1 Maximum Throughput (MT)	46
2.3.2 Proportional Fair Scheduler (PF)	47
2.3.3 Throughput to Average (TTA)	48
2.3.4 Joint Time and Frequency domain schedulers.....	48
2.3.5 Αλγόριθμοι που έχουν σαν βασική παράμετρο την καθυστέρηση	49
2.3.6 Αλγόριθμοι που έχουν σαν βασική παράμετρο την ενέργεια	49
2.3.7 Αλγόριθμοι που έχουν σαν βασική παράμετρο την κατάσταση του buffer.....	49
2.4 Channel-aware/QoS-aware Strategies	50
2.4.1 Χρονοπρογραμματιστές για εγγύηση ρυθμού μετάδοσης.....	50
2.4.2 Χρονοπρογραμματιστές για εγγύηση απαιτήσεων ως προς την καθυστέρηση	51
2.4.3 Χρονοπρογραμματιστές για VoIP υπηρεσίες	53
2.4.4 Αλγόριθμοι που βασίζονται στο QoE.....	54
3. SIMULATOR	57
3.1 Αναφορά σε άλλα εργαλεία προσομοίωσης	57
3.2 Vienna LTE Simulator	57
3.3 LTE Link Level Simulator	58
3.4 LTE System Level Simulator	59
3.5 Βασικά στοιχεία υλοποίησης του Simulator	61

3.5.2	Link Quality Model	62
3.5.3	Link Performance Model	63
3.6	Κάποιες βασικές συναρτήσεις του Simulator κατά την εκτέλεση	63
3.7	Μοντέλα κίνησης	66
3.7.1	Video	67
3.7.2	VoIP	68
3.7.3	FTP	69
4.	QOE	71
4.1	Μοντέλα για υπολογισμό QoE	73
5.	ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΥΠΑΡΧΟΝΤΩΝ SCHEDULER ALGORITHMS ΑΠΟ ΑΠΟΨΗ QOE.	78
5.1	Διαδικασία προσομοίωσης	78
5.2	Τροποποιήσεις στον κώδικα	79
5.3	Απόδοση των scheduler για κάθε μοντέλο κίνησης.	83
5.3.1	Video	83
5.3.2	VoIP	90
5.3.3	FTP	95
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	102
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	103
	ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	104
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	105

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Average MOS για Best CQI για διαφορετικό αριθμό χρηστών.	85
Σχήμα 2: Average MOS για Alpha Fair για διαφορετικό αριθμό χρηστών.....	86
Σχήμα 3: Average MOS για Max TP για διαφορετικό αριθμό χρηστών.....	86
Σχήμα 4: Average MOS για Round Robin για διαφορετικό αριθμό χρηστών.	87
Σχήμα 5: Average MOS ανά Scheduler.....	87
Σχήμα 6: Average MOS για Alpha Fair με διαφορετικά SBR και FR.....	88
Σχήμα 7: Alpha Fair MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.	89
Σχήμα 8: Best CQI MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.	89
Σχήμα 9: Max TP MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.	90
Σχήμα 10: RR MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.	90
Σχήμα 11: Average MOS για Max TP για διαφορετικό αριθμό χρηστών.....	91
Σχήμα 12: Average MOS για Best CQI για διαφορετικό αριθμό χρηστών.	92
Σχήμα 13: Average MOS για Alpha Fair για διαφορετικό αριθμό χρηστών.....	92
Σχήμα 14: Average MOS για Round Robin για διαφορετικό αριθμό χρηστών.	92
Σχήμα 15: Average MOS ανά Scheduler.....	93
Σχήμα 16: Alpha Fair MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.	94
Σχήμα 17: Max TP MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.	94
Σχήμα 18: Best CQI MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.	95
Σχήμα 19: RR MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.	95
Σχήμα 20: Average MOS για max TP για διαφορετικό αριθμό χρηστών.	97
Σχήμα 21: Average MOS για Best CQI για διαφορετικό αριθμό χρηστών.....	98
Σχήμα 22: Average MOS για Alpha Fair για διαφορετικό αριθμό χρηστών.	98
Σχήμα 23: Average MOS για RR για διαφορετικό αριθμό χρηστών.	99
Σχήμα 24: Average MOS ανά Scheduler.....	99
Σχήμα 25: Best CQI MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.	100

Σχήμα 26: RR MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.	100
Σχήμα 27: Max TP MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.	101

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Μελλοντική εξέλιξη των δικτύων σύμφωνα με την Ericsson (Φεβρουάριος 2015).	17
Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική LTE και LTE-A δικτύου EPS.....	19
Εικόνα 3: 3GPP LTE δίκτυο πρόσβασης (E-UTRAN).....	20
Εικόνα 4: Ροές δεδομένων υπηρεσιών και bearer.	24
Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων E-UTRAN.....	27
Εικόνα 6: Στοιβά πρωτοκόλλων και αλληλεπίδραση μεταξύ των επιπέδων.	28
Εικόνα 7: Σύγκριση της OFDMA και SC-FDMA μετάδοσης.	30
Εικόνα 8: Πλέγμα ράδιο πόρων ως προς το χρόνο και τη συχνότητα.	31
Εικόνα 9: Δομή πλαισίου LTE δικτύου.	32
Εικόνα 10: Αλληλεπίδραση μεταξύ των κύριων χαρακτηριστικών RRM.	34
Εικόνα 11: Δομή Χρόνου/Συχνότητας του downlink subframe του LTE στην περίπτωση του εύρους ζώνης των 3 MHz (παράδειγμα με 3 σύμβολα OFDM αφιερωμένα σε κανάλια ελέγχου).	35
Εικόνα 12: Κανάλια μεταφοράς και φυσικά κανάλια στο LTE.	39
Εικόνα 13: Διαδικασία επικοινωνίας eNodeB και Ue.	41
Εικόνα 14: Μοντέλο χρονοπρογραμματιστή.	42
Εικόνα 15: Γενική κατηγοριοποίηση χρονοπρογραμματιστών.	42
Εικόνα 16: LTE πλαίσιο λειτουργίας Packet Scheduler.	49
Εικόνα 17: Δομή του LTE link level simulator.	59
Εικόνα 18: Διάγραμμα του LTE system level simulator (v 1.8 r1375). Η ποιότητα της σύνδεσης αξιολογείται από το link quality model, ενώ το link performance model υπολογίζει το BLER και δίνει ως αποτέλεσμα τη ρυθμαπόδοση της ζεύξης.	60
Εικόνα 19: Σχηματικό διάγραμμα κλάσεων που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ των οντοτήτων που συνθέτουν το LTE System Level Simulator.	60

Εικόνα 20: Διαχωρισμός της ζεύξης LTE σε link quality και link performance model. Τα δεδομένα που δίνονται ως είσοδος παραμετροποιούν τις διαδικασίες στο PHY επίπεδο σε κάθε βήμα.	62
Εικόνα 21: Link performance model. Το αποτέλεσμα του link quality model συνδυάζεται με τις πληροφορίες για τα κατανομημένα RBs και τον εφαρμοζόμενο ρυθμό διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.....	63
Εικόνα 22: Στοιχεία που ορίζονται για την κλάση UE από τον Simulator.....	65
Εικόνα 23: Κατανομή UE ανά Sector.....	66
Εικόνα 24: Στοιχεία που ορίζονται για την κλάση traffic Models. Αριστερά: Μοντέλο κίνησης Video. Δεξιά: Μοντέλο fullbuffer.	67
Εικόνα 25: Αρχικοποίηση για Video.....	68
Εικόνα 26: Συνάρτηση check_TTI για video.	68
Εικόνα 27: Αρχικοποίηση για VoIP.	69
Εικόνα 28: Κώδικας για κατασκευή πακέτων σε VoIP.	69
Εικόνα 29: Κώδικας για κατασκευή πακέτων σε FTP.	70
Εικόνα 32: Προσέγγιση bottom up για τον υπολογισμό του QoE και ερμηνεία του MOS ως προς την ποιότητα που αντιλαμβάνεται ο χρήστης.	72
Εικόνα 31: Φάκελος qoe.....	79
Εικόνα 32: Παραμετροποίηση LTE_sim_main_launcher_example.m.	80
Εικόνα 33: Αλλαγές στο LTE_load_params_dependant.m.....	80
Εικόνα 34: Αρχικοποίηση και ορισμός νέων μεταβλητών.	81
Εικόνα 35: Αρχή της συνάρτησης link_performance.....	81
Εικόνα 36: Σημείο μεταβολής του TB_loss.	81
Εικόνα 37: Υπολογισμός delay_buffer.....	82
Εικόνα 38: Σημείο μεταβολής του Delay.	82
Εικόνα 39: Προσθήκη κώδικα όπου καλούνται τα μοντέλα κίνησης για video και VoIP.	82
Εικόνα 40: Συνάρτηση που έγιναν αλλαγές στο simTrace.m.....	83
Εικόνα 41: Μοντέλο υπολογισμού MOS για video.	85

Εικόνα 42: Μοντέλο υπολογισμού MOS για VoIP.....	91
<i>Εικόνα 44: Συνάρτηση store.</i>	96
Εικόνα 45: Συνθήκη isempty και εντολή για υπολογισμό MOS_ftp.....	96
Εικόνα 46: Μοντέλο υπολογισμού MOS για FTP.....	97

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Βασικοί στόχοι των LTE δικτύων.	18
Πίνακας 2: Ο ρόλος των βασικών EPS διεπαφών.	23
Πίνακας 3: Τυποποιημένα αναγνωριστικά κλάσεων QoS για το LTE.	25
Πίνακας 4: Διαμόρφωση πλαισίου TDD.....	33
<i>Πίνακας 5: Σημειογραφία συμβόλων μετρικών.....</i>	<i>44</i>
Πίνακας 6: Πίνακας σύγκρισης των βασικών Αλγορίθμων.....	55
Πίνακας 7: Μοντέλα κίνησης με βάση την 3GPP.	66
Πίνακας 8. Προδιαγραφές μετάδοσης φωνής και παράμετροι	76
Πίνακας 9: Παράμετροι προσομοίωσης για όλα τα μοντέλα.	78
Πίνακας 10:Παράμετροι προσομοίωσης για το μοντέλο video.....	83
Πίνακας 11: Παράμετροι για video.....	84

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, ειδίκευση «Συστήματα Επικοινωνιών και Δίκτυα». Στόχος της εργασίας, ήταν η μελέτη της ποιότητας εμπειρίας του χρήστη (QoE) στα δίκτυα τέταρτης γενιάς (LTE, LTE-A) για τύπους κίνησης VoIP, Video και FTP με βάση βασικούς αλγόριθμους χρονοπρογραμματισμού των ραδιοπύργων. Πιο αναλυτικά εφαρμόστηκαν κάποια μοντέλα πρόβλεψης QoE για τους παραπάνω τύπους κίνησης ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα για την ποιότητα εμπειρίας που προσφέρουν στο χρήστη οι υπό μελέτη αλγόριθμοι καθώς και να γίνει μία συγκριτική μελέτη της απόδοσής του για τον κάθε τύπο κίνησης. Η ενασχόληση μου με την παρούσα εργασία με βοήθησε να κατανοήσω πιο βαθιά έννοιες των δικτύων LTE και να αναπτύξω μια καλύτερη αντίληψη για την έννοια του QoE και πως μεταβάλλεται ανάλογα το μοντέλο κίνησης και τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σαν αποτέλεσμα της παγκόσμιας επιτυχίας των δικτύων τρίτης γενιάς (3G) οι συνδρομητές κινητών επικοινωνιών αυξάνονται συνεχώς με τους χρήστες ευρυζωνικής πρόσβασης μέσω δικτύων κινητής να υπολογίζεται ότι θα φτάσουν τα 3,4 δισεκατομμύρια έως το 2014 [1]. Έως το 2020 η αύξηση θα είναι ακόμα μεγαλύτερη, και σύμφωνα με την Ericsson θα προστεθούν παγκοσμίως 5,4 δισεκατομμύρια νέοι συνδρομητές [2]. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται αναλυτικά η κατανομή τους ανά υπηρεσία και ανά ήπειρο. Η τάση για μεγαλύτερη χρήση ευρυζωνικών υπηρεσιών πάνω σε High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA) δίκτυα οδήγησε σταδιακά τα δίκτυα τρίτης γενιάς στον κορεσμό τους. Έτσι η 3rd Generation Partnership Project (3GPP) αντιλήφθηκε την αναγκαιότητα για εξέλιξη της τεχνολογίας των κινητών επικοινωνιών για να καλύψει τη μελλοντική ζήτηση της επόμενης δεκαετίας.



Εικόνα 1: Μελλοντική εξέλιξη των δικτύων σύμφωνα με την Ericsson (Φεβρουάριος 2015).

Το 2004 η 3GPP με το Release 8 [2] εισήγαγε την τεχνολογία Long Term Evolution (LTE) για να μπορέσει να παραμείνει ανταγωνιστική και στο μέλλον στην αγορά ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης, θέλοντας ταυτόχρονα να καλύψει τις απαιτήσεις των χρηστών για μεγαλύτερες ταχύτητες, καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας και μειωμένο κόστος υπηρεσιών για τους παρόχους. Για να πετύχει τους στόχους της, χρειάστηκε να εστιάσει στην εξέλιξη της τεχνολογίας βελτιώνοντας το σύστημα μεταγωγής πακέτων και μειώνοντας την πολυπλοκότητά του [2] [3].

Τα LTE δίκτυα σαν εξέλιξη των δικτύων τρίτης γενιάς έχουν ως σκοπό να παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα, μικρότερες καθυστερήσεις και ένα πιο αποδοτικό δίκτυο κορμού και πρόσβασης. Ταυτόχρονα, η μεγαλύτερη χωρητικότητα παρέχεται με μικρότερο κόστος για να διατηρηθεί η εκθετική ανάπτυξη των κινητών υπηρεσιών. Ακόμα στοχεύει σε μεγαλύτερες ταχύτητες, ευελιξία στον τρόπο χρήσης του φάσματος, βελτιωμένη κάλυψη, μικρές καθυστερήσεις και καλύτερο χρόνο ζωής για τις μπαταρίες των τερματικών. Για να πετύχουν αυτούς τους στόχους τα δίκτυα LTE χρησιμοποιούν νέες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης της διεπαφής αέρα, προσαρμογή ζεύξης και πιο εξελιγμένες τεχνολογίες κεραιών, Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO). Στα δίκτυα LTE γίνεται χρήση της διαμόρφωσης Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) για την κατεύθυνση της κατερχόμενης ζεύξης και του Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) για την ανερχόμενη, υπολογίζοντας πάντα τους περιορισμούς της κατανάλωσης ενέργειας που τίθενται από τον εξοπλισμό του χρήστη για την μεταφορά δεδομένων [4] [5]. Ένα ακόμα μέσο για την επίτευξη των στόχων τους είναι οι αναβαθμισμένες διαδικασίες τόσο σε φυσικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο ζεύξης (Medium Access Control, MAC) που προσφέρει η διαχείριση πόρων ραδιοζεύξης (Radio Resource Management, RRM), όπως είναι ο διαμοιρασμός των πόρων, η αναφορά Channel Quality Indicator (CQI), η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (Adaptive Modulation and Coding, AMC) και ο μηχανισμός Hybrid Automatic Retransmission Request (HARQ) [6].

Σε ένα τέτοιο δίκτυο ο σχεδιασμός στρατηγικών για την αποτελεσματική κατανομή των πόρων είναι πολύ σημαντικός. Η αποτελεσματική χρήση των ραδιοπόρων είναι βασική για την επίτευξη των στόχων του συστήματος αλλά και για την ικανοποίηση των χρηστών με βάση τις απαιτήσεις τους για ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service, QoS). Το QoS αποτελεί για τα δίκτυα LTE σύμφωνα και με τις προδιαγραφές τους μια από τις καινοτομίες του και για αυτό το λόγο υποστηρίζεται από πιο εκλεπτυσμένες τεχνικές

RRM [7].

Ως μία από τις βασικές λειτουργίες στη διαχείριση των πόρων ραδιοσυχνοτήτων, ο χρονοπρογραμματισμός πακέτων (Packet Scheduling, PS) παίζει σημαντικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος LTE. Ο χρονοπρογραμματισμός θεωρείται ένα σύστημα MAC επιπέδου και για τα δίκτυα τέταρτης γενιάς η μεγαλύτερη πρόκληση είναι ο χρονοπρογραμματισμός της μετάδοσης δεδομένων του χρήστη στην κατερχόμενη ζεύξη.

Πίνακας 1: Βασικοί στόχοι των LTE δικτύων.

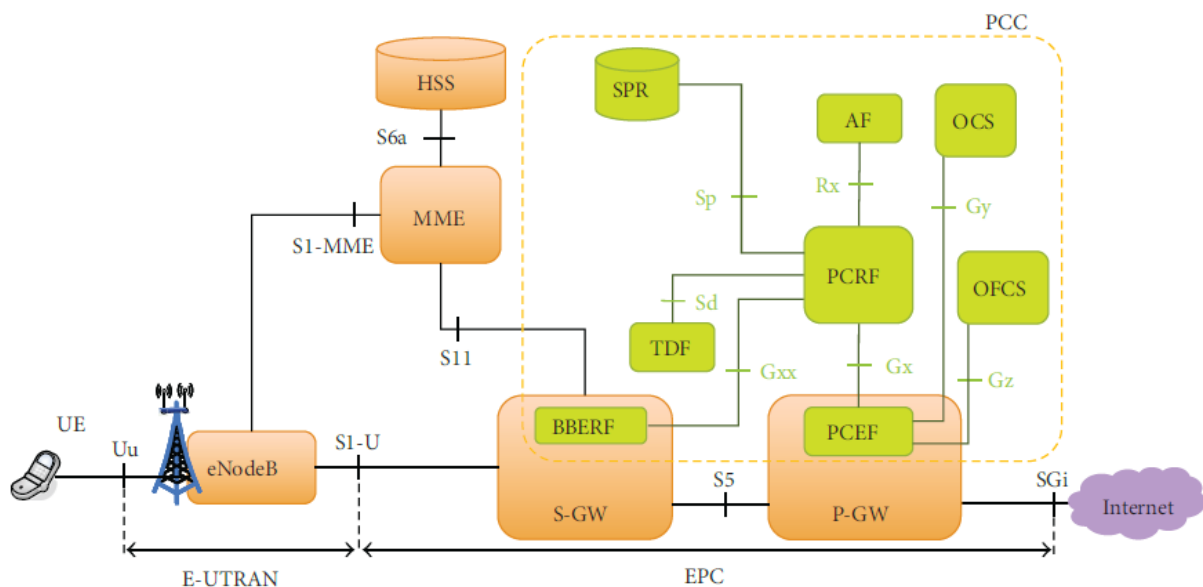
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης	<ul style="list-style-type: none"> • Downlink: 100 Mbps • Uplink: 50 Mbps
Αποδοτικότητα φάσματος	2-4 φορές πιο αποδοτικό από το 3G
Ρυθμός μετάδοσης στα άκρα της κυψέλης	Αυξάνεται διατηρώντας τις ίδιες τοποθεσίες (sites) όπως έχουν αναπτυχθεί έως τώρα.
Καθυστέρηση	Κάτω από 5ms για 5MHz ή περισσότερο φάσμα
Κινητικότητα	<ul style="list-style-type: none"> • Βέλτιστη υπηρεσία για χαμηλή κινητικότητα έως 15 km/h. • Υψηλή απόδοση για ταχύτητα κίνησης έως 120 km/h. • Διατήρηση της σύνδεσης έως τα 350 km/h.
Επέκταση εύρους ζώνης	Από 1,4 έως 20 MHz
RRM	<ul style="list-style-type: none"> • Ενισχυμένη υποστήριξη για από άκρο σε άκρο QoS. • Αποτελεσματικότερη μετάδοση και λειτουργία των πρωτοκόλλων υψηλότερου επιπέδου.
Υποστήριξη υπηρεσιών	<ul style="list-style-type: none"> • Αποτελεσματική υποστήριξη πολλών υπηρεσιών (π.χ. Web-browsing, FTP, video-streaming, VoIP). • Η ποιότητα της υπηρεσίας VoIP θα είναι εξίσου καλή με αυτή των Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) δικτύων.

Επιπλέον ο αριθμός των διεπαφών ασύρματης πρόσβασης έχει μειωθεί σε σχέση με τα HSDPA και ο Σταθμός Βάσης LTE (evolved NodeB / eNodeB / eNB) είναι η μοναδική

οντότητα για την ασύρματη πρόσβαση υπεύθυνη να διανέμει το φάσμα μεταξύ των χρηστών του δικτύου ακολουθώντας συγκεκριμένες πολιτικές. Το κλειδί για την επιτυχία των δικτύων τέταρτης γενιάς είναι ότι η αρχιτεκτονική τους σχετίζεται με αυτή του προκατόχου τους HSDPA [1]. Στον Πίνακα 1 συνοψίζονται οι στόχοι των δικτύων LTE.

1.1 Επισκόπηση LTE αρχιτεκτονικής

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστεί μια γενική εικόνα για την αρχιτεκτονική των LTE δικτύων σύμφωνα με τις προδιαγραφές της 3GPP, με μια εστίαση στην έννοια του QoS. Η αρχιτεκτονική του συστήματος είναι επίπεδη γνωστή ως “Service Architecture Evolution”, με σεβασμό στην προηγούμενη τεχνολογία 3G, παρέχοντας αδιάλειπτη παροχή υπηρεσιών εν κινήσει και μεγαλύτερη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων και σηματοδότησης.



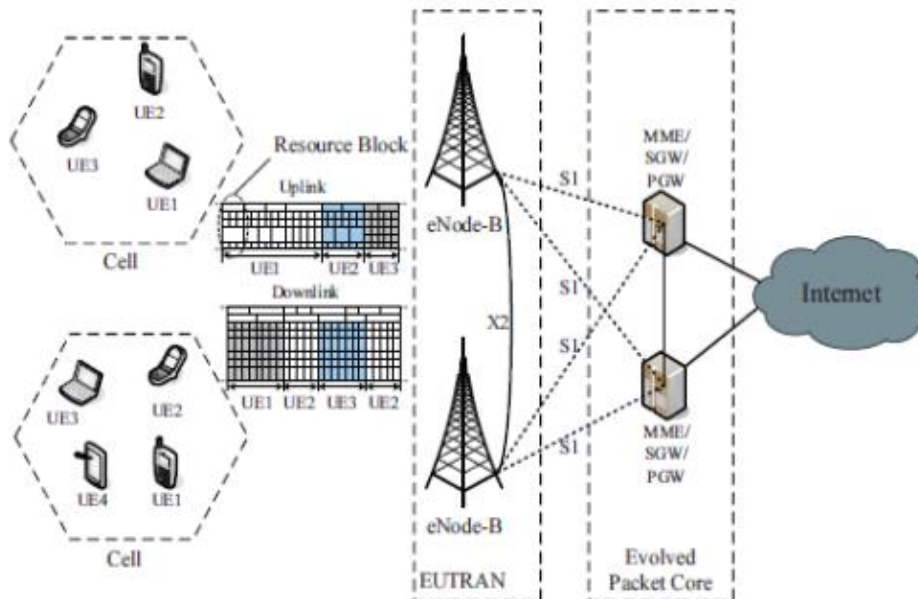
Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική LTE και LTE-A δικτύου EPS.

Στην Εικόνα 2 φαίνεται συνολικά η αρχιτεκτονική ενός δικτύου τέταρτης γενιάς, δηλαδή το εξελιγμένο σύστημα πακέτων (Evolved Packet System, EPS) που περιλαμβάνει τα στοιχεία που συνθέτουν το δίκτυο αλλά και οι τυποποιημένες διεπαφές.

Το δίκτυο αποτελείται από το δίκτυο κορμού (Evolved Packet Core, EPC) και από το δίκτυο πρόσβασης (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN). Το EPC δίκτυο συνθέτουν πολλοί λογικοί κόμβοι ενώ το E-UTRAN αποτελείται αποκλειστικά από ένα μόνο κόμβο, αυτόν του εξελιγμένου σταθμού βάσης (eNodeB), που συνδέεται με τον εξοπλισμό του χρήστη (User Equipment, UE), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.

Το EPS δίνει στον χρήστη διεύθυνση IP για να συνδεθεί σε ένα δίκτυο μεταγωγής

πακέτων (Packet Data Network, PDN) να προσπελάσει το Internet και να μπορέσει να τρέξει υπηρεσίες όπως πραγματοποίηση κλήσης πάνω στο Internet (VoIP). Ένα βασικό στοιχείο που σχετίζεται με το QoS στα δίκτυα LTE είναι οι EPS κομιστές ή φορείς (bearers), που είναι λογικές συνδέσεις μεταξύ τερματικού και δικτύου κορμού. Μπορούν να υποστηριχτούν πολλαπλοί bearers σε ένα χρήστη για να υποστηρίξουν διαφορετικό QoS για κάθε υπηρεσία, για παράδειγμα μια υπηρεσία φωνής και μια υπηρεσία κατεβάσματος ενός αρχείου απαιτούν διαφορετικό QoS.



Εικόνα 3: 3GPP LTE δίκτυο πρόσβασης (E-UTRAN).

Επιπλέον το EPS περιλαμβάνει ένα υποσύστημα για έλεγχο πολιτικής και χρεώσεων (Policy Charging Control, PCC) το οποίο διαθέτει εξελιγμένα εργαλεία για παροχή υπηρεσιών με σεβασμό στο QoS και για έλεγχο των χρεώσεων. Καθορίζει πώς οι πόροι των bearers διατίθενται για μια συγκεκριμένη υπηρεσία, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου που οι ροές υπηρεσίας διαμοιράζονται σε bearers, τι QoS χαρακτηριστικά θα πρέπει να έχουν και τέλος τι είδους κοστολόγηση θα τους εφαρμοστεί.

Το EPC είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των χρηστών και για την εγκατάσταση των bearers. Οι βασικοί λογικοί κόμβοι που αποτελούν το δίκτυο κορμού (EPC) παρουσιάζονται παρακάτω:

Policy Control and Charging Rules Function (PCRF): παρέχει τη διαχείριση των υπηρεσιών και τον έλεγχο των LTE υπηρεσιών. Είναι αρμόδιο για τη λήψη αποφάσεων που αφορούν τον έλεγχο της πολιτικής, είναι υπεύθυνο για την διαχείριση της πολιτικής του QoS καθώς και για τον έλεγχο των λειτουργιών χρεώσεων μέσω της

λειτουργικότητας Policy Control Enforcement Function (PCEF), η οποία είναι εγκαταστημένη στο PDN Gateway (P-GW). Επιπλέον το PCRF παρέχει την εξουσιοδότηση για το QoS (αναγνωριστικό κλάσης QoS και ρυθμός μετάδοσης bit), αποφασίζει πώς μια ορισμένη ροή δεδομένων θα αντιμετωπιστεί από το PCEF και διασφαλίζει ότι αυτή είναι σε συμφωνία με το προφίλ του συνδρομητή.

Home Subscriber Server (HSS): είναι η κύρια βάση δεδομένων που περιέχει τα δεδομένα εγγραφής των συνδρομητών του δικτύου για να υποστηρίξει τον έλεγχο κλήσης και να διαχειριστεί τις συνδέσεις. Περιέχει το προφίλ του συνδρομητή όσον αφορά το QoS και τους περιορισμούς στην πρόσβαση στο δίκτυο, όταν ο χρήστης είναι σε περιαγωγή. Παρέχει ταυτοποίηση και εξουσιοδότηση στους συνδρομητές παράγοντας τα αντίστοιχα διανύσματα και κλειδιά ασφαλείας. Έχει πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία του χρήστη και για τα PDN στα οποία ο χρήστης μπορεί να συνδεθεί. Επιπλέον υποστηρίζει την πολλαπλή πρόσβαση σε δίκτυα πολλαπλού τομέα, τα οποία παρέχουν μια από άκρη σε άκρη διαχείριση της κυκλοφορίας για τους συνδρομητές που μετακινούνται μεταξύ του δικτύου LTE και τοπικών ασύρματων δικτύων (Wireless Local Area Network, WLAN). Επιπλέον, η HSS κατέχει δυναμικές πληροφορίες όπως την ταυτότητα του Mobility and Management Entity (MME) στην οποία ο χρήστης έχει συνδεθεί. Συνδυάζει λοιπόν τον καταχωρητή θέσης αναζήτησης (Home Location Register, HLR) και το κέντρο ελέγχου ταυτότητας (Authentication Center, AUC), που αποτελούν λειτουργικότητες προηγούμενων εκδόσεων [8].

Mobility and Management Entity (MME): το MME είναι ο κόμβος ελέγχου που επεξεργάζεται τη σηματοδότηση μεταξύ του UE και του EPC και των πρωτοκόλλων που τρέχουν μεταξύ τους γνωστά ως Non Access Stratum (NAS) πρωτόκολλα. Οι κύριες λειτουργίες που υποστηρίζονται λοιπόν από το MME έχουν σχέση με τη διαχείριση των φορέων (την εγκατάσταση, τη συντήρηση και την απελευθέρωση τους), καθώς και τη διαχείριση της σύνδεσης.

Serving-GW (S-GW): όλα τα IP πακέτα μεταφέρονται μέσω του S-GW, το οποίο λειτουργεί σαν τοπική άγκυρα κινητικότητας για τους φορείς δεδομένων όταν ο χρήστης μετακινείται από ένα σταθμό βάσης σε έναν άλλο. Περιλαμβάνει μια λειτουργία αναφοράς γεγονότος και μια δέσμευση φορέα. Ο S-GW διατηρεί τις πληροφορίες για τους φορείς όταν τα τερματικά είναι σε κατάσταση αναμονής και αποθηκεύει προσωρινά τα δεδομένα της κατερχόμενης ζεύξης ενώ το MME ξεκινά μια επικοινωνία με το τερματικό (paging) με σκοπό να ξανά εγκαταστήσει τους φορείς. Επιπλέον λειτουργεί και σαν άγκυρα κινητικότητας για συνεργασία με άλλες τεχνολογίες της 3GPP όπως το

General packet resource service (GPRS)και το UMTS.

PDN Gateway (P-GW): το στοιχείο αυτό είναι υπεύθυνο για την εφαρμογή του πρωτόκολλου επιπέδου δικτύου (IP), δηλαδή για την κατανομή διευθύνσεων στους χρήστες, για την επιβολή του QoS, και για την συλλογή και έκθεση των πληροφοριών χρέωσης σύμφωνα με τους κανόνες που έχει θέσει το PCRF. Το P-GW είναι υπεύθυνο για να φιλτράρει τα κατερχόμενα IP πακέτα του χρήστη σε διαφορετικούς QoS φορείς με βάση τα πρότυπα κίνησης ροών (Traffic Flow Templates, TFTs). Το P-GW εκτελεί και την επιβολή του QoS για φορείς που εξασφαλίζουν εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης το οποίο επίσης λειτουργεί σαν άγκυρα κινητικότητας για συνεργασία μεταξύ τεχνολογιών που δεν ανήκουν στην 3GPP για παράδειγμα WiMAX και CDMA2000.

Application Function (AF): εξάγει πληροφορίες συνόδου από την σηματοδότηση της εφαρμογής και επικοινωνεί με την PCRF για να μεταφέρει αυτή τη δυναμική πληροφορία, που απαιτείται για τη λήψη αποφάσεων στο PCRF.

Subscription Profile Repository (SPR): είναι η βάση δεδομένων που αποθηκεύει πληροφορίες που σχετίζονται με την πολιτική χρήσης του δικτύου από ένα συνδρομητή. Για παράδειγμα, η SPR μπορεί να υποδεικνύει ποιες τελικές υπηρεσίες έχουν εγκριθεί για ένα χρήστη, οι επιτρεπόμενες παράμετροι για το QoS ανά υπηρεσία, ή η κατηγορία χρήστη (π.χ., των επιχειρήσεων και των οικιακών). Το PCRF μπορεί να κάνει χρήση αυτών των πληροφοριών συνδρομής σαν βάση για την πολιτική και την λήψη αποφάσεων ελέγχου των χρεώσεων.

Traffic Detection Function (TDF): έχει εισαχθεί στο LTE-A για να βοηθήσει το δίκτυο να επιτύχει επίγνωση των υπηρεσιών με τη θέσπιση μηχανισμών για την ανίχνευση υπηρεσιών.

Online Charging System (OCS): παρέχει τη διαχείριση της πίστωσης και χορηγεί πίστωση στο PCEF με βάση το χρόνο, το φόρτο της κίνησης, ή την ύπαρξη απαιτητικών γεγονότων.

Offline Charging System (OFCS): λαμβάνει συμβάντα από το PCEF και δημιουργεί τα αρχεία χρεώσεων (Charging Data Records, CDRs) για το σύστημα λογαριασμού.

Το δίκτυο πρόσβασης ενός LTE δικτύου, E-UTRAN, αποτελείται μόνο από ένα σύνολο κόμβων σταθμών βάσεων (eNodeBs), οι οποίοι είναι μεταξύ τους διασυνδεδεμένοι με μια διεπαφή γνωστή ως X2 και με το EPC δίκτυο με την διεπαφή S1. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα συστήματα, εδώ ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για τον διαμοιρασμό των πόρων αλλά και για τις διαδικασίες ελέγχου στη ραδιοεπαφή. Ο σταθμός βάσης έχει

σημαντικό ρόλο και για το από άκρο σε άκρο QoS. Κάποιες από τις λειτουργίες που επιτελεί είναι ο έλεγχος πρόσβασης, η επιβολή πολιτικής για τον ρυθμό ώστε να εξασφαλίσει ότι το δίκτυο δεν θα υπερφορτωθεί και θα διασφαλίσει ότι οι υπηρεσίες θα έχουν τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που τους έχει καθοριστεί, η εφαρμογή χρονοπρογραμματισμού για διαμοιρασμό του φάσματος μεταξύ των bearers που έχουν εγκατασταθεί και παραμετροποίηση των πρωτοκόλλων L1/L2 για να είναι συμβατά τα QoS χαρακτηριστικά που απαιτούν οι bearers. Στον

Πίνακας 2 παρουσιάζεται ο ρόλος των βασικών διεπαφών του EPS.

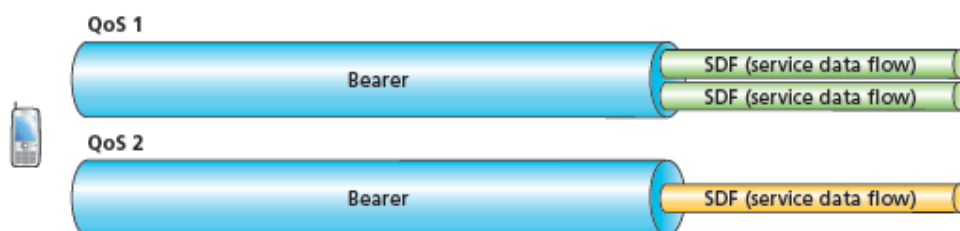
Πίνακας 2: Ο ρόλος των βασικών EPS διεπαφών.

Διεπαφές	Ρόλος
Gx	Χρησιμοποιείται από το PCRF για να μεταφέρει την πολιτική εκτέλεσης στο P-GW
Gxx	Δέσμευση φορέα και λειτουργία αναφοράς γεγονότων
Rx	Χρησιμοποιείται από τη λειτουργία εφαρμογής για να μεταφέρει την πολιτική των δεδομένων στο PCRF
Sp	Επανορθώνει ανά συνδρομητή την πολιτική των δεδομένων
Sd	Χρησιμοποιείται για να αναγνωρίσει/πληροφορήσει για τις εν εξελίξει λεπτομέρειες των συνεδριών από το TDF
SGi	Είναι το σημείο αναφοράς ανάμεσα στο P-GW και στο PDN (π.χ internet)
S5	Σηματοδοτεί τη διεπαφή για να εγκαταστήσει κομιστές ανάμεσα στο S-GW και στο P-GW
S6a	Χρησιμοποιείται από το MME για να επανακτήσει δεδομένα των συνδρομητών

	από τη HSS
S11	Χρησιμοποιείται από το MME για να ελέγχει τα μονοπάτια μεταγωγής και την εγκατάσταση φορέων στο S-GW
S1-MME	Σηματοδοτεί τη διεπαφή ανάμεσα στο eNB και στο MME
S1-U	Επίπεδο χρήστη, ανάμεσα στο eNB και στο S-GW
Uu	Είναι η διεπαφή αέρα ανάμεσα στο UE και στο eNB
Gy	Συνδεδεμένη φόρτωση πληροφοριών
Gz	Αποσυνδεδεμένη φόρτωση πληροφοριών

1.2 Διαχείριση ράδιο φορέα (radio bearer) και η στοίβα πρωτοκόλλων

Η κίνηση τόσο σε επίπεδο χρήστη όσο και σε επίπεδο δικτύου περνάει μέσα από την διεπαφή αέρα κάνοντας χρήση φορέων για δεδομένα και σηματοδοσία (Data Radio Bearer & Signaling Radio Bearer). Κάθε χρήστης που συνδέεται υποστηρίζει τρεις φορείς για σηματοδοσία και έως οχτώ φορείς για δεδομένα.



Εικόνα 4: Ροές δεδομένων υπηρεσιών και bearer.

Ένας ράδιο φορέας (radio bearer) είναι ένα λογικό κανάλι που εγκαθιδρύεται μεταξύ του χρήστη και του σταθμού βάσης. Είναι υπεύθυνος για την διαχείριση της παροχής του QoS στη διεπαφή E-UTRAN (Εικόνα 4). Όταν ένας χρήστης συνδέεται στο δίκτυο δημιουργείται ένας προεπιλεγμένος φορέας (default bearer) για τη βασική σύνδεση και για την ανταλλαγή των μηνυμάτων ελέγχου. Αυτός παραμένει ενεργός κατά την διάρκεια

της σύνδεσης. Dedicated bearers δημιουργούνται κάθε φορά που προκύπτει κάποια καινούρια υπηρεσία. Κάθε φορέας δεδομένων έχει τη δική του παραμετροποίηση QoS ώστε να υποστηρίζει διαφορετικά είδη υπηρεσιών, για παράδειγμα μπορεί να έχει έναν για βίντεο κλήση και έναν άλλο για απλή πρόσβαση στο διαδίκτυο. Επιπλέον ανάλογα με τις απαιτήσεις για QoS μπορούν να ταξινομηθούν σε εγγυημένου ρυθμού (Guaranteed bit-rate) και σε μη-εγγυημένου ρυθμού (non-Guaranteed bit-rate) [9].

Πίνακας 3: Τυποποιημένα αναγνωριστικά κλάσεων QoS για το LTE.

