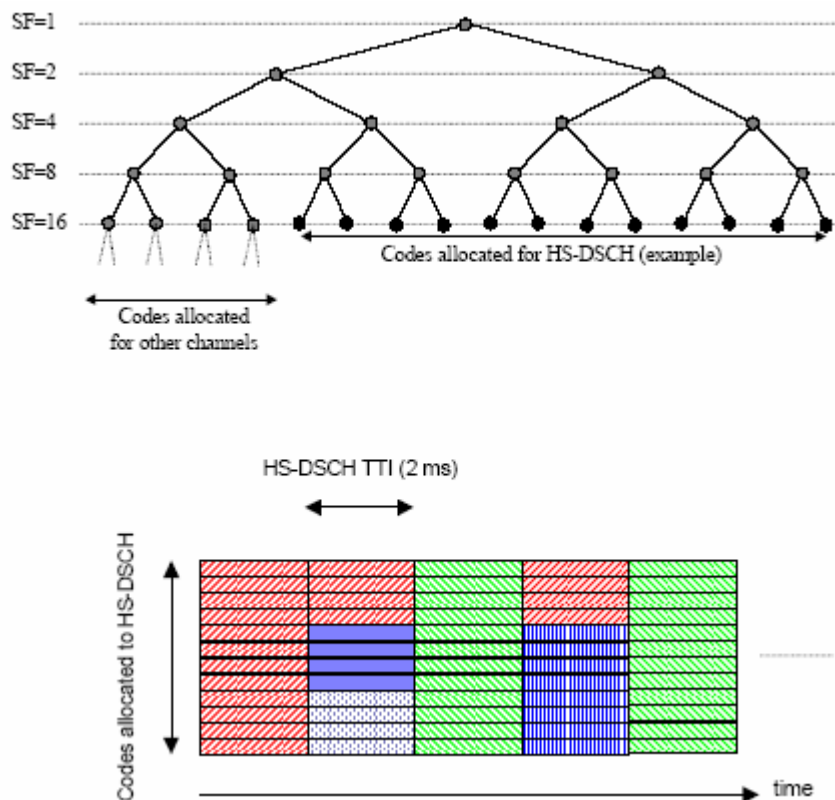


Μεταπτυχιακή Διατριβή

« *Robust Scheduling for Real-Time and Non-Real-Time Traffic in UMTS systems employing HSDPA* »



Μεταπτυχιακή διατριβή του
Γουγούση Αλέξανδρου

Επιβλέπων καθηγητής:
Πατεράκης Μιχάλης

Πολυτεχνείο Κρήτης
Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών
Χανιά - Νοέμβριος 2005

Περίληψη

Η τρίτη γενιά (3G) δικτύων κινητής τηλεφωνίας αποτελεί την εξέλιξη των απλών δικτύων κινητής τηλεφωνίας σε υψηλών επιδόσεων δίκτυα κινητών υπηρεσιών, πέραν της απλής τηλεφωνίας. Η ευρωπαϊκή, και όχι μόνο, πρόταση στα δίκτυα τρίτης γενιάς ακούει στο όνομα UMTS. Η πράξη έχει δείξει ότι τα UMTS δίκτυα τρίτης γενιάς μπορούν να προσφέρουν σε μεμονωμένο χρήστη ρυθμούς οι οποίοι θεωρητικά αγγίζουν τα 384 Kbps (στην πράξη οι ρυθμοί που επιτυγχάνονται είναι της τάξης των 200 Kbps) και μόνο σε περιπτώσεις χαμηλού δικτυακού φορτίου. Οι ρυθμοί αυτοί απέχουν πολύ από το στόχο των 2 Mbps που έχει θέσει το IMT-2000. Από τη μία, η καταγιστική φύση πολλών υπηρεσιών τρίτης γενιάς οδηγεί σε πολύ μικρή αξιοποίηση της χωρητικότητας του καναλιού και από την άλλη, η εισαγωγή ενός πλήθους νέων υπηρεσιών με τον κύριο όγκο τους να διακινείται στο κανάλι καθόδου οδηγεί σε σημαντική αύξηση των απαιτήσεων σε χωρητικότητα του καναλιού καθόδου. Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων έχει προταθεί η HSDPA αρχιτεκτονική, η οποία στοχεύει σε μια σημαντική αύξηση της ρυθμαπόδοσης στο κανάλι καθόδου μιας UMTS κυψέλης και αυξημένες δυνατότητες διαχείρισης καταγιστικών υπηρεσιών. Η αρχιτεκτονική αυτή, η οποία αναβαθμίζει τα δίκτυα σε 3.5G, στηρίζεται σε τρεις νέες τεχνολογικές καινοτομίες. Την προσαρμογή των τεχνικών κωδικοποίησης και διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται κατά την μετάδοση ανάλογα με την κατάσταση της ζεύξης (Link Adaptation), τον συνδυασμό της πληροφορίας από επανεκπομπές με την πληροφορία από την αποτυχημένη αρχική εκπομπή ενός πακέτου (HARQ) και εξυπνότερες τεχνικές χρονοδρόμησης οι οποίες εκμεταλλεύονται τις μεταβολές στην κατάσταση της ζεύξης κάθε χρήστη (Channel-Aware Scheduling). Οι νέες αυτές τεχνικές σε συνδυασμό με την ιδέα ενός διαμοιραζόμενου καναλιού, η οποία προϋπήρχε στο UMTS, οδηγούν σε ρυθμούς μετάδοσης οι οποίοι μπορεί να φθάσουν τα 14.4 Mbps και ιδιαίτερα αποδοτική αξιοποίηση της χωρητικότητας του καναλιού. Ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα στην αποδοτική πολυπλεξία των διαφόρων υπηρεσιών. Φυσικά, η ποικιλομορφία και δυναμικότητα που αναμένεται να εμφανίσει η δικτυακή κίνηση στα δίκτυα τρίτης γενιάς, καθώς και η ανάγκη για την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσιών στους χρήστες, ανεβάζει ψηλά τον πήχη των απαιτήσεων στις επιδόσεις ενός αλγορίθμου χρονοδρομολόγησης. Η εργασία αυτή μελετά το θέμα της χρονοδρομολόγησης σε UMTS κυψέλες οι οποίες υλοποιούν την HSDPA αρχιτεκτονική καθώς και την επίδραση κάποιων παραμέτρων λειτουργίας της HSDPA αρχιτεκτονικής στις επιδόσεις των αλγορίθμων. Στο 1^ο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια σύντομη περιγραφή του UMTS και του WCDMA. Στο κεφάλαιο 2 περιγράφουμε την HSDPA αρχιτεκτονική, ενώ στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια περιγραφή του προσομοιωτή που αναπτύξαμε για μια κυψέλη η οποία υλοποιεί την HSDPA. Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μια εισαγωγή σε θέματα χρονοδρομολόγησης και στην συνέχεια μελετώνται οι επιδόσεις Best-Effort αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης. Στο κεφάλαιο 5 μελετάμε τις επιδόσεις QoS-based αλγορίθμων και ταυτόχρονα προτείνουμε ένα νέο αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης επιδεικνύοντας την βελτιωμένη συμπεριφορά που παρουσιάζει αυτός σε σχέση με παλιότερους αλγορίθμους. Στο κεφάλαιο 6 μελετάμε την επίδραση κάποιων παραμέτρων λειτουργίας του HSDPA στις επιδόσεις των αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης. Τέλος, στο κεφάλαιο 7 περιέχονται κάποια γενικά συμπεράσματα καθώς και κάποιες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Overview

3rd Generation (3G) of cellular telephony networks comprises the evolution of the well known, till this moment, 2G cellular telephony networks into high performance mobile cellular networks, supporting services beyond classical circuit switched telephony. The European, and not only, proposal for 3G networks architecture listens to the name UMTS. Theoretical results have been shown that UMTS 3G networks can offer to a single user data rates up to 384 Kbps, but only in theory. In practice, data rates that can be achieved are located at about 200 Kbps and only in case of a low cell traffic load. These rates are far away from the 2 Mbps goal that has been set by IMT-2000. On the one side, bursty nature of many 3G services leads to a very low utilization factor of downlink channel capacity, and on the other side, the introduction of a wide set of new services with great BW demands for downlink throughput and minor demands for uplink throughput creates a great need for increased downlink capacity. As a solution to these problems, HSDPA architecture has been proposed, which aims at a significant increase in downlink throughput for a UMTS cell and increased capability in handling bursty services. HSDPA, which upgrades 3G cellular networks to 3.5G networks, is based on three new technological innovations. The adaptation of modulation and coding techniques, used for each transmission, to the instantaneous link state (Link Adaptation), the combination a current retransmission with previous unsuccessful transmissions of a frame (HARQ) and smarter scheduling algorithms which take advantage of each user's link-state variations (Channel-Aware Scheduling). These new techniques, in combination with the idea of a shared channel, which coexisted in UMTS, can lead to transmission rates up to 14.4 Mbps and exceptionally good utilization of downlink capacity. The scheduling algorithm comprises a very important factor in efficient multiplexing of various packet based services. Of course, the variety and variability of network traffic in 3G networks and the need for QoS preservation for each user, brings forth the demand for a highly efficient scheduling algorithm. This thesis study the issue of scheduling in UMTS cells which employ the HSDPA architecture and the effect of some HSDPA parameters on the performance of scheduling algorithms. In chapter 1 of these thesis there is a short description of UMTS and WCDMA. In chapter 2, we describe the HSDPA architecture, while in chapter 3 we describe the simulator that has been developed for a single HSDPA cell. Chapter 4 includes an introduction in scheduling issues and a study of a set of Best-Effort algorithms. In chapter 5 we study the performance of QoS-based scheduling algorithms and we propose a new scheduling algorithm, demonstrating its improved behavior in contrast to other algorithms proposed in the past. In chapter 6 we study the effect of some HSDPA operation parameters in the performance of the scheduling algorithm. Finally, chapter 7 contains some general conclusions and some directions for future work.

Ευχαριστίες

Η μεταπτυχιακή αυτή διατριβή είναι το αποτέλεσμα της κύριας μελέτης μου κατά την συμμετοχή μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα του τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (ΗΜΜΥ) του Πολυτεχνείου Κρήτης τα δύο τελευταία χρόνια. Η διατριβή αυτή εκπονήθηκε παράλληλα με την παρακολούθηση μεταπτυχιακών μαθημάτων, με σκοπό την απόκτηση ενός Μ.Δ.Ε. Η μελέτη και έρευνα του αντικειμένου της διατριβής έγινε κάτω από την επίβλεψη του καθηγητή Μιχάλη Πατεράκη. Η επιλογή του θέματος ήταν για μένα πρωτεύουσας σημασίας και αυτό, όπως αποδείχθηκε στην συνέχεια, με βοήθησε στο να αποκτήσω μια σφαιρική άποψη σε αρκετά θέματα που αφορούν τις ασύρματες επικοινωνίες, και όχι μόνο, πέραν του προβλήματος της χρονοδρομολόγησης. Επίσης, κατά την διάρκεια των σπουδών μου στο τμήμα ΗΜΜΥ μου δόθηκε η ευκαιρία συμμετοχής σε διεθνή συνέδρια και επαφής με ανθρώπους της ερευνητικής κοινότητας από όλο τον κόσμο.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Πατεράκη Μιχάλη για την συνεργασία και βοήθεια που μου προσέφερε σε όλους τους τομείς κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Επίσης, ευχαριστώ τους καθηγητές Αθανάσιο Λιάβα και Νίκο Σιδηρόπουλο, τον διδάσκοντα Π.Δ 407 Πολυχρόνη Κουτσάκη καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Ελευθέριο Καριπίδη για την βοήθεια και τις υποδείξεις τους στην κατανόηση τεχνικών θεμάτων και θεμάτων προσομοίωσης κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου. Ακόμα, ευχαριστώ και τον καθηγητή κ.Ποταμιάνο για τον χρόνο που αφιέρωσε για την ανάγνωση της διατριβής αυτής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την οικονομική και ηθική συμπαράστασή τους καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή στο UMTS και το WCDMA	1
1.1	Εισαγωγή στο UMTS	1
1.2	Εισαγωγή στο WCDMA	5
1.3	Κανάλια επικοινωνίας στο WCDMA	7
1.4	Υπηρεσίες δικτύων τρίτης γενιάς	9
2	Περιγραφή της HSDPA αρχιτεκτονικής	13
2.1	Εισαγωγή	13
2.2	Βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής	14
2.3	Κανάλια που χρησιμοποιεί η αρχιτεκτονική	19
2.3.1	Γενική περιγραφή	19
2.3.2	HSDPA Downlink Code Budget	20
2.3.3	Το HS-SCCH κανάλι	21
2.3.4	Το HS-DPCCH κανάλι	23
2.3.5	Το HS-DSCH κανάλι	24
2.3.6	Σειρά εκτέλεσης λειτουργιών στο HSDPA	26
2.3.7	Μέθοδοι προσαρμογής της ζεύξης	27
2.4	Αλλαγές στην αρχιτεκτονική του WCDMA	27
2.5	Δυνατότητες των HSDPA τερματικών	30
2.6	Ισχύς λήψης σήματος στο HS-DSCH κανάλι	31
3	Προσομοίωση της HSDPA αρχιτεκτονικής	35
3.1	Βασικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες του προσομοιωτή	35
3.2	Λειτουργικά διαγράμματα προσομοιωτή	38
3.3	Λεπτομέρειες υλοποίησης	43
3.3.1	Υπολογισμός του μέσου λαμβανόμενου SINR κάθε χρήστη	43
3.3.2	Υπολογισμός του Path Loss στο Link Budget	45
3.3.3	Υλοποίηση των μεταβολών του καναλιού	45
3.3.4	Υλοποίηση του μηχανισμού εκτίμησης καναλιού	47
3.3.5	Υλοποίηση του μηχανισμού HARQ	47
3.3.6	Υπολογισμός της πιθανότητας επιτυχούς μετάδοσης	47
3.3.7	Διαχείριση των καταχωρητών	48
3.3.8	Αντιστοίχιση του λαμβανόμενου Es/No σε κάποιο MCS	48
3.3.9	Επιλογή παραμέτρων λειτουργίας	49
4	Best Effort Χρονοδρομολόγηση	52
4.1	Εισαγωγή στη χρονοδρομολόγηση	52
4.2	Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης	53
4.3	Best-Effort αλγόριθμοι	54
4.3.1	Παρουσίαση αλγορίθμων	54
4.3.2	Σχολιασμός αλγορίθμων	55
4.4	Προσομοιώσεις	57
4.4.1	Σύγκριση αλγορίθμων κάτω από FTP κίνηση	57
4.4.2	Συμπεριφορά του Max C/I σε καταιγιστική κίνηση	60
4.4.3	Σύγκριση αλγορίθμων κάτω από καταιγιστική κίνηση	65
4.5	Γενική κριτική Best-Effort αλγορίθμων	66
5	QoS-based Χρονοδρομολόγηση	69
5.1	Εισαγωγή	69
5.2	1 ^η γενιά QoS-based αλγορίθμων	69
5.2.1	Δομή αλγορίθμων 1 ^{ης} γενιάς	69
5.2.2	Βασικότεροι εκπρόσωποι 1 ^{ης} γενιάς	70