QCI	Resource Type	Priority	Packet Delay Budget [ms]	Packet Loss Rate	Example services
1	GBR	2	100	10^{-2}	Φωνή συνομιλίας
2	GBR	4	150	10^{-3}	Βίντεο συνομιλίας (live streaming)
3	GBR	5	300	10^{-6}	Βίντεο όχι συνομιλίας (buffered streaming)
4	GBR	3	50	10^{-3}	Παιχνίδι σε πραγματικό χρόνο
5	non-GBR	1	100	10^{-6}	IMS signaling
6	non-GBR	7	100	10^{-3}	Φωνή, video (live streaming), interactive gaming
7	non-GBR	6	300	10^{-6}	Video (buffered streaming)
8	non-GBR	8	300	10^{-6}	TCP based (π.χ. WWW, email), chat, FTP, P2P
9	non-GBR	9	300	10^{-6}	

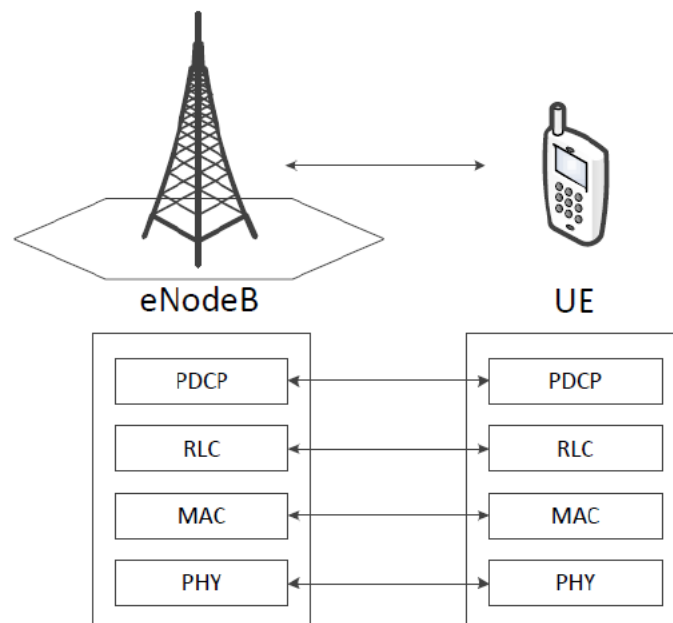
					διαμοιρασμός αρχείων
--	--	--	--	--	----------------------

Εντός αυτού του πλαισίου, ο γενικός ορισμός των απαιτήσεων σε QoS μεταφράζεται σε μεταβλητές που χαρακτηρίζουν την απόδοση που βιώνουν οι χρήστες [10]. Επομένως, ένα σύνολο από παραμέτρους QoS συσχετίζεται με κάθε φορέα ανάλογα με τα δεδομένα εφαρμογής που μεταφέρει και συνεπώς επιτρέποντας διαφοροποίηση μεταξύ των ροών. Με αυτό το σκοπό, αρκετές κλάσεις υπηρεσιών QoS έχουν αναγνωρισθεί, QoS Class Identifiers (QCIs), κατά τη διάρκεια της φάσης τυποποίησης του LTE, π.χ. κλιμακούμενες τιμές χρησιμοποιήθηκαν ως σημείο αναφοράς για τη δρομολόγηση συγκεκριμένων συμπεριφορών προώθησης πακέτων. Όπως περιεκτικά απεικονίζεται στον Πίνακας 3 κάθε κλάση QoS χαρακτηρίζεται από τον τύπο των πόρων της (GBR ή non-GBR), ένα επίπεδο προτεραιότητας, τη μέγιστη επιτρεπτή καθυστέρηση παράδοσης καθώς και το μέγιστο αποδεκτό ρυθμό απώλειας πακέτων. Το στοιχείο RRM μεταφράζει παραμέτρους QoS σε παραμέτρους χρονοπρογραμματισμού (scheduling), πολιτικές εισόδου (admission policies), όρια διαχείρισης ουράς (queue management thresholds), πρωτοκόλλα παραμετροποίησης επιπέδου ζεύξης 3 (link layer protocol configurations), κ.ο.κ.

Οι προδιαγραφές του LTE επίσης εισήγαγαν συγκεκριμένες οντότητες πρωτοκόλλων (Εικόνα 5):

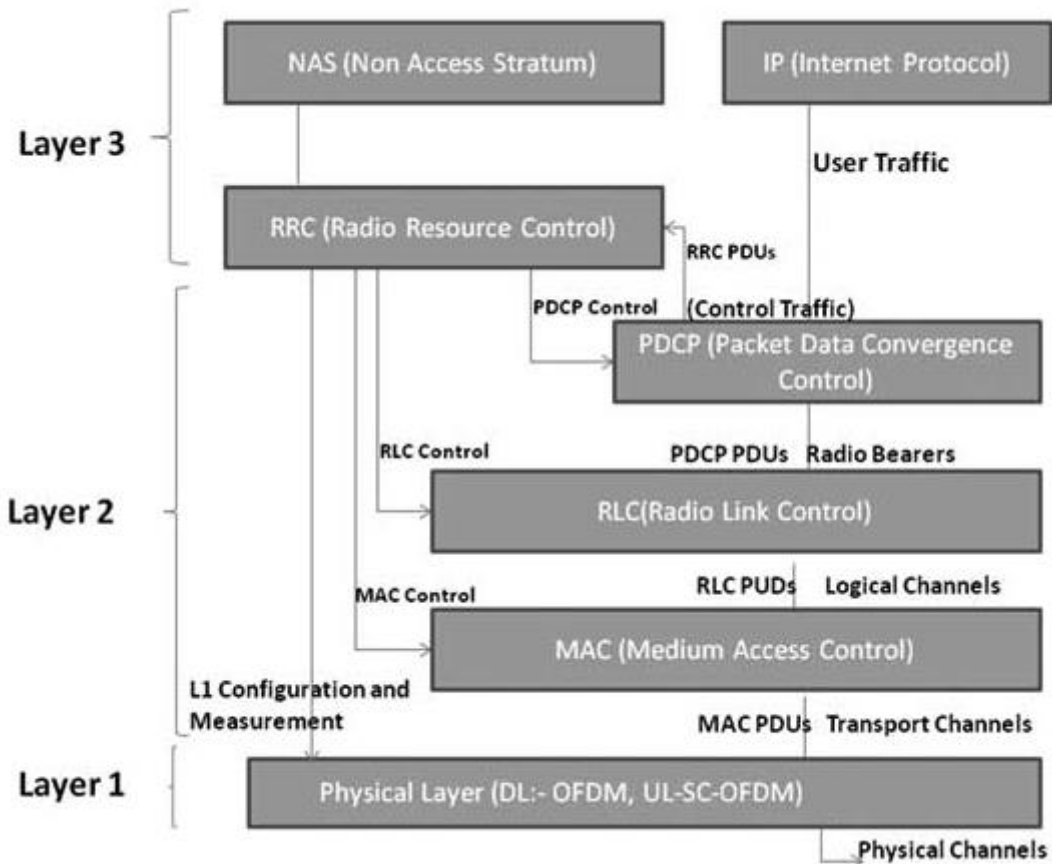
- **Radio Resource Control (Layer 3)**, χειρίζεται την εγκαθίδρυση και τη διαχείριση των συνδέσεων, τη μετάδοση των πληροφοριών του συστήματος, την κινητικότητα, τις διαδικασίες paging, καθώς και την εγκαθίδρυση, την αναδιαμόρφωση και τη διαχείριση των radio bearers [11].
- **Packet Data Convergence Control (PDCP) (Layer 2)**, πραγματοποιεί τη συμπίεση των επικεφαλίδων των ανωτέρων στρωμάτων πριν την ενθυλάκωση του επιπέδου MAC [12]. Είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά δεδομένων είτε από τη μεριά του χρήστη είτε από τη μεριά του ελέγχου, να διατηρήσει τους αριθμούς ακολουθίας PDCP Sequence (SNs), να αποκαταστήσει τα κατώτερα επίπεδα στην ακολουθία παράδοσης του ανώτερου επιπέδου Protocol Data Unit (PDU), να εξαλείψει διπλές εγγραφές κατώτερων επιπέδων Service Data Units (SDUs), να συμβάλλει στην αποκατάσταση των κατώτερων επιπέδων για χαρτογράφηση των bearers στο Radio Link Control, (RLC), στην κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση των δεδομένων στο επίπεδο χρήστη και των δεδομένων του επιπέδου ελέγχου, καθώς και στην προστασία της ακεραιότητας και επαλήθευση

της ακεραιότητας των δεδομένων επιπέδου ελέγχου. Το Packet Data Convergence Protocol (PDCP) τέλος χρησιμοποιείται και για την χαρτογράφηση των Signaling Radio Bearer (SRBs) και των Dedicated Radio Bearer (DRBs) σε λογικά κανάλια τύπου Dedicated Control Channel (DCCH) και Dedicated Traffic Channel (DTCH).



Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων E-UTRAN.

- **Radio Link Control (RLC) (Layer 2)**, παρέχει την αλληλεπίδραση μεταξύ του ράδιο φορέα και της οντότητας MAC [13].
- **MAC (Layer 2)**, παρέχει όλες τις σημαντικότερες διαδικασίες για την ράδιο διεπαφή LTE, όπως πολυπλεξία και αποπολυπλεξία, τυχαία πρόσβαση, κατανομή ραδιοπόρων και αιτήματα χρονοπρογραμματισμού [14].
- **Physical Layer (Layer 1)**, μεταφέρει όλες τις πληροφορίες από το κανάλι μεταφοράς MAC πάνω από τη διεπαφή αέρα. Υποστηρίζει την προσαρμογή ζεύξης (AMC), τον έλεγχο ισχύος, την αναζήτηση κυψέλης (για τον αρχικό συγχρονισμό και για τις περιπτώσεις handover) και άλλες μετρικές (τόσο μέσα στο ίδιο το LTE σύστημα όσο και μεταξύ συστημάτων) για το επίπεδο RRC.



Εικόνα 6: Στοιβά πρωτοκόλλων και αλληλεπίδραση μεταξύ των επιπέδων.

- **Non Access Stratum (NAS) Protocols (Layer 3)**, αποτελούν το υψηλότερο στρώμα επιπέδου ελέγχου μεταξύ του εξοπλισμού του χρήστη και του MME. Τα πρωτόκολλα NAS υποστηρίζουν την κινητικότητα του χρήστη και τις διαδικασίες για την διαχείριση μιας συνεδρίας και για να διατηρήσουν τη σύνδεση IP μεταξύ του τερματικού και του PDN GW.

Στην Εικόνα 6 παρουσιάζονται η στοιβά πρωτοκόλλων αλλά και η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών.

1.3 Φυσικό επίπεδο - τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα LTE δίκτυα για να μπορέσουν να καλύψουν τις απαιτήσεις για μεγαλύτερες ταχύτητες και χωρητικότητα (από 1.4MHz έως 20MHz) εκτός από τις αλλαγές στο δίκτυο κορμού και στις διεπαφές χρησιμοποιούν νέες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης της διεπαφής αέρα σε σχέση με τα προϋπάρχοντα δίκτυα GSM/EDGE και UMTS/HSPA: OFDMA για την κατερχόμενη ζεύξη και SC-FDMA για την ανερχόμενη.

1.3.1 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) και Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)

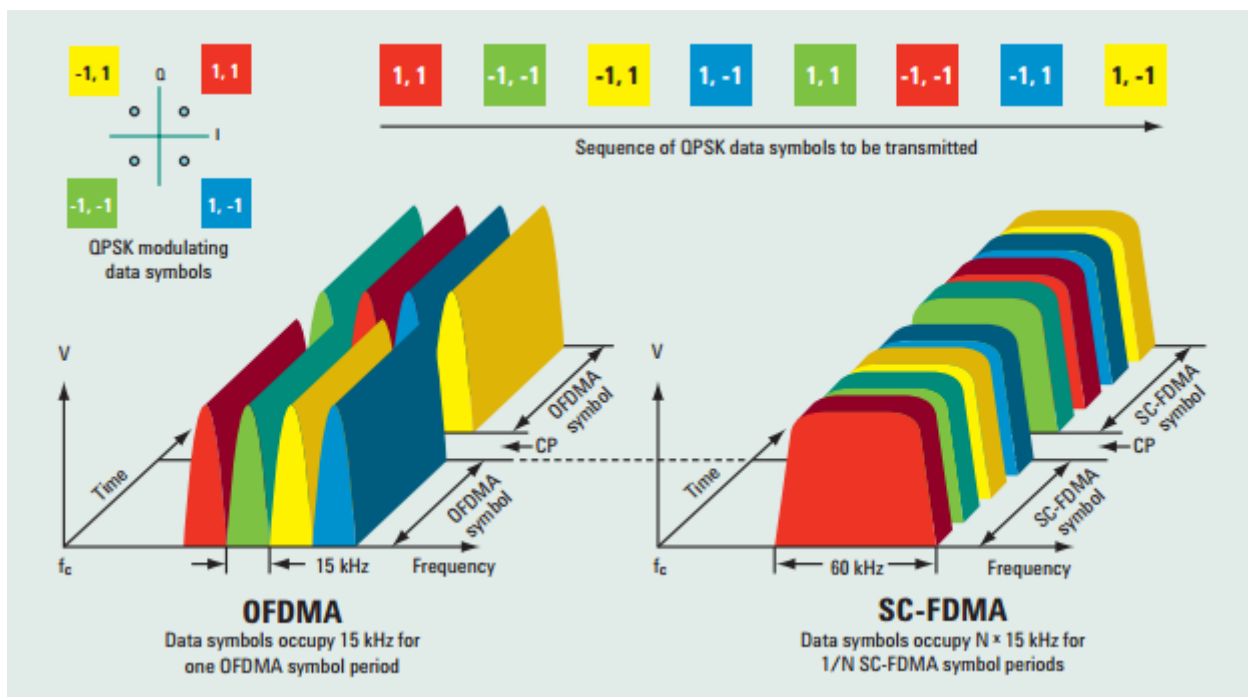
Η τεχνική που χρησιμοποιείται για την ασύρματη μετάδοση και λήψη στο LTE είναι γνωστή ως Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM). Η OFDM χρησιμοποιείται επίσης και από διάφορα άλλα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, όπως στα τοπικά ασύρματα δίκτυα (IEEE 802.11 εκδόσεις a, g και n), το WiMAX (IEEE 802.16), καθώς και στην ψηφιακή τηλεόραση και τις ραδιοφωνικές εκπομπές. Η OFDM εκτελεί τις ίδιες λειτουργίες όπως οποιαδήποτε άλλη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, επιτρέποντας στο σταθμό βάσης να επικοινωνεί με πολλά διαφορετικά κινητά την ίδια στιγμή. Είναι ένας ισχυρός τρόπος να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα της εξασθένησης και της διασυμβολικής παρεμβολής (low inter-symbol interference, ISI) αλλά και να μειωθεί η πολυπλοκότητα της υλοποίησης, ιδιαίτερα από τη μεριά του δέκτη. Όμως η μείωση της πολυπλοκότητας στον δέκτη έχει ως συνέπεια αύξηση της κατανάλωσης ισχύος (Peak-to-Average Power Ratio), αύξηση των απαιτήσεων γραμμικότητας στον ενισχυτή και μειωμένη απόδοση ισχύος για τη μεριά που μεταδίδει. Ωστόσο, το LTE για να μπορέσει να μειώσει τα κόστη και την κατανάλωση ενέργειας που σχετίζονται με την μετάδοση του χρήστη είναι το πρώτο σύστημα που κάνει χρήση του SC-FDMA.

Η OFDM είναι μια μέθοδος που κωδικοποιεί ψηφιακά δεδομένα σε πολλαπλές φέρουσες συχνότητες. Η OFDM έχει εξελιχθεί σε ένα δημοφιλές σύστημα για ευρείας ζώνης ψηφιακές επικοινωνίες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως η ψηφιακή τηλεόραση και η εκπομπή ήχου, στην πρόσβαση DSL Internet, στα ασύρματα δίκτυα, τα δίκτυα Powerline, και 4G δίκτυα επικοινωνιών.

Το OFDM είναι ένα (FDM) σύστημα πολυπλεξίας συχνότητας που χρησιμοποιείται ως ψηφιακή μέθοδος διαμορφώσεως πολλών φορέων. Ένας μεγάλος αριθμός από στενά διατεταγμένους ορθογώνιους υποφέροντες σημάτων χρησιμοποιείται για να μεταφερθούν δεδομένα σε διάφορες παράλληλες ροές δεδομένων ή κανάλια. Κάθε υποφορέας είναι διαμορφωμένος με ένα συμβατικό σχήμα διαμόρφωσης σε χαμηλό ρυθμό συμβόλων, διατηρώντας τα συνολικά ποσοστά παρόμοια με τα συμβατικά συστήματα μονής διαμόρφωσης φέρουσας στο ίδιο εύρος ζώνης.

Το κύριο πλεονέκτημα του OFDM έναντι συστημάτων μονής φέρουσας είναι η ικανότητά του να αντιμετωπίζει δύσκολες συνθήκες καναλιού (για παράδειγμα, η εξασθένηση των υψηλών συχνοτήτων σε ένα μακρύ σύρμα χαλκού, η παρεμβολή στενής ζώνης και η συχνότητα επιλεκτικής εξασθένησης λόγω πολλαπλών διαδρομών) χωρίς σύνθετα

φίλτρα εξίσωσης. Ο χαμηλός ρυθμός συμβόλων καθιστά τη χρήση του διαστήματος φύλαξης μεταξύ συμβόλων προσιτή, καθιστώντας δυνατή την εξάλειψη διασυμβολικής παρεμβολής (ISI). Ο μηχανισμός αυτός διευκολύνει επίσης το σχεδιασμό των δικτύων ενιαίας συχνότητας (Single Frequency FM Networks, SFN), όπου πολλοί γειτονικοί πομποί στέλνουν το ίδιο σήμα ταυτόχρονα με την ίδια συχνότητα, και τα σήματα από πολλαπλούς απομακρυσμένους πομπούς μπορούν να συνδυάζονται εποικοδομητικά και να μην παρεμβαίνουν όπως θα γινόταν συνήθως σε ένα παραδοσιακό σύστημα απλής φέρουσας.



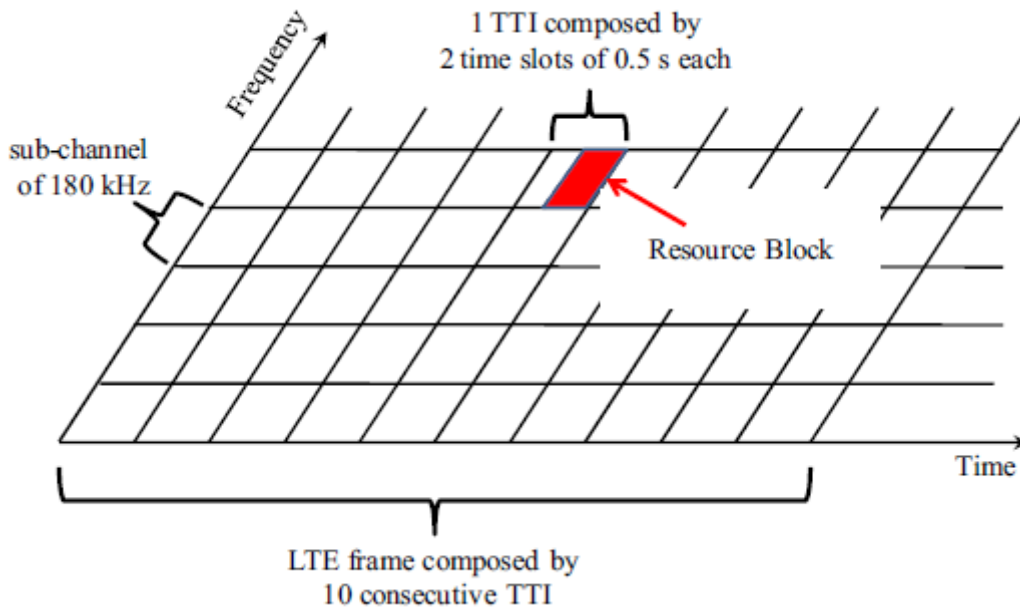
Εικόνα 7: Σύγκριση της OFDMA και SC-FDMA μετάδοσης.

Ειδικότερα όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στα LTE δίκτυα χρησιμοποιείται το OFDMA στην κατερχόμενη ζεύξη και το SC-FDMA στην ανερχόμενη. Η διαφορά τους από το βασικό OFDM είναι ότι επιτρέπουν πολλαπλή πρόσβαση αναθέτοντας σύνολα από υπό φέρουσες σε κάθε χρήστη (Εικόνα 7). Το OFDMA μπορεί να εκμεταλλευτεί την διανομή τυχαίων υποφερουσών μέσα στο συνολικό φάσμα ενώ το SC-FDMA μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο συνεχόμενες. Το OFDMA έχει μεγαλύτερη αντοχή στην εξασθένιση του καναλιού, υψηλού βαθμού επεκτασιμότητα ενώ το SC-FDMA έχει επιλεχθεί σαν διαμόρφωση για την ανερχόμενη ζεύξη διότι μειώνει την κατανάλωση ενέργειας στα τερματικά, δεδομένου του περιορισμού της μπαταρίας τους.

1.4 LTE frame structure

Το OFDMA είναι μια εξαιρετική επιλογή πολυπλεξίας για τα LTE δίκτυα της 3GPP. Παρόλο που προσθέτει επιπλέον πολυπλοκότητα για τον χρονοπρογραμματισμό των

πόρων είναι κατά πολύ καλύτερη από άλλες προσεγγίσεις προσανατολισμένες στα πακέτα όσον αφορά την αποτελεσματικότητα και την καθυστέρηση. Στο OFDMA στους χρήστες κατανέμεται ένας συγκεκριμένος αριθμός υποφερουσών (sub-carriers) για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Στις προδιαγραφές LTE αυτά αναφέρονται ως Physical Resource Blocks (PRBs), τα οποία έχουν διάσταση τόσο στο χρόνο όσο και στη συχνότητα. Η κατανομή των PRBs γίνεται από μια λειτουργία χρονοπρογραμματισμού στον σταθμό βάσης του LTE [15] [16] (Εικόνα 8).



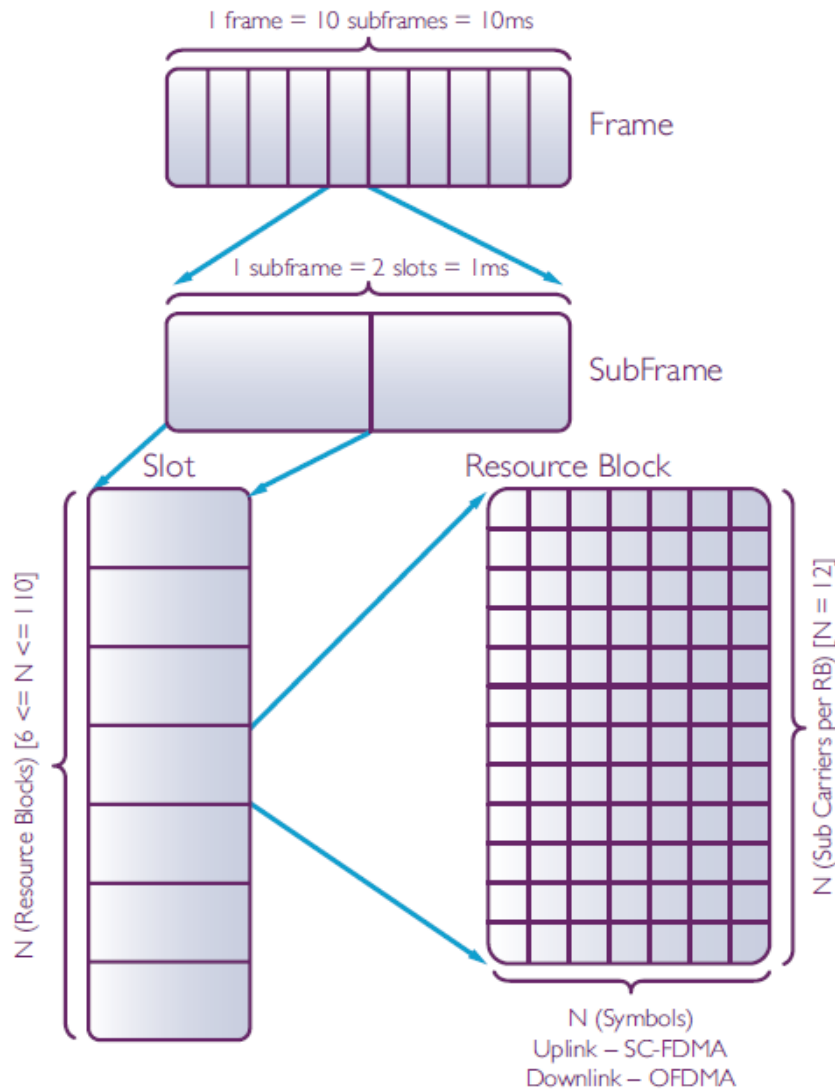
Εικόνα 8: Πλέγμα ραδιο πόρων ως προς το χρόνο και τη συχνότητα.

Συγκεκριμένα, στο πεδίο του χρόνου διανέμονται σε κάθε Χρονικό Διάστημα Μετάδοσης (Transmission Time Interval, TTI), το καθένα από τα οποία διαρκεί 1 ms. Στα LTE δίκτυα ο χρόνος TTI έχει μειωθεί σε 1ms για να μπορέσει να υποστηρίξει χαμηλή καθυστέρηση στην μεταφορά δεδομένων. Ο χρόνος χωρίζεται σε πλαίσια (frames), καθένα από τα οποία αποτελείται από 10 διαδοχικά TTI. Επιπροσθέτως, κάθε TTI αποτελείται από δυο θυρίδες χρόνου (time slots) με μήκος 0.5 ms, οι οποίες αντιστοιχούν σε 7 σύμβολα OFDM στην προεπιλεγμένη διαμόρφωση με σύντομο κυκλικό πρόθεμα.

Στο πεδίο της συχνότητας, το συνολικό εύρος ζώνης διαιρείται σε υπό-κανάλια (sub-channels) των 180 KHz, καθένα από τα οποία διαθέτει 12 διαδοχικά και ισαπέχοντα OFDM sub-carriers. Ένας ραδιοπόρος χρόνου/συχνότητας που εκτείνεται σε δυο slot χρόνου στο πεδίο του χρόνου και σε ένα υπό-κανάλι στο πεδίο συχνότητας καλείται Resource Block (RB) και αντιστοιχεί στη μικρότερη μονάδα ραδιοπόρου που μπορούμε να αναθέσουμε σε ένα UE για μετάδοση δεδομένων. Όταν το μέγεθος του υπό-καναλιού μένει σταθερό, το πλήθος των RBs διαφέρει ανάλογα με τη διαμόρφωση του εύρους

ζώνης του συστήματος (π.χ. 25 και 50 RBs για bandwidth συστημάτων των 5 και 10 MHz αντίστοιχα).

Αυτή η δομή πλαισίων που βασίζεται το LTE φαίνεται στην Εικόνα 9 Στην εικόνα παρουσιάζεται η ιδέα των Subframes, των Slots και των RBs.



Εικόνα 9: Δομή πλαισίου LTE δικτύου.

Όπως περιγράφηκε στο [16], η ραδιοεπαφή υποστηρίζει δυο τύπους δομής frame, που σχετίζονται με διαφορετικά σχέδια duplexing. Στο Frequency Division Duplex (FDD), το εύρος ζώνης διαιρείται σε δυο μέρη, που επιτρέπουν ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων downlink και uplink, και το LTE frame αποτελείται από 10 διαδοχικά πανομοιότυπα subframes. Και στο Time Division Duplex (TDD), αντίθετα, το LTE frame διαιρείται σε δύο διαδοχικά μισά frames, καθένα από τα οποία διαρκεί 5 ms. Σε αυτή την περίπτωση, διαφορετικές διαμορφώσεις των frames επιτρέπουν διαφορετική ισορροπία των πόρων που αφιερώνονται για μετάδοση uplink ή downlink. Όπως παριστάνεται σχηματικά στον Πίνακα 4 στην πραγματικότητα, ένα frame μπορεί να χαρακτηρίζεται από μια μεγάλη

παρουσία downlink (π.χ. διαμόρφωση 5) ή uplink sub-frames (π.χ. διαμόρφωση 0). Σημειώνουμε ακόμα ότι υπάρχει σε όλες τις διαμορφώσεις ένα ειδικό sub-frame (special) που χειρίζεται τις πληροφορίες συγχρονισμού. Η επιλογή του frame TDD πραγματοποιείται από την μονάδα RRM, και, όπως αναμένεται, βασίζεται στην αναλογία μεταξύ της κίνησης downlink και uplink που πρέπει να εξυπηρετήσει το δίκτυο.

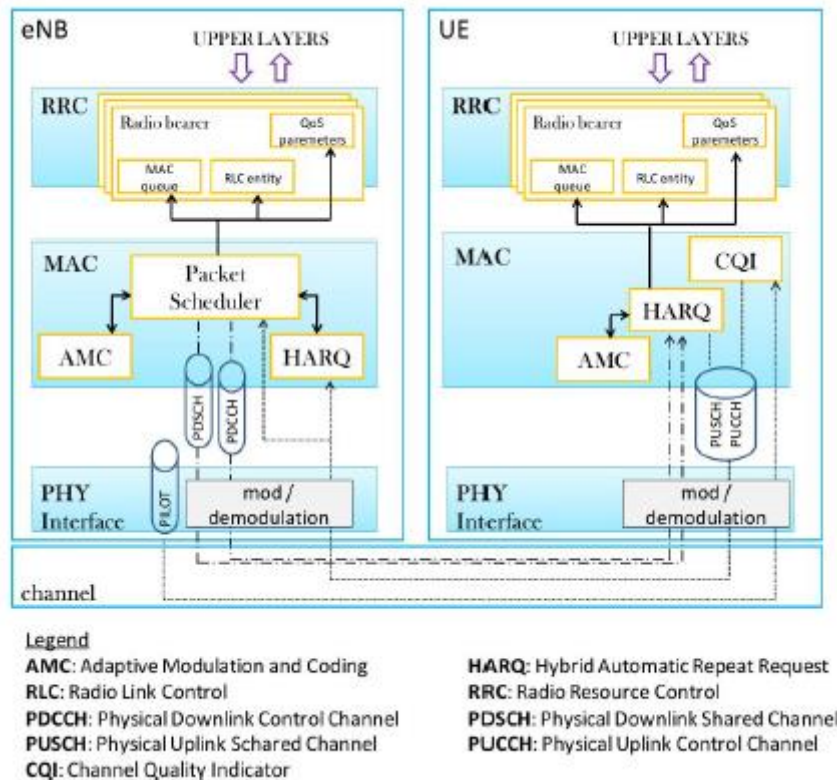
Πίνακας 4: Διαμόρφωση πλαισίου TDD.

configuration number	sub-frame number									
	1 st half frame					2 nd half frame				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

D = downlink sub-frame; U = uplink sub-frame; S = Special sub-frame.

1.5 Radio Resource Management - RRM

Πέρα από τη διανομή των πόρων, το LTE κάνει μαζική χρήση διαδικασιών RRM όπως προσαρμογή ζεύξης (link adaptation), HARQ, έλεγχος ισχύος και αναφορές Channel Quality Indicator (CQI reporting). Οι παραπάνω διαδικασίες τοποθετούνται σε φυσικά και MAC επίπεδα και έχουν ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ τους για να βελτιώσουν την αξιοποίηση των διαθέσιμων ράδιο πόρων. Η Εικόνα 10 δίνει μια γενική περιγραφή των κύριων χαρακτηριστικών και της αλληλεπίδρασης, τόσο στο πλαίσιο της ανταλλαγής δεδομένων όσο και της σηματοδότησης.



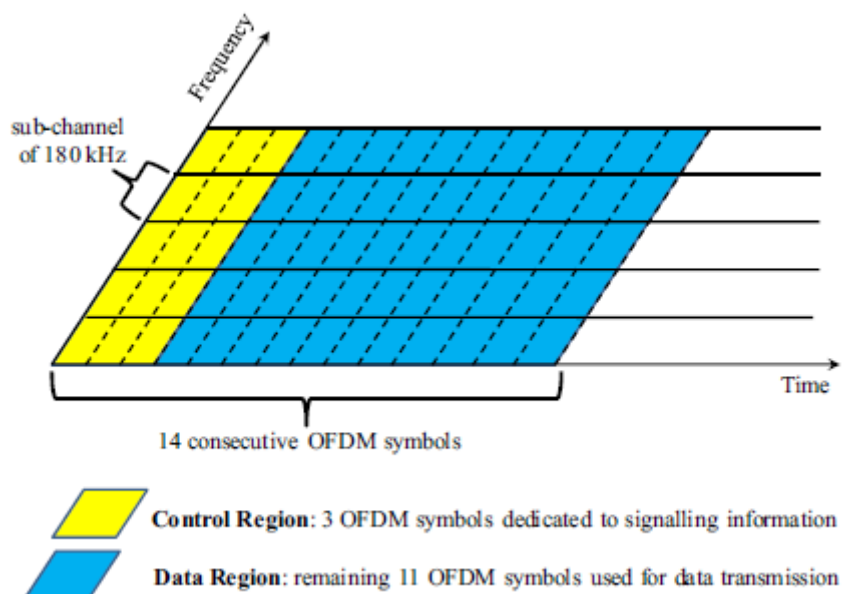
Εικόνα 10: Αλληλεπίδραση μεταξύ των κύριων χαρακτηριστικών RRM.

CQI Reporting: Η διαδικασία του CQI reporting είναι ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό των δικτύων LTE αφού επιτρέπει την εκτίμηση της ποιότητας του καναλιού downlink στο eNB. Κάθε CQI υπολογίζεται ως ένα κβαντισμένο και σε κλίμακα μέτρο του λόγου Σήματος προς Παρεμβολές συν Θόρυβο (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) που βιώνεται. Το κύριο ζήτημα που σχετίζεται με τις μεθόδους αναφοράς CQI είναι να βρεθεί καλή επιλογή ανάμεσα σε μια ακριβή εκτίμηση του καναλιού ποιότητας και ενός μειωμένου κόστους σηματοδότησης (signaling overhead). Στο [17] αναφέρονται περισσότερες λεπτομέρειες επάνω στο θέμα του CQI.

AMC και Power Control: Η διαδικασία του CQI reporting είναι αυστηρά συσχετισμένη με τη μονάδα AMC, η οποία επιλέγει το κατάλληλο Σχέδιο Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης (Modulation and Coding Scheme, MCS) προσπαθώντας να μεγιστοποιήσει την υποστηριζόμενη κίνηση με ένα δεδομένο Ρυθμό Σφάλματος Block (Block Error Rate, BLER) [18]. Με αυτό τον τρόπο, ένας χρήστης που βιώνει υψηλότερο SINR θα εξυπηρετείται με υψηλότερο ρυθμό, ενώ ένας χρήστης στα άκρα της κυψέλης (edge-cell user), ή γενικότερα ένας χρήστης που βιώνει κακές συνθήκες στο κανάλι, θα διατηρήσει ενεργές συνδέσεις σε βάρος χαμηλότερης ρυθμαπόδοσης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο αριθμός των επιτρεπόμενων σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης είναι περιορισμένος. Συνεπώς, η ρυθμαπόδοση στο σύστημα είναι άνω

φραγμένη: πάνω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι αύξηση στο SINR δεν συνεπάγεται κανένα κέρδος στη ρυθμαπόδοση. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το AMC συχνά δουλεύει μαζί με τη μονάδα ελέγχου ισχύος (power control module). Στην πραγματικότητα, το power control module είναι μια δυναμική διαδικασία που ρυθμίζει την ισχύ της μετάδοσης στη ραδιοζεύξη προκειμένου να αντισταθμίσει μεταβολές στις στιγμιαίες συνθήκες του καναλιού [18]. Ο στόχος αυτών των προσαρμογών είναι διπλός: να εξοικονομήσουν ενέργεια καθώς διατηρούν σταθερό bitrate (π.χ. μείωση της ισχύος) ή να αυξήσουν το bitrate επιλέγοντας υψηλότερο MCS (π.χ. ενίσχυση της ισχύος). Και στις δυο περιπτώσεις, ο στόχος επιτυγχάνεται διατηρώντας το αναμενόμενο BLER κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι.

Φυσικά Κανάλια (Physical Channels): Δεδομένα downlink μεταδίδονται από το eNB μέσω του Κοινόχρηστου Καναλιού (Downlink Physical Shared Channel, PDSCH). Όπως αναφέρει και το όνομα του, είναι κοινόχρηστο για τους χρήστες της κυψέλης καθώς, γενικά, καμία κράτηση πόρων δεν πραγματοποιείται στο LTE. Η μετάδοση ωφέλιμου φορτίου του PDSCH επιτρέπεται μόνο σε δεδομένο μέρος του φάσματος και σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σύμφωνα με ένα σχήμα. Ένα παράδειγμα τυπικής δομής του LTE downlink subframe, βασισμένο στο πλέγμα χρόνου/συχνότητας που εξηγήθηκε και απεικονίστηκε προηγουμένως στην Εικόνα 8, φαίνεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11: Δομή Χρόνου/Συχνότητας του downlink subframe του LTE στην περίπτωση του εύρους ζώνης των 3 MHz (παράδειγμα με 3 σύμβολα OFDM αφιερωμένα σε κανάλια ελέγχου).

Τα δεδομένα downlink και οι πληροφορίες σηματοδότησης είναι πολυπλεγμένες ως προς το χρόνο μέσα στο subframe. Συγκεκριμένα, κανάλια ελέγχου, καταλαμβάνουν σε κάθε

ΤΤΙ, τα πρώτα 1 έως 3 σύμβολα OFDM από τα 14 διαθέσιμα. Συνεπώς, μετάδοση δεδομένων επιτρέπεται κατά τη διάρκεια του εναπομείναντος χρόνου. Στην Εικόνα 11 δίνεται η δυνατότητα να παρατηρηθεί η περίπτωση ενός LTE downlink subframe όταν 3 σύμβολα OFDM είναι αφιερωμένα σε μηνύματα ελέγχου.

Ο έλεγχος σηματοδότησης του downlink πραγματοποιείται από τρία φυσικά κανάλια [19], όπου το πιο σημαντικό από την οπτική του scheduling είναι το Φυσικό Κανάλι Ελέγχου Downlink (Physical Downlink Control Channel – PDCCH), το οποίο μεταφέρει εκχωρήσεις για πηγές downlink καθώς και αναθέσεις uplink, συμπεριλαμβανομένου του χρησιμοποιούμενου MCS.

Αξίζει να αναφερθεί η επιρροή που έχει το κόστος ελέγχου (control overhead) στην απόδοση του downlink [20], διότι σε κάθε ΤΤΙ ένας σημαντικός αριθμός ραδιοπόρων χρησιμοποιείται για την αποστολή τέτοιων πληροφοριών. Συγκεκριμένα, το PDCCH μεταφέρει ένα μήνυμα γνωστό ως Πληροφορίες Ελέγχου Downlink (Downlink Control Information, DCI), που μεταβιβάζει διάφορες πληροφορίες ανάλογα με την εκάστοτε διαμόρφωση συστήματος. Διάφοροι τύποι DCI ορίζονται ανάλογα με το είδος των πληροφοριών που μεταφέρουν και το μέγεθος πακέτου τους [21].

Στην κατεύθυνση του uplink, ορίζονται δυο φυσικά κανάλια: το Φυσικό Κανάλι Ελέγχου Uplink (Physical Uplink Control Channel, PUCCH) και το Κοινόχρηστο Φυσικό Κανάλι Uplink (Physical Uplink Shared Channel, PUSCH) [2]. Λόγω των περιορισμών μοναδικού φορέα, η ταυτόχρονη μετάδοση και στα δυο κανάλια δεν επιτρέπεται. Όταν δεν προβλέπεται μετάδοση δεδομένων uplink σε ένα δεδομένο ΤΤΙ, το PUCCH χρησιμοποιείται για να μεταδώσει σηματοδότηση (π.χ. ACK/NACK σχετικό με τις μεταδόσεις downlink, downlink CQI καθώς και αιτήματα για μετάδοση uplink). Αντίθετα, το PUSCH μεταφέρει τα σήματα ελέγχου του uplink όταν το UE έχει προγραμματιστεί για μετάδοση δεδομένων, και σε αυτή την περίπτωση δεδομένα και διαφορετικά πεδία ελέγχου, όπως τα ACK/NACK και το CQI δέχονται πολυπλεξία χρόνου στο ωφέλιμο φορτίο PUSCH.

HARQ: Είναι η διαδικασία αναμετάδοσης στο επίπεδο MAC, βασισμένη στη χρήση του ευρέως γνωστού αλγόριθμου σταμάτα-και-περίμενε (stop-and-wait algorithm) [22]. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται απλά από το eNB και το UE μέσω της ανταλλαγής μηνυμάτων ACK/NACK. Ένα NACK στέλνεται μέσω του PUCCH όταν ένα πακέτο που μεταδίδεται από το eNodeB δεν αποκωδικοποιείται επιτυχημένα στο UE. Σε αυτή την περίπτωση, το eNodeB θα πραγματοποιήσει αναμετάδοση, στέλνοντας το ίδιο αντίτυπο του χαμένου πακέτου. Τότε, το UE θα προσπαθήσει να αποκωδικοποιήσει το πακέτο

Συγκριτική μελέτη της προσφερόμενης Ποιότητας Εμπειρίας αλγορίθμων ραδιο-χρονοπρογραμματισμού σε δίκτυα LTE.

συνδυάζοντας την αναμετάδοση με την αρχική εκδοχή, και θα στείλει ένα μήνυμα ACK στο eNB μόλις το αποκωδικοποιήσει επιτυχώς.

2. BASICS OF SCHEDULING IN LTE

Ο χρονοπρογραμματισμός (scheduling) είναι η διαδικασία με την οποία ο σταθμός βάσης (eNodeB) αποφασίζει σε ποιους χρήστες θα δώσει πόρους για να στείλουν ή να λάβουν δεδομένα. Στα LTE δίκτυα ο χρονοπρογραμματισμός γίνεται κάθε sub frame. Ο χρονοπρογραμματιστής (Scheduler) είναι μια οντότητα του RRM και ένα από τα βασικότερα κομμάτια του L2 της στοίβας πρωτοκόλλων του eNodeB.

Ο χρονοπρογραμματιστής πακέτων είναι υπεύθυνος για να κατανείμει τους πόρους (χρόνος και συχνότητα) στους χρήστες, τόσο στην κατερχόμενη ζεύξη (από τον σταθμό στο τερματικό) όσο και στην ανερχόμενη (από το τερματικό στο σταθμό). Ο scheduler ελέγχει την κατανομή των κοινόχρηστων πόρων μεταξύ των χρηστών κάθε χρονική στιγμή. Η απόφαση για την εκχώρηση των πόρων λαμβάνεται από τον χρονοπρογραμματιστή ο οποίος βρίσκεται στο MAC επίπεδο του σταθμού βάσης. Η σειρά με την οποία τα πακέτα θα αδειάσουν για μετάδοση από την προσωρινή μνήμη τόσο στο σταθμό βάσης όσο και στο τερματικό αποφασίζεται με βάση την στρατηγική του χρονοπρογραμματιστή. Ο χρονοπρογραμματιστής αποφασίζει σε ποιον χρήστη θα διανεμηθούν οι πόροι κάθε TTI (1ms) για να λάβει μεταδόσεις DL-SCH. Η απόδοση του scheduler έχει μεγάλο αντίκτυπο στο επίπεδο υπηρεσίας του λαμβανόμενου πακέτου. Ένας LTE scheduler μοιράζει τους πόρους στα τερματικά σε ομάδες από RBs. Στόχος του packet scheduler είναι να μεγιστοποιήσει την ικανοποίηση του χρήστη από την υπηρεσία του. Οι μετρικές που χρησιμοποιεί για να μετρήσει την ικανοποίηση είναι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που βιώνει κάθε χρήστης, η δικαιοσύνη στον τρόπο διανομής των πόρων μεταξύ των χρηστών, η κατά μέσο όρο καθυστέρηση που αντιλαμβάνεται ο χρήστης και άλλες. Η μετρική επιλέγεται έτσι ώστε ο χρονοπρογραμματιστής να επιλύσει τις διαμάχες για τους πόρους μεταξύ των χρηστών. Γενικά στόχος του χρονοπρογραμματισμού είναι να γίνεται αποτελεσματικό μοίρασμα των πόρων, και καλύτερη απόδοση με γνώμονα πάντα την δικαιοσύνη, την αξιοποίηση των πόρων και την ρυθμαπόδοση.

Στην **Error! Reference source not found.** παρουσιάζονται τα κανάλια που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία των διαφόρων επιπέδων και για την υλοποίηση του scheduling.

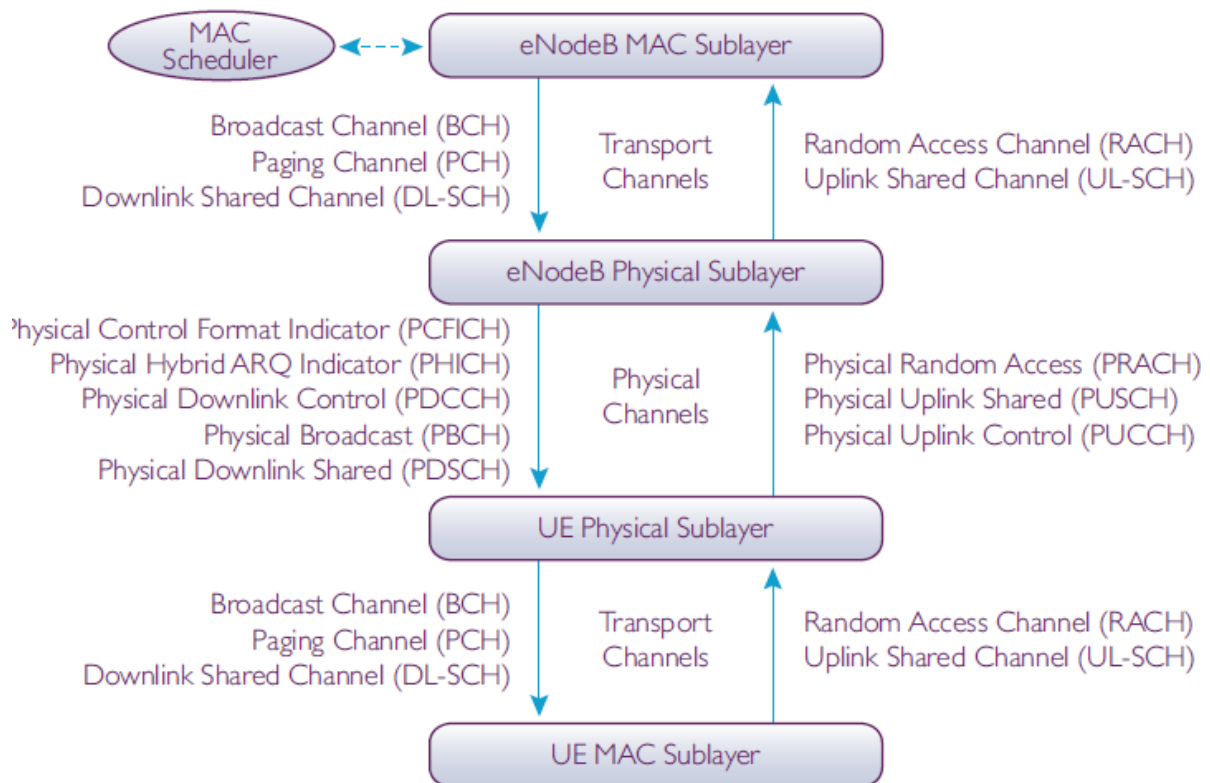
Κάποιοι βασικοί όροι για τον χρονοπρογραμματισμό είναι:

CQI (Channel Quality Indicator) είναι μια τιμή μήκους τεσσάρων bit που αποστέλλεται στον eNB από τον UE ως ανάδραση για την κατερχόμενη ζεύξη. Το CQI ενημερώνει τον

eNB σχετικά με την ποιότητα του καναλιού στο downlink. Αυτό βοηθά τον eNodeB να επιλέξει το κατάλληλο MCS και RB για τον UE.

BSR (Buffer Status Report) είναι ένας τρόπος ώστε ο UE να ενημερώσει το δίκτυο πως έχει κάποια δεδομένα για αποστολή και θέλει να του χορηγηθεί η άδεια για την αποστολή αυτών.

QoS (Quality of Service) καθορίζει το πώς μία συγκεκριμένη ροή δεδομένων χρήστη πρέπει να αντιμετωπίζεται στο δίκτυο. Το QoS υλοποιείται μεταξύ του UE και της PDN Gateway και εφαρμόζεται σε μια σειρά από bearers. Για παράδειγμα, τα πακέτα VoIP έχουν προτεραιότητα από το δίκτυο σε σχέση με τα δεδομένα του προγράμματος περιήγησης.



Εικόνα 12: Κανάλια μεταφοράς και φυσικά κανάλια στο LTE.

Ο MAC Scheduler τρέχει για κάθε TTI και δεσμεύει τους πόρους φάσματος που θα χρησιμοποιηθούν στην ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη. Η διαδικασία αυτή μπορεί να χωριστεί σε:

- Shared Channel Scheduling: Είναι η δέσμευση πόρων που θα χρησιμοποιηθούν από κανάλια PDSCH και PUSCH για τη μεταφορά δεδομένων τόσο από τη μεριά του χρήστη όσο και από τη μεριά του ελέγχου. Ο χρονοπρογραμματισμός του διαμοιραζόμενου καναλιού μπορεί να διαιρεθεί σε λειτουργικότητες για το Uplink

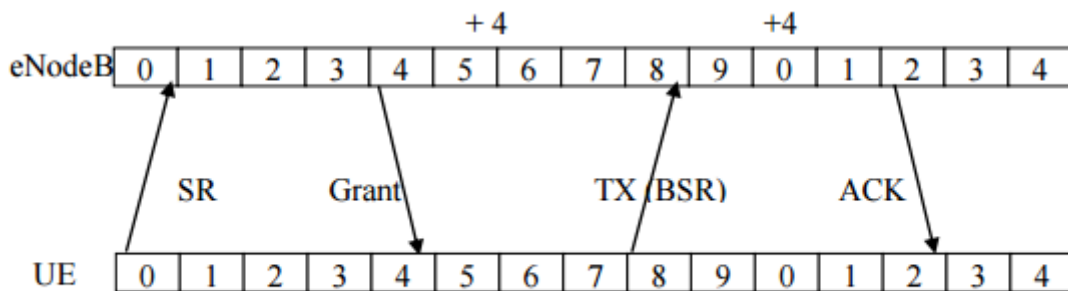
και το Downlink (PDSCH, PUSCH), και για κάθε κατεύθυνση εφαρμόζεται ο χρονοπρογραμματισμός ανεξάρτητα. Σε κάθε περίπτωση, στόχος των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού αυτών των καναλιών είναι να εξασφαλίσουν τους πόρους που απαιτούνται για την μεταφορά της πληροφορίας (transport block size, TBs) σε ένα TTI.

- **Control Channel Scheduling:** Είναι ο χρονοπρογραμματισμός πόρων για το κανάλι PDCCH. Αυτό το κανάλι είναι απαραίτητο για την επικοινωνία των διαμοιραζομένων καναλιών δέσμησης πόρων και στις δύο κατευθύνσεις και για να δώσει άδεια στους χρήστες σε μια κυψέλη. Ο MAC Scheduler επίσης χρονοπρογραμματίζει το κανάλι PDCCH. Τα άλλα κανάλια ελέγχου (π.χ. PCFICH, PHICH) δεν απαιτούν προγραμματισμό. Το PDCCH χρησιμοποιείται για να ενημερώσει το UE για το χρονοπρογραμματισμό των κοινών καναλιών τόσο για την ανερχόμενη όσο και για την κατερχόμενη ζεύξη, και ως εκ τούτου είναι ένα ζωτικό μέρος της διαδικασίας. Αν η κατανομή των πόρων του κοινού καναλιού δεν μπορεί να κοινοποιηθούν στον UE, οι αντίστοιχοι πόροι είναι αναξιόπιστοι.

Ο τρόπος που λειτουργεί ο χρονοπρογραμματισμός είναι ο εξής. Ο UE θα υπολογίσει την τιμή του SNR με βάση την κατάσταση του καναλιού του. Στέλνει ένα CQI στο eNB βασιζόμενο στο SNR που υπολόγισε ώστε να επιλέξει το κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS). Η μέθοδος αναφοράς CQI έχει ως στόχο να πετύχει μια ισορροπία μεταξύ της ποιότητας του καναλιού που υπολογίστηκε και της ελαχιστοποίησης της σηματοδότησης. Πολλές μέθοδοι αναφοράς CQI αναφέρονται στο [23].

Στο uplink ο χρονοπρογραμματισμός είναι πιο πολύπλοκος διότι χρησιμοποιείται το σχήμα SC-FDMA στο οποίο σε κάθε χρήστη πρέπει να διανεμηθούν συνεχόμενα RBs. Ο χρονοπρογραμματιστής στο Uplink καθορίζει ποιος χρήστης θα μεταδώσει και με ποια RBs σε ένα δεδομένο χρονικό όριο. Σε αντίθεση με την διαδικασία στο downlink, στο uplink ο χρονοπρογραμματιστής δεν έχει τη δυνατότητα να γνωρίζει αυτόματα την ζήτηση για μετάδοση. Έτσι πριν την μετάδοση ο χρήστης θα πρέπει να στείλει ένα αίτημα για χρονοπρογραμματισμό (Scheduling request, SR) για να ζητήσει την άδεια για μετάδοση. Όταν ο σταθμός βάσης λάβει το αίτημα από τον χρήστη θα του απαντήσει με scheduling grant. Ο χρονοπρογραμματιστής αποφασίζει τους πόρους σε χρόνο και συχνότητα που θα χρησιμοποιήσει ο χρήστης όπως και τη μορφή μετάδοσης. Όταν λοιπόν το τερματικό λάβει την πληροφορία μπορεί να την μεταδώσει μαζί με τις

απαιτούμενες παραμέτρους μέσα στο sub-frame όταν είναι ενεργό το grant του (**Error! Reference source not found.**).

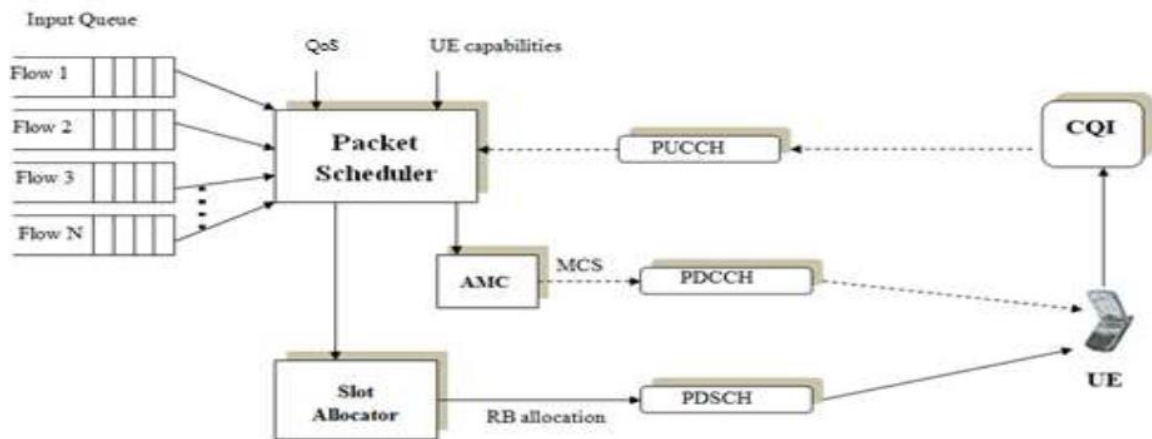


Εικόνα 13: Διαδικασία επικοινωνίας eNodeB και Ue.

2.1 Δυναμική δέσμευση πόρων στα LTE δίκτυα

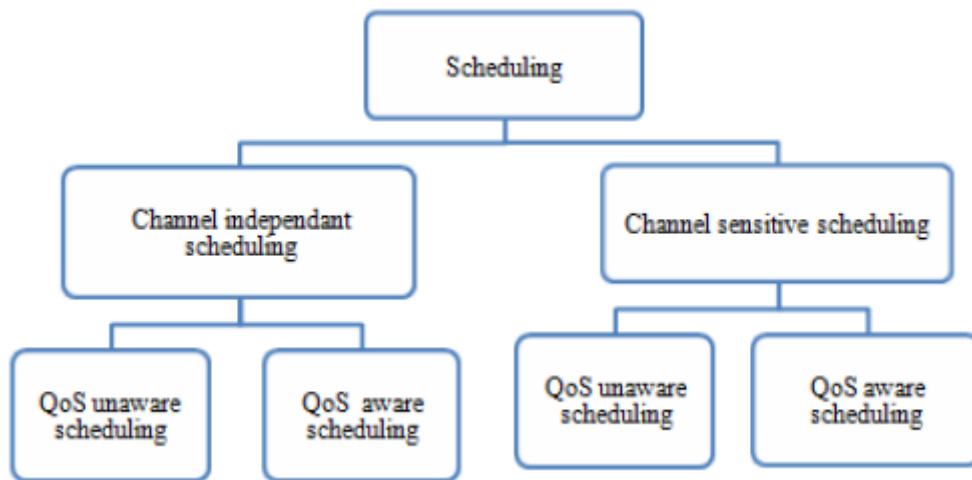
Η δυναμική δέσμευση πόρων ή αλλιώς χρονοπρογραμματισμός πακέτων (Packet Scheduling, PS) αναλαμβάνει την τήρηση των απαιτήσεων σε QoS εφαρμόζοντας τους κατάλληλους αλγορίθμους για χρονοπρογραμματισμό δεδομένων τόσο στο DL όσο και στο UL. Βασικός στόχος του χρονοπρογραμματιστή είναι να μεγιστοποιήσει την χρήση του καναλιού παρέχοντας ταυτόχρονα δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών. Οι δύο βασικές μονάδες ενός PS είναι ο Time Domain Packet Scheduling (TDPS) και ο Frequency Domain Packet Scheduling (FDPS). Ο TDPS επιλέγει ένα υποσύνολο από UEs για να μπουν στην διαδικασία του χρονοπρογραμματισμού και ο FDPS καθορίζει το μέγεθος του block μεταφοράς, το MCS, το PRB για το UE. Η δέσμευση πόρων για ένα χρήστη βασίζεται στην απόφαση του χρονοπρογραμματιστή. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν πριν το σχεδιασμό ενός αλγορίθμου είναι η παροχή QoS, η αποτελεσματικότερη χρήση του φάσματος, η δικαιοσύνη, η πολυπλοκότητα και η διαβάθμιση.

Στο LTE στην κατερχόμενη ζεύξη το QoS εξαρτάται από παραμέτρους όπως οι συνθήκες του καναλιού, η πολιτική δέσμευσης πόρων, οι διαθέσιμοι πόροι, η ανεκτικότητα ή όχι στην καθυστέρηση και άλλα. Στην Εικόνα 14 αποτυπώνεται μια γενική εικόνα ενός μοντέλου χρονοπρογραμματισμού.



Εικόνα 14: Μοντέλο χρονοπρογραμματιστή.

Οι στρατηγικές χρονοπρογραμματισμού ενός ασύρματου δικτύου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν όπως φαίνεται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15: Γενική κατηγοριοποίηση χρονοπρογραμματιστών.

Η κατηγορία Channel independent scheduling θεωρεί ότι το κανάλι είναι αμετάβλητο στο χρόνο, χωρίς λάθη και εμφανίστηκε αρχικά για τα ενσύρματα δίκτυα. Από την άλλη, στην κατηγορία Channel sensitive scheduling εκτιμάται η ποιότητα που αντιλαμβάνεται ο χρήστης με την βοήθεια των αναφορών CQI. Στόχος του χρονοπρογραμματιστή σε αυτή την κατηγορία είναι είτε να μεγιστοποιήσει το QoS που αντιλαμβάνεται ο χρήστης (QoS aware scheduling) είτε να παρέχει δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών (QoS unaware scheduling). Στα LTE δίκτυα έχουμε μόνο channel sensitive scheduling που βασίζεται στη CQI αναφορά του χρήστη.

Τέλος υπάρχουν και κάποιοι παράγοντες στην ανάπτυξη ενός πραγματικού συστήματος LTE που μπορούν να περιορίσουν την εφαρμογή ενός σχήματος ανάθεσης πόρων, όπως οι περιορισμοί του uplink λόγω της διαμόρφωσης που χρησιμοποιεί και θέτει

κάποια όρια που συζητήθηκαν παραπάνω, ο περιορισμός της σηματοδοσίας, τα όρια που θέτει το multi-user diversity gain αλλά και η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας που επιδιώκουμε με διάφορες τεχνικές στα δίκτυα LTE [24].

2.2 Channel-unware strategies

Οι στρατηγικές αυτής της κατηγορίας αν και δεν έχουν ρεαλιστική εφαρμογή στα LTE δίκτυα, πολλές φορές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με channel-aware στρατηγικές για να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος. Οι αλγόριθμοι αυτοί είχαν ως στόχο να πετύχουν δικαιοσύνη, προτεραιότητες ροής και προθεσμία λήξης για όλα τα πακέτα σε δίκτυα μεταγωγής. Από την άλλη, δεν λαμβάνουν καθόλου υπόψιν στην λογική της υλοποίησής τους τις διαφορετικότητες στην ποιότητα του καναλιού.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιοι αλγόριθμοι που ανήκουν στην κατηγορία αυτή και οι μετρικές τους, ενώ στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι σημειογραφίες για τις μετρικές.

2.2.1 First In First Out (FIFO)

Είναι η πιο απλή περίπτωση με αυστηρή προτεραιότητα, όπως μια ουρά FIFO. Εξυπηρετεί τους χρήστες με βάση τη σειρά που ζήτησαν πόρους, δηλαδή όποιος ζήτησε πρώτος θα εξυπηρετηθεί πρώτος. Η μετρική που εκφράζει αυτή την συμπεριφορά είναι:

$$m_{i,k}^{FIFO} = t - T_i$$

Όπου t είναι ο τρέχων χρόνος και T_i είναι η χρονική στιγμή που έγινε η αίτηση από τον i χρήστη.

Αυτή η τεχνική είναι απλή αλλά καθόλου αποδοτική ως προς το μοίρασμα των πόρων.

2.2.2 Round Robin (RR)

Ο Round Robin (RR) είναι απλό και εύκολο να εφαρμοστεί σαν σύστημα χρονοπρογραμματισμού. Αυτός είναι ο λόγος που χρησιμοποιείται από πολλά συστήματα. Στρατηγική του συστήματος αυτού είναι στους UEs να αποδίδονται οι κοινόχρηστοι πόροι με τη σειρά (ο ένας μετά τον άλλο). Έτσι, κάθε UE είναι εξίσου χρονοπρογραμματισμένο χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η τιμή CQI. Ο RR είναι ένα δίκαιο σύστημα χρονοπρογραμματισμού επειδή κάθε UE έχει το ίδιο ποσό πλαισίων μετάδοσης RB. Βασίζεται μόνο στα διαθέσιμα RB, και τα RB πρέπει να ομαδοποιηθούν σε έναν αριθμό RBs για κάθε χρήστη κατά τη διάρκεια της διαδικασίας χρονοπρογραμματισμού. Κατανέμει τα μπλοκ πόρων σε μη κενές ουρές ελέγχου

ραδιοζεύξης (Radio Link Control, RLC) σε κυκλική διάταξη. Οι μη-κενές RLC ουρές επίσης αναφέρονται ως ενεργές ροές. Αν όλες οι ροές κατανέμονται σε κάποια Resource Block Group (RBGs) τότε όλα μεταδίδονται στο ίδιο sub frame. Διαφορετικά, αν κάποιες από τις ροές έχουν μείνει αδιάθετες τότε η κατανομή τους στο επόμενο πλαίσιο θα ξεκινήσει από την τελευταία ροή που δεν διατέθηκε. Η διαμόρφωση και το σύστημα κωδικοποίησης για τα διαφορετικά κανάλια μετάδοσης κατανέμονται ανάλογα με το δείκτη ποιότητας του ληφθέντος καναλιού (CQI) [25]. Αν και ο RR δίνει σε κάθε UE ίσες ευκαιρίες για την απόκτηση RBs, η συνολική ρυθμαπόδοση είναι πολύ χαμηλότερη από ό,τι σε άλλους χρονοπρογραμματιστές επειδή δεν λαμβάνει υπόψιν τις εκτιμήσεις του καναλιού. Στα LTE, διαφορετικοί UEs έχουν διαφορετικές υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις QoS και είναι πολύ δύσκολο να επιτραπεί σε κάθε UE να αναλάβει το ίδιο RB με την ίδια πιθανότητα διότι θα μειώσει την αποδοτικότητα των πόρων.

Πίνακας 5: Σημειογραφία συμβόλων μετρικών.

Έκφραση	Ερμηνεία
$m_{i,k}$	Η μετρική για τον i -οστό χρήστη στο k -οστό RB
$r^i(t)$	Ο ρυθμός μετάδοσης που επιτεύχθηκε από τον i -οστό χρήστη τη χρονική στιγμή t
$\overline{R^i}(t)$	Η κατά μέσο όρο ρυθμαπόδοση του παρελθόντος που επιτεύχθηκε από τον i -οστό χρήστη μέχρι τη χρονική στιγμή t
$\overline{R_{sch}^i}(t)$	Η κατά μέσο όρο ρυθμαπόδοση που επιτεύχθηκε από τη ροή δεδομένων του i -οστού χρήστη όταν χρονοπρογραμματίστηκε
$D_{HOL,i}$	Head of Line Delay, για παράδειγμα η καθυστέρηση του πρώτου πακέτου που είναι να μεταδοθεί για τον i -οστό χρήστη
τ_i	Το όριο καθυστέρησης για τον i -οστό χρήστη
δ_i	Αποδεκτή απώλεια πακέτων για τον i -οστό χρήστη
$d^i(t)$	Ο ευρείας ζώνης αναμενόμενος ρυθμός μετάδοσης για τον i -οστό χρήστη

$d_k^i(t)$	Ο αναμενόμενος ρυθμός μετάδοσης για τον i -οστό χρήστη τη χρονική στιγμή t στο k -οστό RB
Γ_k^i	Αποδοτικότητα φάσματος για τον i -οστό χρήστη πάνω στο k -οστό RB

2.2.3 Blind Equal Throughput (BET)

Η δικαιοσύνη ως προς τη ρυθμαπόδοση είναι το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της προσέγγισης, που χρησιμοποιεί σαν μετρική τη μέση ρυθμαπόδοση που επιτεύχθηκε από τους χρήστες στον προηγούμενο χρονοπρογραμματισμό τους ($\overline{R_{sch}^i(t)}$) και υπολογίζεται σε κάθε TTI για κάθε χρήστη.

$$m_{i,k}^{BET} = \frac{1}{\overline{R^i(t-1)}}$$

με $\overline{R^i(t)} = \beta \overline{R^i(t-1)} + (1-\beta)r^i(t)$ όπου $0 \leq \beta \leq 1$.

Λόγω των ιδιοτήτων της αυτή η μετρική χρησιμοποιείται σε πολλούς schedulers. Πρώτα από όλα, είναι εμφανές ότι σε κάθε TTI ο BET παρέχει πόρους στη ροή που είχε εξυπηρετηθεί με τη μικρότερη μέση ρυθμαπόδοση στο παρελθόν. Με βάση λοιπόν αυτή την πολιτική ο χρήστης που βίωσε την μικρότερη ρυθμαπόδοση θα εξυπηρετείται μέχρι να αποκτήσει την ίδια ρυθμαπόδοση με τους άλλους χρήστες στην κυψέλη. Άρα σε χρήστες με κακή ποιότητα καναλιού θα διατίθενται πιο συχνά πόροι, με αποτέλεσμα την βελτίωση της δικαιοσύνης.

2.2.4 Weighted Fair Queuing (WFQ)

Ένας τρόπος για να εισάγουμε κάποιες προτεραιότητες αποφεύγοντας την πιθανότητα εξάντλησης όλων των πόρων είναι η εφαρμογή της τεχνικής των σταθμισμένων βαρών. Στην περίπτωση αυτή συσχετίζουμε ένα βάρος (w_i) με κάθε χρήστη i ή μπορεί να είναι για μια ομάδα χρηστών, έτσι η μετρική για τον RR γίνεται:

$$m_{i,k}^{WFQ} = w_i m_{i,k}^{RR}.$$

Με τον τρόπο αυτό οι διαθέσιμοι πόροι μοιράζονται κατάλληλα με βάση τα βάρη (όποιος έχει μεγαλύτερο βάρος έχει και μεγαλύτερη προτεραιότητα) αλλά ταυτόχρονα

αποφεύγεται και η εξάντληση όλων των πόρων διότι η μετρική RR που χρησιμοποιείται ελέγχει ότι ο χρόνος που θα περιμένει ένας χρήστης δεν θα αυξάνει ατέρμονα.

2.3 Channel-aware/QoS-unaware Strategies

Οι schedulers αυτής της κατηγορίας είναι οι πιο κατάλληλοι για τα ασύρματα δίκτυα. Κάποιοι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας έχουν ως στόχο να μεγιστοποιήσουν τη ρυθμαπόδοση και κάποιοι να παρέχουν δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών. Η δυνατότητα των αλγορίθμων αυτών βασίζεται στην αναφορά CQI που παίρνει ο eNodeB από το τερματικό και στην προσαρμογή της ζεύξης, βασικά χαρακτηριστικά του RRM. Έστω $d_k^i(t)$ ο αναμενόμενος ρυθμός μετάδοσης για τον i χρήστη το t TTI για όλο το φάσμα και για το k RB. Οι αναφερόμενες τιμές μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την AMC φόρμουλα ή απλά κάνοντας μια εκτίμηση, λαμβάνοντας υπόψιν την πολύ σημαντική έκφραση του Shannon για την χωρητικότητα του καναλιού, έχουμε

$$d_k^i(t) = \log[1 + SINR_k^i(t)].$$

Εκτός όμως από την αποτελεσματική χρήση του φάσματος για ένα δίκτυο κινητής επικοινωνίας είναι σημαντική και η εξασφάλιση ποιότητας υπηρεσίας ακόμα και στα άκρα της κυψέλης.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιοι αλγόριθμοι που ανήκουν στην κατηγορία αυτή.

2.3.1 Maximum Throughput (MT)

Ο αλγόριθμος αυτός παρέχει τη μέγιστη συνολική ρυθμαπόδοση δίνοντας κάθε RB στον χρήστη που έχει την καλύτερη ποιότητα καναλιού. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης με την καλύτερη ποιότητα καναλιού θα χρονοπρογραμματίζεται πάντα. Η μετρική σχέση προτεραιότητας που χρησιμοποιείται στον MT για τον i χρήστη στο k RB είναι η

$$m_{i,k}^{MT} = d_k^i(t)$$

Όπου $d_k^i(t)$ είναι ο αναμενόμενος ρυθμός μετάδοσης για τον i χρήστη τη χρονική στιγμή t στο k RB και N ο αριθμός των χρηστών στο δίκτυο.

Αν και ο αλγόριθμος αυτός μεγιστοποιεί την ρυθμαπόδοση της κυψέλης την ίδια ώρα παρέχει άδικη κατανομή πόρων μεταξύ των χρηστών και ιδιαίτερα αυτών που είναι στα άκρα της κυψέλης.

2.3.2 Proportional Fair Scheduler (PF)

Ο χρονοπρογραμματιστής αυτός είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ του BET και του MT. Βασικός του στόχος είναι η μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης του δικτύου αλλά ταυτόχρονα η εγγύηση σε όλους τους χρήστες ενός ελαχίστου επιπέδου υπηρεσίας. Μία συνάρτηση προτεραιότητας χρησιμοποιείται για να καθορίσει την θέση κάθε UE. Μετά στον χρήστη με την μεγαλύτερη προτεραιότητα διανέμονται οι πόροι. Ένα σχήμα χρονοπρογραμματισμού, P, είναι PF αν και μόνο αν για κάθε εφικτό σχήμα χρονοπρογραμματισμού, S, ικανοποιεί την παρακάτω ισότητα:

$$\sum_k \frac{T_k^{(S)} - T_k^{(P)}}{T_k^{(P)}} \leq 0$$

Όπου $T_k^{(S)}$ είναι η χρονική μέση τιμή του χρήστη k που δίνεται από τον χρονοπρογραμματιστή S .

Ο PF διανέμει τα RBs στον χρήστη με την καλύτερη σχέση ποιότητας καναλιού, για παράδειγμα ένας συνδυασμός CQI και επιθυμητού επιπέδου δικαιοσύνης. Η μετρική έκφραση είναι η:

$$m_{i,k}^{PF} = m_{i,k}^{BET} m_{i,k}^{MT} = \frac{d_k^i(t)}{R^i(t-1)}.$$

Ο παρονομαστής της σχέσης θα αυξάνεται για τους χρήστες που έχουν κακή ποιότητα καναλιού το οποίο συνεπάγεται αύξηση της μετρικής προτεραιότητας, άρα στον χρήστη που βρίσκεται στα όρια της κυψέλης και έχει κακή ποιότητα καναλιού θα του δοθούν πόροι για να μεταδώσει. Η μέση τιμή της ρυθμαπόδοσης μιας παρελθούσας στιγμής δίνεται από την σχέση $\overline{R^i}(t) = \beta \overline{R^i}(t-1) + (1-\beta)r^i(t)$. Η παράμετρος β είναι πολύ σημαντική καθώς σχετίζεται με το παράθυρο χρόνου T_f μέσα στο οποίο η δικαιοσύνη

θέλει να βελτιωθεί με βάση τη σχέση $T_f = \frac{1}{(1-\beta)}$.

Υπάρχουν πολλές παραλλαγές του PF που βασίζονται στις τιμές που λαμβάνονται υπόψιν αλλά αυξάνεται η δυσκολία υλοποίησης ανάλογα με την πολυπλοκότητα του προβλήματος βελτιστοποίησης που έχουμε. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες παραλλαγές [26], [27], [28], [29], [30]. Ο Generalized Proportional Fair (GPF) είναι ένας από αυτούς [31], όπου η μετρική PF τροποποιείται με δύο παραμέτρους τις ξ και ψ , οι οποίες δρουν σαν βάρη για την διαδικασία δέσμευσης πόρων τόσο στο στιγμιαίο ρυθμό

εκπομπής όσο και στη ρυθμαπόδοση που επιτεύχθηκε στο παρελθόν αντίστοιχα. Η σχέση λοιπόν γίνεται:

$$m_{i,k}^{GPF} = \frac{[d_k^i(t)]^\xi}{[R^i(t-1)]^\psi}$$

Βασικός στόχος ενός αλγόριθμου αυτής της κατηγορίας είναι να επιτύχει μια ισορροπία μεταξύ μεγιστοποίησης της ρυθμαπόδοσης του καναλιού και δικαιοσύνης επιτρέποντας σε όλους τους χρήστες να επιτύχουν ένα ελάχιστο QoS. Ένας τέτοιος αλγόριθμος σχεδιάζεται να είναι καλύτερος όσον αφορά το μέσο όρο ρυθμαπόδοσης των χρηστών, να είναι δίκαιος για τους περισσότερους χρήστες και να φτάνει τις ελάχιστες απαιτήσεις για QoS κατά την διάρκεια της διαδικασίας του χρονοπρογραμματισμού.

2.3.3 Throughput to Average (TTA)

Ο αλγόριθμος αυτός εκφράζει μια προσέγγιση μεταξύ του MT και του PF [32]. Η μετρική του είναι η:

$$m_{i,k}^{TTA} = \frac{d_k^i(t)}{d^i(t)}$$

Από την παραπάνω σχέση γίνεται εμφανές ότι όσο μεγαλύτερη αναμένεται η ρυθμαπόδοση του χρήστη τόσο μικρότερη θα είναι η τιμή της μετρικής για ένα RB. Ο TTA έχει ένα μεγάλο βαθμό δικαιοσύνης στο τρέχον παράθυρο ενός TTI διότι μπορεί να εγγυηθεί ότι το καλύτερο RB μπορεί να δοθεί σε οποιονδήποτε χρήστη.

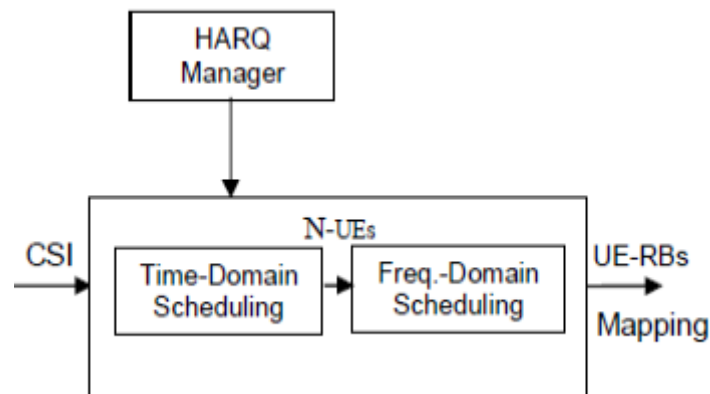
2.3.4 Joint Time and Frequency domain schedulers

Στο άρθρο [33] προτείνεται μια τεχνική δύο βημάτων για την κατανομή του ραδιο φάσματος (**Error! Reference source not found.**).

Αρχικά ένας χρονοπρογραμματιστής ως προς το χρόνο (TDPS) επιλέγει ένα υποσύνολο από χρήστες που είναι συνδεδεμένοι στο σταθμό βάσης στο τρέχον TTI. Μετά τα RBs διανέμονται σε κάθε χρήστη με βάση ένα χρονοπρογραμματιστή ως προς τη συχνότητα (FDPS).

Το τελικό αποτέλεσμα είναι η απόφαση από τους δύο χρονοπρογραμματιστές οι οποίοι δουλεύουν στη σειρά. Το πλεονέκτημα είναι ότι μειώνεται η πολυπλοκότητα και επιπλέον δίνεται η δυνατότητα να εφαρμοστεί διαφορετική πολιτική σε κάθε φάση. Για παράδειγμα μπορεί να εφαρμοστεί στην πρώτη φάση ο RR ο οποίος παρέχει δίκαιη κατανομή του

χρόνου μεταξύ των χρηστών και στη δεύτερη φάση ο PF με τον οποίο πετυχαίνουμε μια καλή αναλογία μεταξύ της αποτελεσματικής χρήσης του φάσματος και της δικαιοσύνης. Επιπλέον στο [34] [35] παρουσιάζεται ένα ενδιαφέρον σχήμα με τη χρήση του PF και στις δύο φάσεις.



Εικόνα 16:LTE πλαίσιο λειτουργίας Packet Scheduler.

2.3.5 Αλγόριθμοι που έχουν σαν βασική παράμετρο την καθυστέρηση

Σημαντικές εργασίες έχουν γίνει με στόχο τον σχεδιασμό χρονοπρογραμματιστών με ευαισθησία ως προς την καθυστέρηση. Στο άρθρο [36] παρουσιάζεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για ελαχιστοποίηση της μέσης καθυστέρησης κάτω από τους περιορισμούς της ισχύς μετάδοσης και του ρυθμού σφάλματος μπλοκ. Στο [37] ο συγγραφέας συσχετίζει μια συνάρτηση καθυστέρησης με κάθε πακέτο. Έτσι όσο μεγαλύτερη η καθυστέρηση τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να του διανεμηθούν πόροι.