5.2.3 Σύγκριση αλγορίθμων 1 ^{ης} γενιάς	72
5.3 Εξάρτηση αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης.....	74
5.4 Βασικές αρχές σχεδίασης QoS-based αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης.....	75
5.5 Περιγραφή QoS απαιτήσεων για RT και NRT υπηρεσίες	76
5.6 2 ^η γενιά QoS-based αλγορίθμων	77
5.6.1 Παλιότεροι αλγόριθμοι	77
5.6.2 Προτεινόμενος αλγόριθμος (α).....	79
5.6.2.1 Βασική μορφή αλγορίθμου	79
5.6.2.2 Κίνητρο ανάπτυξης	80
5.6.2.3 Προσομοιώσεις κάτω από NRT κίνηση.....	82
5.6.3 Προτεινόμενος αλγόριθμος (β).....	86
5.6.3.1 Τροποποιήσεις της βασικής μορφής	86
5.6.3.2 Κίνητρο ανάπτυξης	86
5.6.3.3 Προσομοιώσεις κάτω από συνδυασμένη RT και NRT κίνηση	89
5.6.3.4 Προσομοιώσεις κάτω από RT κίνηση	92
5.6.4 Γενικά συμπεράσματα	94
5.7 Γενίκευση της μορφής των QoS-based αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης	96
5.8 Βελτιστότητα ρυθμαπόδοσης (Throughput Optimality)	98
6 Ανάλυση των παραμέτρων λειτουργίας του HSDPA	101
6.1 Καθορισμός της διαμέτρου της κυψέλης	101
6.2 Κατανομή της μέσης ισχύς λήψης μέσα στην κυψέλη..	102
6.3 Επίδραση των σφαλμάτων εκτίμησης της λαμβανόμενης ισχύς στις επιδόσεις των αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης	103
6.4 Επίδραση της ταχύτητας χρήστη στις επιδόσεις των αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης.	104
6.5 Επίδραση της ακτίνας της κυψέλης στις επιδόσεις της HSDPA	106
7 Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις	109
7.1 Συμπεράσματα	109
7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις	109
Συντομογραφίες	111
Βιβλιογραφία / Αρθρογραφία	112
Παράρτημα Α Παράμετροι προσομοίωσης	115
Παράρτημα Β Jake's Implementation of Clarke's Model for Rayleigh Fading Channels	117
Παράρτημα Γ Μοντελοποίηση του Hybrid-ARQ στο HSDPA	119
Παράρτημα Ε Πίνακες με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων	120

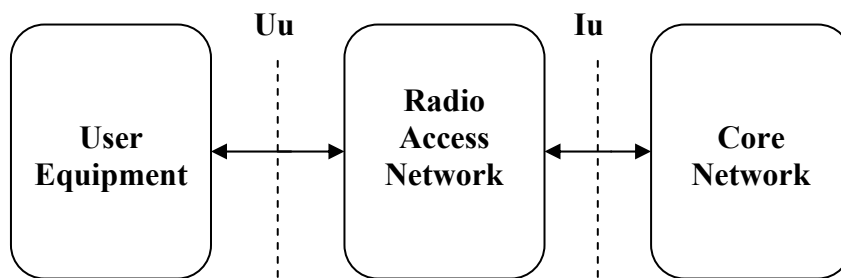
1 Εισαγωγή στο UMTS και το WCDMA

1.1 Εισαγωγή στο UMTS

Το UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) είναι ένα από τα συστήματα κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της ITU (International Telecommunications Union) από μια συνεργασία αρκετών οργανισμών γνωστή ως 3GPP (Third Generation Partnership Project). Μεταξύ άλλων, στην 3GPP συμμετέχουν οι οργανισμοί προτυποποίησης για θέματα τηλεπικοινωνιών της Ευρώπης ETSI (European Telecommunications Standards Institute) και της Ιαπωνίας ARIB (Association of Radio Industry Business). Ο ρόλος του UMTS είναι επεκτείνει τις δυνατότητες των σημερινών δικτύων κινητής τηλεφωνίας (2G) ώστε να υποστηρίξουν μεγαλύτερο αριθμό χρηστών καθώς και μια ευρεία γκάμα από νέες υπηρεσίες, γνωστές και ως υπηρεσίες τρίτης γενιάς.

Τα κύρια στοιχεία της αρχιτεκτονικής του UMTS είναι, όπως και στα περισσότερα κυψελωτά δίκτυα, τρία. Ο εξοπλισμός χρήστη (User Equipment ή UE), το δίκτυο ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network ή RAN) και το δίκτυο κορμού (Core Network ή CN). Το δίκτυο ραδιοπρόσβασης του UMTS ονομάζεται UTRAN (UMTS Terrestrial RAN).

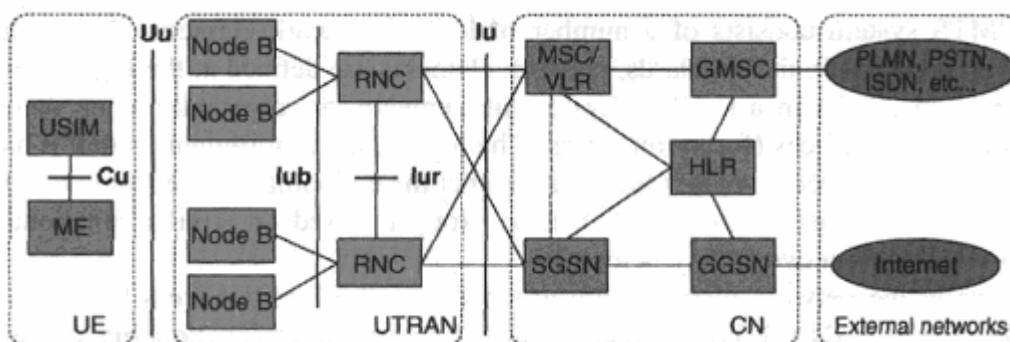
Μια γενική άποψη της αρχιτεκτονικής από πλευράς λειτουργικότητας φαίνεται στην εικόνα 1.1:



Εικόνα 1.1 : Τμήματα της αρχιτεκτονικής του UMTS

* *Uu και Iu είναι οι διεπαφές επικοινωνίας μεταξύ των στοιχείων της UMTS αρχιτεκτονικής.*

Μια πιο αναλυτική άποψη των δικτυακών στοιχείων που υλοποιεί η αρχιτεκτονική του UMTS φαίνεται στην εικόνα 1.2:



Εικόνα 1.2 : Λειτουργικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του UMTS

Μια σύντομη εξήγηση των στοιχείων που το αποτελούν και της κύριας λειτουργίας αυτών παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω:

Mobile Equipment (ME) : Το τερματικό χρήστη/συνδρομητή που χρησιμοποιείται για την ραδιοεπικοινωνία πάνω από το Uu interface.

UMTS Subscriber Identity Module (USIM) : Είναι μια “έξυπνη κάρτα” που κρατά το αναγνωριστικό συνδρομητή, εκτελεί αλγορίθμους αυθεντικοποίησης (authentication) και αποθηκεύει τα κλειδιά αυθεντικοποίησης και κρυπτογράφησης καθώς και κάποιες πληροφορίες σχετικά με τα δικαιώματα του συνδρομητή, οι οποίες χρησιμοποιούνται από το τερματικό.

Node B : Μετατρέπει την ροή πληροφορίας μεταξύ των Iub και Uu interfaces. Επίσης, συμμετέχει στην διαχείριση των ραδιοπόρων. Στην ουσία το Node B είναι το ίδιο με το BSC ενός GSM δικτύου. Ο γενικότερος όρος “σταθμός βάσης” μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά για να αναφερθούμε στο Node B.

Radio Network Controller (RNC) : Κατέχει και ελέγχει τους ραδιοπόρους στην περιοχή του (στα Node B που είναι συνδεδεμένα με αυτό). Το RNC είναι το σημείο πρόσβασης υπηρεσιών για όλες τις υπηρεσίες τις οποίες το UTRAN παρέχει στο CN.

Home Location Register (HLR) : είναι μια βάση δεδομένων στο home system του χρήστη όπου αποθηκεύεται το κύριο αντίγραφο του προφίλ υπηρεσιών του χρήστη (επιτρεπόμενες υπηρεσίες, απαγορευμένες περιοχές για roaming, κατάσταση προώθησης κλήσης, κ.λ.π)

Mobile Services Switching Centre/Visitor Location Register (MSC/VLR) : είναι ο μεταγωγέας και η βάση δεδομένων που εξυπηρετεί το UE στην τρέχουσα περιοχή του για υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος. Η VLR λειτουργία είναι να κρατά ένα αντίγραφο του προφίλ υπηρεσιών του χρήστη όπως και μερικές πιο ακριβείς πληροφορίες για την τοποθεσία του χρήστη εντός του συστήματος που τον εξυπηρετεί. Η περιοχή του δικτύου στην οποία η πρόσβαση γίνεται μέσω του MSC/VLR συχνά αναφέρεται ως περιοχή CS (Circuit Switched)

Gateway MSC (GMSC) : Είναι ο μεταγωγέας στο σημείο που το UMTS συνδέεται με εξωτερικά δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος. Όλες οι εισερχόμενες ή εξερχόμενες συνδέσεις μεταγωγής κυκλώματος διέρχονται από το GMSC.

Serving GPRS Support Node (SGSN) : Η λειτουργία αυτού του στοιχείου είναι παρόμοια με αυτή του MSC/VLR αλλά τυπικά χρησιμοποιείται για υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου. Η περιοχή του δικτύου στην οποία η πρόσβαση γίνεται μέσω του GMSC συχνά αναφέρεται ως περιοχή PS (Packet Switched).

Gateway GPRS Support Node (GGSN) : Η λειτουργία αυτού του στοιχείου είναι παρόμοια με αυτή του GMSC αλλά αναφέρεται σε υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου.

Ένα RNC ως προς τη σχέση του με ένα Node B μπορεί να χαρακτηριστεί ως :

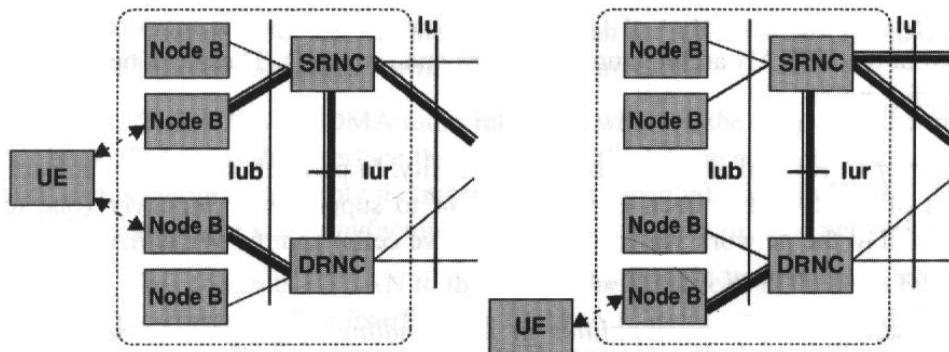
Controlling RNC (CRNC) : ενός Node B ονομάζεται το RNC στο οποίο ανήκει το Node B (το RNC στο οποίο τερματίζεται το Iub interface του Node B).

Τα RNC ως προς την σχέση τους με ένα κινητό σταθμό διαχωρίζονται σε:

Serving RNC (SRNC): Είναι το RNC το οποίο κατέχει τον κύριο έλεγχο της επικοινωνίας του χρήστη με το δίκτυο κορμού. Στο SRNC ενός χρήστη τερματίζεται η Iu ζεύξη του χρήστη καθώς και η RANAP σύνδεση (σηματοδότησης) από και προς το δίκτυο κορμού για

τον χρήστη αυτό. Επίσης, αποτελεί και σημείο τερματισμού της Radio Resource Control (RRC) σηματοδότησης. Το SRNC μπορεί επίσης να είναι (αν και όχι πάντα) το CRNC ενός Node B που χρησιμοποιείται από το κινητό για σύνδεση με το UTRAN. Ένα UE συνδεδεμένο στο UTRAN έχει ένα και μοναδικό SRNC.

Drift RNC (DRNC): Είναι οποιοδήποτε άλλο RNC εκτός από το SRNC που ελέγχει κυψέλες οι οποίες χρησιμοποιούνται από το κινητό σταθμό (εικόνα 1.3). Αν χρειάζεται παρέχει λειτουργίες macro diversity combining and splitting. Δεν κάνει layer-2 processing αλλά κάνει διάφανη δρομολόγηση των δεδομένων χρήστη μέσω των Iub και Iur interfaces, εκτός από την περίπτωση που το UE κάνει χρήση ενός κοινού ή διαμοιραζόμενου καναλιού μεταφοράς. Ένα UE μπορεί να έχει κανένα, ένα ή περισσότερα DRNCs.



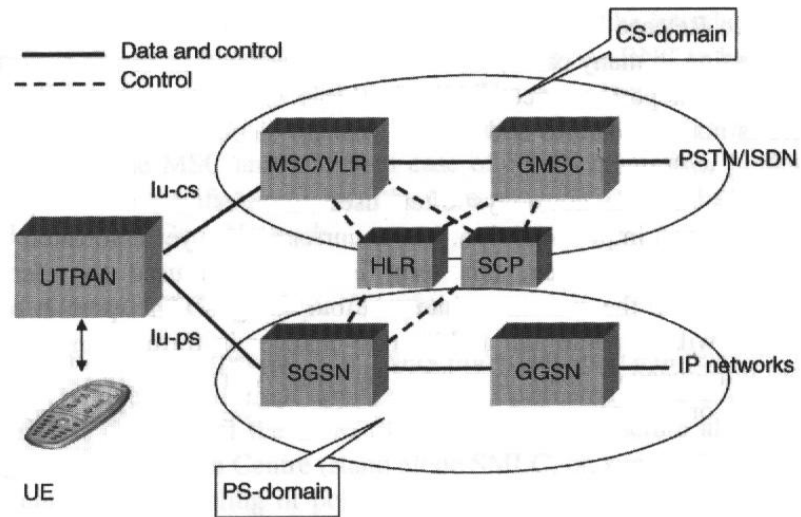
Εικόνα 1.3 : Συσχέτιση χρήστη με διάφορα RNC

Οι κύριες αρμοδιότητες των RNC και Node-B φαίνονται στα παρακάτω πλαίσια:

RNC Responsibilities	Node B Responsibilities
<ol style="list-style-type: none"> 1.) Load control 2.) Congestion control 3.) Admission control 4.) Code allocation 5.) Handover decision 6.) Outer-loop power control 7.) Mapping of RAB parameters into air-interface transport channel parameters 8.) L2 processing 	<ol style="list-style-type: none"> 1.) L1 processing <ul style="list-style-type: none"> - channel coding - channel interleaving - rate adaptation - spreading 2.) Basic Radio Resource Management Operations <ul style="list-style-type: none"> - inner-loop power control

Όπως φαίνεται, σχεδόν όλες οι αποφάσεις σχετικά με την διαχείριση πόρων στο ραδιοδίκτυο πρόσβασης λαμβάνονται από το RNC, ενώ το Node-B έχει ως κύρια λειτουργία την απαραίτητη επεξεργασία του σήματος σε φυσικό επίπεδο.