2.3.6 Αλγόριθμοι που έχουν σαν βασική παράμετρο την ενέργεια

Ένας αλγόριθμος που βασίζεται στην ενέργεια μετάδοσης περιγράφεται στο άρθρο [38], όπου η μετρική χρονοπρογραμματισμού βασίζεται στη σχέση μεταξύ ενέργειας μετάδοσης ανά bit και στους διαθέσιμους πόρους. Στο [39] διατυπώνεται ένα πρόβλημα ανάθεσης πόρων με παραμέτρους την ενέργεια, την καθυστέρηση και το ρυθμό.

2.3.7 Αλγόριθμοι που έχουν σαν βασική παράμετρο την κατάσταση του buffer

Για να αποφύγουμε την απώλεια πακέτων απαιτείται κάποιου είδους διαχείριση του buffer. Ένα σχήμα που ασχολείται με αυτό είναι το Buffer-Aware Traffic-Dependent (BATD) [40]. Αυτό που απασχόλησε τους συγγραφείς ήταν η πιθανότητα απώλειας πακέτων λόγω της υπερχειλίσης του buffer, την οποία ήθελαν να κρατήσουν όσο γίνεται πιο χαμηλά ενώ ταυτόχρονα παρείχαν μια εγγύηση για μεγάλη ρυθμαπόδοση του

συνολικού συστήματος και ένα βαθμό δικαιοσύνης. Ο BATD χρησιμοποιεί την αναφορά για την κατάσταση του buffer από τον χρήστη που έχει σταλεί στο σταθμό βάσης και τα στατιστικά κίνησης για να θέσει δυναμικά τις προτεραιότητες σε κάθε MAC ουρά. Μια παρόμοια παραδοχή είναι και στο άρθρο [41].

2.4 Channel-aware/QoS-aware Strategies

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι διαφορετικές απαιτήσεις σε QoE εκφράζονται με ένα σύνολο από κατάλληλες παραμέτρους σε κάθε ροή. Με βάση τις τιμές αυτών των μεταβλητών ο χρονοπρογραμματιστής θα πρέπει να εξασφαλίσει είτε κάποιο συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης είτε κάποια ελάχιστη καθυστέρηση. Λαμβάνοντας υπόψιν πόσο σημαντική είναι η υποστήριξη πολυμεσικών υπηρεσιών στα LTE δίκτυα, η παράδοση των πακέτων μέσα σε ένα προκαθορισμένο διάστημα κάνει απαραίτητους τους αλγορίθμους που υποστηρίζουν το QoS.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες λύσεις που ανήκουν στην κατηγορία αυτή.

2.4.1 Χρονοπρογραμματιστές για εγγύηση ρυθμού μετάδοσης

Μια γενική λύση για την επίτευξη συγκεκριμένου QoS για ροές που απαιτούν συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης παρουσιάζεται στο άρθρο [42]. Ο χρονοπρογραμματιστής δουλεύει τόσο στην κατεύθυνση του χρόνου όσο και στην κατεύθυνση του χρόνου. Στον χρόνο είναι ένας Priority Set Scheduler (PSS) που επιλέγει τους χρήστες με την μεγαλύτερη προτεραιότητα, αυτούς των οποίων οι ροές είναι κάτω από το ρυθμό μετάδοσης που έχουν ως στόχο. Οι υπόλοιποι ανήκουν σε ένα σύνολο με χαμηλή προτεραιότητα. Στους χρήστες της πρώτης και δεύτερης κατηγορίας εφαρμόζονται αλγόριθμοι BET και PF αντίστοιχα. Μετά την επιλογή των υποψήφιων για μετάδοση από τον TDPS, στο στάδιο FDPS εφαρμόζεται ο PF για την ανάθεση των πόρων και η μετρική που τον εκφράζει είναι η

$$m_{i,k}^{PFsch} = \frac{d_k^i(t)}{\overline{R_{sch}^i}(t-1)}$$

όπου $\overline{R_{sch}^i}(t-1)$ είναι η προηγούμενη μέση ρυθμαπόδοση με τη διαφορά ότι ανανεώνεται η τιμή της όταν ο i χρήστης πραγματικά εξυπηρετείται. Εκφράζει ουσιαστικά μια εκτίμηση για την ρυθμαπόδοση που μπορεί να πετύχει ο i χρήστης όταν έχει διαθέσιμους πόρους.

Στο άρθρο [43] παρουσιάζεται μια παρόμοια τεχνική με την διαφορά ότι

κατηγοριοποιούνται οι ροές με βάση το QCI του κάθε φορέα, σε GBR και σε non-GBR. Μετά τον διαχωρισμό αυτό ο FDPS διανέμει τους πόρους στο σύνολο των χρηστών που απαιτούν GBR για να πετύχουν τον ρυθμό μετάδοσης που έχουν ως στόχο. Όταν όλοι οι χρήστες αυτής της κατηγορίας έχουν φτάσει τον επιθυμητό ρυθμό μετά διανέμει τους υπολειπόμενους πόρους στους non-GBR χρήστες με βάση την PF μετρική.

Τέλος στο άρθρο [44] χρησιμοποιούνται πάλι προτεραιότητες οι οποίες υπολογίζονται από την σχέση $P_i = \frac{D_{HOL,i}}{\tau_i}$ για τον κάθε χρήστη. Όσο αυξάνεται η τιμή του P_i τόσο

καλύτερους πόρους για μετάδοση θα πάρει ο χρήστης για να πετύχει τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης. Αφού καλυφθούν οι ανάγκες των χρηστών με την μεγαλύτερη προτεραιότητα μετά ακολουθούν αυτοί με τη δεύτερη μεγαλύτερη και όσο υπάρχουν πόροι ακολουθείται η σειρά προτεραιότητας.

2.4.2 Χρονοπρογραμματιστές για εγγύηση απαιτήσεων ως προς την καθυστέρηση

Οι στρατηγικές αυτής της κατηγορίας που στόχος τους είναι η μετάδοση με μια εγγυημένη καθυστέρηση είναι οι πιο αντιπροσωπευτικοί της κατηγορίας QoS-aware, διότι βασική απαίτηση του QoS είναι η παράδοσή του πακέτου με συγκεκριμένη διορία. Αυτή η παραδοχή είναι πάρα πολύ σημαντική στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου όσο και στις υπηρεσίες μετάδοσης βίντεο και VoIP.

Ένας βασικός αλγόριθμος της κατηγορίας αυτής είναι ο Modified-Largest Weighted Delay First (M-LWDF) [45] που παρέχει μια οριοθετημένη καθυστέρηση στην παράδοση των πακέτων και αποτελεί μια επέκταση του Largest Weighted Delay First (LWDF) [46]. Οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου από αυτές μη πραγματικού αντιμετωπίζονται διαφορετικά, οι πρώτες με βάση τον PF και οι άλλες με μετρικές με βάρη σύμφωνα με τη σχέση:

$$m_{i,k}^{M-LDFW} = a_i D_{HOL,i} m_{i,k}^{PF} = a_i D_{HOL,i} \frac{d_k^i(t)}{R^i(t-1)},$$

όπου το $D_{HOL,i}$ είναι η καθυστέρηση του πακέτου επικεφαλίδα της ροής. Ο αλγόριθμος αυτός κάνοντας χρήση πληροφοριών για τη συσσωρευμένη καθυστέρηση ώστε να διαμορφώσει τη συμπεριφορά του PF πετυχαίνει μια καλή ισορροπία μεταξύ δικαιοσύνης, αποτελεσματικής χρήσης φάσματος και παροχής QoS. Μια θεωρητική ανάλυση για την δικαιοσύνη του M-LWDF παρουσιάζεται στο [47] και μία παραλλαγή

του με χρήση του μηχανισμού ένδειξης (token) με καλύτερη απόδοση στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου παρουσιάζεται στο άρθρο [48].

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος που αρχικά αναπτύχθηκε για να υποστηρίξει εφαρμογές πολυμέσων σε συστήματα πολυπλεξίας χρόνου [49] ο Exponential PF (EXP/PF). Κάνει χρήση των χαρακτηριστικών του PF για να χειριστεί εφαρμογές μη πραγματικού χρόνου και της εκθετικής συνάρτησης για την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση των εφαρμογών πραγματικού χρόνου. Στόχος του είναι να εξασφαλίσει ένα όριο για την καθυστέρηση σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου αλλά ταυτόχρονα να μεγιστοποιήσει τη ρυθμαπόδοση με αποδεκτά επίπεδα δικαιοσύνης. Για ροές πραγματικού χρόνου η μετρική είναι η

$$m_{i,k}^{EXP/PF} = \exp\left(\frac{a_i D_{HOL,i} - \chi}{1 + \sqrt{\chi}}\right) \frac{d_k^i(t)}{R^i(t-1)} \quad \text{όπου} \quad \chi = \frac{1}{N_{rt}} \sum_{i=1}^{N_{rt}} a_i D_{HOL,i},$$

N_{rt} είναι οι ενεργές κατερχόμενες ροές. Οι ροές πραγματικού χρόνου χειρίζονται από το PF.

Ο αλγόριθμος Exponential Rule (EXP) του άρθρου [50] αποτελεί μια βελτίωση του EXP/PF. Ο EXP λαμβάνει υπόψιν του τη συνολική κατάσταση του δικτύου, διότι η καθυστέρηση που αντιλαμβάνεται ένα τερματικό κανονικοποιείται με βάση τις συνολικές καθυστερήσεις όλων των χρηστών. Η μετρική είναι η

$$m_{i,k}^{EXP Rule} = b_i \exp\left(\frac{a_i D_{HOL,i}}{c + \sqrt{(1/N_{rt}) \sum_j D_{HOL,j}}}\right) \Gamma_k^i,$$

όπου Γ_k^i είναι η αποδοτικότητα φάσματος για τον χρήστη i στο k RB.

Μία ακόμα παραλλαγή του EXP/PF που παρουσιάζεται στο άρθρο [50] είναι ο Logarithmic Rule (LOG), ο οποίος διαφέρει από τον EXP στο γεγονός ότι χρησιμοποιεί λογαριθμική συνάρτηση για να υπολογίσει την καθυστέρηση και η μετρική γίνεται $m_{i,k}^{LOG Rule} = b_i \log(c + a_i D_{HOL,i}) \Gamma_k^i$. Βέλτιστη ρυθμαπόδοση και δικαιοσύνη μπορεί να

επιτευχθεί με κατάλληλες τιμές των παραμέτρων $b_i = \frac{1}{E[\Gamma^i]}$, $c = 1.1$, $a_i = \frac{5}{(0.99\tau_i)}$.

Ο αλγόριθμος Frame Level Scheduler (FLS) στο [51] εγγυάται οριοθετημένη καθυστέρηση για ροές πραγματικού χρόνου και αυτό το πετυχαίνει με την ανάπτυξη πλαισίου δύο επιπέδων. Τα δύο επίπεδα για την δέσμευση πόρων λειτουργούν σε

διακριτούς χρόνους. Στο ψηλότερο επίπεδο σε κάθε LTE πλαίσιο εφαρμόζεται ένας νόμος γραμμικού ελέγχου διακριτού χρόνου με σκοπό να υπολογίσει το συνολικό ποσό δεδομένων ροής πραγματικού χρόνου το οποίο θα μεταδοθεί στο τρέχον πλαίσιο ώστε να καλύψει τους περιορισμούς του ως προς την καθυστέρηση. Από την άλλη το χαμηλότερο επίπεδο λειτουργεί κάθε TTI και είναι υπεύθυνο για την ανάθεση RBs σε κάθε ροή. Ειδικότερα, στις ροές με περιορισμό ως προς την καθυστέρηση η ανάθεση πόρων γίνεται με πολιτική MT μέχρι το σύνολο των δεδομένων του υψηλότερου επιπέδου να μεταδοθεί. Στη συνέχεια εφαρμόζεται τεχνική PF για το εναπομείναν φάσμα που μοιράζεται στους χρήστες βέλτιστης προσπάθειας.

Τέλος στη βιβλιογραφία περιγράφονται πολλές ακόμη τεχνικές οι οποίες είναι πολύ πιο πολύπλοκές και βασίζονται στις παραπάνω. Στο άρθρο [52] παρουσιάζεται μια στρατηγική συνεταιριστικής θεωρίας παιγνίων η οποία διαμορφώνει τον EXP rule κάνοντας χρήση ενός μηχανισμού με εικονικό token. Στο [53] οι συγγραφείς περιγράφουν μια καιροσκοπική (opportunistic) διαδικασία που μπορεί να πετύχει μέγιστη χρήση του φάσματος και ταυτόχρονα εγγυημένο χαμηλό ρυθμό απώλειας πακέτων για ροές που απαιτούν περιορισμένη καθυστέρηση. Στο [54] παρουσιάζεται ένα λιγότερο πολύπλοκο σχήμα που, σαν εξέλιξη του προηγούμενου, ο Delay-Prioritized Scheduler (DPS), με την ανάπτυξη πλαισίων δυο επιπέδων για εγγυημένη καθυστέρηση σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

2.4.3 Χρονοπρογραμματιστές για VoIP υπηρεσίες

Σύμφωνα με το άρθρο [55] η μέγιστη αποδεκτή καθυστέρηση για την υπηρεσία φωνής είναι 250ms. Αν υπολογίσουμε την καθυστέρηση που εισάγεται από το δίκτυο κορμού, από το RLC και από το MAC buffering, η συνολική καθυστέρηση από τη ραδιοεπαφή δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 100ms [56].

Μία λύση που αναπτύχθηκε για να βελτιστοποιήσει την απόδοση του δικτύου όταν έχουμε υπηρεσίες φωνής και ροές βέλτιστης προσπάθειας παρουσιάζεται στο [26]. Ο αλγόριθμος χωρίζεται σε δύο σχήματα ένα ως προς το χρόνο και ένα ως προς τη συχνότητα [32]. Ως προς το χρόνο εφαρμόζεται ένα σχήμα για τα αξιολογήσει την ανάγκη μια ροή να χρονοπρογραμματιστεί το δεδομένο TTI, η Required Activity Detection with Delay Sensitivity (RAD-DS). Η μετρική αυτή για τον χρόνο εκφράζεται ως συνδυασμός τριών διαφορετικών μετρικών και η έκφρασή της είναι η:

$$m_i(t) = m_i^{RR}(t)RA_{traf}^i(t)DS_{traf}^i(t)$$

όπου η μετρική RA εκφράζει το χρόνο που απαιτείται από τον i -οστό χρήστη να πετύχει το απαιτούμενο QoS. Για την περίπτωση του VoIP υπολογίζεται από τη σχέση:

$$RA_{VoIP}^i(t) = \frac{GBR^i}{R_{sch}^i(t)}$$

Το DS είναι μια παράμετρος ευαισθησίας η οποία αυξάνει με την καθυστέρηση του πρώτου πακέτου για μετάδοση. Στο τέλος εφαρμόζεται μια τεχνική RR για να εξασφαλιστεί κάποια δικαιοσύνη ως προς το χρόνο. Ενώ ως προς τη συχνότητα εφαρμόζεται η PF μετρική.

Στο [57] παρουσιάζεται ένα σχήμα που δίνει προτεραιότητα σε VoIP πακέτα. Έχει περιόδους μέσα στις οποίες μόνο VoIP ροές μπορούν να εξυπηρετηθούν, ενώ αυτές δεν είναι πολύ μεγάλες για να μην υποβαθμίζει τις υπόλοιπες ροές αλλά αν υπάρχει ζήτηση μπορεί να αυξηθεί. Η ανάθεση πόρων μεταξύ των ροών VoIP γίνεται σε ένα κανάλι ευαίσθητο ως προς τη δίκαιη αναμονή στην ουρά [58].

2.4.4 Αλγόριθμοι που βασίζονται στο QoE

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό στοιχείο των LTE δικτύων είναι και η εμπειρία του χρήστη (Quality of Experience, QoE), το άρθρο [59] ασχολείται με την μεγιστοποίηση της ποιότητας που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος όταν χρονοπρογραμματίζεται κίνηση πολυμέσων. Η δουλειά αυτή αποτελείται από δυο στάδια. Στο πρώτο γίνεται η διατύπωση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού σε σχέση με το QoE σε διαδικασία απόφασης Markov. Μετά για τη λύση του προβλήματος σχεδιάζεται ένας ευρετικός κανόνας. Το άρθρο αυτό τονίζει την ανάγκη για ύπαρξη περισσότερων τεχνικών χρονοπρογραμματισμού για QoE.

Τέλος στον Πίνακα 6 παρουσιάζεται μια σύγκριση κάποιων από τους παραπάνω αλγορίθμους.

Πίνακας 6: Πίνακας σύγκρισης των βασικών Αλγορίθμων.

Αλγόριθμος	Παράμετρος Scheduling	Θετικά	Αρνητικά
FIFO	Ο χρόνος αίτησης	Απλός	Αναποτελεσματικός Μη γνώση για κατάσταση καναλιού
RR	Η χρονική στιγμή εξυπηρέτησης	Απλός	Αναποτελεσματικός Μη γνώση για κατάσταση καναλιού
WFQ	Βάρη προτεραιότητας	Εισάγει προτεραιότητες	Μη γνώση για κατάσταση καναλιού
EDF	Όριο καθυστέρησης	Αποφεύγει την προθεσμία λήξης	Μη γνώση για κατάσταση καναλιού
LWDF	Αποδεκτός ρυθμός απώλειας πακέτων	QoS ως προς την καθυστέρηση	Μη γνώση για κατάσταση καναλιού
MT	Αναμενόμενος ρυθμός μετάδοσης	Μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης	Άδικος
PF	Αναμενόμενος ρυθμός μετάδοσης Μέση ρυθμαπόδοση του παρελθόντος	Δικαιοσύνη	Χαμηλή αποδοτικότητα φάσματος
TTA	Αναμενόμενος ρυθμός μετάδοσης Ευρείας ζώνης αναμενόμενος	Πολύ ισχυρή δικαιοσύνη	

	ρυθμός μετάδοσης		
M-LWDF	Καθυστέρηση του πρώτου πακέτου	Εφαρμογές πραγματικού χρόνου και μη αντιμετωπίζονται διαφορετικά	Αναποτελεσματικός σε συνθήκες υπερφόρτωσης.
EXP/PF	Καθυστέρηση του πρώτου πακέτου	Εφαρμογές πραγματικού χρόνου και μη αντιμετωπίζονται διαφορετικά	Πολύπλοκος
EXP rule	Καθυστέρηση του πρώτου πακέτου Αποδοτικότητα φάσματος του UE	Καλή απόδοση ως προς το Scheduling	Πολύπλοκος
LOG rule	Καθυστέρηση του πρώτου πακέτου Αποδοτικότητα φάσματος του UE	Καλή απόδοση ως προς το Scheduling	Πολύπλοκος

3. SIMULATOR

Η αναπαραγωγή μιας ιδέας έχει μεγάλη παράδοση στις φυσικές και τις θεωρητικές επιστήμες, ωστόσο τα τελευταία χρόνια γίνεται εμφανές ότι είναι σημαντική και για τον τομέα της επεξεργασίας σήματος. Πρόκειται για μια δύσκολη και επίπονη διαδικασία, ειδικά σε περιπτώσεις όπου ένας ερευνητής επιθυμεί να αναπαράγει τα αποτελέσματα προηγούμενης έρευνας και να πραγματοποιήσει συγκρίσεις με έναν δικό του αλγόριθμο. Ένα περιβάλλον προσομοίωσης μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο σε αυτή την κατεύθυνση. Ο Vienna LTE Simulator [72], αποτελεί ένα τέτοιο περιβάλλον ανοιχτού κώδικα που επιτρέπει την πραγματοποίηση προσομοιώσεων τόσο σε επίπεδο ζεύξης όσο και σε επίπεδο σήματος του UMTS LTE.

3.1 Αναφορά σε άλλα εργαλεία προσομοίωσης

Υπάρχουν διάφορα εργαλεία για την πραγματοποίηση προσομοιώσεων επιπέδου συστήματος: αυτά που έχουν σχεδιαστεί αποκλειστικά για ένα σύστημα LTE-A αλλά και αυτά που αποτελούν ενότητα ενός μεγαλύτερου πακέτου. Κάποια παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι τα Riverbed SteelCentral NetModeler (πρώην OPNET Modeler Suite) [61], OMNeTCC [62], ITCC [63], ns-2/ns-3 [64] [65], GNS3 [66], openWNS [67] και Hurricane II [68]. Το αρνητικό των συστημάτων αυτών είναι ότι είναι low-level και απαιτούν από το χρήστη πολύ δουλειά και πολλές φορές τα αποτελέσματά τους στερούνται ακρίβειας και επαλήθευσης λόγω της πολυπλοκότητάς τους. Επιπλέον συστήματα προσομοιώσεων αναπτύσσουν οι πάροχοι και οι κατασκευαστές αλλά αυτά δεν είναι διαθέσιμα για εμπορική χρήση.

3.2 Vienna LTE Simulator

Ο Vienna LTE Simulator από το πανεπιστήμιο Vienna University of Technology είναι ένα περιβάλλον προσομοίωσης για το LTE το οποίο βασίζεται στην MATLAB. Το περιβάλλον αυτό προήλθε μετά το προηγούμενο και πολύ επιτυχημένο προσομοιωτή του ίδιου πανεπιστημίου για το WiMAX [69].

Για την ανάπτυξη και την τυποποίηση του LTE αλλά και για την διαδικασία υλοποίησης εξοπλισμού από τους κατασκευαστές η διαδικασία της προσομοίωσης είναι απαραίτητη τόσο για τον έλεγχο όσο και για την βελτιστοποίηση αλγορίθμων και διαδικασιών. Οι δοκιμές αυτές πρέπει να πραγματοποιηθούν σε επίπεδο ζεύξης (Link Level) αλλά και στο πλαίσιο ενός δικτύου (System Level).

Ο Vienna LTE Simulator αποτελείται από ένα προσομοιωτή για το επίπεδο του συστήματος (System Level Simulator) και ένα για το επίπεδο ζεύξης (Link Level

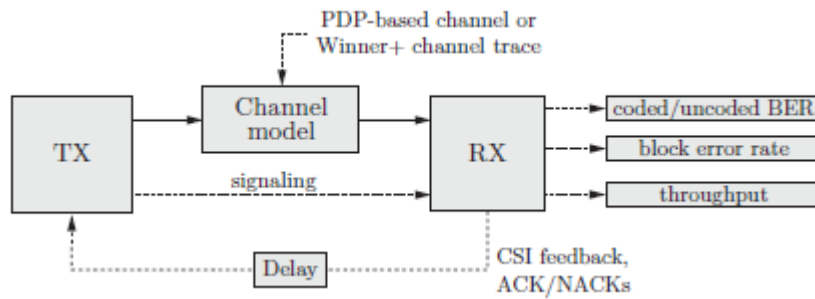
Simulator). Ο κώδικας και των δύο είναι διαθέσιμος στην ακαδημαϊκή κοινότητα με μία άδεια μη εμπορική επιτρέποντας στους ερευνητές μια πλήρη πρόσβαση στα δομικά στοιχεία του περιβάλλοντος αυτού αλλά και ενισχύοντας την συνεργασία μεταξύ των πανεπιστημίων και διευκολύνοντας την έρευνα. Επιπλέον διαθέτει και κάποιους αλγορίθμους κάτω από την ίδια άδεια χρήσης κάνοντας ευκολότερη την σύγκριση και την αναπαραγωγή τους.

Το Μάιο του 2015 ο συγκεκριμένος προσομοιωτής είχε περισσότερα από 30000 downloads. Αποτελείται από περισσότερες από 100000 γραμμές κώδικα πάνω στον οποίο δουλεύει μια μεγάλη κοινότητα από χρήστες, εγγυώντας έτσι την ποιότητά του.

3.3 LTE Link Level Simulator

Στο Link Level οι προσομοιώσεις επιτρέπουν τον έλεγχο αλγορίθμων που αφορούν την εκτίμηση καναλιού (channel estimation), την παρακολούθηση (tracking) καθώς και την πρόβλεψη (prediction) και τον συγχρονισμό (synchronization), το κέρδος από την χρήση MIMO, AMC και τεχνικών ανατροφοδότησης. Επιπλέον διαθέτει receiver structures (παραμελώντας όμως τις παρεμβολές κυψέλης και τις επιπτώσεις του χρονοπρογραμματισμού διότι αυξάνουν δραματικά την πολυπλοκότητα της προσομοίωσης και τον χρόνο εκτέλεσης). Ακόμη, προσφέρει μοντελοποίηση της κωδικοποίησης και της αποκωδικοποίησης του καναλιού, μοντελοποίηση του φυσικού επιπέδου και άλλα παρόμοια.

Τα βασικά κομμάτια του Link Level προσομοιωτή είναι ο δέκτης (receiver), ο πομπός (transmitter) και το κανάλι (channel model) όπως φαίνονται και στην Εικόνα 17. Ανάλογα με το είδος της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται ένα ή περισσότερα κομμάτια. Το κανάλι είναι αυτό που συνδέει μεταξύ τους τον πομπό και το δέκτη και χρησιμοποιείται για καθοδική κίνηση διότι για τη σηματοδοσία και την ανοδική κίνηση γίνεται η παραδοχή ότι είναι χωρίς σφάλματα. Στο downlink, η πληροφορία για τη σηματοδοσία περνάει από τον πομπό στο δέκτη και περιέχει κωδικοποίηση, HARQ, scheduling και precoding παραμέτρους. Στο uplink επισημαίνονται ο Channel Quality Indicator (CQI), ο Precoding Matrix Indicator (PMI), και ο Rank Indicator (RI) (μαζί και τα τρία αποτελούν το Channel State Information, CSI).



Εικόνα 17: Δομή του LTE link level simulator.

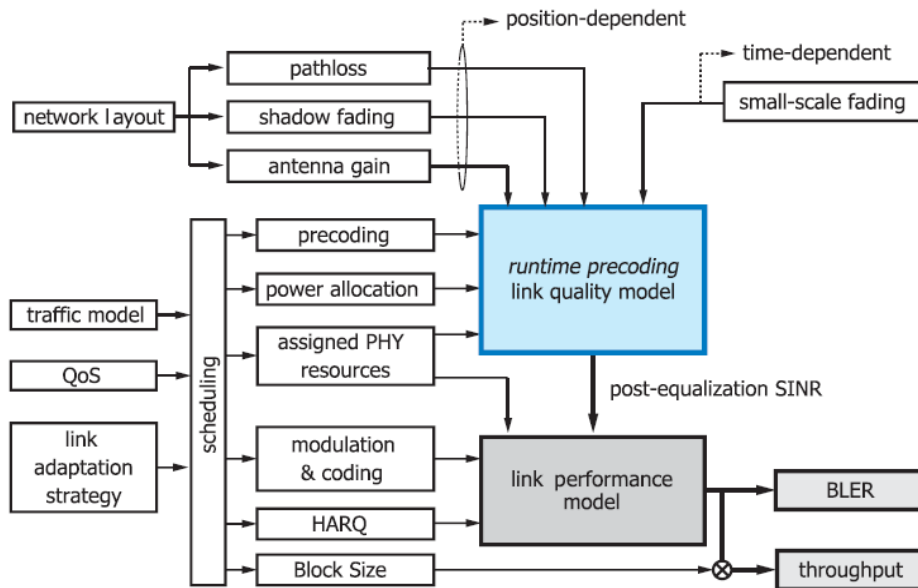
3.4 LTE System Level Simulator

Οι System Level προσομοιώσεις εστιάζουν περισσότερο σε θέματα που σχετίζονται με το δίκτυο, όπως η δέσμευση πόρων και ο χρονοπρογραμματισμός, η διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών, η διαχείριση παρεμβολών, ο έλεγχος πρόσβασης, ο σχεδιασμός για τη βελτιστοποίηση δικτύου, η εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών, κτλ. Σε ένα σύστημα προσανατολισμένο στην πολλαπλή χρήση σαν το LTE δεν είναι ξεκάθαρο ποια στοιχεία είναι αυτά που θα αναδείξουν την απόδοση του συστήματος. Κάποιες κλασικές μετρικές όπως το (un)coded Bit Error Ratio (BER), το (un)coded Block Error Ratio (BLER), και η ρυθμαπόδοση (throughput) δεν αρκούν για να βγάλουμε ικανοποιητικά συμπεράσματα από την εκτέλεση σεναρίων πολλαπλής πρόσβασης. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση πιο ολοκληρωμένων μετρικών όπως για παράδειγμα η δικαιοσύνη (fairness), η προσαρμογή πολλαπλής πρόσβασης ή οι βαθμοί ελευθερίας (DoF). Όμως αυτές οι θεωρητικές παραδοχές πρέπει να αντιστοιχίζονται με τις τιμές της απόδοσης που αξιολογούνται από τις προσομοιώσεις.

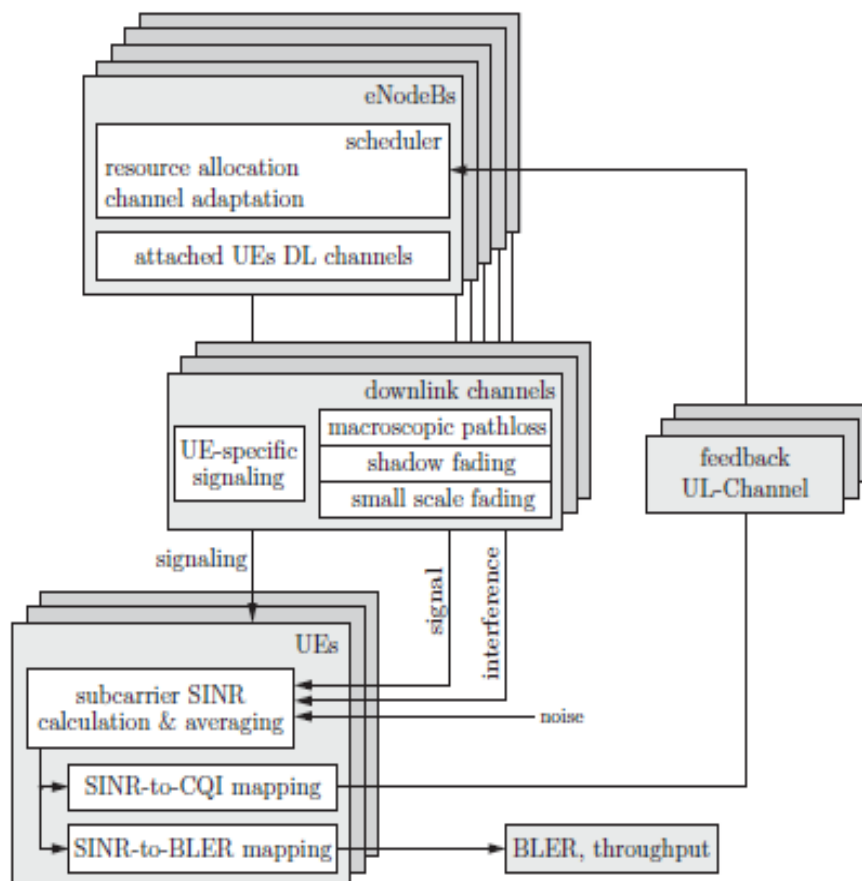
Στο επίπεδο συστήματος αναλύεται η απόδοση ολόκληρου του δικτύου. Ένα δίκτυο LTE αποτελείται από ένα πλήθος σταθμών βάσης που καλύπτουν μια περιοχή στην οποία βρίσκονται τα τερματικά και κινούνται τριγύρω.

Ο προσομοιωτής αποτελείται από δύο κομμάτια: ένα μοντέλο μέτρησης της ζεύξης (link quality model) και ένα μοντέλο μέτρησης της απόδοσης (link performance model), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 18. Το μοντέλο για την μέτρηση της ζεύξης χρησιμοποιείται για να παρουσιάσει την ποιότητα της ζεύξης, η οποία προκύπτει από τις μετρήσεις που δίνει το τερματικό και απαιτείται για τον προσδιορισμό της δέσμευσης πόρων και για την προσαρμογή της ζεύξης. Η δεδομένη μετρική ποιότητας ζεύξης αξιολογείται για κάθε υπό-πλαίσιο.

Συγκριτική μελέτη της προσφερόμενης Ποιότητας Εμπειρίας αλγορίθμων ραδιο-χρονοπρογραμματισμού σε δίκτυα LTE.



Εικόνα 18: Διάγραμμα του LTE system level simulator (v 1.8 r1375). Η ποιότητα της σύνδεσης αξιολογείται από το link quality model, ενώ το link performance model υπολογίζει το BLER και δίνει ως αποτέλεσμα τη ρυθμαπόδοση της ζεύξης.



Εικόνα 19: Σχηματικό διάγραμμα κλάσεων που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ των οντοτήτων που συνθέτουν το LTE System Level Simulator.

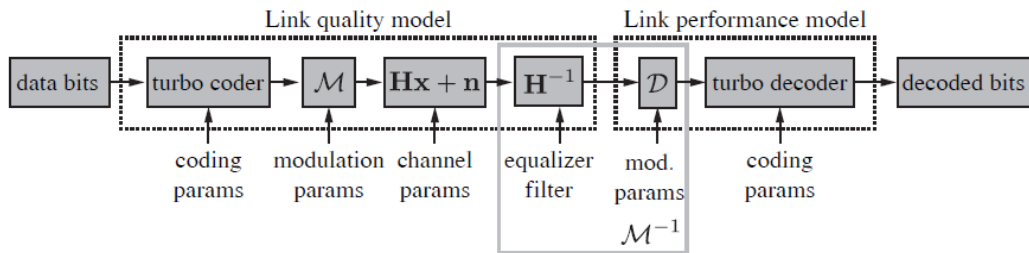
3.5 Βασικά στοιχεία υλοποίησης του Simulator

Μια απλή προσέγγιση που θα εκφράζει την απόδοση του συστήματος θα πρέπει για κάθε σύνδεση να εκτελεί όλες τις διαδικασίες τόσο του φυσικού όσο και του MAC επιπέδου. Παρόλο που φαίνεται απλό, αυτή η προσέγγιση δεν κλιμακώνεται καλά και τα αποτελέσματα δεν είναι πρακτικά λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας του καναλιού με τις διαδικασίες κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης και ιδιαίτερα με την προσθήκη των MIMO κεραιών.

Για παράδειγμα, για το μικρότερο δυνατό bandwidth των 1.4 MHz το οποίο απαιτεί το μικρότερο χρόνο για να δώσει αποτελέσματα, μια τυπική link level προσομοίωση θα διαρκέσει κάποιες ώρες, με βάση πάντα και το MCS που θα εφαρμοστεί αλλά και τον τρόπο διαμόρφωσης MIMO και του φορέα λήψης. Επιπλέον μία απλή προσομοίωση με τη χρήση μιας διάταξης τριών τομέων εξαγωνικών κυψελών με όχι λιγότερους από δύο δακτυλίους, για να δώσει μια υλοποίηση δικτύου με περιορισμένες παραβολές, με δύο χρήστες ανά κυψέλη και με φάσμα 20 MHz θα αυξήσει την πολυπλοκότητα 950 φορές από την περίπτωση με το 1.4 MHz. Αυτό θα συμβεί διότι τα RBs θα αυξηθούν από 6 σε 100 και ο αριθμός των eNodeBs από 1 σε 57 (19 τοποθεσίες από 3eNodeB η κάθε μία). Άρα μια τέτοια προσομοίωση θα διαρκούσε ακόμα και μήνες.

Βασικός στόχος λοιπόν του μοντέλου Link to System (L2S) είναι με δεδομένη παραμετροποίηση της εισόδου που του δίνεται να προβλέψει την απόδοση της σύνδεσης, στη συγκεκριμένη περίπτωση την ρυθμαπόδοση πάνω στη σύνδεση. Για να απλοποιηθεί το πρόβλημα χωρίζεται σε δυο κομμάτια τα οποία από κοινού υπολογίζουν την ποιότητα της σύνδεσης, το link quality model και το link performance model.

Το link quality model εκφράζει την ποιότητα του σήματος μετά την λήψη και την εξισορρόπησή του. Έχοντας ως σκοπό αυτή η μετρική να εκφράσει την ποιότητα της εισόδου στον turbo αποκωδικοποιητή μια απλή επιλογή είναι ο μετά εξισορροπιστής (post-equalization) SINR [73]. Το link performance model με το post-equalization SINR που έλαβε χαρτογραφεί την ποιότητα του σήματος λήψης σε BLER και throughput με βάση το ρυθμό κωδικοποίησης και το MCS που χρησιμοποιήθηκε για τη μετάδοση. Στην Εικόνα 18 φαίνεται η σχέση του link quality model και του link performance model και οι απαραίτητοι είσοδοι σε κάθε βήμα για την εκτέλεση. ενώ στην Εικόνα 19 φαίνεται ένα διάγραμμα που απεικονίζει την σχέση μεταξύ των στοιχείων του μοντέλου link-to-system στον LTE System Level Simulator..



Εικόνα 20: Διαχωρισμός της ζεύξης LTE σε link quality και link performance model. Τα δεδομένα που δίνονται ως είσοδος παραμετροποιούν τις διαδικασίες στο PHY επίπεδο σε κάθε βήμα.

Έτσι λοιπόν σε ένα δίκτυο προσθέτοντας και τις διαδικασίες φυσικού επιπέδου μπορούμε να διακρίνουμε τα ακόλουθα στοιχεία του L2S και τις συνδέσεις με το link quality model και το link performance model.

Διάταξη του δικτύου: Η διάταξη του δικτύου περιγράφει που θα τοποθετηθούν οι σταθμοί βάσης σε σχέση με το δέκτη και πώς θα παραμετροποιηθούν. Αυτό δεν περιλαμβάνει μόνο τη θέση αλλά και τις αξιμουθιακές συντεταγμένες και τον τύπο και την κλίση της κεραίας. Λόγω fading που παρατηρείται στη ζεύξη σε μέρη με χωρική και χρονική εξάρτηση, η διάταξη του δικτύου καθορίζει τους μακροσκοπικούς συντελεστές του fading, οι οποίοι καθορίζουν την δύναμη που λαμβάνεται. Η διάταξη του δικτύου ενσωματώνεται στο link quality model και διαχωρίζεται σε pathloss, shadow fading και antenna gain.

Fading μικρής κλίμακας: Θεωρείται ανεξάρτητο της θέσης. Το fading μικρής κλίμακας αναπαριστά γρήγορες, frequency-selective εναλλαγές καναλιών στο χρόνο και είναι ενσωματωμένο στο link quality model.

Scheduling: Ο scheduler διενεργεί τις διαδικασίες κατανομής των πόρων του επιπέδου MAC. Για τους σκοπούς του link modelling, η κατανομή πόρων επιπέδου PHY και η επιλογή precoder που εφαρμόζεται σε καθένα από τα links αλλάζουν το σύνολο των subcarriers τα οποία και πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν από το link measurement model, καθώς και από το effective channel matrix που χρησιμοποιείται στο φίλτρο του equalizer, και συνεπώς είναι τμήμα του link-measurement model.

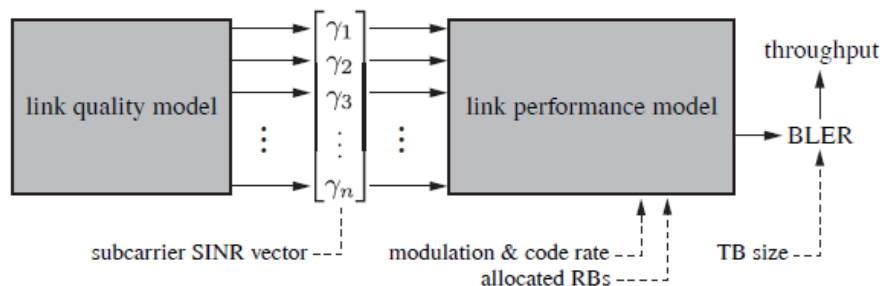
3.5.2 Link Quality Model

Ο επίσημος ορισμός του Link Quality Model είναι ότι μοντελοποιεί τις μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή ζεύξης και την κατανομή των πόρων [74]. Μπορεί να ερμηνευτεί σαν ένα μέτρο της ποιότητας του σήματος που λαμβάνεται, για το οποίο το post-equalization SINR των συμβόλων δεδομένων χρησιμοποιείται ως μετρική για το L2S μοντέλο με μία παραδοχή για το block fading. Με την παραδοχή αυτή για το

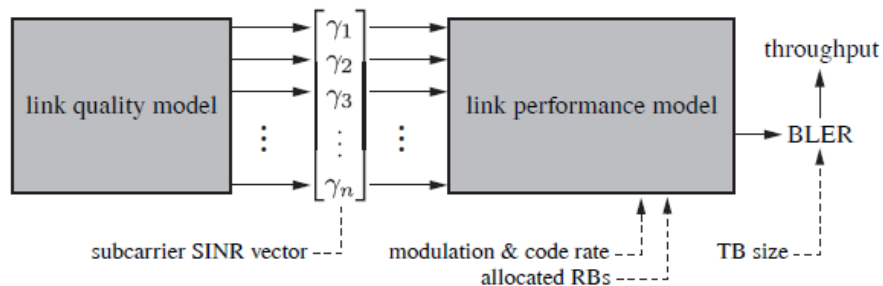
block fading το post-equalization SINR ανά sub carrier και ανά sub frame είναι 12 000 SINR points/TTI για φάσμα 20MHz (100 RBs, 12 subcarriers/RB).

3.5.3 Link Performance Model

Τα αποτελέσματα από το link quality model για την ποιότητα του καναλιού λειτουργούν σαν είσοδο για το link performance model. Για το σύνολο των RBs για τα οποία χρονοπρογραμματίστηκε (εάν χρονοπρογραμματίστηκε) το link performance model συνδυάζει τα αποτελέσματα από το link quality model με την διαμόρφωση και το ρυθμό κωδικοποίησης που εφαρμόστηκε και προβλέπει το BLER του λαμβανόμενου Transport Block (TB). Η πιθανότητα BLER για επιτυχή ή όχι λήψη ενός TB είναι τυχαία και βασίζεται σε μια διαδικασία ρίψης νομίσματος. Συνδυαζόμενη στη συνέχεια με το μέγεθος του TB, το throughput προσδιορίζεται όπως φαίνεται στην



Εικόνα 21.



Εικόνα 21: Link performance model. Το αποτέλεσμα του link quality model συνδυάζεται με τις πληροφορίες για τα κατανομημένα RBs και τον εφαρμοζόμενο ρυθμό διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.

3.6 Κάποιες βασικές συναρτήσεις του Simulator κατά την εκτέλεση

Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας είναι ο System Level Vienna simulator vr. 1.6_r885. Ο βασικός φάκελος του Vienna LTE Simulator είναι ο `LTE_sim_main_launcher_examples.m` μέσω του οποίου τρέχουμε την προσομοίωση. Στο φάκελο αυτό μπορούμε να ορίσουμε ή να αλλάξουμε κάποιες από τις ήδη ορισμένες παραμέτρους ανάλογα με το σενάριο που θέλουμε να υλοποιήσουμε. Οι βασικές παράμετροι φορτώνονται από το αρχείο `LTE_load_params.m`. Κατά την εκτέλεση της

προσομοίωσης η συνάρτηση `LTE_load_params_dependant.m` χρησιμοποιείται για την δημιουργία των επιπλέον παραμέτρων.

Οι παράμετροι που απαιτούνται για την προσομοίωση είναι αυτές που σχετίζονται με την υλοποίηση του δικτύου, δηλαδή τα χαρακτηριστικά του UE, του eNodeB, του Scheduler, του shadow fading, αλλά και παράμετροι που σχετίζονται με την διαδικασία, δηλαδή ο χρόνος, ο τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων και άλλα τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στο [75].

Μετά την επιλογή των παραμέτρων ξεκινά η εκτέλεση της προσομοίωσης, βασική συναρτήση για την εκτέλεση είναι η `LTE_sim_main.m` στην οποία φαίνονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθούνται για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Μετά τις απαραίτητες αρχικοποιήσεις (π.χ. Macroscopic Pathloss, Shadow Fading, Scheduler και μοντέλο κίνησης (traffic_Model)), θα γίνει ο ορισμός των καμπυλών BLER (`LTE_init_load_BLER_curves.m`) και των οντοτήτων του δικτύου (UE, eNodeB). Βασικές συναρτήσεις για την υλοποίηση των παραπάνω είναι από τη μία η `LTE_init_network_generation.m` καθώς και η συνάρτηση `LTE_init_generate_users_and_add_schedulers.m`. Στη συνέχεια έχουμε τη δημιουργία του δικτύου, των sectors, αρχικοποιήσεις που σχετίζονται με το κανάλι, το οποίο χωρίζεται σε downlink και uplink, αλλά και παράμετροι που σχετίζονται με την ανατροφοδότηση (βασικές συναρτήσεις από φακέλους `network_elements` και `channel_models`), τα traces για την καταγραφή των αποτελεσμάτων που θέλουμε να πάρουμε από τη διαδικασία αυτή (συναρτήσεις από το φάκελο `tracing`). Στην Εικόνα 22 παρουσιάζονται οι παράμετροι που ορίζουμε για το UE.


```

obj: 1x1 network_elements.UE =

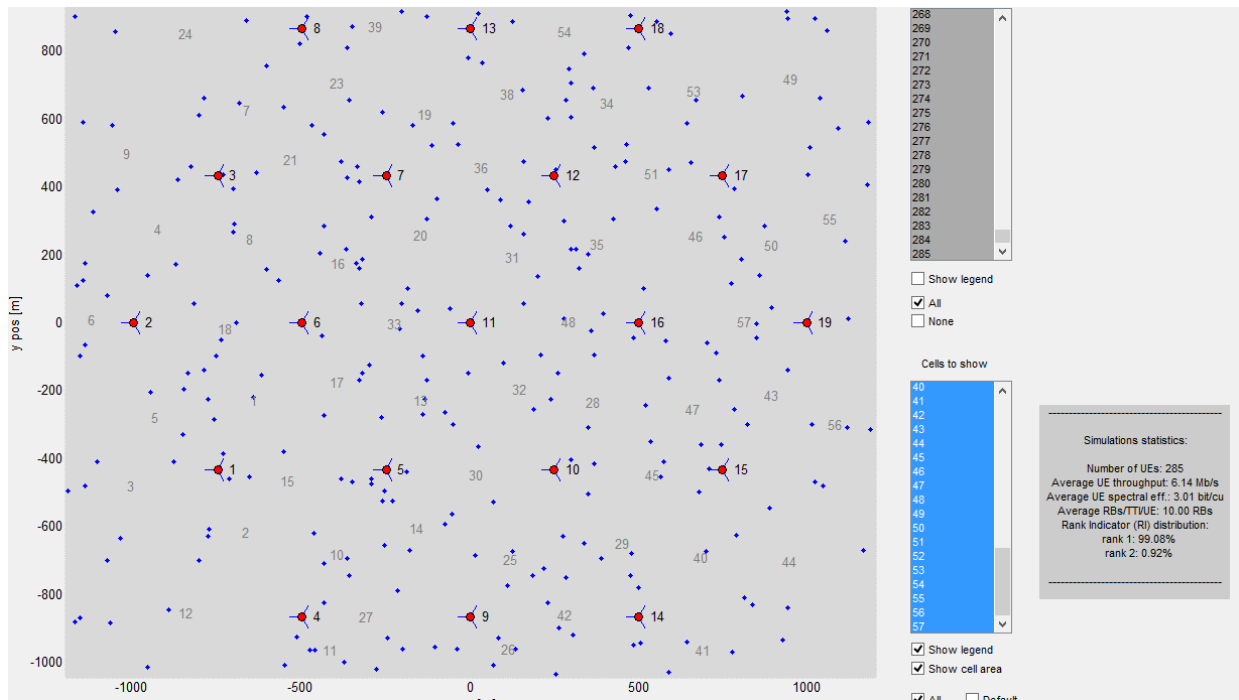
network_elements.UE handle
Package: network_elements

Properties:
    id: 1
    pos: [-610 -219.2305]
    attached_site: [1x1 network_elements.eNodeB]
    attached_sector_idx: 1
    attached_eNodeB: [1x1 network_elements.eNodeB_sector]
    walking_model: [1x1 walking_models.straightWalkingModel]
    downlink_channel: [1x1 channel_models.downlinkChannelModel]
    RB_grid: [1x1 network_elements.resourceBlockGrid]
    uplink_channel: [1x1 channel_models.uplinkChannelModel]
    receiver_noise_figure: 9
    thermal_noise_W_RB: 5.6921e-015
    penetration_loss: 0
    nRX: 2
    antenna_gain: 0
    trace: [1x1 tracing.ueTrace]
    clock: [1x1 network_elements.clock]
    CQI_mapper: [1x1 utils.cqiMapper]
    link_quality_model_output: [1x1 struct]
    feedback: [1x1 struct]
    unquantised_CQI_feedback: 0
    BLER_curves: [1x1 utils.blerCurvesFast]
    SINR_averager: [1x1 utils.miesmAveragerFast]
    codebook: [4x4x4 cell]
    eNodeB_signaling: [1x1 network_elements.eNodeBSignaling]
    trace_SINR: 0
    SNR_avg_preequal: 41.8882
    wideband_SINR: 1.1658
    deactivate_UE: 0
    default_tx_mode: 4
    traffic_model: [1x1 traffic_models.video]
    lambda: 0
    adaptive_RI: 0
    cell_change: [1x1 struct]

```

Εικόνα 22: Στοιχεία που ορίζονται για την κλάση UE από τον Simulator.

Το κομμάτι της συνάρτησης `LTE_sim_main.m` που σχετίζεται με την διαδικασία της ανάθεσης πόρων και της ανατροφοδότησης θα επαναληφθεί για όσα TTI έχουμε αποφασίσει να τρέξουμε την προσομοίωση. Αρχικά υπάρχει η επιλογή για την περίπτωση της μετάδοσης με μηδενική καθυστέρηση για υπολογισμό SINR και ανατροφοδότησης. Μετά, για κάθε sector οι eNodeBs παίρνουν ανατροφοδότηση από τα UEs τους και εφαρμόζεται το scheduling, αλλά το feedback παρέχεται μετά το 3^ο TTI. Στο επόμενο βήμα για κάθε UE υπολογίζεται το SINR και το feedback με τη βοήθεια της συνάρτησης `UEs(u_).link_quality_model(LTE_config)`. Τέλος πάλι για κάθε UE με βάση την παραπάνω διαδικασία υπολογίζεται αν ένα πακέτο παραδόθηκε (`ACK==1`) ή όχι και αναλόγως αδειάζουν ή όχι οι buffers του συστήματος. Τέλος υπολογίζονται τα αποτελέσματα που θέλουμε και αφορούν την απόδοση του δικτύου και του αλγόριθμου χρονοπρογραμματισμού όπως το throughput, το fairness ή όποιον άλλο δείκτη κρίνουμε απαραίτητο, και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα αλλά και μια συνολική εικόνα της κατανομής των UE στο δίκτυο που κατασκευάζεται (Εικόνα 23).



Εικόνα 23: Κατανομή UE ανά Sector.

3.7 Μοντέλα κίνησης

Γενικά στις ασύρματες επικοινωνίες οι υπηρεσίες χωρίζονται σε πραγματικού χρόνου (Real Time, RT) και σε μη πραγματικού χρόνου (Non Real Time, NRT). Οι RT έχουν συνεχή αποστολή πακέτων και σε σειρά. Τέτοιες υπηρεσίες είναι το VoIP, η IPTV, η τηλεδιάσκεψη και το παιχνίδι σε πραγματικό χρόνο. Από την άλλη οι NRT υπηρεσίες είναι πιο ελαστικές σε καθυστερήσεις και δεν έχουν περιορισμούς ως προς την σειρά μετάδοσης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν το E-mail, η λήψη αρχείων και η περιήγηση στον ιστό.

Σύμφωνα με τη 3GPP ορίζονται τα παρακάτω μοντέλα κίνησης για τους χρήστες ενός LTE δικτύου (Πίνακας 7: Μοντέλα κίνησης με βάση την 3GPP Πίνακας 7). Τα συγκεκριμένα μοντέλα κίνησης υλοποιούνται από τον simulator και καθορίζονται από τη συνάρτηση `LTE_trafficmodel.m`.

Η αρχικοποίηση είναι $aPrioriPdf = [0.1, 0.2, 0.2, 0.3, 0.2]$; με βάση την 3GPP.

Πίνακας 7: Μοντέλα κίνησης με βάση την 3GPP.

Εφαρμογή	Κατηγορία	Ποσοστό χρηστών
FTP	Best effort	10 %
Web Browsing / HTTP	Interactive	20 %

Video Streaming	Streaming	20 %
VoIP	Real-time	30 %
Gaming	Interactive real-time	20 %

Ο LTE Vienna simulator υποστηρίζει τους τύπους κίνησης VoIP, video, ftp, http και fullbuffer. Κάθε τύπος κίνησης έχει το δικό του τρόπο κατασκευής πακέτων και την δικιά του συνάρτηση `check_TTI(obj)` στην οποία υπάρχουν οι συνθήκες για την κατασκευή πακέτων στην αρχή της προσομοίωσης αλλά και κατά την διάρκεια για να είναι πιο ρεαλιστικό το μοντέλο. Στο fullbuffer μοντέλο θεωρείται ότι ο buffer είναι πάντα γεμάτος, το οποίο δεν είναι ρεαλιστικό αλλά με αυτό μπορούμε να ελέγξουμε την λειτουργία του δικτύου στα όριά του. Στην Εικόνα 24 φαίνονται τα στοιχεία που αποθηκεύονται για κάθε UE ανάλογα με το μοντέλο κίνησης, για την περίπτωση που είναι fullbuffer ή κάποιο από τα υπόλοιπα. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες λεπτομερείς για τα μοντέλα που θα χρησιμοποιήσουμε.

```

obj: 1x1 traffic_models.video =

traffic_models.video handle
Package: traffic_models

Properties:
  type: 'video'
  slice_mean: 100
  slice_max: 250
  slice_min: 53
  inter_mean: 6
  inter_max: 12.5000
  inter_min: 2.5000
  slice_x: []
  inter_x: []
  slices: [8x1 double]
  inters: [7x1 double]
  slice_cmf: []
  inter_cmf: []
  counter: 1
  slice_counter: []
  iat: []
  rate_constraint: 64
  UE: [1x1 network_elements.UE]
  id_counter: 1
  packet_buffer: [1x100 traffic_models.data_packet]
  delay_buffer: []
  HARQ_delay: 3
  bit_count: 0
  read_start: 1
  is_fullbuffer: 0

obj: 1x1 traffic_models.fullbuffer =

traffic_models.fullbuffer handle
Package: traffic_models

Properties:
  type: 'fullbuffer'
  UE: [1x1 network_elements.UE]
  id_counter: 1
  packet_buffer: [1x100 traffic_models.data_packet]
  delay_buffer: []
  HARQ_delay: 3
  bit_count: 0
  read_start: 1
  is_fullbuffer: 0
    
```

Εικόνα 24: Στοιχεία που ορίζονται για την κλάση traffic Models. Αριστερά: Μοντέλο κίνησης Video. Δεξιά: Μοντέλο fullbuffer.

3.7.1 Video

Για το μοντέλο κίνησης video η δημιουργία των πακέτων γίνεται με βάση την κατανομή

Pareto όπως και ο επιθυμητός χρόνος άφιξης μεταξύ δύο frames. Ο υπολογισμός των τιμών αυτών γίνεται με βάση κάποια όρια αρχικοποίησης, οι τιμές των οποίων φαίνονται στην Εικόνα 25.

```
5 properties
6     type = 'video';
7     slice_mean = 100; % mean slice size
8     slice_max = 250; % max slice size in bytes (2000bits)
9     slice_min = 53; % min slice size
0     inter_mean = 6; % mean slice interarrival time (encoder delay)
1     inter_max = 12.5; % max slice interarrival time
2     inter_min = 2.5; % min slice interarrival time
3     slice_x
4     inter_x
5     slices = zeros(8,1); % eight slices per frame
6     inters = zeros(7,1);
7     slice_cmf
8     inter_cmf
9     counter = 1;
0     slice_counter;
1     iat;
2     rate_constraint = 64; % 64 kbit/s minimum rate constraint
3 end
```

Εικόνα 25: Αρχικοποίηση για Video.

Η δημιουργία πακέτων γίνεται είτε σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (γραμμή 58) είτε σε σχέση με μια τυχαία μεταβλητή την *iat* που ορίζεται για κάθε UE κατά την αρχικοποίησή του, όπως φαίνεται στη γραμμή 64 (Εικόνα 26).

```
56 function check_TTI(obj)
57 -     obj.counter = obj.counter + 1;
58 -     if ~mod(obj.UE.clock.current_TTI-1,100)
59 -         obj.generate_packet(obj.slice_cmf,obj.type,obj.slice_x);
60 -         obj.iat = obj.eval_cmf(obj.inter_cmf,obj.inter_x); %Jenny
61 -         obj.counter = 0;
62 -         obj.slice_counter = 1;
63 -     end
64 -     if obj.iat <= obj.counter && obj.slice_counter < 8
65 -         obj.generate_packet(obj.slice_cmf,obj.type,obj.slice_x);
66 -         obj.iat = obj.eval_cmf(obj.inter_cmf,obj.inter_x);
67 -         obj.counter = 0;
68 -         obj.slice_counter = obj.slice_counter + 1;
69 -     end
70 -     obj.bit_count = obj.get_buffer_length;
71 - end
```

Εικόνα 26: Συνάρτηση *check_TTI* για video.

3.7.2 VoIP

Στην Εικόνα 27 παρουσιάζονται οι μεταβλητές που απαιτούνται για την αρχικοποίηση ενός VoIP πακέτου.

```

6      properties
7          type = 'voip';
8          state = true;
9          c = 0.01; % data according to RAN R1-070674
0          d = 0.99;
1          iit_voice = 20;
2          iit_silence = 160;
3          delay_constraint = 50;
4          voice_size = 40*8;
5          silence_size = 15*8;
6          arrival_rate_voice
7          arrival_rate_silence
8      end
9

```

Εικόνα 27: Αρχικοποίηση για VoIP.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η συνάρτηση για την κατασκευή πακέτων VoIP. Παρατηρούμε ότι για να δημιουργηθεί ένα νέο πακέτο θα πρέπει αρχικά να ισχύει η συνθήκη της γραμμής 29. Μετά εξετάζει την τιμή της τυχαίας μεταβλητής *state*, αν είναι αληθής ή ψευδής. Τέλος, με βάση την τιμή αυτή, επιλέγει αν θα κατασκευάσει πακέτο τύπου *voice* (γραμμή 44) ή αν θα είναι *silence* (γραμμή 47).

```

28      function check_TTI(obj)
29 -         if ~mod(obj.UE.clock.current_TTI-1,20) % here comes the two state markov model assumed for the s
30 -             coin_toss = rand;
31 -             if obj.state % active state
32 -                 if coin_toss < obj.d
33 -                     obj.state = true;
34 -                 else
35 -                     obj.state = false;
36 -                 end
37 -             else % inactive state
38 -                 if coin_toss < obj.c
39 -                     obj.state = true;
40 -                 else
41 -                     obj.state = false;
42 -                 end
43 -             end
44 -             if obj.state % generate a new speech packet in the active state
45 -                 obj.generate_packet(obj.voice_size,obj.type);
46 -             else % in the inactive state
47 -                 if ~mod(obj.UE.clock.current_TTI-1,160) % generate a new silence descriptor (SID) packet if
48 -                     obj.generate_packet(obj.silence_size,obj.type);
49 -                 end
50 -             end
51 -             obj.bit_count = obj.get_buffer_length;
52 -         end
53 -     end
54

```

Εικόνα 28: Κώδικας για κατασκευή πακέτων σε VoIP.

3.7.3 FTP

Βασικές παράμετροι για ένα πακέτο FTP είναι το μέγεθος του και το Reading time. Στο μοντέλο κίνησης FTP του simulator η δημιουργία πακέτων γίνεται με ομοιόμορφη λογαριθμική κατανομή και το reading time είναι ορισμένο στα 180 seconds. Μόνο μετά από το πέρας του reading time ξαναδημιουργούνται νέα πακέτα.

```
function check_TTI(obj)
    if ~obj.state
        obj.waiting_time = obj.waiting_time-1;
        if obj.waiting_time <= 0 % if the end of the reading state is reached
            obj.generate_packet(obj.data_cmf,obj.type,obj.data_x);
            obj.state = true;
            obj.bit_count = obj.get_buffer_length;
        end
    end
end
```

Εικόνα 29: Κώδικας για κατασκευή πακέτων σε FTP.

4. QoE

Σήμερα, η πρόσβαση στο Internet μέσω του δικτύου της κινητής τηλεφωνίας έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας των ανθρώπων. Η λειτουργία του δικτύου κινητής δεν περιλαμβάνει πλέον μόνο υπηρεσίες φωνής αλλά και υπηρεσίες βίντεο συνεχούς ροής και μεταφοράς δεδομένων. Αν και τα δίκτυα LTE έχουν βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με τα προηγούμενα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (2G, 3G), ένα δίκτυο πρόσβασης κινητής θεωρείται σαν ένα σημείο συμφόρησης [72]. Για να αντιμετωπίσουν την αύξηση των δεδομένων που κυκλοφορούν στο δίκτυο και τις διαφορετικές απαιτήσεις των εφαρμογών τα δίκτυα LTE πρέπει να κάνουν χρήση νέων τεχνικών για αποδοτική τροφοδοσία ενέργειας και δέσμευση πόρων. Οι παραδοσιακές μέθοδοι για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου βασίζονται στην ποιότητα του συστήματος (Quality of Service, QoS) με μετρικές όπως η απόδοση, η καθυστέρηση και το jitter. Ωστόσο οι απαιτήσεις των εφαρμογών είναι διαφορετικές όσον αφορά τους πόρους του δικτύου. Επιπλέον το QoS δεν μπορεί να εκφράσει την εμπειρία του χρήστη από τις διάφορες εφαρμογές. Τα μεγέθη αυτά ήταν αντιπροσωπευτικά για να εκτιμήσουν την ποιότητα της υπηρεσίας και κατά επέκταση την εμπειρία του χρήστη για υπηρεσίες φωνής, αλλά πλέον για υπηρεσίες δεδομένων αυτή η συσχέτιση μετρήσεων με το όφελος χρήστη δεν είναι απόλυτη. Πρώτον αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι διαθέσιμοι πόροι διαμοιράζονται ταυτόχρονα σε διαφορετικές εφαρμογές και δεύτερον λόγω του ότι το δίκτυο είναι αποκλειστικά μεταγωγής πακέτων και επηρεάζεται από την απόδοση των ενδιάμεσων κόμβων αλλά και από τα πρωτόκολλα μέσα στα οποία ταξιδεύουν οι πληροφορίες. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η αξιολόγηση των επιδόσεων των υπηρεσιών δεδομένων συνήθως γίνεται με την παρακολούθηση των τερματικών σε πραγματικό χρόνο. Επί του παρόντος λοιπόν η ποιότητα της εμπειρίας (Quality of Experience, QoE) εκφράζει καλύτερα την υποκειμενική άποψη των χρηστών και διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο στην ένδειξη της εμπειρίας των χρηστών από την αλληλεπίδρασή τους με κάποια εφαρμογή ή υπηρεσία [73]. Το QoE είναι μια υποκειμενική μέτρηση της ποιότητας που παρέχεται στον χρήστη όταν αυτός χρησιμοποιεί μια τηλεπικοινωνιακή υπηρεσία. Ο σκοπός που επιδιώκεται από τον υπολογισμό του QoE μπορεί να είναι η βελτίωση της λειτουργίας του δικτύου με βάση αντικειμενικές παραμέτρους, ή η γνώση της ποιότητας που τελικά αντιλαμβάνεται ο χρήστης και του επιπέδου της ικανοποίησής του, αλλά και η αποδοτικότερη χρήση των πόρων του δικτύου. Το QoE λαμβάνει υπόψιν την ικανοποίηση του χρήστη τόσο από το περιεχόμενο όσο και από τη χρήση της εφαρμογής.



Εικόνα 30: Προσέγγιση bottom up για τον υπολογισμό του QoE και ερμηνεία του MOS ως προς την ποιότητα που αντιλαμβάνεται ο χρήστης.

Παραδοσιακά το QoE αξιολογούνται με υποκειμενικά τεστ που πραγματοποιούνταν από χρήστες με σκοπό να υπολογιστεί η ικανοποίησή τους με βάση την κλίμακα του MOS (Mean Opinion Score) (Εικόνα 30). Αυτή η τεχνική εκτός από ακριβή είναι και κουραστική για τον χρήστη και επιπλέον δεν μπορεί να συμβάλλει στην λήψη αποφάσεων για βελτίωση του QoE άμεσα. Για το λόγο αυτό οι νέοι μέθοδοι υπολογισμού του QoE βασίζονται στην επίδοση συγκεκριμένων δεικτών που σχετίζονται με τις υπηρεσίες. Μια πιθανή λύση για την άμεση εκτίμηση του QoE είναι να εντάξουμε έναν αναλυτή QoE στα τερματικά και οι μετρήσεις από αυτά να συγκεντρώνονται σε έναν κεντρικό εξυπηρετητή [74]. Μια άλλη λύση είναι να προσθέσουμε νέα στοιχεία στο δίκτυο τα οποία θα είναι υπεύθυνα να συγκεντρώνουν την κίνηση από μια υπηρεσία και να αναλύουν την επίδοσή της [10]. Παρόλα αυτά, ό,τι λύση και να επιλέξουμε για την εκτίμηση του QoE από μετρικές κίνησης είναι αναγκαίο να γίνει μια αντιστοίχιση με βάση τις τιμές του QoE. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση συναρτήσεων, που σχετίζονται με την υπηρεσία δεδομένων που μας ενδιαφέρει, οι οποίες θα κάνουν μια αντιστοίχιση του QoS σε QoE (με βάση την κλίμακα MOS). Πολλές ερευνητικές εργασίες έχουν γίνει προς αυτή την κατεύθυνση. Μια γενική φόρμουλα για την σύνδεση του QoS με QoE παρουσιάζεται στο άρθρο [75].

Ένα μεγάλο σύνολο από εφαρμογές όπως η περιήγηση στο web ή στο e-mail, η παρακολούθηση φωτογραφιών σε πραγματικό χρόνο και η λήψη αρχείων απαιτούν από τους χρήστες να περιμένουν κάποιο χρόνο, ο οποίος οφείλεται στον χρόνο απόκρισης που απαιτείται από την αίτηση του χρήστη μέχρι να πάρει ανταπόκριση/απάντηση για την αίτησή του. Έτσι η ποιότητα που αντιλαμβάνεται ο χρήστης από την αλληλεπίδρασή του με τις υπηρεσίες δεδομένων επηρεάζεται από το χρόνο αναμονής, και συγκεκριμένα, όσο περισσότερο περιμένει τόσο λιγότερο ικανοποιημένος είναι.

4.1 Μοντέλα για υπολογισμό QoE

Σήμερα, το QoE που αντιλαμβάνονται οι χρήστες σε ένα περιβάλλον ασύρματης πρόσβασης έχει μεγάλο ενδιαφέρον. Είναι πιθανό να είναι ο βασικός παράγοντας μέτρησης ποιότητας πολυμεσικών εφαρμογών που αντιλαμβάνονται οι χρήστες. Το QoE του τελικού χρήστη εξαρτάται τόσο από το QoS του δικτύου που σχετίζεται με την αξιόπιστη παράδοση των δεδομένων της υπηρεσίας μέσα στο δίκτυο, όσο και από το QoS της εφαρμογής. Τη συνεισφορά των δύο αυτών παραγόντων στο QoE πρέπει να τη λάβουμε υπόψιν κατά το σχεδιασμό των σχημάτων ανάθεσης πόρων για την παροχή υπηρεσιών πολυμέσων με υψηλή ποιότητα.

Η πλήρης αξιοποίηση των διαθέσιμων περιορισμένων πόρων και ταυτόχρονα η εξασφάλιση υψηλού QoE είναι ένα μείζον θέμα. Κάποιες εργασίες προτείνουν τεχνικές που το QoE βασίζεται στο ρυθμό μετάδοσης (data rate) και στο ρυθμό απώλειας πακέτων (packet error rate, PER). Όμως όλες οι υπηρεσίες δεν εκφράζονται και δεν επηρεάζονται το ίδιο από αυτούς τους παράγοντες. Για παράδειγμα το QoE για το web-browsing είναι πιο ευαίσθητο στον παράγοντα της καθυστέρησης (delay). Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα ανάλογα με την υπηρεσία για τον υπολογισμό του QoE.

Για παράδειγμα, το μοντέλο χρονοπρογραμματισμού του άρθρου [80] είναι ένα σχήμα για πολλαπλές υπηρεσίες σε δίκτυο LTE-A. Στόχος του είναι η μεγιστοποίηση του αθροίσματος MOS για όλους τους χρήστες και για αυτό μοντελοποιείται σαν ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης και χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο δυναμικής βελτιστοποίησης που βασίζεται στο πρόβλημα πολλαπλών επιλογών Knapsack (MCKP). Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα μοντέλα για τον υπολογισμό του MOS για διάφορες υπηρεσίες.

IPTV

Εδώ χρησιμοποιείται το cross-layer μοντέλο πρόβλεψης QoE video που ορίζεται στο [82], το οποίο λαμβάνει υπόψη τόσο το Application QoE (AQoS) συμπεριλαμβανομένου του frame rate (FR) και του send bit rate (SBR), όσο και του Network QoE (NQoS) συμπεριλαμβανομένου του packet error rate (PER) της μετάδοσης του βίντεο. Η συνάρτηση MOS δίνεται από:

$$\eta_{IPTV} = \max \left\{ 1.0, \frac{a_1 + a_2 FR + a_3 \ln(SBR)}{1 + a_4 PER + a_5 (PER)^2} \right\}$$

όπου $a_1 \sim a_5$ είναι συντελεστές που θέτουμε ίσους με:

-0.0228, -0.0065, 0.6582, 10.0437, 0.6865 όταν θεωρούμε ότι μεταδίδεται βίντεο με γρήγορη κίνηση (rapid movement – RM). Παρόμοια με τις υπηρεσίες φωνής, τα πακέτα της ροής βίντεο μεταδίδονται συνεχόμενα με σταθερό διάστημα T_s . Υπολογίζουμε την τιμή του PER με την μέτρηση των πακέτων που μεταδίδονται υπερβαίνοντας το μέγεθος και πέρα από το διάστημα T_s . Τα FR και SBR είναι ρυθμιζόμενες παράμετροι για εφαρμογή του ρυθμού προσαρμογής. Ένα τυπικό δείγμα βίντεο RM, το ‘Coastguard’ χρησιμοποιείται με την ακολουθία πακέτων στη βελτιστοποίηση. Το FR του έχει τεθεί σε 30 fps, ενώ το SBR κυμαίνεται μεταξύ 10.9 kbps και 54.6 kbps με 5 επίπεδα συμπίεσης.

File download / FTP

Η λήψη αρχείου (file download – FD) και η πλοήγηση στον ιστό είναι ελαστικές υπηρεσίες, που δεν έχουν συνεχόμενα πακέτα να φτάνουν σε ορισμένη ακολουθία. Για την υπηρεσία FD, η ικανοποίηση των χρηστών σχετίζεται μόνο με τον αποδοτικό ρυθμό δεδομένων. Συνεπώς, το QoE μοντέλο της υπηρεσίας λήψης ορίζεται ως:

$$\eta_{FD} = \begin{cases} 1.0, & v < 8\text{kbps} \\ b_1 \log_{10}(b_2 u), & 8\text{kbps} \leq v < 315\text{kbps} \\ 5.0, & 315\text{kbps} \leq v \end{cases}$$

όπου b_1, b_2 είναι συντελεστές που ορίζονται ίσοι με 2.5037 και 0.3136.

Web browsing

Οι χρήστες που πλοηγούνται στον ιστό δεν ενδιαφέρονται για το μέγεθος της ζητούμενης σελίδας αλλά και δεν τους αρέσει ο μεγάλος χρόνος αναμονής. Ένα πείραμα έχει σχεδιαστεί στο [83], από το οποίο εξάγεται το QoE της υποκειμενικής εμπειρίας χρήστη της πλοήγησης στον ιστό. Μια αναλυτική συνάρτηση που ταιριάζει με τα ευρήματα MOS είναι:

$$\eta_{Web} = 5 - \frac{578}{1 + \left(11.77 + 22.61/\tau\right)^2}$$

όπου $\tau = \tau_c + \tau_r$ είναι ο χρόνος απόκρισης.

Η λογαριθμική κανονική κατανομή, $\ln N(\mu, \sigma^2)$, ταιριάζει ικανοποιητικά με το εμπειρικό PDF των μεγεθών των ιστοσελίδων με συντελεστές $\mu = 10.33$, $\sigma = 2.16$ [83].

Υψηλός χρόνος αναμονής απόκρισης του ζητούμενου ιστού θα προκαλέσει την απώλεια της υπομονής των χρηστών, και συνεπώς θα μειώσει το MOS σε 1.0. Επομένως, ένα

όριο μεγέθους σελίδας (Page Size Limit, PSL) ορίζεται σε αυτό το άρθρο ως ένα είδος ελέγχου επιπέδου εφαρμογής. Όταν υπάρχει αίτημα για μια υπερμεγέθης ιστοσελίδα, μεγαλύτερη από το PSL, μια ειδοποίηση σφάλματος θα αποστέλλεται στον χρήστη ο οποίος και θα είναι το ίδιο δυσαρεστημένος όπως με την υψηλό χρόνο αναμονής. Ωστόσο, αυτός ο μηχανισμός απόρριψης θα εξοικονομήσει πόρους για αιτήματα μικρότερων ιστοσελίδων στα οποία μπορεί να ανταποκριθεί πιο γρήγορα και επομένως να βελτιώσει το QoE.

Στο άρθρο [60] στόχος είναι σε ένα διαμοιραζόμενο κανάλι κατά τη διαδικασία χρονοπρογραμματισμού της ροής πολυμεσικού χαρακτήρα να πετύχουμε μέγιστη ποιότητα. Για να εκφραστεί η ικανοποίηση του χρήστη χρησιμοποιείται μια συνάρτηση που εξαρτάται από την καθυστέρηση στη ροή μεταφοράς. Το πρόβλημα λοιπόν αυτό στη συνέχεια μοντελοποιείται σε μια διαδικασία απόφασης Markov. Αν και αυτό το πρόβλημα είναι γενικά μη επιλύσιμο, ως προσεγγιστική λύση αναπτύσσεται ένας απλός και προσιτός κανόνας με δείκτες που βασίζονται στην προσέγγιση Gittins, όπου αρχικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της μέσης καθυστέρησης των ροών.

Στο άρθρο [84] περιγράφεται ένα σχήμα χρονοπρογραμματισμού του downlink που είναι γνωστό ως Quality-aware DRX (Q-DRX) Scheme το οποίο όχι μόνο έχει ως στόχο το καλύτερο QoS για να ικανοποιήσει τους χρήστες αλλά και να συμβάλει στη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας στο τερματικό του χρήστη λόγω της χρήσης της μεθόδου DRX. Επιπλέον παρουσιάζεται και η επιρροή που έχουν στο QoE του χρήστη η διαφορετική διάρκεια των DRX κύκλων σιγής, ιδιαίτερα στην περίπτωση της υπηρεσίας VoIP.

Στο άρθρο [77] προτείνεται μια νέα προσέγγιση cross layer κατανομής πόρων η οποία βασίζεται στο QoE για πολλαπλές εφαρμογές στο downlink στα δίκτυα LTE. Για την μεγιστοποίηση του QoE με ταυτόχρονα δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών οι συγγραφείς εισάγουν έναν αλγόριθμο για δέσμευση πόρων που βασίζεται σε Particle Swarm Optimization (PSO) και έχει ταχύτερο βαθμό σύγκλισης.

VoIP

Το E-model που έχει οριστεί από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union – ITU) χρησιμοποιείται για το μοντέλο πρόβλεψης QoE VoIP [81], το οποίο θεωρεί το MOS ως μια συνάρτηση παράγοντα ρυθμού μετάδοσης που συμβολίζεται με Ω . Συνδυάζει όλες τις σχετικές παραμέτρους για τον συγκεκριμένο χρήστη, π.χ.,

$$\Omega = \Omega_0 - I_s - I_d - I_{e-eff} + A$$

όπου Ω_0 είναι ο βασικός λόγος σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio), I_s είναι το άθροισμα όλων των απομειώσεων κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, I_d είναι ο παράγοντας απομείωσης που αναπαριστά την καθυστέρηση των σημάτων φωνής, I_{e-eff} είναι ο παράγοντας απομείωσης εξοπλισμού, και A είναι ο παράγοντας πλεονεκτήματος που σχετίζεται με το σενάριο. Σε ένα ιδανικό περιβάλλον, μπορούμε να θέσουμε $\Omega_0 = 94$ και $I_s = A = 0$.

Για χάριν απλότητας, I_d είναι συνάρτηση της απόλυτης καθυστέρησης T_a , που συμπεριλαμβάνει την καθυστέρηση του δικτύου κορμού τ_c και την καθυστέρηση του δικτύου εκπομπής τ_r . Συνεπώς, η καθυστέρηση από άκρη σε άκρη είναι $T_a = 2\tau = 2(\tau_c + \tau_r)$. Όταν $T_a \leq 100$ ms, η απόλυτη καθυστέρηση μετά βίας μπορεί να γίνει αντιληπτή, π.χ., $I_d = 0$. Στην περίπτωση που 100 ms $< T_a \leq 2(\tau_c + T_s)$,

$$I_d(T_a) = 25 \left\{ \left(1 + X^6 \right)^{\frac{1}{6}} - 3 \left[1 + \left(\frac{X}{3} \right)^6 \right]^{\frac{1}{6}} + 2 \right\},$$

$$X = \log_2 \left(\frac{T_a}{100} \right),$$

όπου T_s είναι το σταθερό διάστημα πακέτων που καθορίζεται από τις προδιαγραφές μετάδοσης φωνής. Όταν $T_a > 2(\tau_c + T_s)$, δηλαδή $\tau_r > T_s$, που συνεπάγεται αποτυχία της υπηρεσίας λόγω του υπερβολικά υψηλού ρυθμού πακέτων, συνεπώς $I_d = \infty$.

Πίνακας 8. Προδιαγραφές μετάδοσης φωνής και παράμετροι

Standards	Bit rate (bps)	T_s (ms)	I_{e-eff}
G.711	64.0	20	0
G.728	16.0	30	7
G.729	8.0	20	10
G.723.1	5.3	30	19

Η τιμή του I_{e-eff} σχετίζεται με τις προδιαγραφές μετάδοσης φωνής σε ιδανικές συνθήκες.

Συγκριτική μελέτη της προσφερόμενης Ποιότητας Εμπειρίας αλγορίθμων ράδιο-χρονοπρογραμματισμού σε δίκτυα LTE.

Τέσσερις διαφορετικές προδιαγραφές με τις παραμέτρους τους και τις τιμές I_{e-eff} που αντιστοιχούν δίνονται στον Πίνακα 8. Προδιαγραφές μετάδοσης φωνής και παράμετροι.