Τα εξωτερικά δίκτυα στα οποία μπορεί να συνδέεται το δίκτυο κορμού του UMTS χωρίζονται σε δίκτυα που παρέχουν συνδέσεις μεταγωγής κυκλώματος (Circuit Switched ή CS), όπως το PSTN και το ISDN, και σε δίκτυα που παρέχουν συνδέσεις μεταγωγής πακέτου (Packet Switched ή PS), όπως το Internet. Η δόμηση του δικτύου κορμού του UMTS ως προς το είδος της υπηρεσίας που πρόκειται να εξυπηρετηθεί (CS ή PS) φαίνεται στην εικόνα 1.4:



Εικόνα 1.4 : Πρόσβαση του UTRAN σε δίκτυα μεταγωγής πακέτου και κυκλώματος

Μια συνοπτική περιγραφή του UMTS μπορεί να βρει κανείς στο [1], για περισσότερες λεπτομέρειες παραπέμπουμε στο [2], ενώ μια πιο αναλυτική περιγραφή των λειτουργιών και της αρχιτεκτονικής του UMTS μπορεί να βρεθεί στο [3].

1.2 Εισαγωγή στο WCDMA

Το WCDMA αποτελεί το air-interface του UMTS. Η τεχνική πρόσβασης που χρησιμοποιεί το WCDMA είναι το Direct Sequence Code Division Multiple Access (DS-CDMA). Τα βασικότερα χαρακτηριστικά και παράμετροι λειτουργίας του WCDMA [4] δίνονται στην εικόνα 1.5. Η πληροφορία προς μετάδοση απλώνεται σε ένα εύρος φάσματος που συνήθως είναι 5 MHz, εξ' ου και η ονομασία Wideband-CDMA.

Channel bandwidth	1.25, 5, 10, 20 MHz
Downlink RF channel structure	Direct spread
Chip rate	(1.024) ^a /4.096/8.192/16.384 Mc/s
Roll-off factor for chip shaping	0.22
Frame length	10 ms/20 ms (optional)
Spreading modulation	Balanced QPSK (downlink) Dual channel QPSK (uplink) Complex spreading circuit
Data modulation	QPSK (downlink) BPSK (uplink)
Coherent detection	User dedicated time multiplexed pilot (downlink and uplink); no common pilot in downlink
Channel multiplexing in uplink	Control and pilot channel time multiplexed I&Q multiplexing for data and control channel
Multirate	Variable spreading and multicode
Spreading factors	4–256
Power control	Open and fast closed loop (1.6 kHz)
Spreading (downlink)	Variable length orthogonal sequences for channel separation Gold sequences 2^{18} for cell and user separation (truncated cycle 10 ms)
Spreading (uplink)	Variable length orthogonal sequences for channel separation, Gold sequence 2^{41} for user separation (different time shifts in I and Q channel, truncated cycle 10 ms)
Handover	Soft handover Interfrequency handover
^a In the ARIB WCDMA proposal a chip rate of 1.024 Mc/s has been specified, whereas in the ETSI WCDMA is has not.	

Εικόνα 1.5 : Παράμετροι του WCDMA

Αν και ο ρυθμός αυτός δεν προβλεπόταν στις αρχικές επιλογές για το WCDMA, τελικά το chip rate που επικράτησε ήταν τα 3.84 Mcps.

Για το WCDMA έχουν προβλεφθεί δύο καταστάσεις λειτουργίας [4]:

FDD: Οι εκπομπές των καναλιών ανόδου και καθόδου μεταφέρονται σε ξεχωριστά τμήματα του φάσματος. Ένα ζευγάρι τέτοιων φασματικών τμημάτων με συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους, εκχωρείται σε κάθε σύνδεση που εγκαθίσταται από το ραδιοδίκτυο.

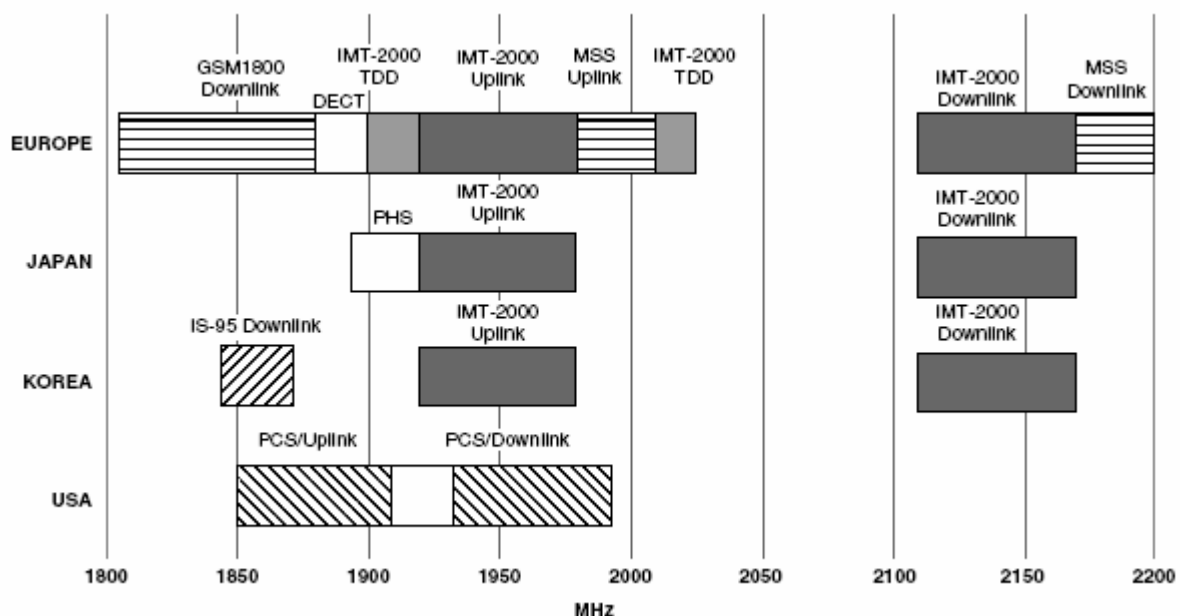
TDD: Οι εκπομπές των καναλιών ανόδου και καθόδου μεταφέρονται στην ίδια φασματική περιοχή με χρήση συγχρονισμένων χρονικών διαστημάτων (χρονοθυρίδων). Οι χρονοθυρίδες ενός φυσικού καναλιού χρησιμοποιούνται είτε για την μετάδοση είτε για την λήψη από ένα τερματικό.

** Η παρούσα διατριβή ασχολείται με την FDD έκδοση του WCDMA.*

Οι κύριες διαφορές του WCDMA με το GSM δίκτυο δεύτερης γενιάς είναι οι εξής:

- Η απόσταση μεταξύ των φορέων (carrier spacing) είναι 5 MHz (WCDMA) αντί για 200 KHz (GSM).
- Το Frequency reuse factor στο GSM κυμαίνεται από 1 έως 18 (όσο πιο πυκνό είναι το δίκτυο τόσο μεγαλύτερος και ο συντελεστής) ενώ στο WCDMA είναι 1.
- Η χρονοδρομολόγηση υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου στο GSM (GPRS) γίνεται ανάλογα με το σε ποιόν χρήστη ανήκει η τρέχουσα χρονοθυρίδα, ενώ στο WCDMA ανάλογα με το φορτίο κάθε χρήστη.
- Η συχνότητα ελέγχου ισχύος είναι 2 Hz ή μικρότερη στο GSM και 1500 Hz στο WCDMA.
- Ο έλεγχος της ποιότητας (Quality Control) του δικτύου στο GSM γίνεται στατικά με κατάλληλο network planning (frequency planning) ενώ στο WCDMA δυναμικά με αλγορίθμους διαχείρισης των ραδιοπόρων.

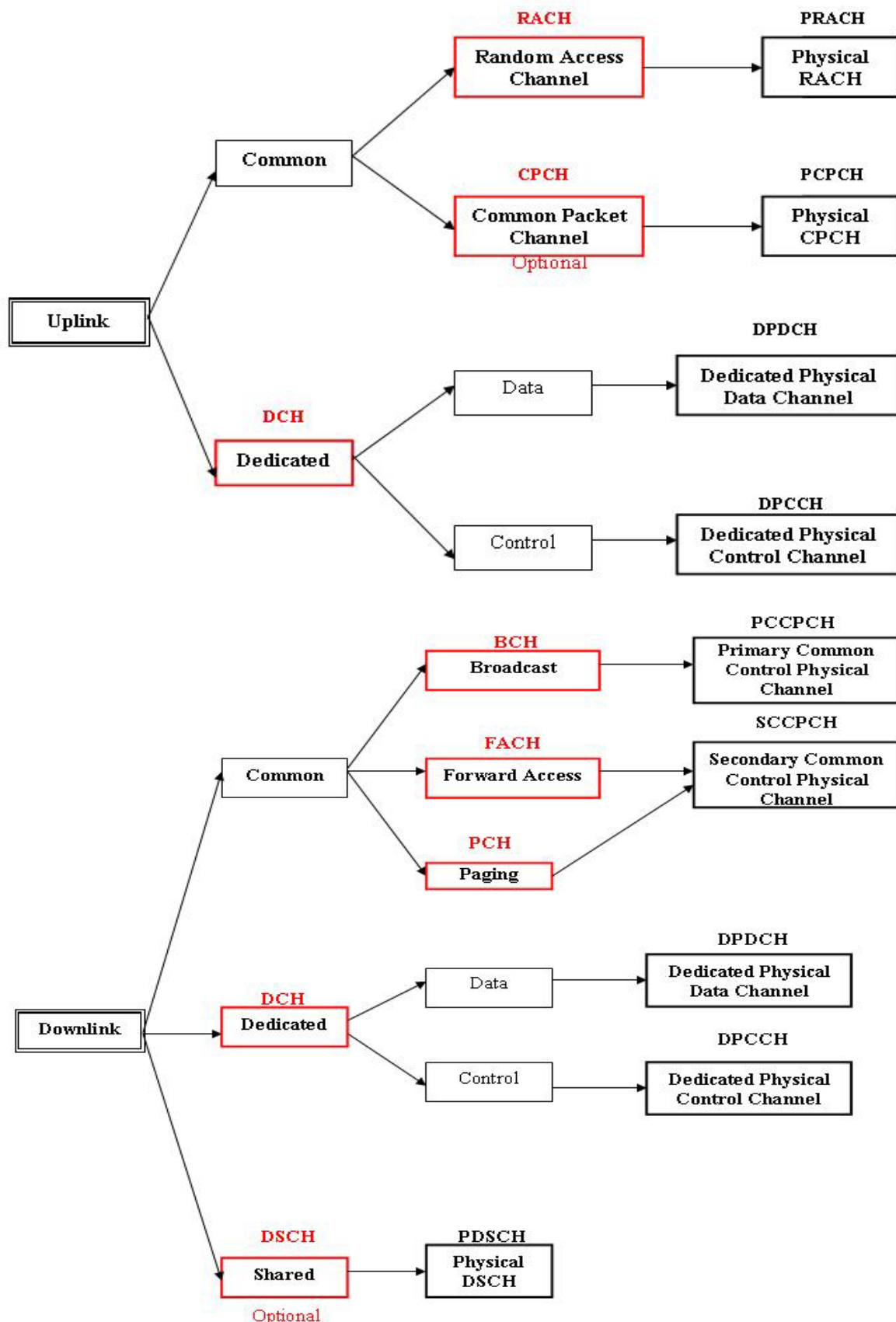
Οι περιοχές του φάσματος στις οποίες θα εφαρμοστεί το WCDMA εξαρτώνται από τις περιοχές του φάσματος οι οποίες έχουν δεσμευτεί για τα δίκτυα τρίτης γενιάς (IMT-2000) σε κάθε περιοχή του κόσμου και οι οποίες φαίνονται στο σχήμα της εικόνας 1.6 [2]:



Εικόνα 1.6 : Εκχώρηση της φασματικής περιοχής των 2 GHz σε Ευρώπη, Ιαπωνία, Κορέα και USA

1.3 Κανάλια επικοινωνίας στο WCDMA

Τα κανάλια επιπέδου μεταφοράς (κόκκινο χρώμα) τα οποία χρησιμοποιεί το WCDMA καθώς και τα κανάλια φυσικού επιπέδου (μαύρο χρώμα) στα οποία αντιστοιχούν παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα [2]:



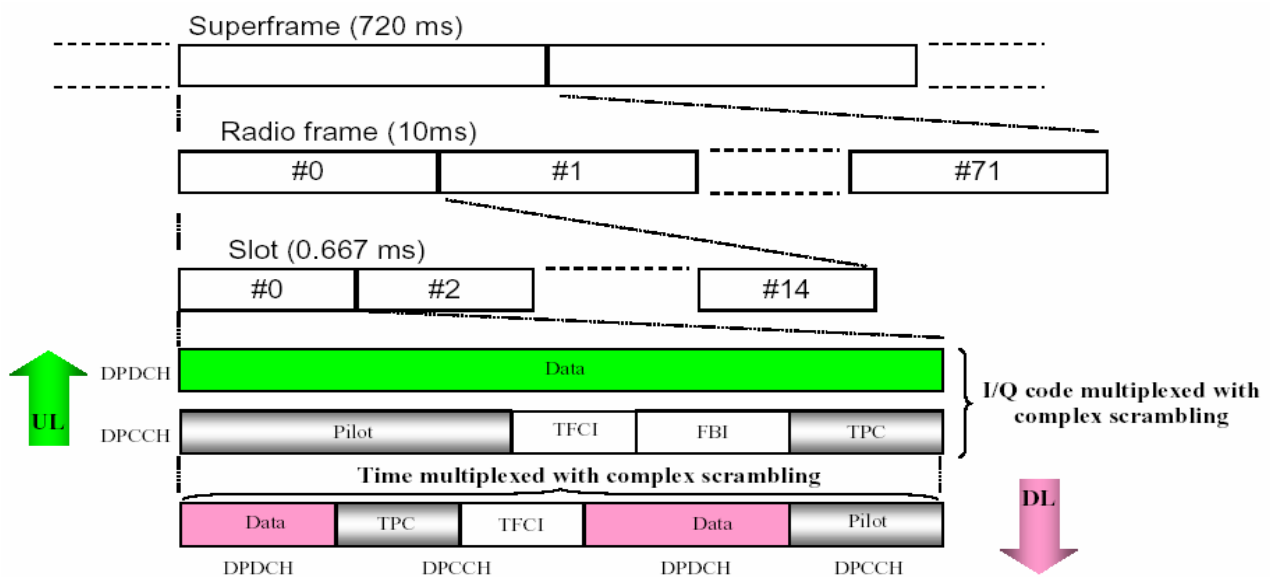
Εικόνα 1.7 : Σχέση καναλιών ανόδου και καθόδου στο WCDMA

* Από τα κανάλια επιπέδου μεταφοράς απεικονίζεται καλύτερα το σύνολο των λειτουργιών στις οποίες μπορεί να εμπλακεί ένα τερματικό όταν είναι συνδεδεμένο με ένα UMTS δίκτυο.

Παρακάτω θα αναφερθούμε λίγο παραπάνω στα κανάλια τα οποία χρησιμοποιούνται στο WCDMA για την μεταφορά πληροφορίας, που καταφθάνει από το επίπεδο μεταφοράς, από το σταθμό βάσης στο κινητό τερματικό.

FACH (Forward Access Channel) : Μεταφέρει κυρίως πληροφορία ελέγχου σε τερματικά τα οποία βρίσκονται στην κυψέλη, αλλά μπορεί να μεταφέρει και σύντομα μηνύματα δεδομένων (π.χ μετά την λήψη ενός μηνύματος τυχαίας πρόσβασης από τον σταθμό βάσης).

DCH (Dedicated Channel) : Το βασικό κανάλι για την εξυπηρέτηση υπηρεσιών μεταγωγής κυκλώματος αλλά και άλλων υπηρεσιών. Η δομή των πλαισίων του DCH καναλιού φαίνεται για το κανάλι ανόδου και καθόδου στην εικόνα 1.8:



Εικόνα 1.8 : Δομή του καναλιού DCH

* Κάθε πλαίσιο (10 msec) αντιστοιχεί σε $3.8 \text{ Mcps} / 100 = 38.400 \text{ chip}$
Κάθε slot (0.667 msec) αντιστοιχεί σε $3.8 \text{ Mcps} / 1500 = 2560 \text{ chip}$

Το DCH αποτελείται από δύο λογικά κανάλια, τα DPCCCH και DPDCH, τα οποία είναι πολυπλεγμένα στο πεδίο του χρόνου (Downlink) ή των κωδίκων (Uplink):

- DPCCCH : Το κανάλι αυτό είναι σταθερού ρυθμού και μεταφέρει πληροφορία απαραίτητη για την λειτουργία της σύνδεσης σε φυσικό επίπεδο. Η πληροφορία αυτή είναι:

- Tx Power Control (TPC) : Bit σηματοδότησης του ελέγχου ισχύος
- Transport Format Combination Indicator (TFCI): Πληροφορία σχετικά με το bit-rate, το channel coding και το interleaving που χρησιμοποιείται στο DPDCH
- Pilot : Σύμβολα συγχρονισμού για σύμφωνη (coherent) ανίχνευση
- Feedback Information (FBI) : Σύμβολα αναφοράς για εκτίμηση της κατάστασης (του λαμβανόμενου Signal to Interference Ratio ή SIR) του καναλιού (για χρήση στο fast power control)

- **DPDCH** : Το κανάλι αυτό είναι μεταβλητού ρυθμού και μεταφέρει δεδομένα ή σηματοδότηση που προέρχονται από το επίπεδο μεταφοράς. Ο τρέχον ρυθμός του αναφέρεται στα TFI bit του DPCCCH. Το S.F του DPDCH μπορεί να πάρει τιμές 4-256 για το Uplink και 4-512 για το Downlink. Η χρήση του 512 δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση του soft handover και γενικά σπάνια χρησιμοποιείται (κυρίως σε περιπτώσεις όπου απλά θέλουμε να παρέχουμε έλεγχο ισχύος σε υπηρεσίες με ελάχιστη δραστηριότητα στο κανάλι καθόδου, π.χ ανέβασμα ενός αρχείου). Ο μέγιστος ρυθμός που μπορεί να πετύχει ένας χρήστης είναι γύρω στα 2.8 Mbps αξιοποιώντας 3 κωδικούς με S.F ίσο με 4 στο Downlink ή 6 κωδικούς με S.F ίσο με 4 στο Uplink (με την υπόθεση ότι ο ρυθμός κωδικοποίησης είναι $\frac{1}{2}$).

Τα βασικά χαρακτηριστικά του DCH καναλιού συνοψίζονται ως εξής:

- Use of fast power control
- Fast data rate change (on a frame-by-frame basis)-(προσοχή: το data rate μπορεί να αλλάζει, όχι το S.F)
- Support of soft handover
- Support of transmission to a certain part of a cell or a sector by varying antenna weights in adaptive antenna systems.

DSCH (Downlink Shared Channel) : Διαμοιραζόμενο κανάλι στο οποίο πολυπλέκονται (χρονικά) με αποδοτικό τρόπο πακετοποιημένα δεδομένα από πολλούς χρήστες. Τα βασικά χαρακτηριστικά του DSCH είναι: (1) Το DSCH χρησιμοποιείται μόνο από χρήστες που έχουν Downlink DCH κανάλι στην διάθεσή τους. Η απαίτηση αυτή αναδύεται από την ανάγκη για έλεγχο ισχύος και ειδοποίηση του τερματικού για το πότε θα πρέπει να αποκωδικοποιήσει το DSCH (γιατί θα υπάρχει πληροφορία γι αυτό) και ποιους κωδικούς από το DSCH πρέπει να αποκωδικοποιήσει (αυτό γίνεται είτε μέσω TFCI , είτε μέσω σηματοδότησης υψηλότερου επιπέδου όταν πρόκειται για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους). (2) Η χρήση του DSCH βοηθά στο να μην ξεμείνουμε από κωδικούς καναλοποίησης όταν υπάρχουν συνδέσεις/υπηρεσίες με υψηλό peak-rate αλλά χαμηλό activity-cycle (η χρήση επιπλέον scrambling code πρέπει να αποφεύγεται επειδή χάνουμε την ορθογωνιότητα μεταδόσεων από την ίδια πηγή). Το DSCH έχει S.F που παίρνει τιμές από 4 έως 256, ανάλογα με τους διαθέσιμους πόρους της κυψέλης και το μέγεθος της κίνησης που το DSCH καλείται να εξυπηρετήσει κάθε στιγμή. (4) Η χωρητικότητα του DSCH μπορεί να διατίθεται με διαφορετικό τρόπο σε κάθε πλαίσιο (είτε σε ένα χρήστη με υψηλό ρυθμό μετάδοσης (time multiplexing), είτε σε αρκετούς χρήστες χαμηλού ρυθμού παράλληλα (time and code multiplexing)).

1.4 Υπηρεσίες δικτύων τρίτης γενιάς

Τα συστήματα δεύτερης γενιάς σχεδιάστηκαν αρχικά για την αποδοτική μεταφορά υπηρεσιών φωνής. Αντίθετα, τα συστήματα κινητής επικοινωνίας 3^{ης} γενιάς σχεδιάστηκαν με βάση την ευέλικτη υποστήριξη οποιουδήποτε είδους υπηρεσίας με τέτοιο τρόπο ώστε η βέλτιστη λειτουργία του δικτύου μετά την εισαγωγή μιας νέας υπηρεσίας να μην απαιτεί επαναρύθμιση του δικτύου. Εκτός από την ευελιξία αυτή το WCDMA έχει κάποιες προχωρημένες δυνατότητες οι οποίες είναι:

- Θεωρητικούς ρυθμούς μετάδοσης οι οποίοι αγγίζουν τα 2 Mbps στο Release'99 του 3GPP και ξεπερνούν τα 10 Mbps στο Release 5 του 3GPP. Οι ρυθμοί που αναμένονται να είναι εφικτοί στην πράξη (ανά χρήστη) είναι μέχρι 384 Kbps αρχικά, και παραπάνω από 2 Mbps με το Release 5.

- Χαμηλές καθυστερήσεις με packet round trip times μικρότερα των 200 msec.
- Διάφανη κινητικότητα (seamless mobility) ακόμα και για υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου.
- Διαφοροποίηση του QoS κάθε υπηρεσίας ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητα με την οποία γίνεται η εξυπηρέτησή τους.
- Δυνατότητα παράλληλης εξυπηρέτησης υπηρεσιών φωνής και δεδομένων, ακόμα και για τον ίδιο χρήστη.
- Διαλειτουργικότητα με τα υπάρχοντα δίκτυα GSM/GPRS δεύτερης γενιάς.

Τα δίκτυα αυτά εισάγουν μια ευρεία γκάμα νέων υπηρεσιών οι οποίες έρχονται να εκμεταλλευθούν τις δυνατότητες οι οποίες προσφέρονται από τα συστήματα 3^{ης} γενιάς. Μια άποψη του νέου συνόλου των υπηρεσιών που θα προσφέρονται φαίνονται στον πίνακα 1.1:

	Person-to-Person	Content-to-Person	Business Connectivity
Real-Time Services	<ul style="list-style-type: none"> • AMR Speech • Wideband AMR • Video telephony • 1-way video sharing • PoC • VoIP 	<ul style="list-style-type: none"> • Audio Streaming (music) • Video Streaming (Teleconferencing, Live TV, stored TV programs) 	
Non Real-Time Services	<ul style="list-style-type: none"> • SMS • MMS • Multiplayer games 	<ul style="list-style-type: none"> • mobile-related content downloading (ring-tones, video clips, wallpapers, ...) • Location-based services (e.g roadside assistance, real-time traffic conditions, weather reports, ATM machine locator, service finder (hospital, bank, clubs, taxi station,...)) 	<ul style="list-style-type: none"> • Web browsing • E-mail • FTP

Πίνακας 1.1 : Κατηγοριοποίηση υπηρεσιών των δικτύων τρίτης γενιάς

Επεξήγηση νέων υπηρεσιών:

AMR Speech : Είναι η γνωστή υπηρεσία φωνής η οποία στο UMTS ενσωματώνει τεχνικές για ανίχνευση φωνητικής δραστηριότητας (VAD) και διακοπτόμενης μετάδοσης (DTX) με αναγέννηση του παρασκηνακού θορύβου σε περίπτωση απουσίας φωνητικής δραστηριότητας. Η χρήση των τεχνικών αυτών ελαττώνει το φορτίο του δικτύου κορμού καθώς και την κατανάλωση της μπαταρίας του κινητού. Ο κωδικοποιητής φωνής στο UMTS υλοποιεί μια τεχνική υποστήριξης πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης (Adaptive Multirate (AMR)). Ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να ελέγχεται από το δίκτυο ραδιοπρόσβασης και να προσαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου (π.χ ελάττωση του ρυθμού μετάδοσης (δηλαδή της ποιότητας της φωνής) ώστε να ελαττωθούν οι παρεμβολές και να εξυπηρετηθούν περισσότεροι χρήστες ή να αυξηθεί η κάλυψη της κυψέλης). Οι ρυθμοί κωδικοποίησης που υποστηρίζονται είναι μεταξύ 4.5 και 12.2 Kbps.

Wideband AMR : Υπηρεσία με αυξημένη ποιότητα φωνής. Ο κωδικοποιητής αυτής της υπηρεσίας χρησιμοποιεί διπλάσιο ρυθμό δειγματοληψίας (16 KHz) και δίνει ρυθμούς κωδικοποίησης από 6.6 έως 23.85 Kbps.

Voice Over IP (VoIP) : Μεταφορά φωνής μέσω του IP πρωτοκόλλου για την διεξαγωγή υπεραστικών και διεθνών κλήσεων με χαμηλό κόστος.

Push-to-Talk over Cellular (PoC) : Η υπηρεσία αυτή είναι παρόμοια με μια walkie-talkie υπηρεσία πάνω από το packet switched domain του κυψελωτού δικτύου. Το PoC είναι μια μονόδρομη (και όχι αμφίδρομη όπως η κλασσική φωνητική κλήση) υπηρεσία στην οποία η φωνητική σύνδεση εγκαθίσταται με το πάτημα ενός κουμπιού και ο δέκτης απλά ακούει την φωνή χωρίς να χρειάζεται να απαντήσει σε κάποια κλήση.

Multiplayer Games : Υπηρεσία η οποία εφαρμόζεται σε μια ομάδα χρηστών, οι οποίοι παίζουν το ίδιο παιχνίδι την ίδια στιγμή, και μεταφέρει σε καθέναν από την ομάδα πληροφορία για τις κινήσεις των υπόλοιπων παικτών στο παιχνίδι. Τα παιχνίδια αυτά χωρίζονται σε Real Time Action Games, τα οποία έχουν υψηλές απαιτήσεις σε καθυστέρηση (delay<300 msec) , σε Real Time Strategy Games, τα οποία έχουν μέτριες απαιτήσεις σε καθυστέρηση (delay<900msec) και σε Turn-based Strategy Games (τα οποία έχουν πολύ χαλαρές απαιτήσεις σε καθυστέρηση (delay<40sec).

Audio/Video Streaming : Ο συνδρομητής κατεβάζει και προβάλλει την ίδια στιγμή στο κινητό του τμήματα video ή ήχου/μουσικής, τα οποία είναι αποθηκευμένα στο δίκτυο κορμού ή στο διαδίκτυο.

Location-based services : Ο συνδρομητής προβάλλει στο κινητό του πληροφορία σχετική με την γεωγραφική θέση που επιθυμεί (συνήθως σχετική με την θέση στην οποία βρίσκεται ή κατευθύνεται). Το είδος της πληροφορίας είναι συνήθως ταξινομημένο σε πολυεπίπεδους καταλόγους και επιλέγεται μέσω αυτών, έτσι ώστε τα δεδομένα που μετακινεί ο συνδρομητής στο κανάλι ανόδου να είναι ελάχιστα. Η πληροφορία μπορεί να περιλαμβάνει συνήθως κείμενο και εικόνες και πιο σπάνια ήχο ή video.