Το MOS του VoIP μπορεί να υπολογιστεί από το Ω που πήραμε ως εξής:

$$\eta_{VoIP} = \begin{cases} 1.0, & \Omega < 0 \\ 1 + 0.035\Omega + \frac{7R(\Omega - 60)(100 - \Omega)}{10^6}, & \text{αλλού} \\ 4.5, & \Omega \geq 0 \end{cases}$$

5. ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΥΠΑΡΧΟΝΤΩΝ SCHEDULER ALGORITHMS ΑΠΟ ΑΠΟΨΗ QoE.

Όπως παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο 2, υπάρχει πληθώρα από αλγορίθμους για Scheduling οι οποίοι εφαρμόζονται για να καλύψουν διαφορετικές απαιτήσεις του δικτύου. Από την άλλη σύμφωνα με το κεφάλαιο 4, στα LTE δίκτυα μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ποιότητα που αντιλαμβάνεται ο συνδρομητής (QoE) και μάλιστα υπάρχουν διαφορετικά μοντέλα ανάλογα με το τύπο κίνησης που εφαρμόζεται.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η απόδοση κάποιων Scheduling Algorithms από άποψη QoE για διάφορα traffic models.

5.1 Διαδικασία προσομοίωσης

Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε ο System Level Vienna simulator vr. 1.6_r885. Χρειάστηκε να γίνουν κάποιες αλλαγές στον υπάρχοντα κώδικα για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της έρευνάς μας.

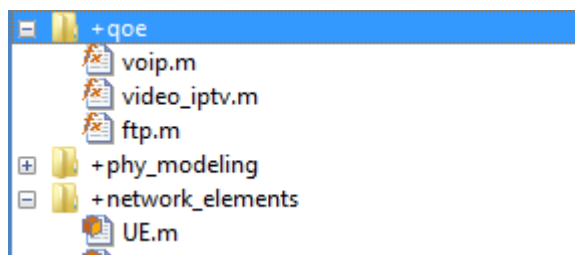
Πίνακας 9: Παράμετροι προσομοίωσης για όλα τα μοντέλα.

Παράμετροι	Τιμές
Frequency	2.1 GHz
System bandwidth	10 MHz
Resources Blocks (RBs)	100 (1 RB = 180 kHz)
Transmission mode	CLSM (Closed Loop Spatial Multiplexing)
nTX x nRX antennas	2x2
Simulation length	10,100, 500 TTIs
Uplink delay	3 TTIs
Inter eNodeB distance	500 m
Macroscopic pathloss model environment	urban
Minimum coupling loss	70 dB
eNodeB TX power	46 dBm
UEs (User Equipments) position	UEs are located in target sector only, 3,6,15 UEs/sector Round Robin

Scheduler	Best CQI Max TP Alpha Fair
-----------	--

5.2 Τροποποιήσεις στον κώδικα

Η βασική προσθήκη στον κώδικα του simulator για την εκτέλεση των προσομοιώσεων είναι ο φάκελος “qoe” ο οποίος περιέχει τα διάφορα μοντέλα για υπολογισμό QoE για το κάθε μοντέλο κίνησης. Μέσα ο φάκελος περιέχει τρία αρχεία: ένα για κίνηση τύπου video, ένα για VoIP και ένα για FTP (Εικόνα 33).



Εικόνα 31: Φάκελος qoe.

Αρχικά, τροποποιήσεις στον υπάρχων κώδικα έγιναν στο αρχείο `LTE_sim_main_launcher_example.m` όπου δηλώνονται κάποιες επιπλέον μεταβλητές για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης πέραν των ήδη ορισμένων τιμών (Εικόνα 32).

```

20
21 % Some changes to the base configuration, in case you would need/want them
22 - LTE_config.show_network = 0;
23 - LTE_config.nTX = 2;
24 - LTE_config.nRX = 2;
25 - LTE_config.tx_mode = 4;
26 - LTE_config.bandwidth = 10000000;%Jenny
27 - LTE_config.scheduler = 'max TP'; % prop fair Sun % round robin
28 - LTE_config.scheduler_params.alpha = 1;
29 % LTE_config.shadow_fading_type = 'claussen';
30 - LTE_config.compact_results_file = true;
31 - LTE_config.delete_ff_trace_at_end = true;
32 - LTE_config.UE_cache = true;
33 - LTE_config.simulation_time_tti = 500;%was 4
34 - LTE_config.UE_cache_file = 'auto';
35 - LTE_config.adaptive_RI = 0;
36 - LTE_config.keep_UEs_still = true;
37 - LTE_config.UE_per_eNodeB = 5; %was 100
38 - LTE_config.scheduler_params.av_window = 20;%was 20
39 - LTE_config.map_resolution = 5; %was 10
40 - LTE_config.pregenerated_ff_file = 'auto';
41 - LTE_config.trace_version = 'v1'; % 'v1' for pregenerated precoding. 'v2' for run-time-a
42 - LTE_config.traffic_models = 'ftp';
43 - LTE_config.traffic_models.usetraffic_model = true;
44 - output_results_file = LTE_sim_main(LTE_config);
45

```

Εικόνα 32: Παραμετροποίηση LTE_sim_main_launcher_example.m.

Στη σειρά 27 ορίζουμε τον scheduler που έχουμε επιλέξει. Στη σειρά 28 ορίζουμε την επιπλέον μεταβλητή 'alpha' που απαιτείται για τον scheduler Alpha Fair. Ενώ στη σειρά 42 ορίζουμε το μοντέλο κίνησης και στη 43 θέτουμε την μεταβλητή usetraffic_model σε true για να ορίσουμε ότι θα εφαρμόσουμε κάποιο μοντέλο κίνησης και δεν θα υλοποιήσουμε σενάριο fullbuffer. Επιπλέον θέτουμε το bandwidth 10 MHz (γραμμή 26).

Στο αρχείο LTE_load_params_dependant.m χρειάστηκε να διαγραφούν οι παρακάτω γραμμές κώδικα για να έχουμε δικαίωμα εκτέλεσης και άλλων αλγορίθμων με ενεργοποιημένο μοντέλο κίνησης (Εικόνα 33).

```

557 %% Traffic models
558 - if isfield(LTE_config,'traffic_models')
559     %was commented by Jenny
560     % if LTE_config.traffic_models.usetraffic_model && ~(strcmp(LTE_config.scheduler,'constrained') || st
561     %warning('Traffic models are just supported with the constrained scheduler - deactivating traffic
562     % LTE_config.traffic_models.usetraffic_model = false;
563     %end
564 - if isfield(LTE_config.traffic_models,'type')
565     if strcmp(LTE_config.traffic_models.type,'MLaner')
566         lambda_pois = 0.0031*exp(1.085*log10(LTE_config.traffic_models.av_cell_TP));
567         warning('Overruling the number of UEs according to the traffic model');
568         randn('state',round(cputime*10));
569         rand('state',round(cputime*3*10));

```

Εικόνα 33: Αλλαγές στο LTE_load_params_dependant.m.

Στο αρχείο UE.m έχουμε προσθέσει κάποιες μεταβλητές για την κλάση UE για τον υπολογισμό του QoE για τα διάφορα μοντέλα όπως το TB_loss και το transm για το Video και το Voip, το TB_delay για το Voip, καθώς και τα MOS_voip και MOS_video για να κρατάμε τις τιμές που υπολογίσαμε (Εικόνα 34).


```

97
98     TB_loss %
99     TB_delay %
100    MOS_voip %
101    MOS_video %Jenny
102    MOS_ftp
103    TTI_length_s
104    transm    %transmitted packets
105 end
106

```

Εικόνα 34: Αρχικοποίηση και ορισμός νέων μεταβλητών.

Στο αρχείο UE.m στην παρακάτω συνάρτηση (Εικόνα 35 καλούμε την αντίστοιχη συνάρτηση για τον υπολογισμό του QoE για το κάθε UE και υπολογίζουμε τις τιμές των μεταβλητών TB_loss και TB_delay.

```

666
667 % Evaluate whether this TB arrived correctly by using the data from
668 % the link quality model and feeding it to the link performance
669 % model (BLER curves)
670 function link_performance_model(obj,LTE_config)
671
672     % Get RB grid
673     % the_RB_grid = obj.RB_grid;
674
675     % Get SINRs from the link quality model. Only the dB (not
676     % linear) are needed.
677     SINR_dB = obj.link_quality_model_output.SINR_dB;
678
679     % Calculate TB SINR
680     DL_signaling = obj.eNodeB_signaling;
681     TB_CQI = DL_signaling.TB_CQI;
682     user_RBs = DL_signaling.assigned_RB_map;
683     assigned_RBs = DL_signaling.num_assigned_RBs;
684     assigned_power = DL_signaling.assigned_power;
685     tx_mode = DL_signaling.tx_mode;
686     nLayers = DL_signaling.nLayers;

```

Εικόνα 35: Αρχή της συνάρτησης link_performance.

Στη γραμμή 757 αυξάνεται η τιμή TB_loss κάθε φορά που ένα πακέτο δεν έχει μεταδοθεί σωστά (ACK==0) (Εικόνα 36)

```

752
753     % Receive
754     ACK = BLER<rand(1,nCodewords);
755     % ACK = false(1,nCodewords);
756     if ACK == 0
757         obj.TB_loss = obj.TB_loss+1; % Per TTI per UE;
758         fprintf('UE %d loss is %d\n ',obj.id,obj.TB_loss);
759     end
760     % fprintf('ACK is %d\n ',ACK);
761     else
762         % Dummy results
763         TB_SINR_dB = [];
764         ACK = false(1,nCodewords);

```

Εικόνα 36: Σημείο μεταβολής του TB_loss.

Παράλληλα το TB_delay στη γραμμή 942 κυρίως για την περίπτωση του VoIP, γίνεται όσο το delay_buffer που υπολογίζεται στη συνάρτηση remove_packet της διαδικασίας generic (Εικόνα 37).

```

82     obj.packet_buffer([obj.packet_buffer.get_id] == packet_id) = [];
83 -   obj.packet_buffer(obj.get_packet_ids == packet_id) = traffic_models.data_packet(0,0,0);
84 -   if success
85 -       obj.delay_buffer = [obj.delay_buffer,obj.UE.clock.current_TTI-temp_packet.get_origin-obj.HARQ_delay];
86 -   else
87 -       obj.delay_buffer = [obj.delay_buffer,Inf];
88 -   end
    
```

Εικόνα 37: Υπολογισμός delay_buffer.

```

if strcmp(obj.traffic_model.type,'voip') || strcmp(obj.traffic_model.type,'video') || strcmp(obj.traffic_model.type,'voice')
for pp = 1:length(packet_parts{cw_})
    if packet_parts{cw_}(pp).data_packet_id
        packet_ind = obj.traffic_model.get_packet_ids == packet_parts{cw_}(pp).data_packet_id;
        if sum(packet_ind)
            [packet_done,packet_id] = obj.traffic_model.packet_buffer(packet_ind).acknowledge(packet_id);
            if packet_done && packet_id
                obj.traffic_model.remove_packet(packet_id,true);
                if (obj.traffic_model.delay_buffer>0)
                    obj.TB_delay = obj.traffic_model.delay_buffer;
                end
            end
        end
    end
end
    
```

Εικόνα 38: Σημείο μεταβολής του Delay.

Ενώ από τη γραμμή 778 έως 791 καλούνται οι συναρτήσεις για τα αντίστοιχα μοντέλα κίνησης. Υπολογίζουμε τιμές μετά το 3^ο TTI (Εικόνα 39). Επιπλέον υπολογίζουμε το average loss ως τον λόγο των πακέτων που χάθηκαν ως προς το συνολικό αριθμό πακέτων για μετάδοση, η τιμή των οποίων αποθηκεύεται στη μεταβλητή transm, που αυξάνει κάθε φορά που ισχύει η συνθήκη στη γραμμή 785 και 792 ανάλογα το τύπο κίνησης.

```

778 -   if assigned_RB_s==0
779 -       avg_delay = mean(obj.TB_delay); %IF POSITIVE!
780 -       % disp(obj.traffic_model.slice_counter);
781 -       % fprintf('size %d\n ',obj.traffic_model.arrival_rate_voice);
782 -       %disp(obj.traffic_model.arrival_rate_voice);
783 -       if strcmp(obj.traffic_model.type,'video')
784 -           if obj.traffic_model.slice_counter ~=0 ||obj.traffic_model.counter~=0
785 -               obj.transm=obj.transm+1;
786 -           end
787 -           avg_loss = obj.TB_loss/obj.transm
788 -           obj.MOS_video = qoe.video_iptv(obj,avg_loss);
789 -       end
790 -       if strcmp(obj.traffic_model.type,'voip')
791 -           if obj.traffic_model.arrival_rate_voice~=0
792 -               obj.transm=obj.transm+1;
793 -           end
794 -           avg_loss = obj.TB_loss/obj.transm
795 -           obj.MOS_video = qoe.voip(obj,avg_loss,avg_delay);
796 -       % fprintf('MOS %d\n ', obj.MOS_video );
797 -       end
    
```

Εικόνα 39: Προσθήκη κώδικα όπου καλούνται τα μοντέλα κίνησης για video και VoIP.

Επιπλέον αλλαγές έγιναν και στο αρχείο ueTrace.m και στο αρχείο simTraces.m ώστε να αποθηκεύονται οι τιμές MOS για κάθε χρήστη για κάθε TTI ώστε να μπορούν στη συνέχεια να εξαχθούν τα απαραίτητα γραφήματα (Εικόνα 40)

```

22
23     methods
24     function calculate_UE_aggregates(obj)
25         for s=1:length(obj.eNodeB_tx_traces)
26             obj.eNodeB_tx_traces(s).calculate_final_average_BLER;
27         end
28         for u=1:length(obj.UE_traces)
29             obj.UE_traces(u).calculate_final_average_throughput_Mbps;
30             obj.UE_traces(u).calculate_final_average_MOS_video; % Jenny
31             obj.UE_traces(u).calculate_final_average_MOS_voip; % Jenny
32             obj.UE_traces(u).calculate_final_average_spectral_efficiency_bit_per_cu;
33             obj.UE_traces(u).calculate_final_average_RBs_per_TTI;
34             obj.UE_traces(u).calculate_final_average_energy_per_bit;
35         end
36     end
37 end
38 end
39 end
    
```

Εικόνα 40: Συνάρτηση που έγιναν αλλαγές στο `simTrace.m`

Τέλος τροποποιήσεις έγιναν και στο `LTE_GUI_show_aggregate_results.m` για την εμφάνιση των γραφικών παραστάσεων με βάση τα αποτελέσματα.

5.3 Απόδοση των scheduler για κάθε μοντέλο κίνησης.

5.3.1 Video

Πίνακας 10: Παράμετροι προσομοίωσης για το μοντέλο video.

Παράμετροι	Τιμές
Simulation length	10, 100, 500TTIs
System bandwidth	10 MHz
UE_per_eNodeB	1, 2, 5
FR	10, 30 fps
SBR	64, 512 Mbps

Αρχικά θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού για μοντέλο κίνησης video (Εικόνα 41). Λεπτομέρειες για την λειτουργία των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού και για τις παραμέτρους που λαμβάνουν υπόψιν τους για τον τρόπο που θα κατανείμουν τα RBs παρουσιάζονται στα προηγούμενα κεφάλαια. Βασικές παράμετροι για το μοντέλο video είναι το frame rate και το send bit rate τα οποία είναι σταθερά και ανάλογα με τις τιμές τους δείχνουν αν έχουμε ένα βίντεο με γρήγορη εναλλαγή εικόνων που είναι πιο απαιτητικό ή όχι, καθώς και το packet error rate το οποίο υπολογίζουμε σαν το λόγο των χαμένων πακέτων προς τα πακέτα μετάδοσης για κάθε χρήστη. Πιο αναλυτικά έχουμε τρεις κατηγορίες για το βίντεο:

Η πρώτη κατηγορία ταξινομείται ως ‘Ελαφριά κίνηση (Slight Movement)’ (SM), η οποία

περιλαμβάνει ακολουθίες με μια μικρή κινούμενη περιοχή ενδιαφέροντος (πρόσωπο) σε στατικό υπόβαθρο.

Η δεύτερη κατηγορία ταξινομείται ως ‘Απαλό περπάτημα (Gentle Walking)’ (GW), η οποία περιλαμβάνει ευρυγώνια αποσπάσματα στα οποία κινείται τόσο το υπόβαθρο όσο και το περιεχόμενο.

Η τρίτη κατηγορία ταξινομείται ως ‘Γρήγορη κίνηση (Rapid Movement)’ (RM), η οποία περιλαμβάνει αθλητικού τύπου αποσπάσματα video.

Το μοντέλο πρόβλεψης προέρχεται από μη-γραμμική ανάλυση των παραμέτρων QoS τόσο στο layer εφαρμογής όσο και στου δικτύου και δίνεται παρακάτω (όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο):

$$MOS = \frac{a_1 + a_2FR + a_3 \ln(SBR)}{1 + a_4PEP + a_5(PEP)^2}$$

όπου SBR συμβολίζει το Send Bite Rate, FR το Frame Rate και PEP το Packet Error Probability. Οι επαναπροσδιορισμένοι μετρικοί συντελεστές $a_i, i = 1, 2, 3, 4, 5$ μαζί με το R^2 δείχνουν την καταλληλότητα εφαρμογής για τις τρεις κατηγορίες video στον παρακάτω Πίνακας 11

Πίνακας 11: Παράμετροι για video

Συντελεστής	SM	GW	RM
a_1	2.797	2.273	-0.0228
a_2	-0.0065	-0.0022	-0.0065
a_3	0.2498	0.3322	0.6582
a_4	2.2073	2.4984	10.0437
a_5	7.1773	-3.7433	0.6865

Όπως φαίνεται και στον κώδικα παρακάτω, το FR και το SBR ορίζονται στο μοντέλο ανάλογα με την κατηγορία του βίντεο που έχουμε. Αρχικά θεωρούμε ένα βίντεο κατηγορίας 3 και θέτουμε τις τιμές FR=10 frames per second και SBR=64 Mbps.

```

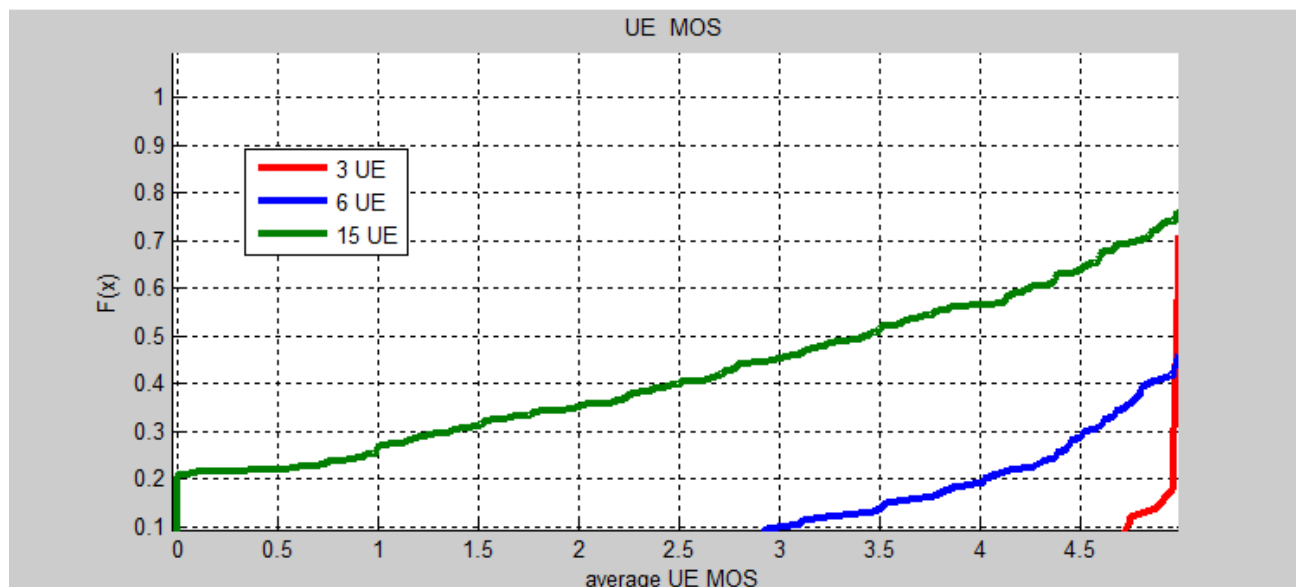
1 function [ MOS ] = video_ipTV(obj,PER )
2 %% Video Streaming traffic
3 % QoE for Video Streaming (e.g. IPTV and YouTube)
4 % [VTC Fall 2012] A Novel QoE-Based Carrier Scheduling Scheme in LTE-Advanced Networks with Multi-Service
5 -
6 - a1 = -0.0228;
7 - a2 = -0.0065;
8 - a3 = 0.6582;
9 - a4 = 10.0437;
10 - a5 = 0.6865;
11
12 % FR: frames per second
13 FR = 10;%60;
14 % SBR: send bit rate in bps
15 SBR = 64000;%512000;
16
17 MOS = (a1 + a2*FR + a3*log(SBR)) / (1 + a4*PER + a5*(PER^2))
18
19 if MOS > 5
20     MOS = 5;
21 end
22
23 if MOS < 1
24     MOS = 1;
25 end
26
27 end
28

```

Εικόνα 41: Μοντέλο υπολογισμού MOS για video.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Αρχικά έχουμε την μεταβολή του MOS, για την οποία πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τους schedulers Round Robin, Best CQI, Max Throughput και Alpha Fair για 3, 6 και 15 χρήστες ανά sector και για 10, 100 και 500 TTI για τον καθένα.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή ως προς τον αριθμό των UE ανά sector (3,6,15) για το MOS με Scheduler τον Best CQI και TTI=100.

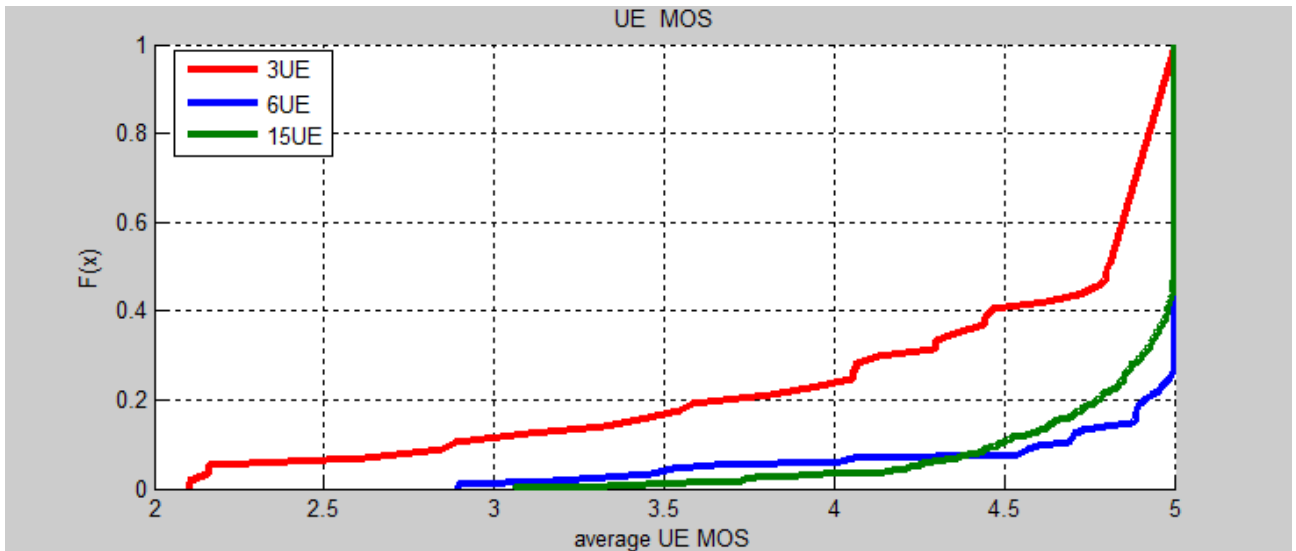


Σχήμα 1: Average MOS για Best CQI για διαφορετικό αριθμό χρηστών.

Μια μικρή παρατήρηση είναι ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών παρατηρούμε

μεγαλύτερη διασπορά του MOS που υποδηλώνει χαμηλή ποιότητα. Το συγκεκριμένο εύρημα είναι λογικό διότι το ίδιο φάσμα διαμοιράζεται μεταξύ περισσότερων χρηστών.

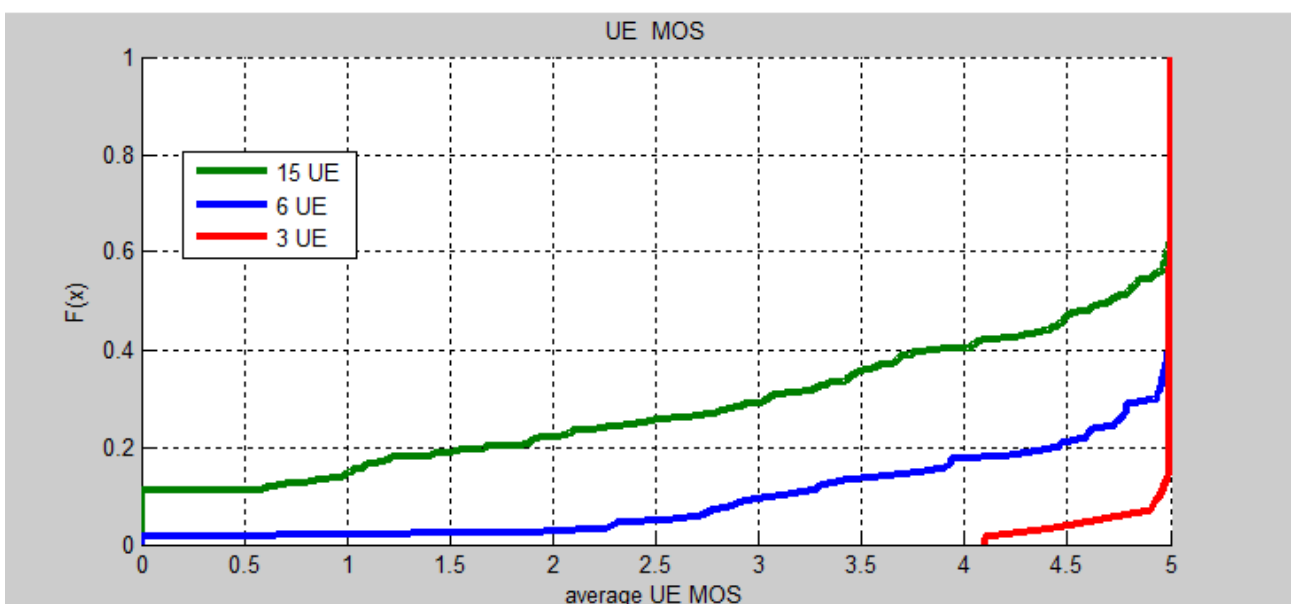
Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή ως προς τον αριθμό των UE ανά sector (3,6,15) για το MOS με Scheduler τον Alpha Fair και TTI=100.



Σχήμα 2: Average MOS για Alpha Fair για διαφορετικό αριθμό χρηστών.

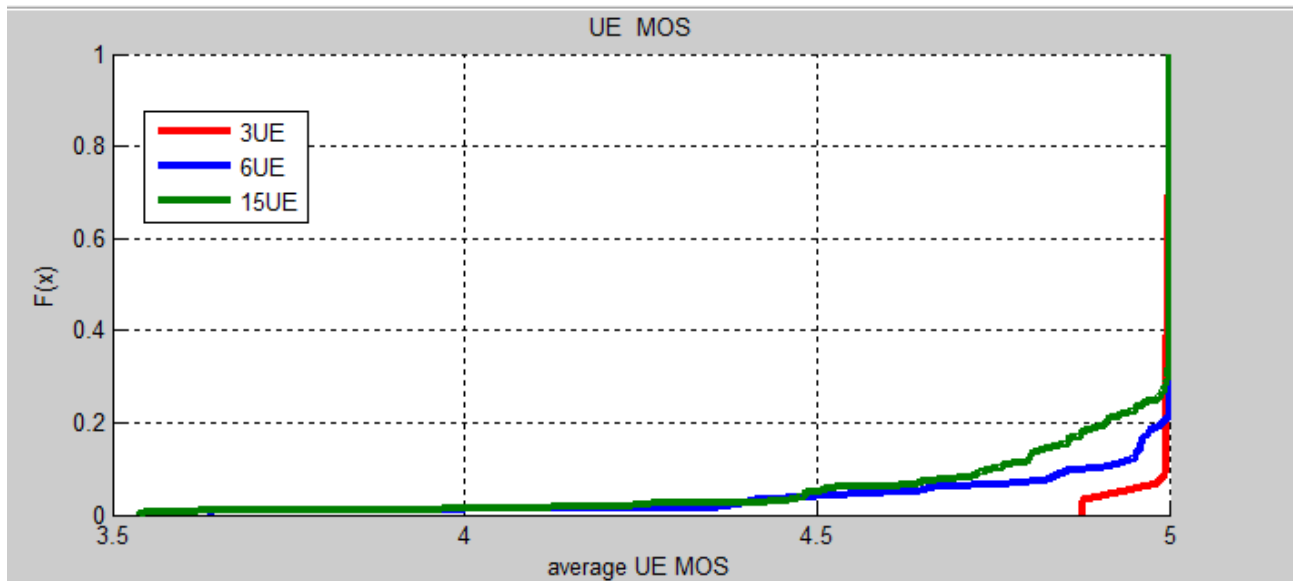
Στον αλγόριθμο Alpha Fair παρατηρούμε ότι και στις τρεις περιπτώσεις η κατανομή είναι παρόμοια καθώς προσπαθεί να είναι δίκαιος και άρα να παρέχει παρόμοια ποιότητα σε όλους και να μην διακρίνονται μεγάλες αποκλίσεις.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή ως προς τον αριθμό των UE ανά sector (3,6,15) για το MOS με Scheduler τον Max TP και TTI=100.



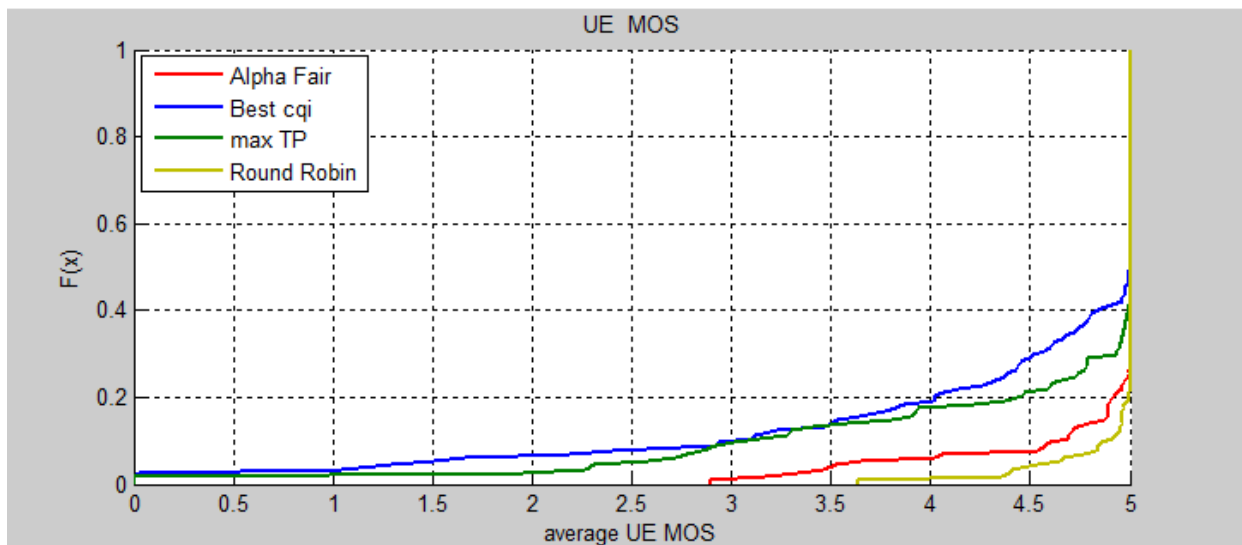
Σχήμα 3: Average MOS για Max TP για διαφορετικό αριθμό χρηστών.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή ως προς τον αριθμό των UE ανά sector (3,6,15) για το MOS με Scheduler τον Round Robin και TTI=100.



Σχήμα 4: Average MOS για Round Robin για διαφορετικό αριθμό χρηστών.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συγκριτική απόδοση ως προς το MOS των τεσσάρων schedulers που μελετήθηκαν προηγουμένως (Round Robin, Best CQI, Max TP, Alpha Fair) για 6 UE ανά sector και για TTI=100.

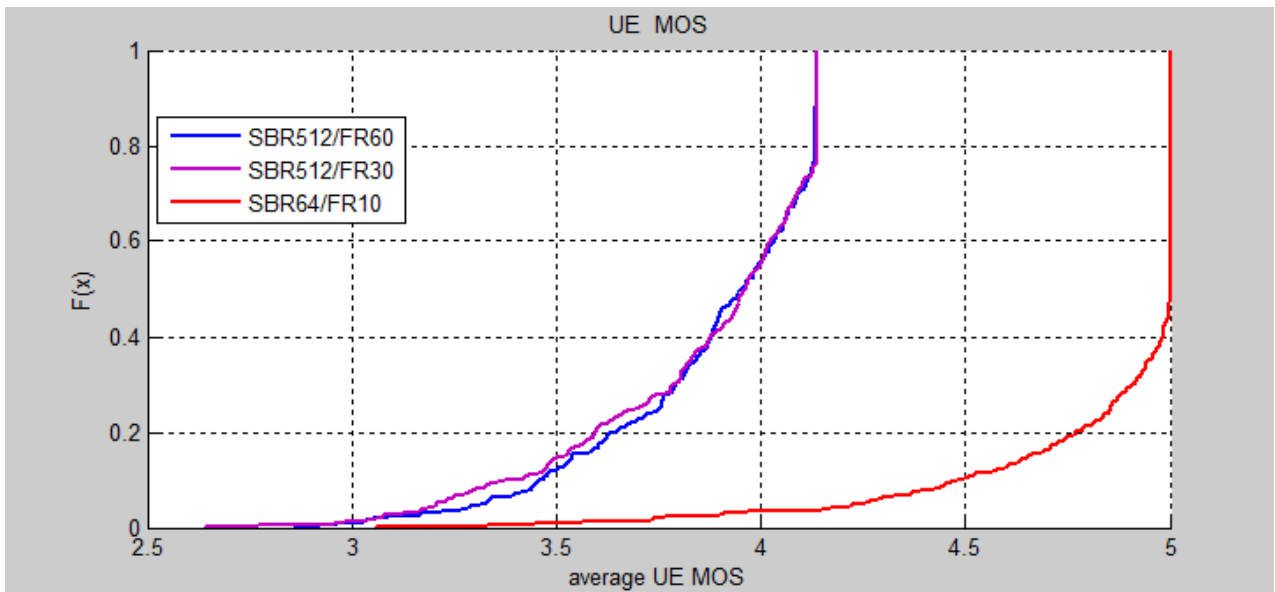


Σχήμα 5: Average MOS ανά Scheduler.

Μια παρατήρηση για τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ότι οι αλγόριθμοι που στοχεύουν στην δικαιοσύνη (Round Robin και Alpha Fair) πετυχαίνουν καλύτερα αποτελέσματα. Αν και στερούνται την ίδια στιγμή throughput οι χρήστες, τελικά αντιλαμβάνονται ικανοποιητική υπηρεσία ως μέσο όρο. Από την άλλη, οι άλλοι δύο αλγόριθμοι που έχουν ως στόχο κάποιο χαρακτηριστικό QoS όπως το throughput και το

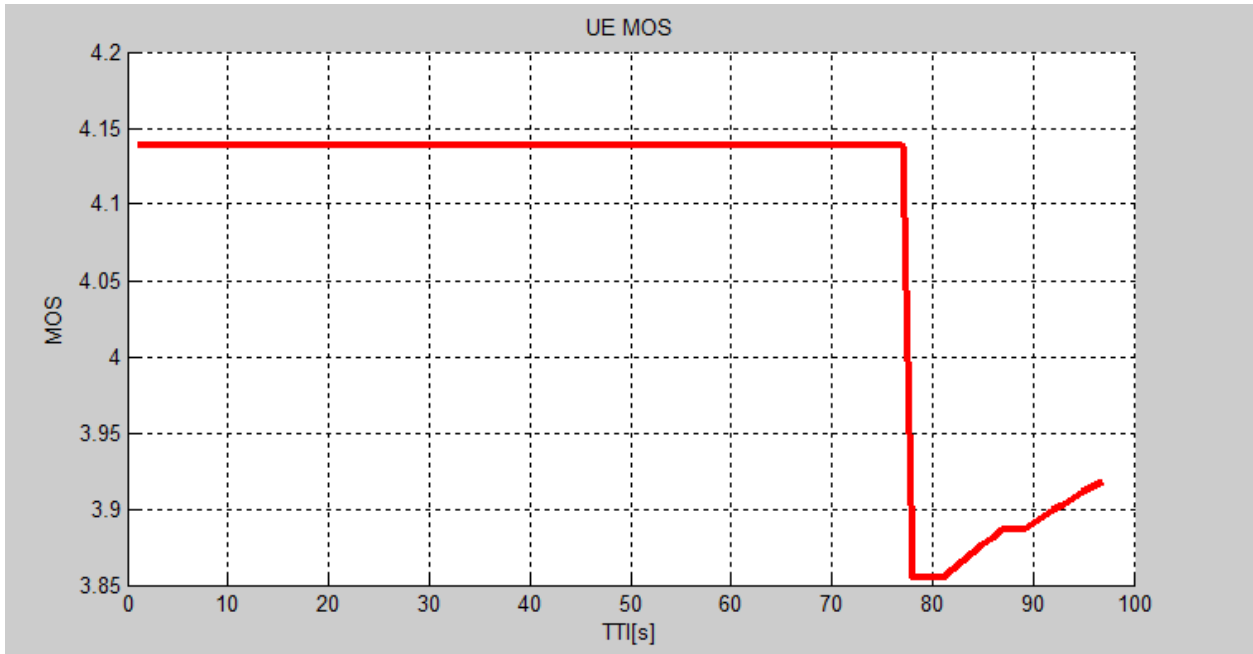
CQI (Max TP και Best CQI αντίστοιχα) οδηγούν σε μεγάλες αποκλίσεις, με αποτέλεσμα κάποιοι χρήστες τελικά να έχουν μη ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Στη συνέχεια, στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή του MOS για βίντεο με SBR=[512 512 64] Mbps και FR=[60 30 10] fps αντίστοιχα. Εφαρμόζουμε τον Alpha fair scheduler για 5 χρήστες ανά sector. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρατηρούμε ότι σε video με πιο γρήγορη εναλλαγή εικόνων έχουμε και πιο μειωμένο MOS.