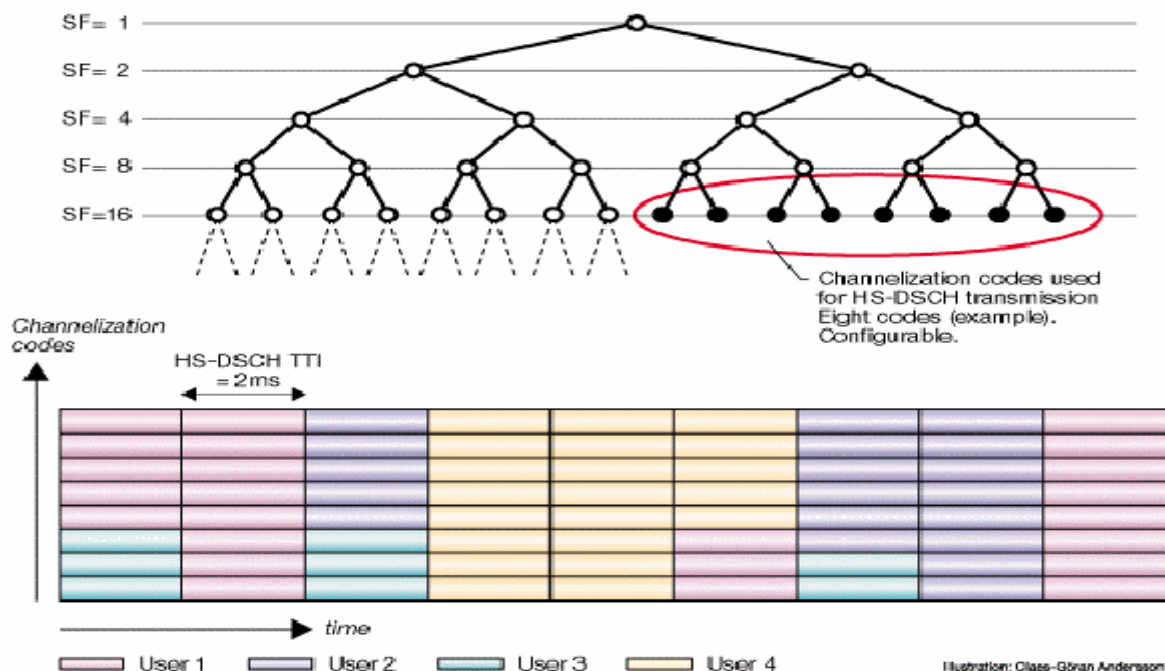
Το κύριο πρόβλημα με τις νέες υπηρεσίες είναι ότι σε πολλές από αυτές (βλέπε υπηρεσίες με κόκκινο χρώμα) ο κύριος όγκος τους μετακινείται στο κανάλι καθόδου μιας κυψέλης , είναι δηλαδή αρκετά ασύμμετρες. Αν και το βασικό είδος υπηρεσιών στον οποίο στοχεύουν οι εταιρίες παροχής υπηρεσιών κινητής επικοινωνίας με τα δίκτυα 3G είναι οι υπηρεσίες δεδομένων (εξαιτίας του γεγονότος ότι αυτές είναι πιο ανεκτικές ως προς την καθυστέρηση και μπορούν να φέρουν μεγαλύτερα φορτία κίνησης ανά χρήστη (κάτι πολύ ελκυστικό αφού ο συνήθης τρόπος χρέωσης για υπηρεσίες δεδομένων είναι η ογκοχρέωση)), εξίσου πιθανή θεωρείται και η εξυπηρέτηση μονόδρομων πολυμεσικών υπηρεσιών (π.χ audio/video streaming) . Ο χειρισμός αυτής της ιδιαιτερότητας είναι πέρα από της δυνατότητες των συστημάτων μεταγωγής κυκλώματος τα οποία εγκαθιστούν πάντα ένα ζεύγος ιδίων καναλιών ανόδου και καθόδου για κάθε υπηρεσία σπαταλώντας έτσι BW. Η λύση βρίσκεται στην καλύτερη εκμετάλλευση των ραδιοπόρων (διαθέσιμο BW, ισχύς, κώδικες,...) μέσω της χρήσης διαμοιραζόμενων καναλιών καθόδου. Το WCDMA προβλέπει ένα τέτοιο κανάλι, το DSCH, το οποίο όμως δεν είναι αρκετά αποδοτικό. Οι νέες αυτές συνθήκες οδήγησαν στην ανάγκη για την ανάπτυξη νέων αρχιτεκτονικών με κύριο στόχο την παροχή μεγάλων ρυθμοποδόσεων στο κανάλι καθόδου των κυψελών. Μία από αυτές τις αρχιτεκτονικές είναι η HSDPA.

2 Περιγραφή της HSDPA αρχιτεκτονικής

2.1 Εισαγωγή

Η μετάδοση δεδομένων με υψηλό μέγιστο ρυθμό μετάδοσης και χαμηλό κύκλο δραστηριότητας οδηγεί γρήγορα σε εξάντληση των κωδικών καναλοποίησης κάτω από έναν κωδικό scrambling. Για να αποφύγουμε αυτό το φαινόμενο υπάρχουν δύο λύσεις: είτε να χρησιμοποιήσουμε ένα δεύτερο κωδικό scrambling, είτε να χρησιμοποιήσουμε διαμοιραζόμενα κανάλια. Η πρώτη λύση έχει το μειονέκτημα ότι χάνεται η ορθογωνιότητα μεταξύ των κωδικών καναλοποίησης, κάτι που πρέπει να αποφεύγεται. Από την άλλη, με την χρήση διαμοιραζόμενου καναλιού μπορούμε να πετύχουμε 100% αξιοποίηση του φυσικού μέσου χωρίς να θυσιάσουμε την ορθογωνιότητα των κωδικών. Ο περιορισμός των διαμοιραζόμενων καναλιών είναι ότι εφαρμόζονται μόνο σε υπηρεσίες βασισμένες σε πακέτα. Μια πρώτη υλοποίηση διαμοιραζόμενου καναλιού στο WCDMA είναι το DSCH κανάλι. Σε μια παρόμοια βάση με το DSCH κινείται και η HSDPA αρχιτεκτονική [5] με σκοπό να πετύχει ακόμα καλύτερες επιδόσεις σε ένα διαμοιραζόμενο κανάλι καθόδου.

Η βασική ιδέα της HSDPA αρχιτεκτονικής είναι ότι ένα σύνολο από κοινούς κωδικούς καναλοποίησης (channelization codes) με Spreading Factor =16, οι οποίοι συνθέτουν το κανάλι HS-DSCH της αρχιτεκτονικής, μοιράζονται σε διάφορους χρήστες στο πεδίο του χρόνου. Οι κωδικοί αυτοί αποτελούν ένα τμήμα του δένδρου των CDMA κωδικών που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των διαφόρων καναλιών του WCDMA. Συνήθως όλοι οι κωδικοί του HS-DSCH διατίθενται (αν χρησιμοποιούνται και κατά πόσο αποδοτικά εξαρτάται από την ισχύ με την οποία λαμβάνει ο δέκτης το σήμα και άρα από την κατάσταση της ζεύξης τερματικού-σταθμού βάσης) σε ένα μόνο χρήστη ανά χρονικά διαστήματα (TTI ή Transmission Time Interval) των 2 msec (time multiplexing) αν και η ταυτόχρονη εκπομπή σε περισσότερους χρήστες (π.χ 2 ως 4) είναι κάτι δυνατό εντός του ίδιου TTI, χρησιμοποιώντας διαφορετικό τμήμα του συνόλου των κοινών κωδικών (code multiplexing) για κάθε χρήστη στον οποίο γίνεται μετάδοση εντός του ίδιου TTI. Στην εικόνα 2.1 βλέπουμε ένα παράδειγμα όπου 8 κωδικοί έχουν δεσμευτεί για το HS-DSCH κανάλι. Στις χρονοθυρίδες 1,3,6 και 7 (αριθμημένες από αριστερά προς τα δεξιά) χρησιμοποιείται και code multiplexing παράλληλα με το time multiplexing.



Εικόνα 2.1 : Εκχώρηση καναλιών στο HS-DSCH

Μερικές σύντομες περιγραφές της HSDPA αρχιτεκτονικής και των βασικών πλεονεκτημάτων της μπορούν να βρεθούν στα [6],[7],[8],[9],[10],[11], [12], ενώ για περισσότερες λεπτομέρειες παραπέμπουμε στα [5],[2] και [13].

Επίσης, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η υλοποίηση της HSDPA αρχιτεκτονικής αποτελείται από τρεις φάσεις, καθεμία από τις οποίες περιλαμβάνει και διαφορετικές τεχνικές βελτίωσης του δικτύου. Ο τρεις αυτές φάσεις είναι :

- **Φάση 1^η : Βασικό HSDPA** Η πρώτη φάση περιλαμβάνει την αύξηση των επιδόσεων στο κανάλι καθόδου μέσω της χρήσης πιο αποδοτικών τεχνικών διαμόρφωσης (εκτός από QPSK υλοποιείται και η 16-QAM), τεχνικών επανεκπομπής (HARQ), δυναμικής προσαρμογής της κάθε ραδιοζεύξης και εξυπνότερων τεχνικών χρονοδρομολόγησης σε μικρότερες χρονικές κλίμακες (2 msec αντί για 10-80 msec που προβλέπει το WCDMA) μέσω ενός διαμοιραζόμενου καναλιού. Η φάση αυτή περιλαμβάνεται στην έκδοση 5 της 3GPP και στοχεύει σε ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 10.8 Mbps.
- **Φάση 2^η : Βελτιώσεις του HSDPA** Η φάση αυτή εισάγει τεχνικές επεξεργασίας διατάξεων πολλαπλών κεραιών. Ο σκοπός αυτών των τεχνικών είναι να αυξήσουν την ακτίνα κάλυψης για μέτριους και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (π.χ από 384 Kbps και πάνω). Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν τεχνικές για Tx diversity (όπου το κινητό επιλέγει την κεραία εκπομπής που δίνει την καλύτερη λήψη), beamforming (οι οποίες κατευθύνουν την εκπεμπόμενη δέσμη προς μια μικρότερη περιοχή του τομέα αλλά με μεγαλύτερη ισχύ) και MIMO (όπου γίνεται χρήση πολλαπλών κεραιών τόσο στο σταθμό βάσης όσο και στο κινητό τερματικό). Η φάση αυτή περιλαμβάνεται στην έκδοση 6 της 3GPP και στοχεύει σε ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 30 Mbps.
- **Φάση 2^η : Νέο air-interface** Η Τρίτη φάση περιλαμβάνει την χρήση Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) στο φυσικό επίπεδο σε συνδυασμό με πιο αποδοτικές τεχνικές διαμόρφωσης (π.χ 64-QAM) και προχωρημένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος.

Στην εργασία αυτή θα ασχοληθούμε με την πρώτη φάση της υλοποίησης του HSDPA και γι αυτό με τον όρο HSDPA αρχιτεκτονική θα αναφερόμαστε στην πρώτη φάση της υλοποίησης.

2.2 Βασικά Στοιχεία της Αρχιτεκτονικής:

Διαμοιραζόμενο Κανάλι : Το HS-DSCH κανάλι της HSDPA είναι ένα κανάλι το οποίο μοιράζεται σε πολλούς χρήστες. Οι κώδικες του καναλιού και η ισχύς που αφιερώνεται σε αυτό είναι ένας κοινός πόρος ο οποίος διανέμεται δυναμικά μεταξύ των χρηστών τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο των κωδίκων (στο πεδίο των κωδίκων, όταν στο ίδιο TTI μεταδίδεται πληροφορία σε περισσότερους του ενός χρήστες). Οι διαθέσιμοι κώδικες με S.F = 16 (κάτω από το ίδιο scrambling code) είναι 16. Επειδή όμως για την λειτουργία του HS-DSCH απαιτείται και η λειτουργία κάποιων επιπλέον καναλιών με βοηθητικές αλλά απαραίτητες λειτουργίες, ο μέγιστος αριθμός διαθέσιμων κωδικών που μπορούμε να αφιερώσουμε στο HS-DSCH είναι 15.

Η διαμοιραζόμενη φύση του HS-DSCH καναλιού έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

- Better capacity utilization for bursty services
- Easily-controlled power peaks
- Multiuser diversity

(Στοιχεία που αυξάνουν
τις επιδόσεις του
συστήματος)

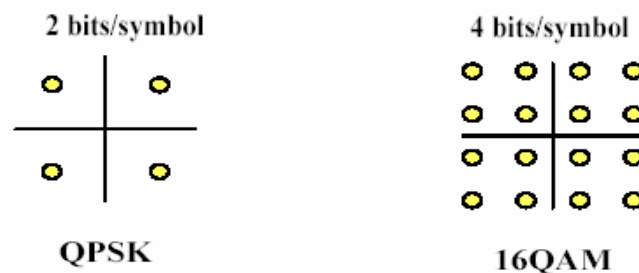
- ☞ No soft-handover support
- ☞ Need for scheduling , admission control

Στοιχεία που αυξάνουν
την πολυπλοκότητα του
συστήματος

Στην ουσία η αρχιτεκτονική HSDPA αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος με σκοπό την αντίστοιχη αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος (ή καλύτερη αξιοποίηση της χωρητικότητας).

Turbo Coding : Σε αντίθεση με το WCDMA που χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό από Convolutional $\frac{1}{2}$ ή $\frac{1}{3}$ ή Turbo $\frac{1}{3}$ Coding, η HSDPA χρησιμοποιεί αποκλειστικά Turbo Coding με διάφορους ρυθμούς. Η κωδικοποίηση αυτή είναι πιο αποδοτική από το Convolutional Coding όταν τα μεταδιδόμενα πλαίσια έχουν αρκετά μεγάλο μήκος (αρκετές εκατοντάδες bit ή περισσότερο), επιτρέποντας την ελάττωση της ισχύος εκπομπής με ταυτόχρονη διατήρηση του BER και του ρυθμού μετάδοσης (η επίδοση του Turbo Coding για αρκετά μεγάλα πλαίσια πλησιάζει το όριο Shannon). Όσο καλύτερη είναι η κατάσταση του καναλιού (μειωμένη πιθανότητα εμφάνισης σφαλμάτων) τόσο μεγαλύτερος ρυθμός κωδικοποίησης χρησιμοποιείται, αυξάνοντας έτσι το ρυθμό μετάδοσης της “καθαρής” πληροφορίας. Οι διάφοροι ρυθμοί κωδικοποίησης, που μπορούν να εκτείνονται από $\frac{1}{6}$ έως και $\frac{1}{1}$ (τυπικοί ρυθμοί κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι οι: $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ και $\frac{1}{4}$), παράγονται όλοι από έναν μοναδικό Turbo κωδικοποιητή με ρυθμό $\frac{1}{3}$ μέσω repetition ή puncturing (αν ο ρυθμός κωδικοποίησης που θέλουμε να επιτύχουμε είναι μικρότερος του $\frac{1}{3}$ τότε χρησιμοποιείται repetition, αλλιώς χρησιμοποιείται puncturing).

Higher Order Modulation : Η HSDPA αρχιτεκτονική πέρα από την κλασσική τεχνική διαμόρφωσης QPSK που χρησιμοποιεί το WCDMA κάνει χρήση και της πιο αποδοτικής (φασματικά) τεχνικής 16-QAM (εικόνα 2.2). Η 16-QAM προσφέρει διπλάσιο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στο ίδιο φάσμα αλλά απαιτεί καλύτερες συνθήκες ζεύξης (καλύτερο σηματοθορυβικό λόγο στον δέκτη) για να διατηρήσει σταθερή την ποιότητα της επικοινωνίας (η οποία εκφράζεται συνήθως σε BER ή BLER). Η εισαγωγή του 16QAM αυξάνει την πολυπλοκότητα στον δέκτη του τερματικού αφού τώρα πια απαιτείται και η εκτίμηση του σχετικού πλάτους των λαμβανόμενων συμβόλων, επιπρόσθετα την ανίχνευσης της φάσης του σήματος που ήταν η μόνη απαίτηση στο QPSK.