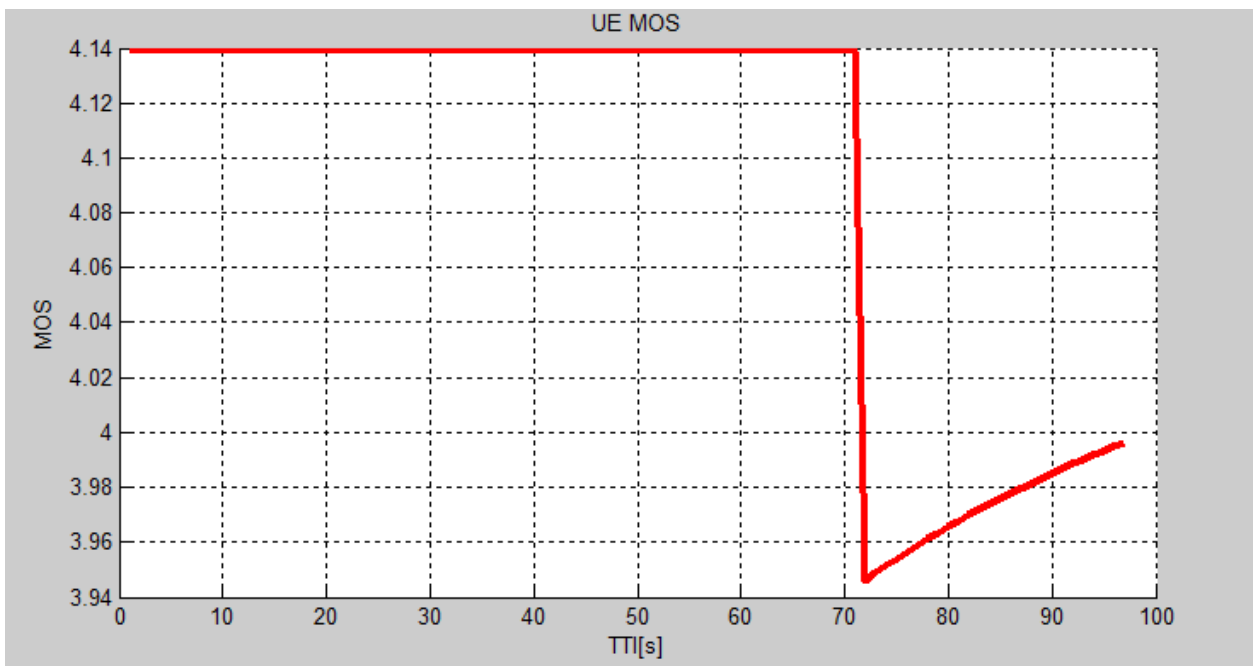


Σχήμα 6: Average MOS για Alpha Fair με διαφορετικά SBR και FR.

Επιπλέον στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η μεταβολή του MOS ενός χρήστη ανά TTI (TTI=100, UE=6). Σκοπός των γραφικών αυτών είναι να μελετήσουμε τη διακύμανση του QoE για κάθε scheduler, για έναν τυχαίο χρήστη. Σε κάποιους schedulers δεν παρουσιάζεται εικόνα διότι το QoE παρέμενε σταθερό.

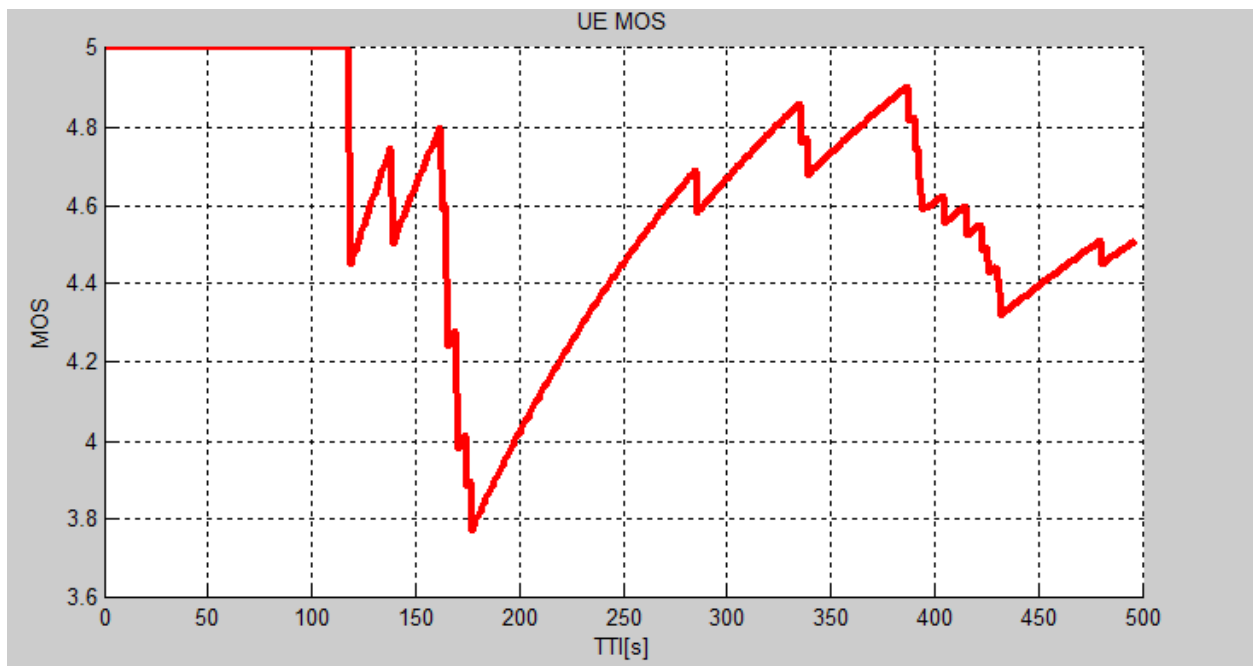


Σχήμα 7: Alpha Fair MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.

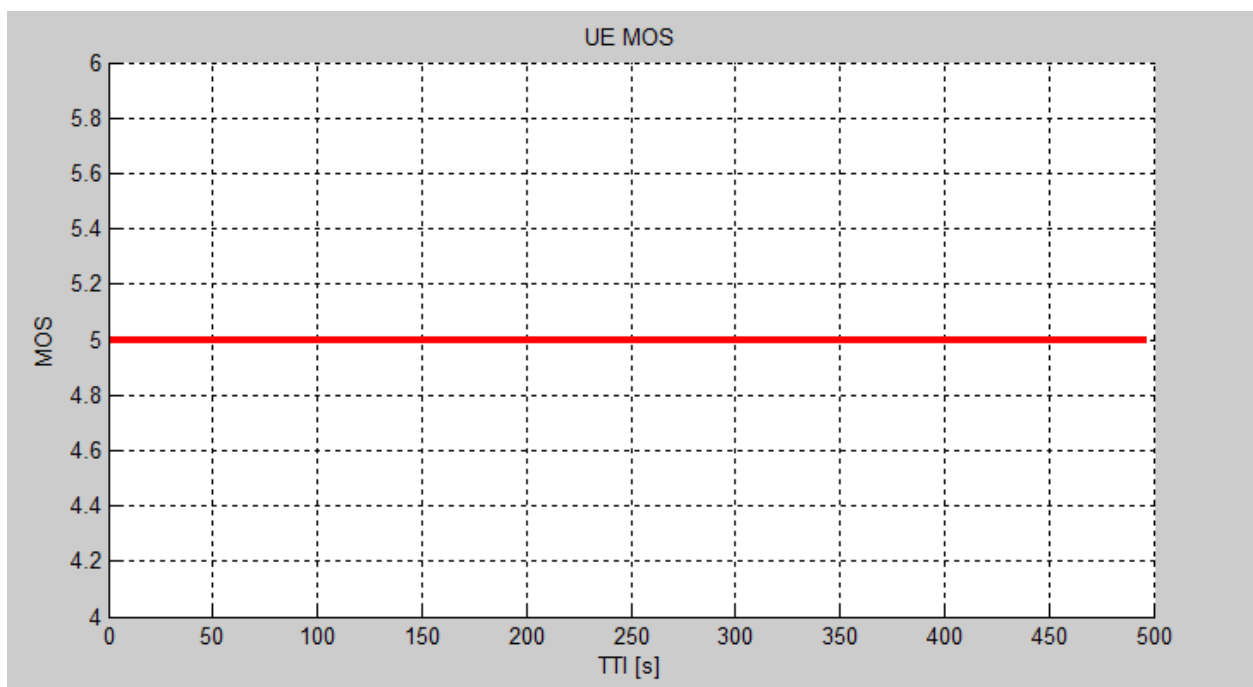


Σχήμα 8: Best CQI MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.

Για καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον Max TP και RR εφαρμόστηκε TTI=500.



Σχήμα 9: Max TP MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.



Σχήμα 10: RR MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.

5.3.2 VoIP

Παρακάτω θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού για μοντέλο κίνησης **VoIP**. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τους schedulers Round Robin, Best CQI, Max Throughput και Alpha fair για 3, 6 και 15 χρήστες ανά sector και για 10, 100 και 500 TTI για τον καθένα.

Για το μοντέλο VoIP ο κώδικας για τον υπολογισμό του MOS παρουσιάζεται στην Εικόνα

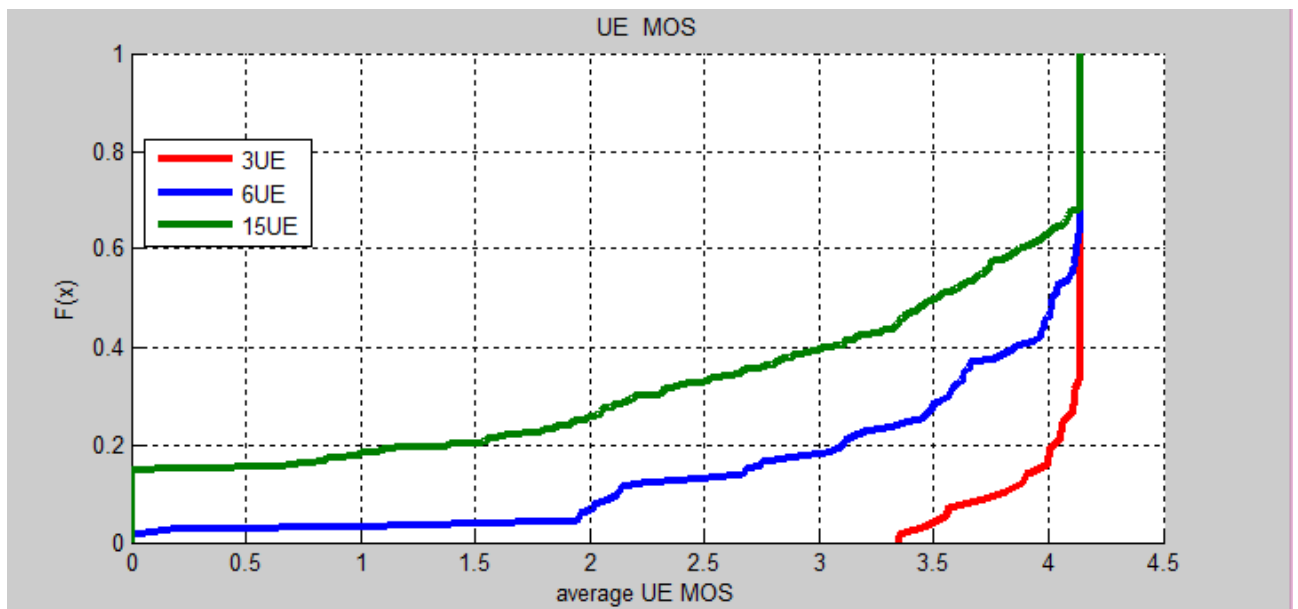
42.

```

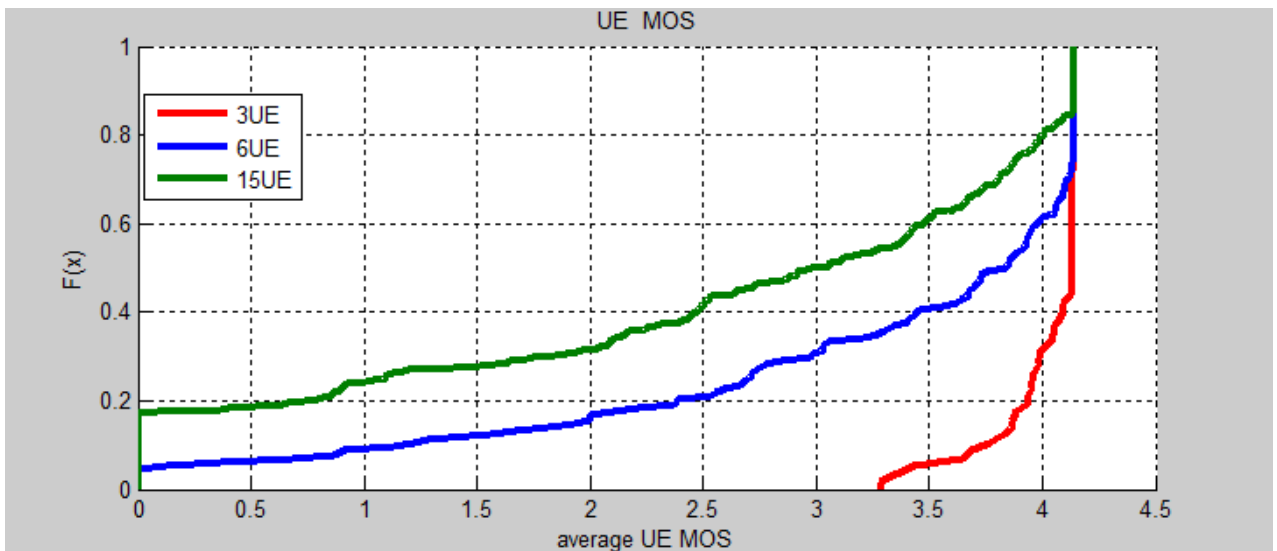
1 function [ MOS ] = voip(packet_loss,delay)
2 % VoIP traffic
3 % QoE for VoIP
4 % [ACM SIGCOMM 2001] Voice over IP performance monitoring
5 - delay=delay*0.001;
6 - Ie = 11 + 40*log(1 + 10*packet_loss);
7 - x = delay - 177.3; % msec
8
9 - if x < 0
10 -     H = 0;
11 - else
12 -     H = 1;
13 - end
14
15 - Id = 0.024 * delay + 0.11 * x * H;
16
17 - R = 94.2 - Ie - Id;
18
19 - if R < 0
20 -     MOS = 1;
21 - elseif R >= 0 && R <= 100
22 -     MOS = 1 + 0.035*R + 7*(1e-6) * R * (R-60) * (100-R);
23 - else
24 -     MOS = 5;
25 - end
26 - end
27

```

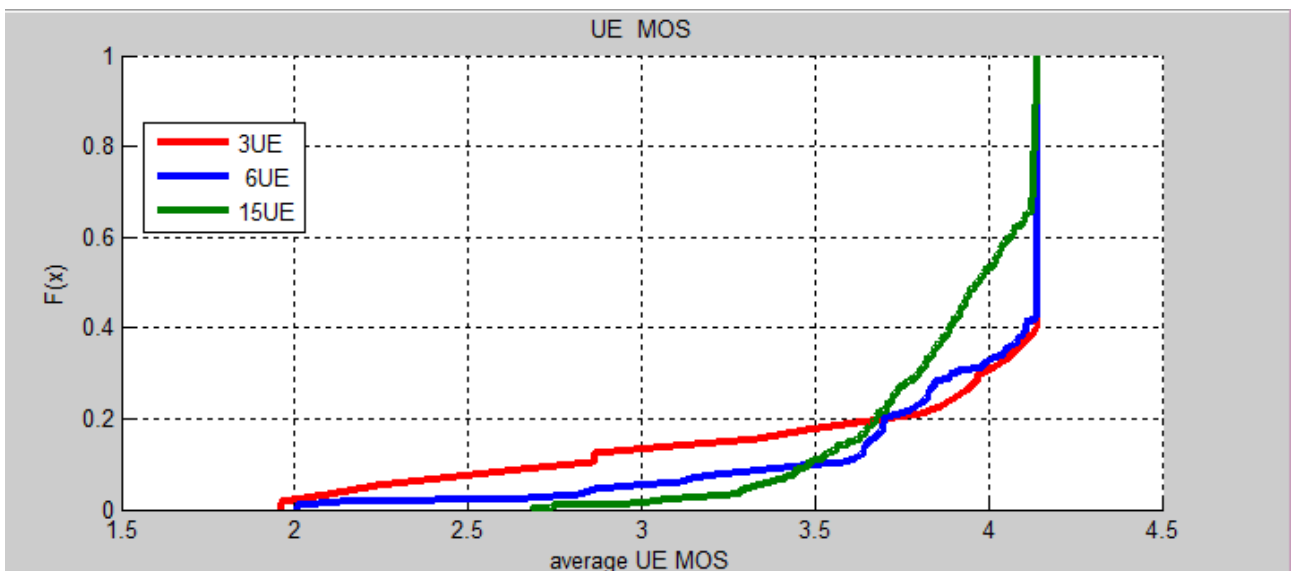
Εικόνα 42: Μοντέλο υπολογισμού MOS για VoIP.



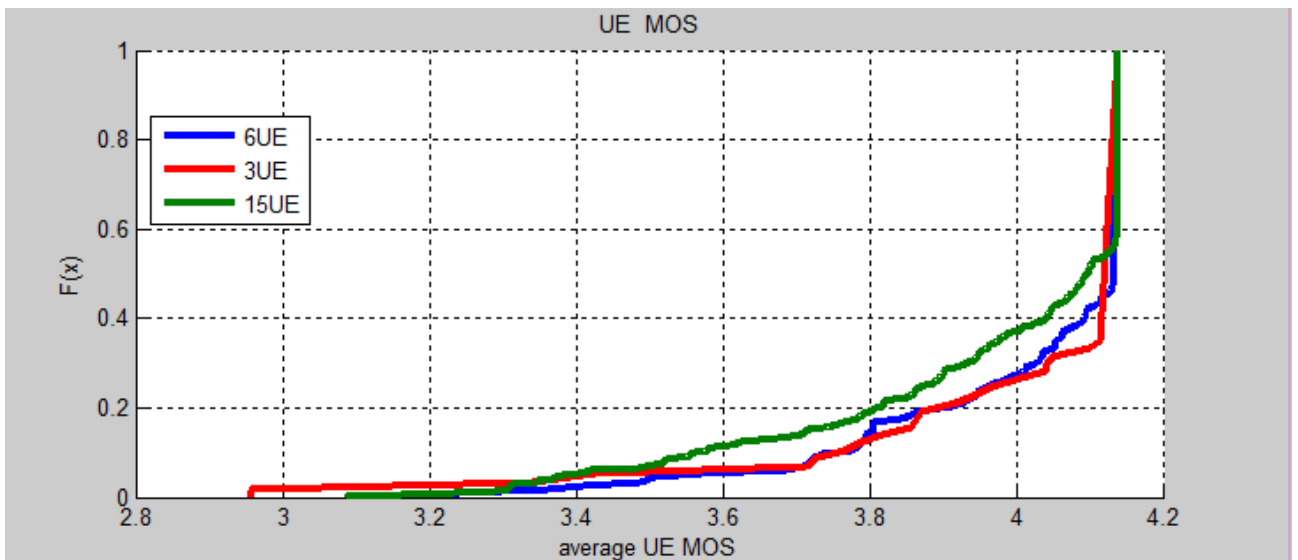
Σχήμα 11: Average MOS για Max TP για διαφορετικό αριθμό χρηστών.



Σχήμα 12: Average MOS για Best CQI για διαφορετικό αριθμό χρηστών.



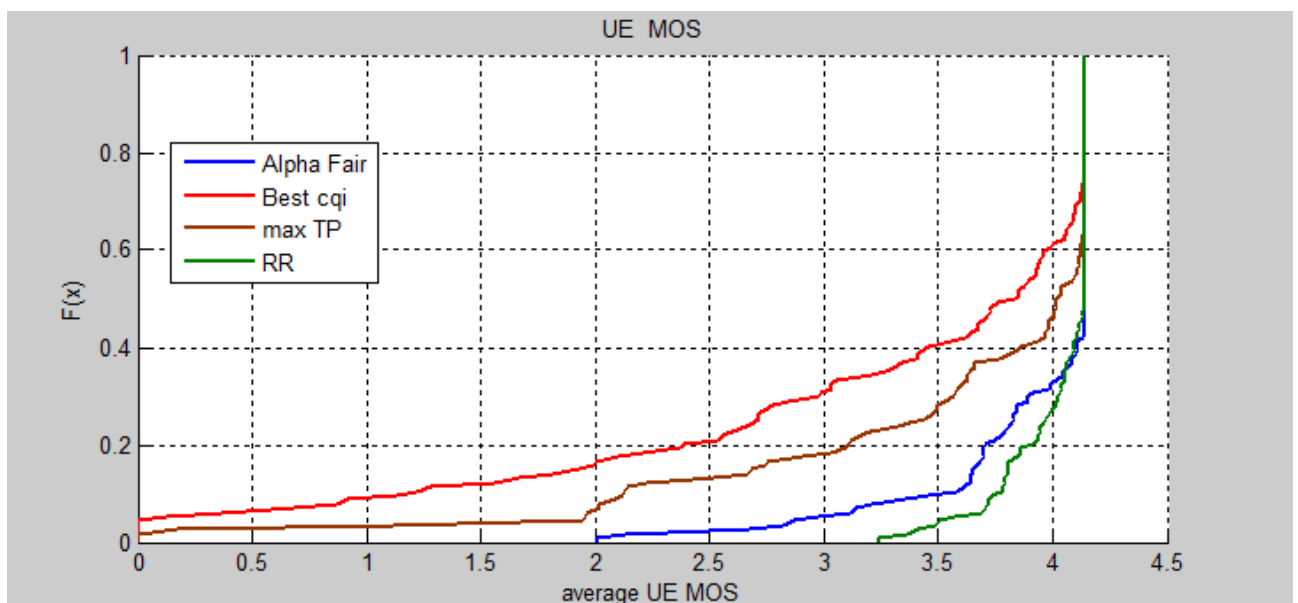
Σχήμα 13: Average MOS για Alpha Fair για διαφορετικό αριθμό χρηστών.



Σχήμα 14: Average MOS για Round Robin για διαφορετικό αριθμό χρηστών.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι για δεδομένα φωνής οι αλγόριθμοι που έχουν ως στόχο την δικαιοσύνη είναι πιο ικανοποιητικοί διότι και πάλι δεν έχουν μεγάλες διακυμάνσεις μεταξύ των τιμών MOS αλλά από την άλλη πετυχαίνουν τιμές πιο κοντά στο βέλτιστο (MOS=5). Σε αντίθεση, οι δύο πρώτοι αλγόριθμοι εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις και έχουν συγκέντρωση τιμών MOS και αρκετά χαμηλά που υποδηλώνει μη ικανοποιητική υπηρεσία. Ιδιαίτερα στην υπηρεσία φωνής είναι σημαντικό να έχουμε μια ικανοποιητική ποιότητα, $MOS > 3,5$, για τους περισσότερους χρήστες παρά να προσπαθούμε να βελτιώσουμε την ταχύτητα του χρήστη ή το CQI διότι τελικά ο χρήστης δεν το αντιλαμβάνεται και μένει με μια μη ικανοποιητική υπηρεσία.

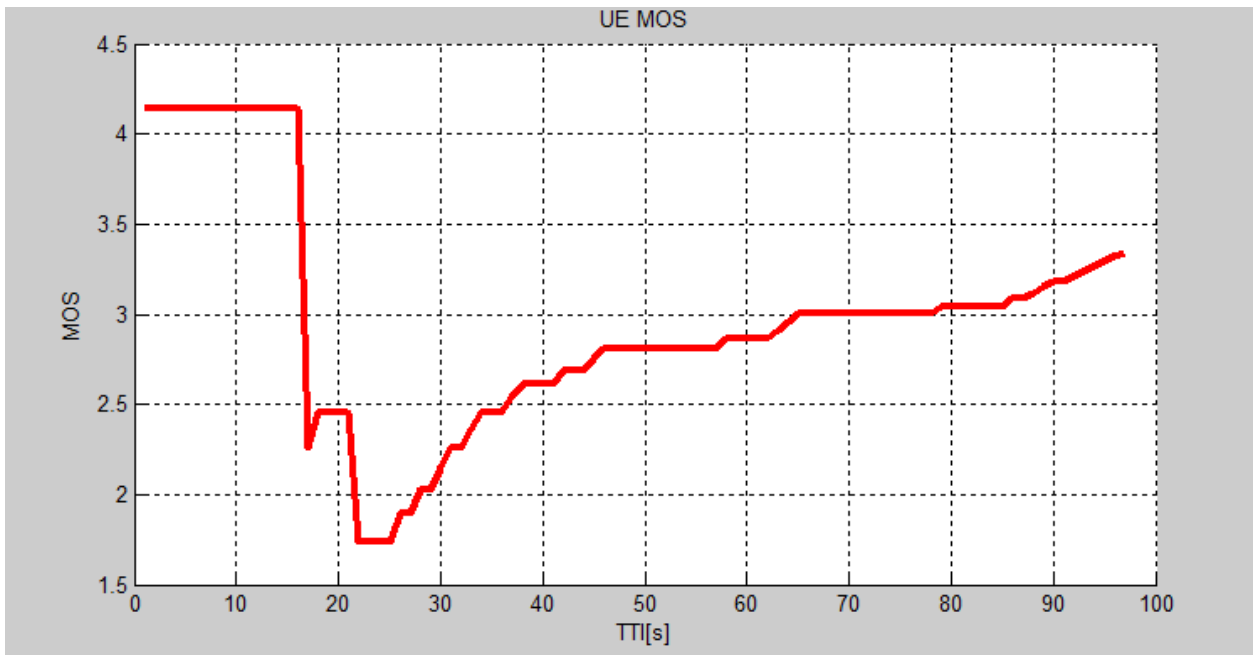
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η απόδοση ως προς το MOS των τεσσάρων schedulers (Round Robin, Best CQI, Max TP, Alpha Fair) για 6 UE ανά sector και για TTI=100.



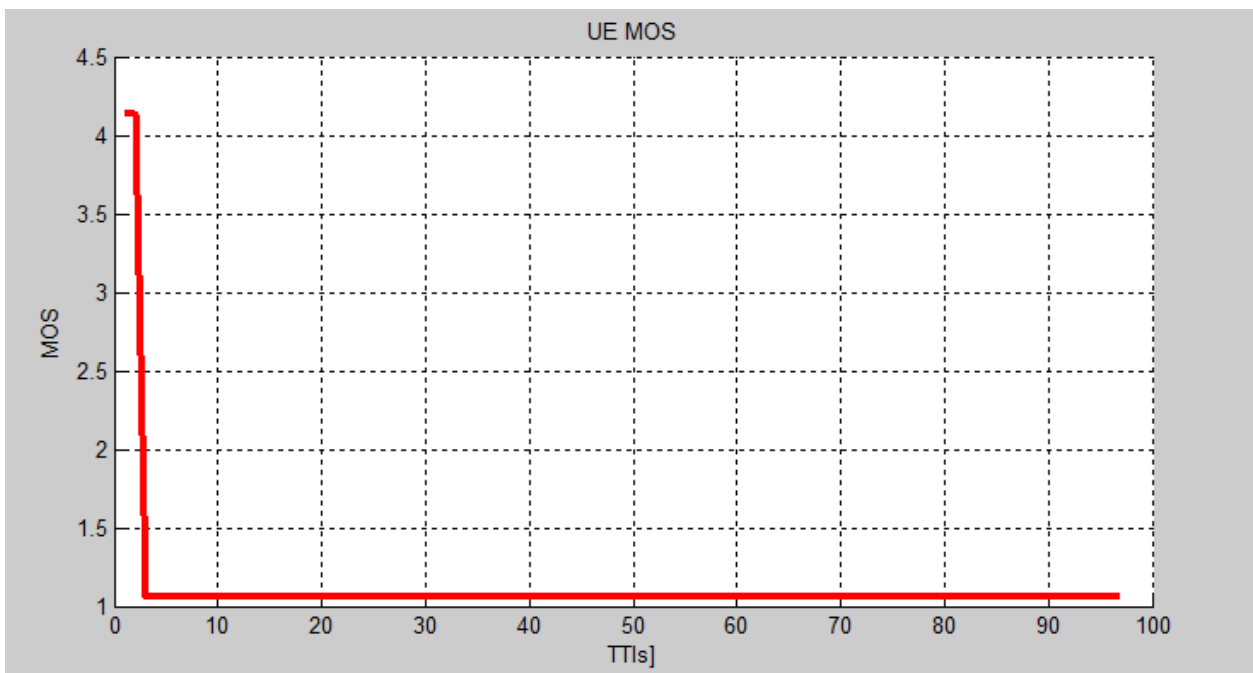
Σχήμα 15: Average MOS ανά Scheduler.

Παρόμοια, η προαναφερθείσα τάση των Best CQI και Max TP αποτυπώνεται και στο συγκριτικό σχήμα. Δηλαδή, παρόλο που οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι προσπαθούν να παρέχουν μια αρκετά καλή υπηρεσία σε κάποιους χρήστες, τελικά οδηγούν στην ύπαρξη χρηστών με σχεδόν καθόλου υπηρεσία.

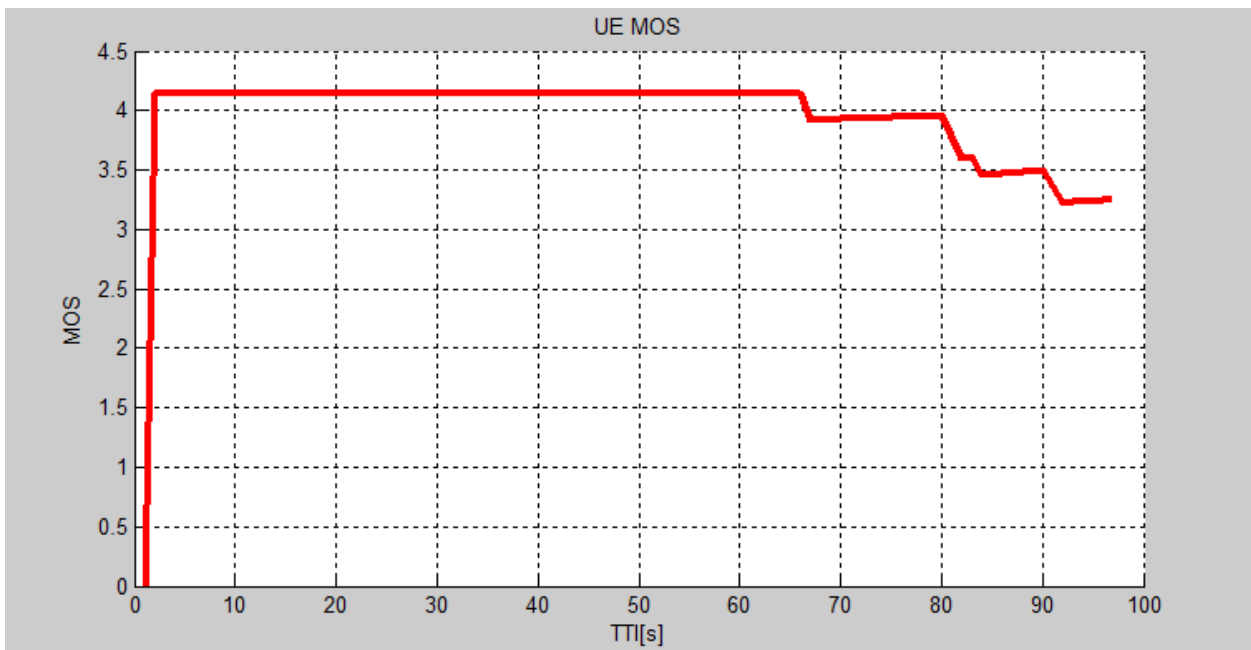
Τέλος, στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η μεταβολή του MOS ενός χρήστη ανά TTI (TTI=100, UE=6).



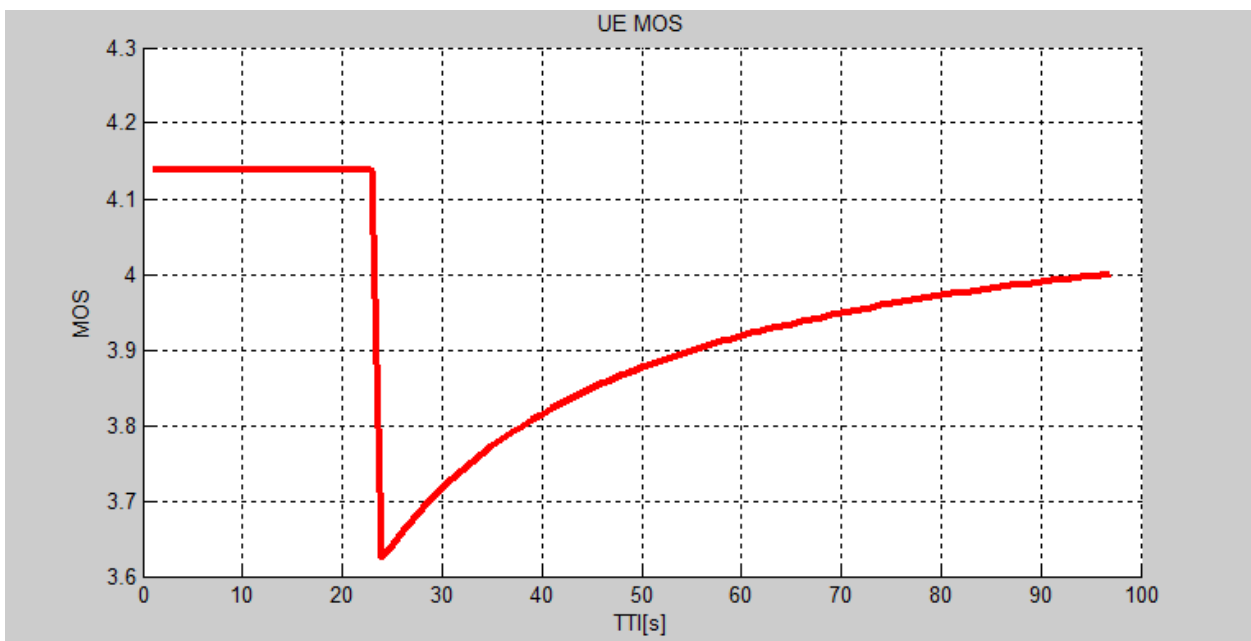
Σχήμα 16: Alpha Fair MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.



Σχήμα 17: Max TP MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.



Σχήμα 18: Best CQI MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.



Σχήμα 19:RR MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.

5.3.3 FTP

Παρακάτω θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού για το μοντέλο κίνησης **FTP**. Ο υπολογισμός του MOS για κάθε χρήστη για κάθε TTI σε αυτό το μοντέλο υπολογίζεται από το πρώτο TTI. Η συνάρτηση υπολογισμού του καλείται από τη συνάρτηση `store()` του `ueTrace.m` (Εικόνα 43) και βασική παράμετρος της είναι το `rate` για κάθε χρήστη για κάθε TTI (γραμμή 126, Εικόνα 44).

```

94 % Trace this specific TTI
95 function store(obj,feedback,attached_eNodeB,position,tti_idx,assigned_RB,assigned_power,TB_CQI,TB
96 % Optional varargin variables to trace are:
97 % - extra_traces{1} -> SINR
98 % - extra_traces{2} -> SNR
99 fb_CQI = feedback.CQI;
00 fb_ACK = feedback.ACK;
01

```

Εικόνα 43: Συνάρτηση store.

Βασικός περιορισμός είναι ο χρήστης να χρονοπρογραμματίστηκε για αυτό και καλείται μόνο στην περίπτωση που ισχύει η συνθήκη στη γραμμή 111 (Εικόνα 44) δηλαδή αν του ανατέθηκαν RB. Η παράμετρος throughput, ο ρυθμός μετάδοσης, μπορεί να είναι είτε μηδέν αν ο UE τελικά δεν κατάφερε να μεταδώσει επιτυχώς (ACK=0) είτε να πάρει κάποια τιμή ανάλογα με το μέγεθος του TB.

```

110
111 if ~isempty(assigned_RB)
112     obj.assigned_RB(tti_idx) = assigned_RB;
113     obj.assigned_power_W(tti_idx) = assigned_power;
114     obj.ACK(1:length(fb_ACK),tti_idx) = fb_ACK;
115     obj.TB_CQI(1:length(TB_CQI),tti_idx) = TB_CQI;
116     obj.TB_size(1:length(TB_size),tti_idx) = TB_size;
117     obj.N_used_bits(1:length(N_used_bits),tti_idx) = N_used_bits;
118     obj.BLER(1:length(BLER),tti_idx) = BLER;
119     obj.average_MOS_video = MOS_video; % Jenny
120     obj.TB_SINR_dB(1:length(TB_SINR_dB),tti_idx) = TB_SINR_dB;
121     obj.throughput(1:length(fb_ACK),1) = TB_size(:).*fb_ACK(:) / obj.TTI_length_s;
122     % disp('THR=');
123     % disp(obj.throughput);
124     % obj.traffic_model.type,'ftp'
125     for n=1:length(fb_ACK)
126         obj.MOS_ftp(n,tti_idx) = qoe.ftp(TB_CQI,obj.throughput(n,1)); %jenny
127     end
128 end
129

```

Εικόνα 44: Συνθήκη isempty και εντολή για υπολογισμό MOS_ftp.

Το μοντέλο FTP υπολογίζει στην αρχή ένα πακέτο για κάθε χρήστη με βάση την ομοιόμορφη λογαριθμική κατανομή με μέγιστο μέγεθος το $5 \cdot 10^6$ bits. Μια ακόμα βασική παράμετρος είναι το $mean_reading_time = 180$ seconds διότι μετά από αυτό το χρόνο θα ξαναφτιάξει νέο πακέτο.

Ο κώδικας για το FTP μοντέλο φαίνεται στην Εικόνα 45. Παρατηρούμε ότι βασική παράμετρος για τον υπολογισμό είναι ο ρυθμός μετάδοσης. Η μικρότερη τιμή που μπορεί να πάρει το MOS στην περίπτωση που ο ρυθμός μετάδοσης είναι μηδέν είναι ένα.


```

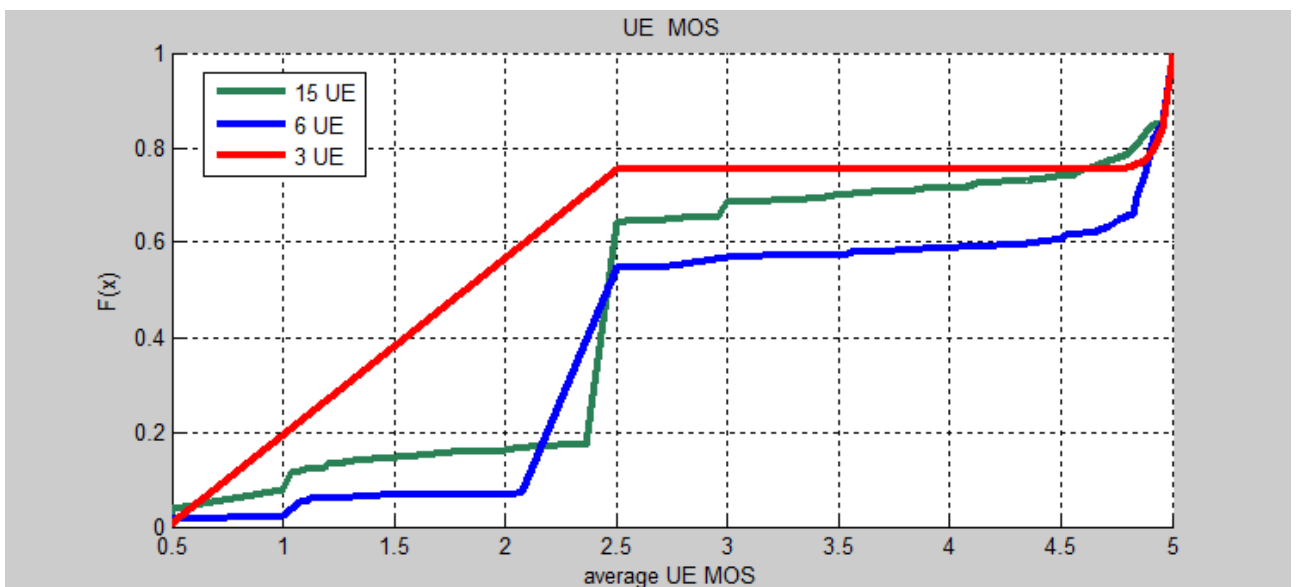
1 function [ MOS ] = ftp(cqi,rate)
2 % FILE_DOWNLOAD (ftp traffic) //cqi,LTE_
3 % QoE for File Download services
4 % [VTC Fall 2012] A Novel QoE-Based Ca
5
6 a = 2.192;
7 b = 3.57 * 1e-4;
8
9 if rate < 8000 % bps
10     MOS = 1;
11 else
12     if rate < 315000
13         MOS = a*log10(b*rate);
14     else
15         MOS = 5;
16     end
17 end
18 %MOS
19 if MOS > 5 || MOS < 1
20     disp('MOS error');
21     disp(MOS);
22 end
23
24 end
25

```

Εικόνα 45: Μοντέλο υπολογισμού MOS για FTP.