Εικόνα 2.2 : Τεχνικές διαμόρφωσης QPSK και 16-QAM

Link Adaptation : Η τεχνική διαμόρφωσης και ο ρυθμός κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται από το HS-DSCH κανάλι επιλέγεται δυναμικά (μπορεί να αλλάζει ακόμα και κάθε TTI) έτσι ώστε να διατηρούμε την επιθυμητή ποιότητα επικοινωνίας προς κάθε χρήστη και ταυτόχρονα να μεταφέρουμε όσο περισσότερη πληροφορία γίνεται σε κάθε εκπομπή. Η δυνατότητα αυτή μας επιτρέπει να καταργήσουμε τον έλεγχο ισχύος που αντικαθιστάται από την προσαρμογή της τεχνικής μετάδοσης (των τεχνικών διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Modulation and Coding Scheme (MCS)) που χρησιμοποιείται σε κάθε μετάδοση). Όσο μικρότερη είναι η ισχύς που λαμβάνεται από τον δέκτη, τόσο πιο ανθεκτικό MCS επιλέγεται για την μετάδοση. Η τεχνική αυτή: α) είναι πιο αποδοτική στον χειρισμό των βραχυπρόθεσμων μεταβολών του καναλιού από ότι ο έλεγχος ισχύος, β η προσαρμογή της ζεύξης έχει το πλεονέκτημα ότι ελαττώνει τις μεταβολές των παρεμβολών σε σχέση με τον έλεγχο ισχύος, και γ) εκμεταλλεύεται με καλύτερο τρόπο κινητά τα οποία βρίσκονται πολύ κοντά στο σταθμό βάσης (η ισχύς εκπομπής προς αυτά τα κινητά δεν

μπορεί να ελαττωθεί απεριόριστα και το κέρδος από την ελάττωση της ισχύς εκπομπής είναι μικρό μπροστά σε αυτό που πετυχαίνεται μέσω του AMC). Η επιλογή του MCS μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, οι πιο βασικοί των οποίων αναφέρονται αμέσως παρακάτω.

Μέθοδοι επιλογής του MCS:

- Το τερματικό εκτιμά την ποιότητα της ζεύξης και υπολογίζει το βέλτιστο Transport Format και το αναφέρει στο σταθμό βάσης .
- Το τερματικό εκτιμά την ποιότητα της ζεύξης και αναφέρει την εκτίμησή του στο σταθμό βάσης όπου και επιλέγεται το καταλληλότερο Transport Format για μετάδοση.
- Ο σταθμός βάσης εκτιμά το καταλληλότερο Transport Format με βάση την πληροφορία από τον έλεγχο ισχύος του αντίστοιχου DCH χωρίς ανάδραση από το τερματικό.

Ακόμα και στην περίπτωση που γίνεται χρήση ανάδρασης από το τερματικό η επιλογή του σταθμού βάσης εξαρτάται και από άλλους παράγοντες (φορτίο της κυψέλης, διαθέσιμοι πόροι, ρυθμίσεις του δικτύου, κ.λ.π) και έτσι μπορεί να είναι διαφορετική από αυτή που προτείνει το τερματικό.

Fast Link Adaptation / HARQ / Scheduling : Οι αποφάσεις για τις λειτουργίες της χρονοδρομολόγησης, του HARQ και της προσαρμογής της ζεύξης λαμβάνονται ανά διαστήματα των 2 msec, κάτι το οποίο τους δίνει την δυνατότητα να παρακολουθούν και να εκμεταλλεύονται καλύτερα τις γρήγορες μεταβολές του καναλιού εξαιτίας της πολλαπλής διόδευσης και την λειτουργία επαναμετάδοσης. Το TTI των 2 msec είναι αρκετά μικρότερο από την περίοδο επαναπροσδιορισμού του χρήστη που χρησιμοποιεί το shared κανάλι (γνωστό και ως DSCH) που προβλέπει το Release'99 του WCDMA (η οποία παίρνει τιμές από 10 έως 80 msec).

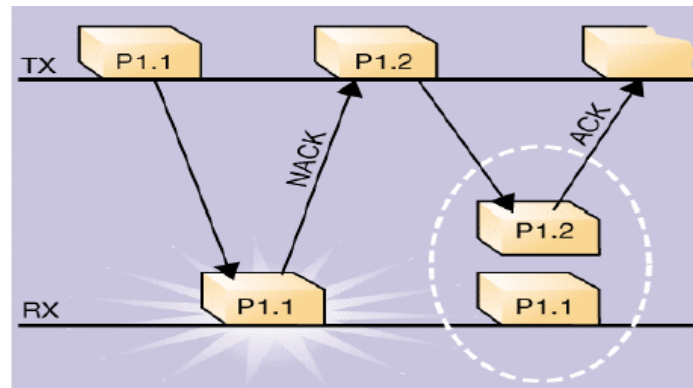
HARQ : Στην τεχνική αυτή η πληροφορία από προηγούμενες αποτυχημένες μεταδόσεις συνδυάζεται με την πληροφορία από επαναμεταδόσεις ώστε να αυξηθεί η πιθανότητα επιτυχημένης αποκωδικοποίησης στον δέκτη (εικόνα 2.3). Το HARQ λειτουργεί σε δύο καταστάσεις:

- Chase/Soft Combining (SC) : Στην κατάσταση αυτή, χρησιμοποιούνται επανεκπομπές πανομοιότυπες της αρχικής εκπομπής, οι οποίες προστίθεται στις ήδη ληφθείσες μεταδόσεις. Πριν συνδυαστούν οι διάφορες επανα/μεταδόσεις του ίδιου μπλοκ πολλαπλασιάζονται με ένα βάρος ανάλογο το λαμβανόμενο από τον δέκτη SINR πριν την αποκωδικοποίηση. Η πολυπλοκότητα του SC είναι ελάχιστη αφού δεν απαιτείται ειδική επεξεργασία της πληροφορίας που φθάνει από επανεκπομπές και έχει πολύ μικρές απαιτήσεις σε καταχωρητές αφού δεν απαιτεί επιπλέον χώρο για την αποθήκευση των επανεκπομπών. Επίσης, προσφέρει time diversity (πιθανή στιγμιαία εμφάνιση ισχυρού θορύβου κατά την αρχική μετάδοση θα εξομαλυνθεί από τον μέσο όρο του θορύβου στο σύνολο των μεταδόσεων) και soft combining gain (i.e the energy accumulation effect for each bit).

- Incremental Redundancy (IR) : Στην κατάσταση αυτή, δεν χρησιμοποιούνται πανομοιότυπες μεταδόσεις όπως στο SC αλλά τμήμα της επανεκπομπής αποτελείται μερικώς (Partial IR) ή εξ'ολοκλήρου (Full IR) από καινούργια parity bits. Στο Partial IR, κάθε επανεκπομπή είναι από μόνη της αποκωδικοποιήσιμη αφού τα bit που αφορούν την καθαρή πληροφορία επαναλαμβάνονται ως έχουν. Στο Full IR, ολόκληρη η επανεκπομπή αποτελείται καινούργια parity bits και γι αυτό κάθε επανεκπομπή δεν είναι αποκωδικοποιήσιμη από μόνη της.

Σημείωση 1^η : Το IR χρησιμοποιείται συνήθως όταν η πρώτη εκπομπή έχει γίνει με σχετικά μεγάλο coding-rate γιατί αλλιώς δεν υπάρχει ακόμα πολύ (αποδοτική) πληροφορία κωδικοποίησης η οποία να μην έχει σταλεί.

Σημείωση 2^η : Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται 16-QAM σε κάθε επανεκπομπή της ίδιας πληροφορίας γίνεται αναδιάταξη του 16-QAM αστερισμού (constellation rearrangement) ώστε τα μισά bit που πριν είχαν ελλιπή προστασία (σε σχέση με τα άλλα μισά) τώρα να έχουν παραπάνω από τα υπόλοιπα, και ανάποδα.

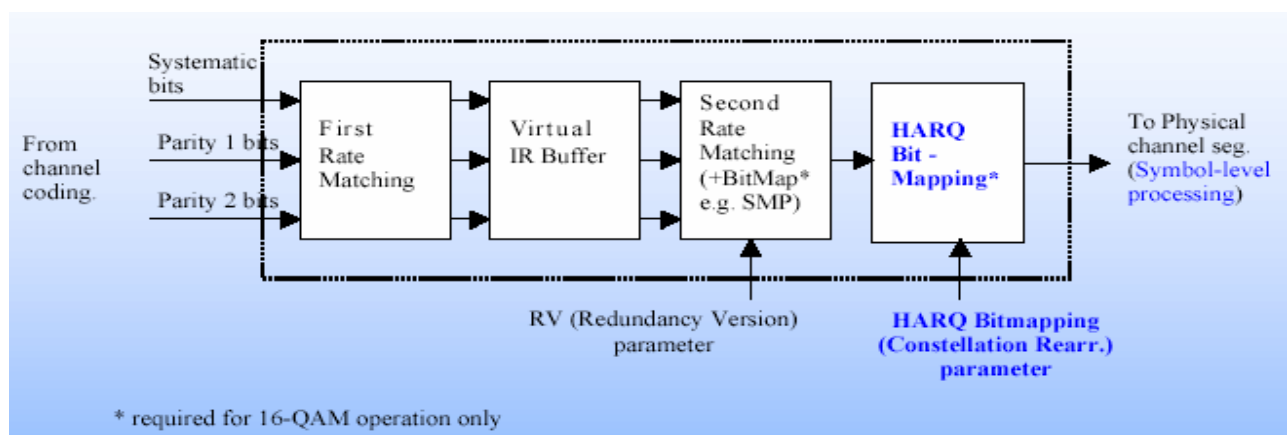


Εικόνα 2.3 : Λειτουργία του μηχανισμού HARQ

Σημείωση 3^η : Στο SC οι επιμέρους επανεκπομπές μπορούν να προστεθούν ενώ στο IR η επιπλέον πληροφορία κωδικοποίησης χρειάζεται να αποθηκευτεί ξεχωριστά, οπότε και οι απαιτήσεις σε μνήμη είναι μεγαλύτερες στο IR. Οι απαιτήσεις του τερματικού σε μνήμη καθορίζονται από το SC στο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης (γι αυτό με το μέγιστο ρυθμό μόνο SC μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ενώ με μικρότερους ρυθμούς είναι δυνατή και η χρήση του IR).

Σημείωση 4^η : Στην περίπτωση που κατά την κωδικοποίηση χρησιμοποιείται repetition, σε κάθε επανεκπομπή τα bit τα οποία συμμετέχουν στο repetition είναι διαφορετικά. Έτσι, έχουμε πιο ομοιόμορφη διανομή της αθροιστικής ενέργειας ανά bit κατά μήκος όλου του πλαισίου.

Η λειτουργία της HARQ μονάδας αποτελείται από δύο στάδια (εικόνα 2.4) στα οποία συνδυάζεται με την λειτουργία προσαρμογής ρυθμού (rate matching) που προσαρμόζει τον αριθμό των κωδικών bit. Στο πρώτο στάδιο ο αριθμός των κωδικών bit που παράγονται από τον κωδικοποιητή προσαρμόζεται στο διαθέσιμο χώρο του καταχωρητή του τερματικού. Αυτό επιτυγχάνεται κόβοντας μέρος και από τα δύο parity bit streams του turbo κωδικοποιητή (puncturing). Φυσικά, αν δεν υπήρχε περιορισμός ως προς το μέγεθος του καταχωρητή αυτό το στάδιο θα ήταν περιττό. Στο δεύτερο στάδιο ο αριθμός των κωδικών bit προσαρμόζεται στον αριθμό των διαθέσιμων bit του καναλιού ανά TTI χρησιμοποιώντας puncturing ή repetition. Το HARQ χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους, τις s και r , από τις οποίες η s ξεχωρίζει τις μεταδόσεις οι οποίες είναι αποκωδικοποιήσιμες από μόνες τους ($s=1$) και αυτές που δεν είναι ($s=0$), και η r επιτρέπει την επιλογή διαφορετικών συνόλων από bit στην διαδικασία του puncturing ή του repetition. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η χρήση του CC μπορεί να είναι απαραίτητη αν ο αριθμός των bit του καναλιού είναι μεγαλύτερος ή ίσος με τον διαθέσιμο soft combining buffer στο τερματικό.

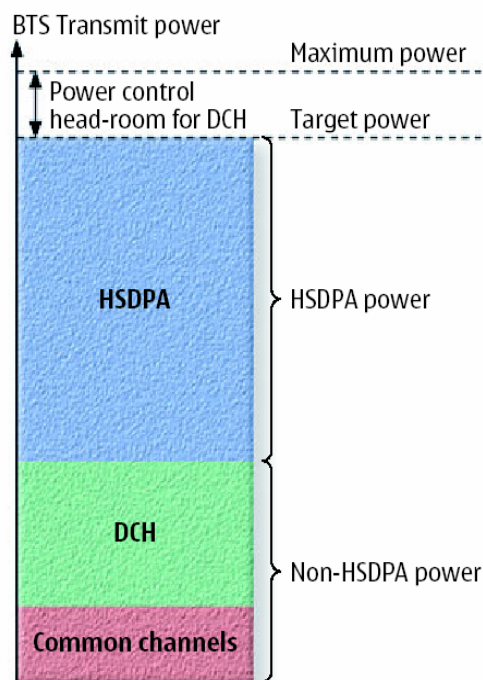


Εικόνα 2.4 : Λειτουργικό διάγραμμα του HARQ

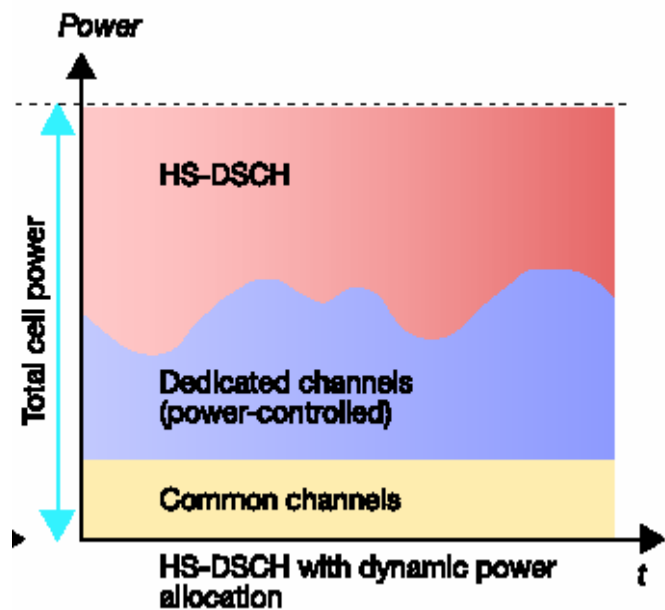
Η τεχνική του HARQ μας επιτρέπει να αντιμετωπίσουμε μια ζεύξη χαμηλής ποιότητας με πιο αποδοτικό τρόπο ελαττώνοντας τον αριθμό των επανεκπομπών που απαιτούνται για την σωστή μετάδοση ενός πακέτου πληροφορίας μέσα από την ζεύξη αυτή. Το πόσο βελτιώνεται σε κάθε επαναμετάδοση η τιμή του BLER (Block Error Rate) με τη χρήση του H-ARQ έχει εκτιμηθεί από εκτενείς μετρήσεις και έχει καταγραφεί σε πίνακες οι οποίοι αντιστοιχούν μια σειρά από παραμέτρους (Modulation και Coding της πρώτης μετάδοσης, E_s/N_0 κάθε προηγούμενης μετάδοσης του ίδιου Block, τρέχον E_s/N_0) σε μια πιθανότητα εσφαλμένης αποκωδικοποίησης των δεδομένων μετά και την τρέχουσα μετάδοση. Υπάρχουν όμως και πιο απλοί τύποι οι οποίοι μοντελοποιούν την απόδοση του H-ARQ και χρησιμοποιούνται για την απλοποίηση των προσομοιώσεων [14].

Εύρωστη υλοποίηση : Η δομή της HSDPA αρχιτεκτονικής εισάγει αρκετές ευκολίες στην υλοποίηση και την σχεδίαση του HS-DSCH, οι κυριότερες από τις οποίες είναι οι εξής:

- Δεν απαιτείται ξεχωριστή συχνότητα φορέα και έτσι αποφεύγονται χρονοβόρες διαδικασίες κατανομής φάσματος αλλά και επιπλέον επένδυση χρημάτων στην μίσθωση νέων συχνοτήτων. Το HS-DSCH υλοποιείται χωρίς κανένα πρόβλημα στον ίδιο φορέα με το WCDMA.
- Το ποσοστό των πόρων μιας κυψέλης που χρησιμοποιείται από την HSDPA μπορεί να είναι σταθερό ή να ρυθμίζεται δυναμικά ώστε να έχουμε καλύτερη και μεγαλύτερη αξιοποίηση των πόρων (εικόνα 2.5). Ωστόσο η δυναμική αυτή ρύθμιση αυξάνει την πολυπλοκότητα των αλγορίθμων διαχείρισης των ραδιοπόρων.



**Fixed Power Allocation
to HS-DSCH**



Variable Power Allocation to HS-DSCH

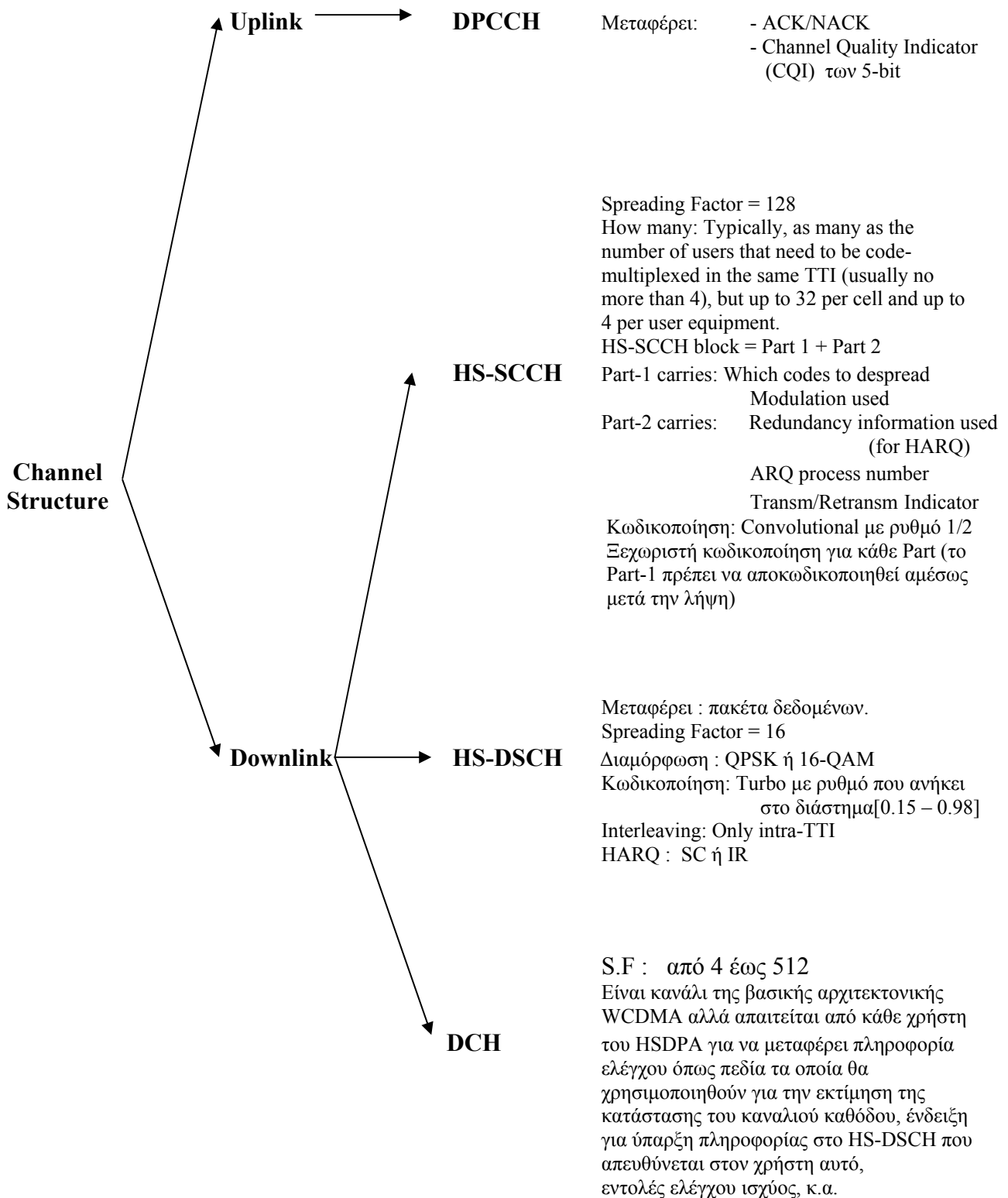
Εικόνα 2.5 : Κατανομή ισχύος στο HS-DSCH

- Η αρχιτεκτονική δεν χρειάζεται να εφαρμοστεί ταυτόχρονα σε όλο το UMTS δίκτυο του παροχέα. Η υλοποίηση μπορεί να γίνει τμηματικά (και μερικά) ξεκινώντας από σημεία με υψηλή ζήτηση σε υπηρεσίες δεδομένων (hotspots) όπως λιμάνια, αεροδρόμια, χώρους γραφείων κ.λ.π. Η μόνη εμφανής επίδραση στον τελικό χρήστη όταν αυτός εγκαταλείπει μια HSDPA περιοχή θα είναι μια πτώση στην απόδοση (μικρότεροι ρυθμοί μετάδοσης).

2.3 Κανάλια που χρησιμοποιεί η αρχιτεκτονική HSDPA

2.3.1 Γενική περιγραφή

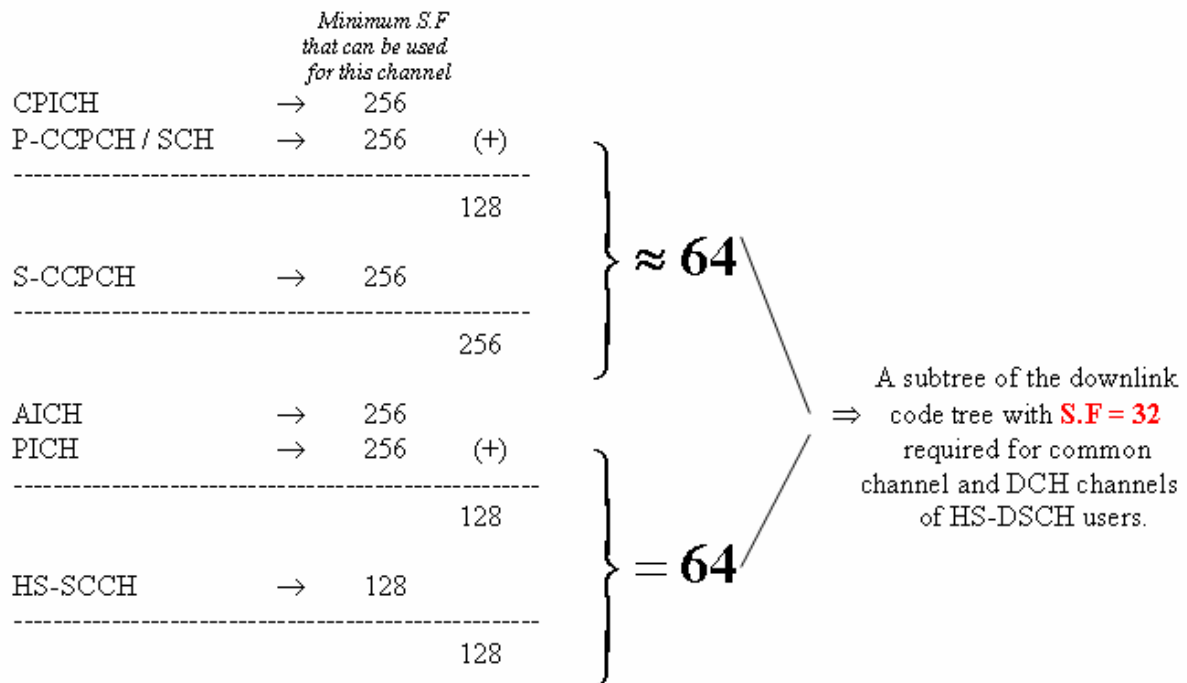
Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται από έναν χρήστη στην HSDPA (δηλαδή από ένα χρήστη στον οποίο μεταδίδεται πληροφορία μέσω του HS-DSCH) και το είδος της πληροφορίας που αυτά τα κανάλια μεταφέρουν, φαίνονται στο διάγραμμα της εικόνας 2.6:



Εικόνα 2.6 : Λειτουργία των καναλιών που χρησιμοποιεί η HSDPA

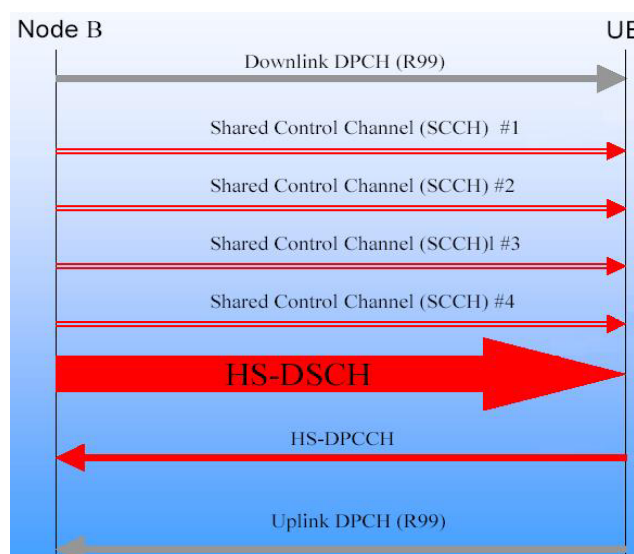
2.3.2 HSDPA Downlink Code Budget

Στην ενότητα 2.2 αναφέραμε ότι το πολύ 15 από τους 16 κωδικούς με S.F=16 μπορούν να δεσμευτούν για το HS-DSCH κανάλι. Στην συνέχεια ακολουθεί ένα παράδειγμα που εξηγεί τον περιορισμό αυτό. Το διάγραμμα της εικόνας 2.7 αναφέρει τον ελάχιστο αριθμό κωδικών που απαιτείται να δεσμεύσουμε για κανάλια διαφορετικά του HS-DCH σε ένα HSDPA σύστημα.



Εικόνα 2.7 : Υπολογισμός ελάχιστου τμήματος του κωδικού δένδρου που πρέπει να δεσμευθεί για κανάλια εκτός του HS-DSCH

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα γίνεται προφανές ότι , με την προϋπόθεση ότι 15 από τους 16 κώδικες με S.F = 16 διατίθενται στο HS-DSCH , ο αριθμός των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από το HS-DSCH (που μπορούν να έχουν ένα Downlink DCH, αφού χρήση του HS-DSCH μπορούν να κάνουν μόνο όσοι έχουν ήδη μια σύνδεση Downlink/Uplink DCH) είναι 9 το πολύ για DCH_S.F = 256 και 18 το πολύ για DCH_S.F=512. Αυτό αφορά την περίπτωση μοναδικού Scrambling Code. Αν χρησιμοποιηθεί και δεύτερος τότε μπορούμε να εξυπηρετήσουμε περισσότερους χρήστες. Μια απεικόνιση των καναλιών που χρησιμοποιεί ένας HSDPA χρήστης φαίνεται και στην εικόνα 2.8.



Εικόνα 2.8 : Κανάλια που χρησιμοποιεί ένα χρήστης της HSDPA

2.3.3 Το HS-SCCH κανάλι

Το HS-SCCH (High Speed Shared Control Channel) κανάλι μεταφέρει την απαραίτητη πληροφορία ελέγχου φυσικού επιπέδου ώστε να ενεργοποιήσει την αποκωδικοποίηση δεδομένων που στέλνονται στο HS-DSCH και πιθανή λειτουργία του HARQ. Χρησιμοποιεί S.F = 128 και άρα μπορεί να μεταφέρει 40 bit ανά slot (20 Kbps ελάχιστος ρυθμός πληροφορίας για κωδικοποίηση $\frac{1}{2}$ ή αντίστοιχα 42 Kbps ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για το DPDCH). Κάθε χρήστης μπορεί να παρακολουθεί μέχρι και 4 τέτοια κανάλια, ενώ ο μέγιστος αριθμός τέτοιων καναλιών ανά κυψέλη είναι 32.

Πληροφορία που μεταφέρει στο FDD :

Transport-Format and resource Related Information (TFRI) :

- Σύνολο κωδικών καναλοποίησης που απευθύνονται στο τερματικό : 7 bit
- Τεχνική Διαμόρφωσης : 1 bit
- Μέγεθος μπλοκ μεταφοράς : 6 bit

Hybrid-ARQ-related Information :

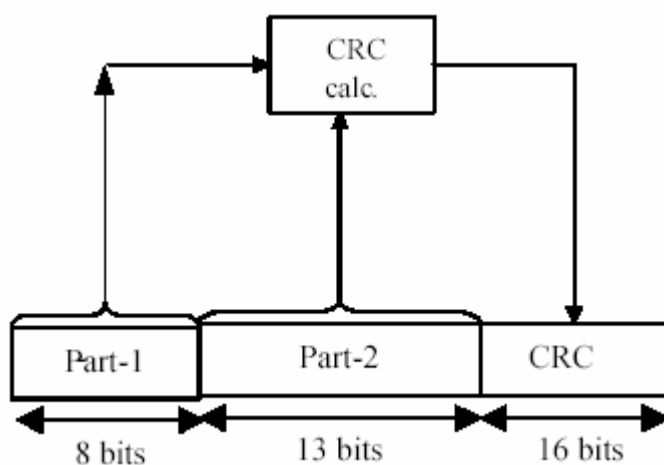
- Hybrid-ARQ process number : 3 bit
- Redundancy Version : 3 bit
- New-data indicator : 1 bit
- UE ID: bits implicitly encoded

CRC attachment

Δομή της πληροφορίας στο HS-SCCH: (εικόνα 2.9)

Part-1 : Κωδικοί καναλοποίησης και τεχνική διαμόρφωσης (8 bits)

Part-2 : Μέγεθος μπλοκ μεταφοράς και πληροφορία σχετική με το HARQ (≥ 13 bits)



Εικόνα 2.9 : Δομή πλαισίου στο κανάλι HS-SCCH

* Κάθε μέρος (Part) κωδικοποιείται ανεξάρτητα με συνελκτική κωδικοποίηση ρυθμού $\frac{1}{2}$ και 8 tail bits. Αυτό γίνεται γιατί το πρώτο μέρος πρέπει να αποκωδικοποιηθεί πριν την ολοκλήρωση της λήψης του δεύτερου μέρους.