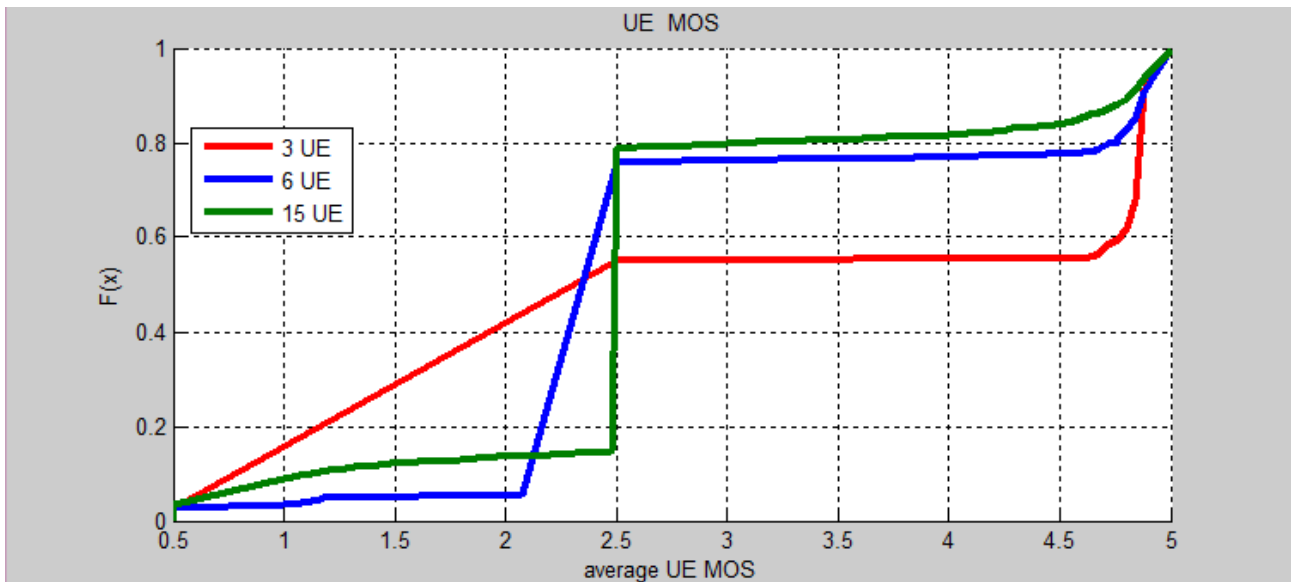
Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τους schedulers Round Robin, Best CQI, Max Throughput και Alpha Fair για 3, 6 και 15 χρήστες ανά sector 100 TTI για το καθένα.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή ως προς τον αριθμό των UE ανά sector (3,6,15) για το MOS με Scheduler τον Max TP και TTI=100.



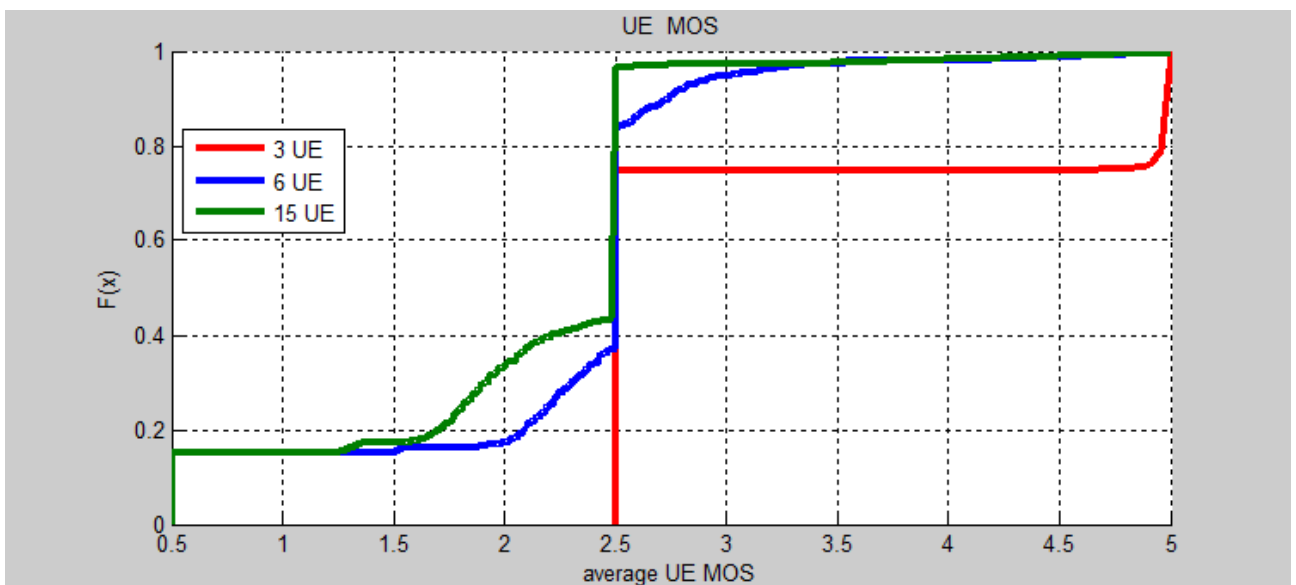
Σχήμα 20: Average MOS για max TP για διαφορετικό αριθμό χρηστών.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή ως προς τον αριθμό των UE ανά sector (3,6,15) για το MOS με Scheduler τον Best CQI και TTI=100.



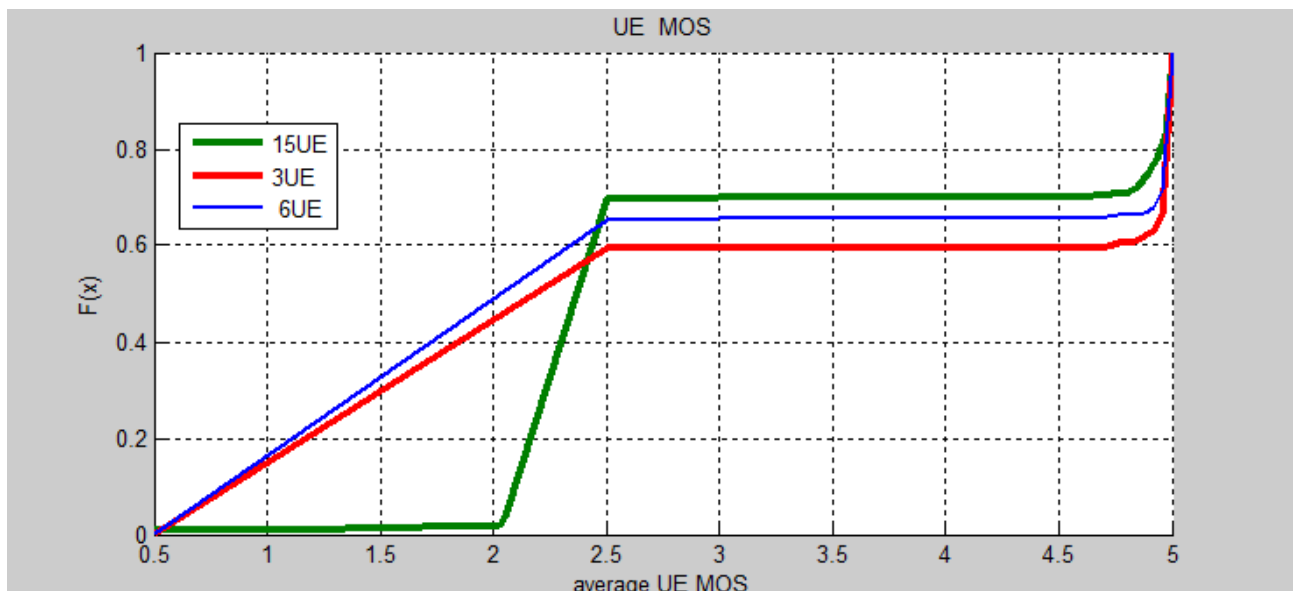
Σχήμα 21: Average MOS για Best CQI για διαφορετικό αριθμό χρηστών.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή ως προς τον αριθμό των UE ανά sector (3,6,15) για το MOS με Scheduler τον Alpha Fair και TTI=100.



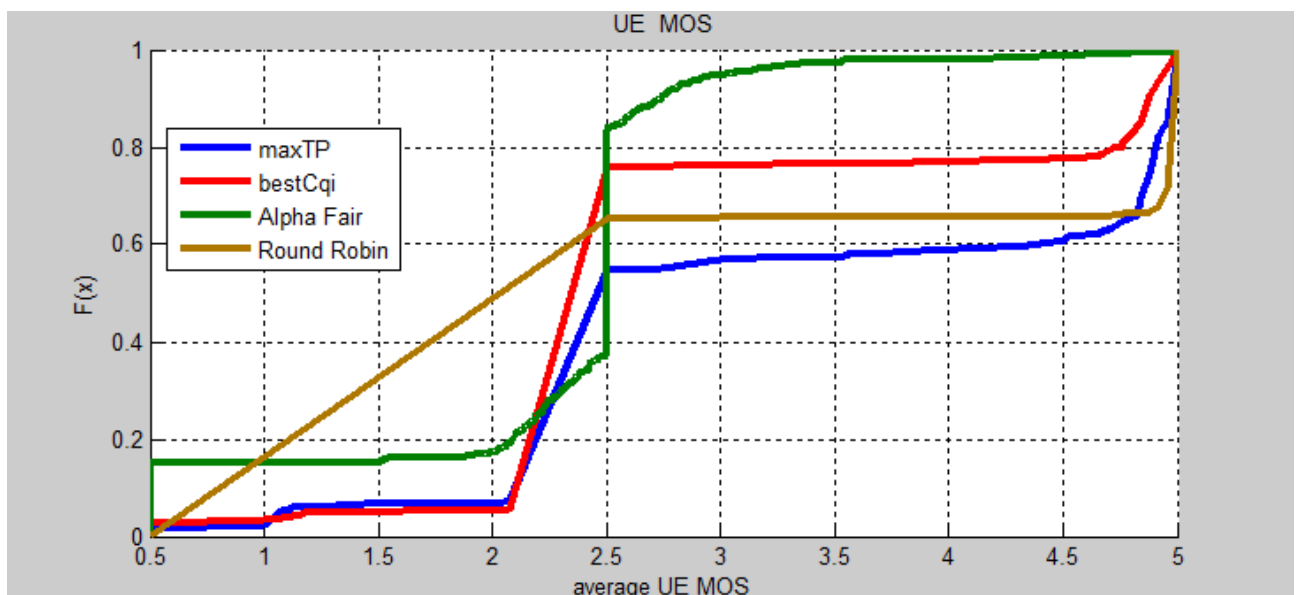
Σχήμα 22: Average MOS για Alpha Fair για διαφορετικό αριθμό χρηστών.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή ως προς τον αριθμό των UE ανά sector (3,6,15) για το MOS με Scheduler τον Round Robin και TTI=100.



Σχήμα 23: Average MOS για RR για διαφορετικό αριθμό χρηστών.

Τέλος στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η απόδοση ως προς το MOS των τεσσάρων schedulers (Round Robin, Best CQI, Max TP, Alpha Fair) για 6 UE ανά sector και για TTI=100.



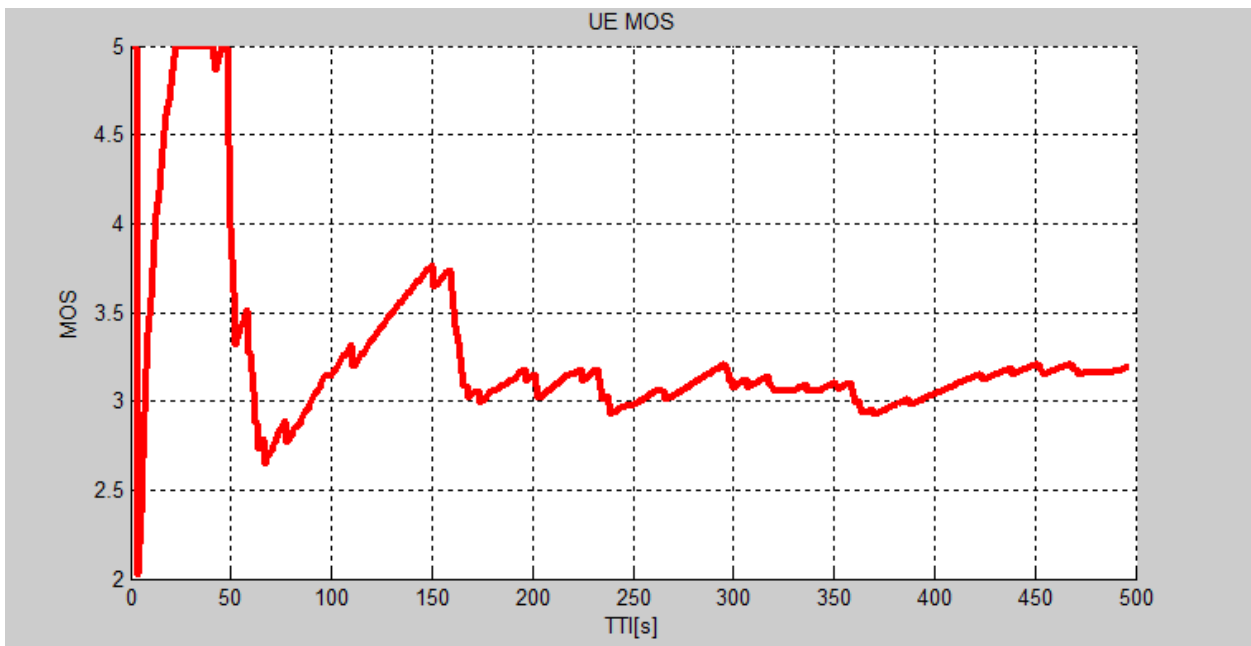
Σχήμα 24: Average MOS ανά Scheduler.

Στο μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε για αυτό τον τύπο κίνησης η παράμετρος που μεταβάλλει το MOS είναι το throughput. Έτσι λοιπόν παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνονται οι χρήστες έχουμε χειρότερη υπηρεσία, δηλαδή μικρότερη συγκέντρωση σε τιμές $MOS > 4.5$. Συγκριτικά παρατηρούμε ότι πάλι οι αλγόριθμοι με στόχο την δίκαιη κατανομή πόρων έχουν καλύτερα αποτελέσματα. Τέλος, είναι λογικό ο max TP να έχει τα λιγότερα ικανοποιητικά αποτελέσματα, διότι μειώνοντας το throughput ορισμένων χρηστών στοχεύει να δώσει καλύτερη ταχύτητα σε χρήστες με καλές συνθήκες και ήδη

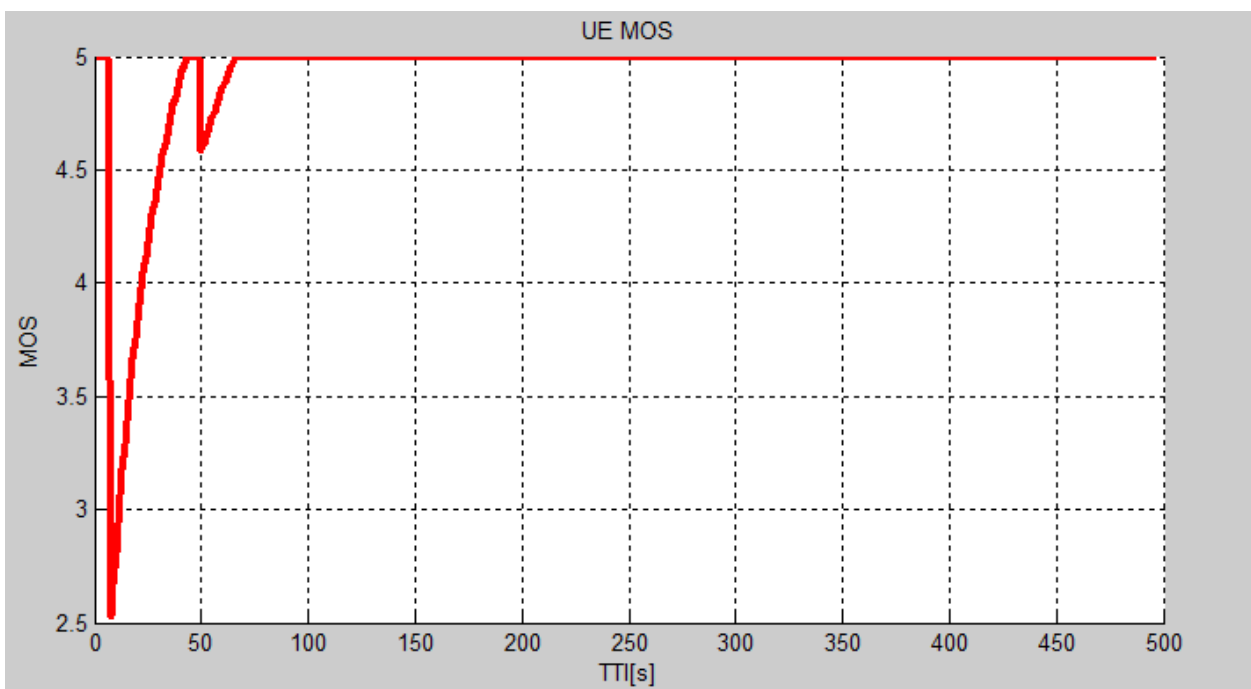
Συγκριτική μελέτη της προσφερόμενης Ποιότητας Εμπειρίας αλγορίθμων ραδιο-χρονοπρογραμματισμού σε δίκτυα LTE.

καλό ρυθμό, το οποίο όμως δεν αντανακλάται σε περαιτέρω βελτίωση του QoE.

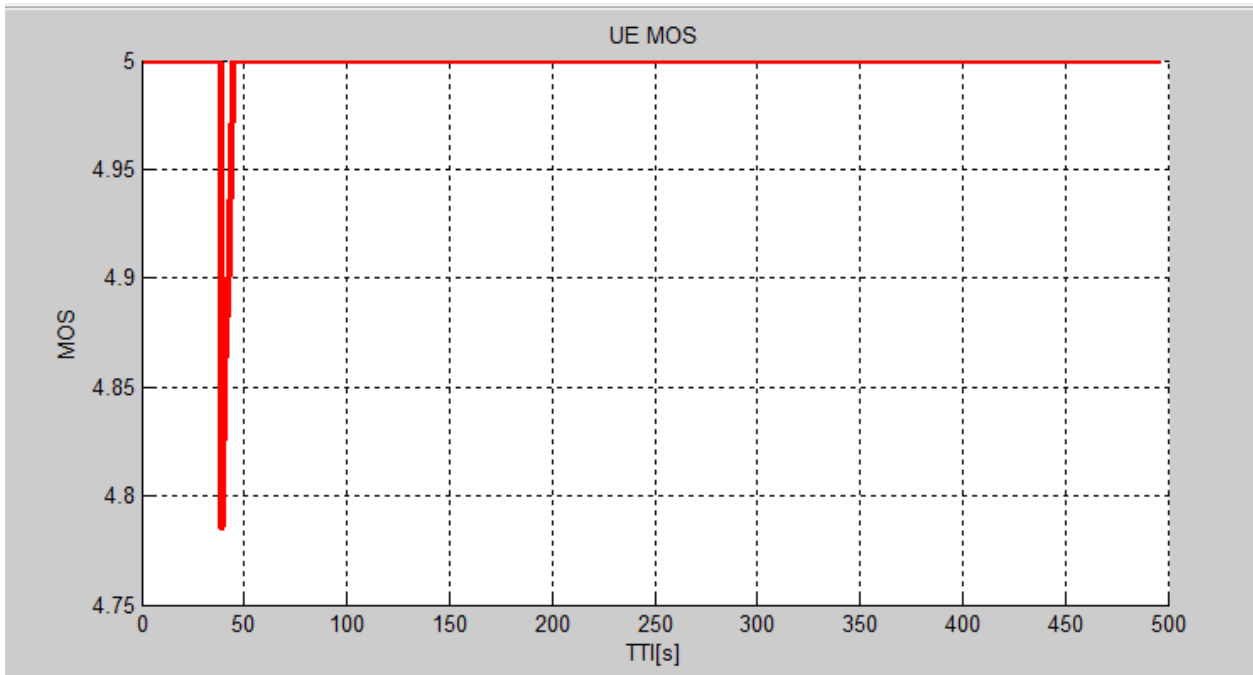
Τέλος, στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η μεταβολή του MOS ενός χρήστη ανά TTI (TTI=500,UE=6).



Σχήμα 25: Best CQI MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.



Σχήμα 26: RR MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.



Σχήμα 27: Max TP MOS ανά TTI για τον χρήστη UE=50.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε υλοποίηση και εφαρμογή βασικών μοντέλων υπολογισμού του QoE για διαφορετικά μοντέλα κίνησης και για διαφορετικούς θεμελιώδεις radio schedulers. Εισάγοντας αλλαγές και προσθήκες στον Vienna LTE simulator, πετύχαμε μια σημαντική επέκτασή του ώστε να υπολογίζεται το QoE των χρηστών, πέραν των παραδοσιακών παραμέτρων για υπολογισμό του QoS.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ποικίλουν αλλά γενικά δείχνουν μια τάση οι αλγόριθμοι με στόχο τη δικαιοσύνη να έχουν καλύτερα αποτελέσματα για το μεγαλύτερο μέρος των χρηστών ακόμα και σε απαιτητικές εφαρμογές όπως το video. Ένα ακόμα συμπέρασμα των πειραμάτων που έγιναν είναι ότι ακόμα και με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης οι χρήστες μπορούν στο τέλος να αντιληφθούν μια υπηρεσία καλής ποιότητας αρκεί να λάβουν τα δεδομένα τους εγκαίρως.

Το αρνητικό των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό QoE είναι ότι λαμβάνουν μόνο λίγες παραμέτρους υπόψιν ανάλογα με την υπηρεσία, οι οποίες ίσως να μην εκφράζουν πάντα σωστά την αντιληφθείσα ποιότητα υπηρεσίας αλλά και τον κάθε χρήστη. Η εμπειρία του χρήστη είναι μια υποκειμενική παράμετρος η οποία πολλές φορές μπορεί να επηρεαστεί και από παραμέτρους εκτός δικτύου, όπως από τις απαιτήσεις του χρήστη και τη διαφορετική αντίληψή του, για παράδειγμα ως προς την καθυστέρηση. Παρόλα αυτά, η πρόταση νέων μοντέλων μέτρησης QoE ήταν εκτός των στόχων της παρούσας διπλωματικής.

Μελλοντικά θα ήταν ενδιαφέρον να εξετάσουμε επιπλέον τον τύπο κίνησης http και το gaming σχετικά με την επιρροή του radio scheduler ως προς το επιτεύξιμο QoE. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, θα μπορούσαν να γίνουν και κάποιες βελτιώσεις στα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να είναι πιο ρεαλιστικά και να λαμβάνουν υπόψιν τους πιο πολλές παραμέτρους.

Τέλος, τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα μελέτη θα μπορούσαν να αποτελέσουν πρόσφορο έδαφος για το σχεδιασμό και την υλοποίηση καινοτόμων αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού των ραδιοπόρων, οι οποίοι θα χτίζουν πάνω στους υπάρχοντες αλλά θα παρέχουν ένα καλύτερο QoE στους χρήστες.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Sites	Τοποθεσίες
Evolved NodeB / eNodeB / eNB	Σταθμός Βάσης LTE
Bandwidth	Φάσμα
Scheduling	Χρονοπρογραμματισμός
Scheduler	Χρονοπρογραμματιστής
Paging	Σελιδοποίηση
Throughput	Ρυθμαπόδοση
Fairness	Δικαιοσύνη

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

LTE	Long Term Evolution
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
3GPP	Generation Partnership Project
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
MAC	Medium Access Control
RRM	Radio Resource Management
CQI	Channel Quality Indicator
AMC	Adaptive Modulation and Coding
HARQ	Hybrid Automatic Retransmission Request
QoS	Quality of Service
PS	Packet Scheduling
EPS	Evolved Packet System
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
UE	User Equipment
PDN	Packet Data Network
MME	Mobility and Management Entity
QCIs	QoS Class Identifiers
PRBs	Physical Resource Blocks
TTI	Transmission Time Interval,
RB	Resource Block
PDN	Packet Data Network
TDPS	Time Domain Packet Scheduling
FDPS	Frequency Domain Packet Scheduling
RBGs	Resource Block Group
FR	frame rate
FTP	File download
RR	Round Robin

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Ericsson, «"Long Term Evolution(LTE)-An Introduction",» *ts*, June 2009.
- [2] Ericsson, «Ericsson Mobility Report mwc 2015,» 2015.
- [3] 3GPP, «Tech. Specif. Group Radio Access Network - Physical Channel and Modulation (Release 8), 3GPP TS 36.211».
- [4] 3GPP, «"Overview of 3gpp release 8",» 2011.
- [5] 3GPP, «"Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Physical Layer Procedures",» 2010.
- [6] «Overview of 3gpp release 8,» 1 January 2013.
- [7] . F. Capozzi, «Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks: Key Design Issues and a Survey,» *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, τόμ. 15, SECOND QUARTER 2013.
- [8] I. T. U. (ITU), «Overall network operation, telephone service, service operation and human factors,» *ITU-T, Recommendation E.800 Annex B*, Aug. 2008.
- [9] Ms. Pallavi Umesh Naik¹, «Design and Development of Medium Access Control Scheduler in LTE eNodeB,» *International Journal of Computational Engineering Research*, τόμ. 03, αρ. 4, April 2013.
- [10] H. Ekstrom, «"QoS control in the 3GPP evolved packet system",» *IEEE Commun. Mag*, τόμ. 47, π. 76–83, Feb. 2009.
- [11] K. Pathak, «"System, method, and apparatus for measuring application performance management",» 2003.
- [12] . T. Hossfeld, «"Initial delay vs. interruptions: between the devil and the deep blue sea",» *in Proceedings of the 4th International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*, July 2012.
- [13] . T. De Pessemer, «"Quantifying QoE of mobile video consumption in a real-life setting drawing on objective and subjective parameters",» *σε in Proceedings of the IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB '11)*, June 2011.
- [14] . De Pessemer, «"Quantifying the influence of rebuffering interruptions on the user's quality of experience during mobile video watching",» *σε IEEE Transactions on Broadcasting*, 2013.
- [15] F. Wamser, «"Utilizing buffered YouTube playtime for QoE-oriented scheduling in OFDMA networks",» *σε in Proceedings of the 24th International Teletraffic Congress (ITC 24' 12)*, September 2012.
- [16] Dr. Wes McCoy, «Overview of the 3GPP Long Term,» 2007.
- [17] «Tech. Specif. Group Radio Access Network - Physical Channel and Modulation (Release 8), 3GPP TS 36.211».
- [18] N. Kolehmainen, «Channel Quality Indication Reporting Schemes for UTRAN Long Term Evolution Downlink,» *σε IEEE Veh. Tech. Conf., VTC Spring*, Marina Bay, Singapore, May 2008,.
- [19] E. Dahlman, «3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband,» *Academic Press*, 2008.
- [20] R. Love, «Downlink Control Channel Design for 3GPP LTE,» *σε IEEE Wireless Commun. and Net. Conf., WCNC*, Las Vegas, Nevada, USA, Apr. 2008.
- [21] F. Capozzi, «UTRAN LTE Downlink System Performance under Realistic Control Channel Constraints,» *σε IEEE Veh. Tech. Conf VTC-Fall*, Anchorage, Alaska, USA, Sep. 2009..
- [22] 3GPP, «Multiplexing and Channel Coding (Release 10), 3GPP TS 36.212.».
- [23] S. Sesia, «LTE, The UMTS Long Term Evolution: From theory to practice,» *σε John Wiley & Sons*, 2009.
- [24] Kolehmainen, «"Channel Quality Indication Reporting Schemes for UTRAN Long Term Evolution Downlink",» *σε in Proceedings of IEEE Vehicular Technology*, Marina Bay, Singapore, May 2008..
- [25] C. Bontu and E. Illidge, «"DRX mechanism for power saving in LTE",» *"DRX mechanism for power saving in LTE"*, τόμ. 47, pp. 48 –55, Jun. 2009.
- [26] T. Aditya Tiwari IIT Kharagpur, «LONG TERM EVOLUTION (LTE), Verification of MAC Scheduling algorithms in,» 2014.
- [27] . G. Monghal, «QoS Oriented Time and Frequency Domain Packet Scheduler for the UTRAN Long Term Evolution,» *σε IEEE Vehicular technology Conference*, VTC spring, Singapore, 2008.
- [28] . J. Z. R. Kwan, «Proportional Fair Multiuser Scheduling in LTE,» *IEEE Signal Process Letters*, τόμ. 16, June 2009.
- [29] M. Proebster, «Adaptive Fairness Control for a Proportional Fair LTE Scheduler,» *σε Of IEEE*

- Personal Indoor and Mobile Radio Communication, PIMRC*, Istanbul, Turkey, Sep. 2010.
- [30] X. Li, «Adaptive PF Scheduling Algorithm in LTE cellular system,» σε *International Conference on Information and Communication Technology Convergence, ICTC*, Jeju Island, Korea, Nov. 2010.
- [31] . C. Beh, «Joint Time-Frequency Domain Proportional Fair Scheduler with HARQ for 3GPP LTE Systems,» σε *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC-Fall*, Calgary, Alberta, Sep. 2008..
- [32] C. Wengerter, «Fairness and Throughput Analysis for Generalized Proportional Fair Frequency Scheduling in OFDMA,» σε *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC-Spring*, Stockholm, Sweden, May 2005.
- [33] P. Kela, «Dynamic packet scheduling performance in UTRA Long Term Evolution downlink,» σε *International Symposium on Wireless Pervasive Comput.*, Santorini, Greece, May 2008.
- [34] . A. Pokhariyal, «HARQ Aware Frequency Domain Packet Scheduler with Different Degrees of Fairness for the UTRAN Long Term Evolution,» σε *IEEE Veh. Tech. Conf., VTC-Spring*, Dublin, Ireland, Apr. 2007.
- [35] «LTE MAC Scheduler & Radio Resource,» Roke Manor Research Ltd, 2011.
- [36] C. Beh, «Joint Time-Frequency Domain Proportional Fair Scheduler with HARQ for 3GPP LTE Systems,» σε *IEEE Veh. Tech. Conf., VTC-Fall*, Calgary, Alberta, Sep. 2008.
- [37] H. F. a. H. Alnuweiri, «A Cross-layer Design for Dynamic Resource Block Allocation in 3G Long Term Evolution System,» σε *IEEE Mobile Adhoc and Sensor Systems, MASS*, Macau, China, Nov. 2009.
- [38] P. Liu, «Delay-Sensitive Packet Scheduling in Wireless Networks,» σε *IEEE Wireless Communication and Networking Conference. WCNC*, Atlanta, Georgia, USA, Mar. 2003.
- [39] K. Jungsup Song, «Packet-Scheduling Algorithm by the Ratio of Transmit Power to the Transmission Bits in 3GPP LTE Downlink,» *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010.
- [40] G. Seyed Mohamad Alavi, «Efficient Resource Allocation Algorithm for OFDMA Systems with Delay Constraint,» *Computer Communications*, τόμ. 36, p. 421–430, 2013.
- [41] Z. Niu, «Buffer-Aware and Traffic-Dependent Packet Scheduling in Wireless OFDM Networks,» σε *IEEE Wireless Commun., Net. and Mobile Comput., WiCOM*, Dalian, China, Oct. 2008.
- [42] . G. Yue, «“Channel-Adapted and Buffer-Aware Packet Scheduling in LTE Wireless Communication System,» σε *IEEE Wireless Commun., Net. and Mobile Comput., WiCOM*, Dalian, China, Oct. 2008.
- [43] . G. Monghal, «QoS oriented time and frequency domain packet schedulers for the UTRAN long term evolution,» σε *in Proc. IEEE Veh. Tech. Conf., VTC-Spring*, Marina Bay, Singapore, May 2008..
- [44] Y. Zaki, «Multi-QoS Aware Fair Scheduling for LTE,» σε *in Proc. IEEE Veh. Tech. Conf., VTC Spring*, May 2011.
- [45] D. S. a. A. Rouskas, «Scheduling with QoS provisioning in Mobile Broadband Wireless Systems,» σε *in Proc. IEEE European Wireless Conf., EW*, Apr. 2010.
- [46] M. Andrews, «Providing quality of service over a shared wireless link,» *IEEE Commun. Mag*, p. 150–154, Feb. 2001.
- [47] K. Ramanan, «Largest Weighted Delay First Scheduling: Large Deviations and Optimality,» *Annals of Applied Probability*, June 2001.
- [48] Y. Xian Yon-ju, «Analysis of M-LWDF Fairness and an Enhanced MLWDF Packet Scheduling Mechanism,» *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, Aug. 2011.
- [49] . B. Mauricio Iturralde, «Performance Study of Multimedia Services Using Virtual Token Mechanism for resource Allocation in LTE Networks,» σε *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2011.
- [50] -H. Rhee, «Scheduling of Real/non-real Time Services: Adaptive EXP/PF Algorithm,» σε *in Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, VTC-Spring*, Jeju, Korea, Apr. 2003..
- [51] B. Sadiq, «Downlink Scheduling for Multiclass Traffic in LTE,» *Eurasip Journal of Wireless Communication Networks*, τόμ. 2, pp. 9-13, Oct. 2009.
- [52] G. Piro, «“Two level Downlink Scheduling for Real-Time Multimedia Services in LTE Networks,» *in IEEE Trans. Multimedia*, τόμ. 13, p. 1052–1065., Oct. 2011.
- [53] M. Iturralde, «Resource Allocation for Real Time Services Using Cooperative Game Theory and a Virtual Token Mechanism in LTE Networks,» σε *IEEE Personal Indoor Mobile Radio Commun., PIMRC*, Sydney, Australia, Jan. 2012..
- [54] H. Adibah Mohd Ramli, «Resource allocation technique for video streaming applications in the LTE system,» σε *Proc of Wireless and Optical Commun. Conf., WOCC*, May 2010.
- [55] . Sandrasegaran, «Delay-prioritized scheduling DPS for real time traffic in 3gpp lte system,» σε *IEEE Wireless Commun. and Net. Conf., WCNC*, Apr. 2010,.

- [56] J. Puttonen, «Voice-over-IP performance in UTRA long term evolution downlink,» σε *IEEE Veh. Tech. Conf., VTC-Spring*, Marina Bay, Singapore, May 2008..
- [57] 3GPP, «Policy and charging control architecture (Release 9), 3GPP TS 23.203».
- [58] Choi, «MAC Scheduling Scheme for VoIP Traffic Service in 3G LTE,» σε *IEEE Veh. Tech. Conf., VTC-Fall*, Baltimore, MD, USA, Oct. 2007..
- [59] Wang, «Channel adaptive fair queueing for scheduling integrated voice and data services in multicode cdma systems,» σε *IEEE Wireless Commun. and Net., WCNC*, New Orleans, Louisiana, USA,, Mar. 2003.
- [60] Flanire Taboada, «QoE-aware optimization of multimedia flow scheduling,» *Computer Communication*, αρ. 2013.
- [61] «Riverbed. [Online]. Available: <http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/opnet.html?redirect=opnet>,» [Ηλεκτρονικό].
- [62] «OMNeTCC. [Online]. Available: <http://www.omnetpp.org>,» Jan. 2015. [Ηλεκτρονικό].
- [63] «ITCC. [Online]. Available: <http://itpp.sourceforge.net/4.3.1/>,» Mar. 2015. [Ηλεκτρονικό].
- [64] «ns-2. [Online]. Available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>,» Jan. 2015. [Ηλεκτρονικό].
- [65] «ns-3. [Online]. Available: <http://www.nsnam.org/>,» Jan 2015. [Ηλεκτρονικό].
- [66] «GNS3. [Online]. Available: <http://www.gns3.com/>,» Jan. 2015. [Ηλεκτρονικό].
- [67] D. B. R. J. a. M. S. S. Max, «Evaluation of IMT-advanced scenarios using the open wireless network simulator,» σε *in Proc. Int. ICST Conf. Simulation Tools Techn.*, Torremolinos, Spain, Mar. 2010,.
- [68] «Hurricane II WAN Emulation and Network Simulation. [Online]. Available: <http://packetstorm.com/packetstorm-products/hurricane-ii-software>,» Jan. 2015. [Ηλεκτρονικό].
- [69] C Mehlführer, «Experimental evaluation of adaptive modulation and coding in MIMO WiMAX with limited feedback.,» *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*,, 2008.
- [70] Josep Colom Ikuno, «Accurate SINR Estimation Model for System Level Simulation of LTE Networks,» Ottawa, Canada, 2012.
- [71] K. Brueninghaus, «Link performance models for system level simulations of broadband radio access systems,» σε *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC2005)*,, Berlin, Germany, Sept. 2005.
- [72] A. Institute of Telecommunications Vienna University of Technology, «Vienna LTE Simulators System Level Simulator Documentation, v1.8r1375».
- [73] D. Astely and E. Dahlman, «“LTE: the evolution of mobile broadband,,”» *Communications Magazine*,, τόμ. 47, pp. 44-51, 2009.
- [74] Peiwen Tang, «QoE-Based Resource Allocation Algorithm for Multi-Applications in Downlink LTE Systems,» *International Conference on Computer, Communications and Information Technology*, CCIT 2014.
- [75] Díaz, «“Customer-centric measurements on mobile phones”,» σε *in Proceedings on 12th IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ICSE '08)*, 2008.
- [76] . Fiedler, «A generic quantitative relationship between quality of experience and quality of service,» *IEEE Network*, 2010.
- [77] Z. Fei Liu, «A Novel QoE-Based Carrier Scheduling Scheme in LTE-Advanced Networks with Multi-Service,» 2012.
- [78] Khan, «Quality of experience driven adaptation scheme for video applications over wireless networks,» 2010.
- [79] P. Ameigeiras, «QoE oriented cross-layer design of a resource allocation algorithm in beyond 3G systems,» 2010.
- [80] B. M. SajidMushtaq, «QoE/QoS-aware LTE downlink scheduler for VoIP with power saving,» 2015.
- [81] G.107, «The E-model, a computational model for use in transmission planning,» 2005.