* Το Redundancy Version και το Constellation Version κωδικοποιούνται μαζί (η χρήση 16-QAM υπονοεί ότι στα κωδικοποιημένα bit εννοείται και το Constellation Version).

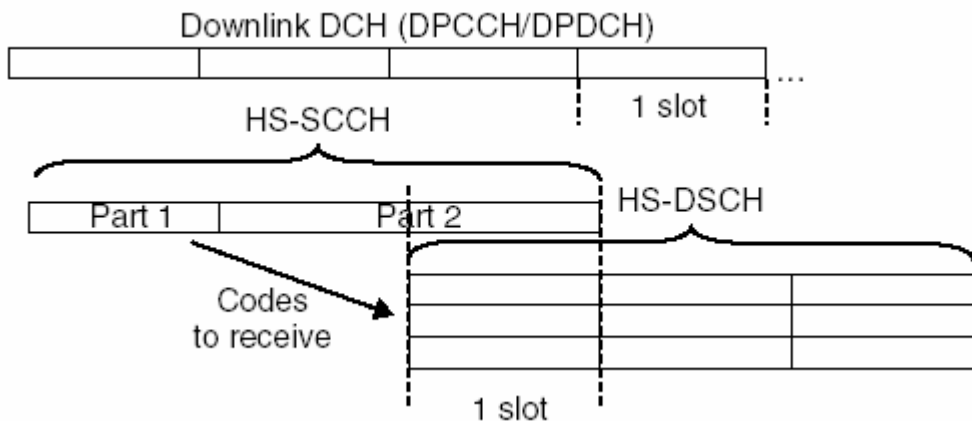
* Και τα δύο μέρη χρησιμοποιούν μάσκα, έτσι ώστε σε κάποιο HS-SCCH κανάλι το

οποίο παρακολουθείται από περισσότερους του ενός χρήστες, κάθε χρήστης να μπορεί να γνωρίζει αν η πληροφορία που μεταδίδεται είναι γι αυτόν.

* Πληροφορία που μπορεί να εξαχθεί από τις υπόλοιπες παραμέτρους δεν μεταδίδεται ξεχωριστά (π.χ ο ρυθμός κωδικοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στο HS-DSCH, ο οποίος μπορεί να εξαχθεί από το μέγεθος του μπλοκ μεταφοράς και άλλες παραμέτρους μεταφοράς).

Χρονική σχετική θέση των HS-SCCH και HS-DSCH :

Από το σχήμα της εικόνας 2.10 γίνεται εμφανές γιατί το πρώτο μέρος κωδικοποιείται ξεχωριστά.

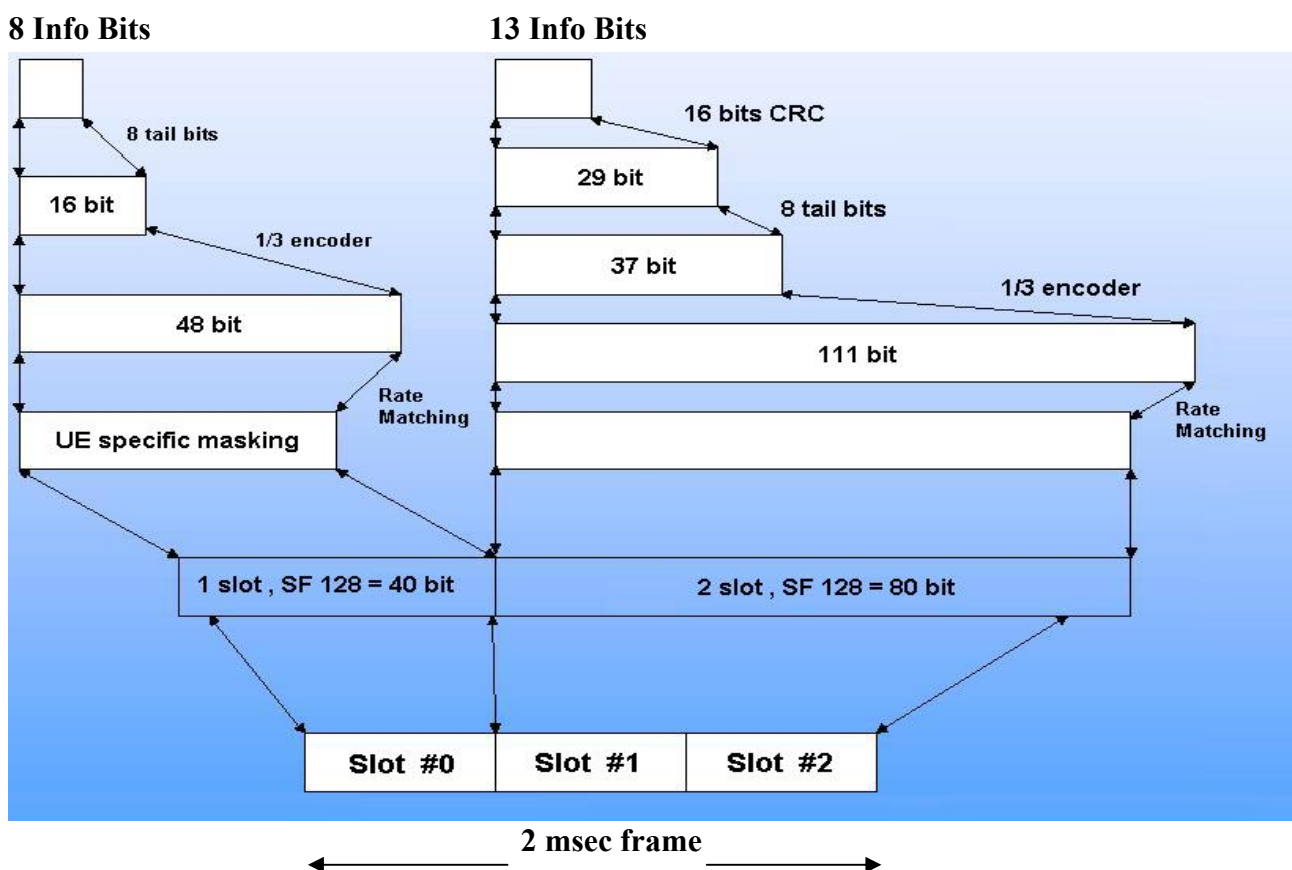


Περιέχει χρονικά κρίσιμη πληροφορία, απαραίτητη για την έγκαιρη εκκίνηση της διαδικασίας αποκωδικοποίησης του HS-DSCH και άρα την αποφυγή chip level buffering. Το DCH δεν έχει κάποια συγκεκριμένη χρονική συσχέτιση με το HS-SCCH

Εικόνα 2.10 : Συγχρονισμός των καναλιών HS-SCCH και HS-DSCH

και άρα ούτε και με το HS-DSCH κανάλι.

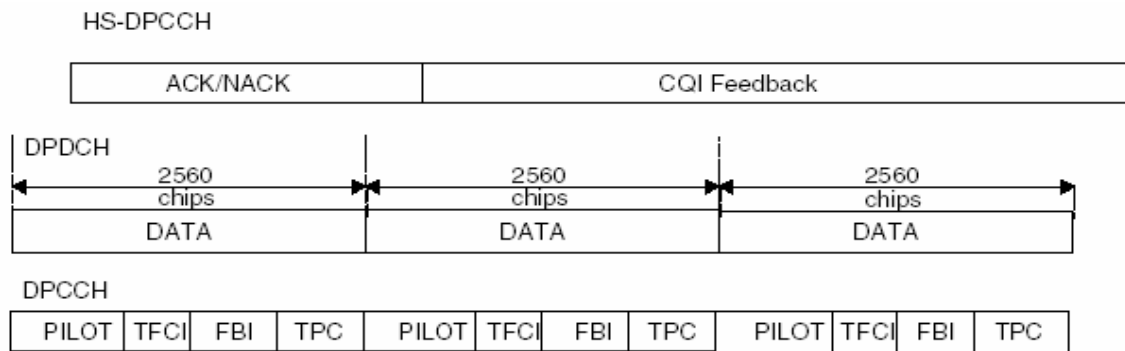
Αναπαράσταση σχηματισμού ενός HS-SCCH πλαισίου : (εικόνα 2.11)



Εικόνα 2.11 : Σχηματισμός ενός πλαισίου για το HS-SCCH κανάλι

2.3.4 Το HS-DPCCH κανάλι

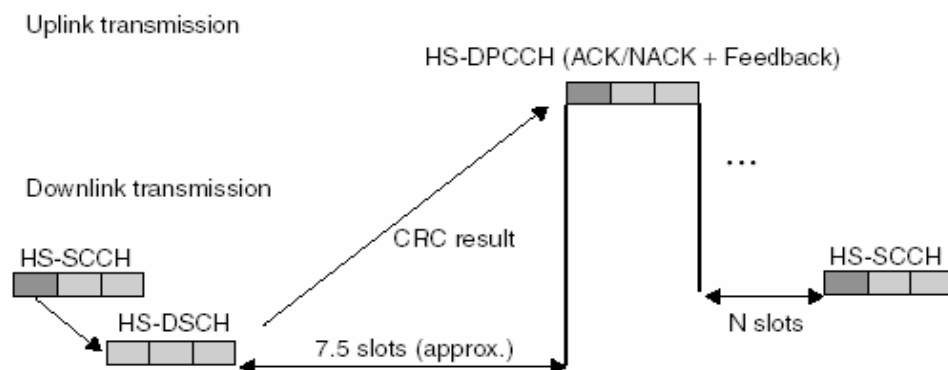
Το HS-DPCCH (High Speed DPCCH) είναι απόλυτα συμβατό με το DPCCH του WCDMA (έχει $SF = 256$) και το μόνο που αλλάζει είναι η πληροφορία που μεταφέρει (εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.12 : Δομή του καναλιού HS-DPCCH

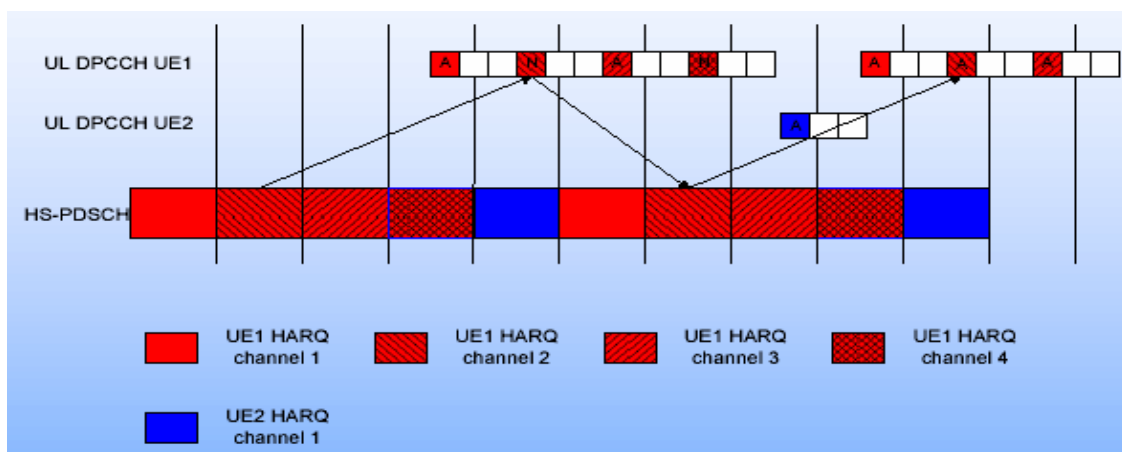
Πληροφορία που μεταφέρει: Η πληροφορία που μπορεί μεταφέρεται (προαιρετικά) από το HS-DPCCH σε κάθε TTI είναι: α) 1-bit ACK/NACK ένδειξη, και β) 5-bit CQI (Channel Quality Indicator) ένδειξη

Χρονική συσχέτιση ως προς την μετάδοση των ACK/NACK : (βλέπε σχήμα εικόνας 2.13)



Εικόνα 2.13 : Χρονική λειτουργία των επιβεβαιώσεων σωστής λήψης (ACK)

Η καθυστέρηση επιστροφής του ACK/NACK αντιμετωπίζεται με χρήση πολλαπλών Stop-And-Wait (SAW) ARQ ανά χρήστη και επομένως αρκετές λειτουργίες H-ARQ ανά χρήστη (εικόνα 2.14). Σύμφωνα με εκτιμήσεις του RTT στο φυσικό επίπεδο (L1) [13], η καθυστέρηση μεταξύ μετάδοσης και πρώτης επαναμετάδοσης είναι περίπου 12 msec, το οποίο απαιτεί 6 SAW διαδικασίες για συνεχή μετάδοση πληροφορίας σε ένα τερματικό.



Εικόνα 2.14 : Χρήση πολλαπλών ARQ

2.3.5 Το HS-DSCH κανάλι

Το HS-DSCH (High Speed Downlink Shared Channel) είναι το κανάλι καθόδου της HSDPA που μεταφέρει τα δεδομένα των χρηστών. Το HS-DSCH αποτελεί μια “εξέλιξη” του DSCH του WCDMA. Οι κύριες διαφορές μεταξύ του HS-DSCH και των υπόλοιπων καναλιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετάδοση πακέτων στο κανάλι καθόδου φαίνονται στον πίνακα 2.1:

Channel	HS-DSCH	DSCH	Downlink DCH	FACH
Spreading factor	Fixed, 16	Variable (256-4) frame-by-frame	Fixed, (512-4)	Fixed (256-4)
Modulation	QPSK/16QAM	QPSK	QPSK	QPSK
Power control	Fixed/slow power setting	Fast, based on the associated DCH	Fast with 1500 kHz	Fixed/slow power setting
HARQ	Packet combining at L1	RLC level	RLC level	RLC level
Interleaving	2 ms	10–80 ms	10–80 ms	10–80 ms
Channel coding schemes	Turbo coding	Turbo and convolutional coding	Turbo and convolutional coding	Turbo and convolutional coding
Transport channel multiplexing	No	Yes	Yes	Yes
Soft handover	For associated DCH	For associated DCH	Yes	No
Inclusion in specification	Release 5	Release'99	Release'99	Release'99

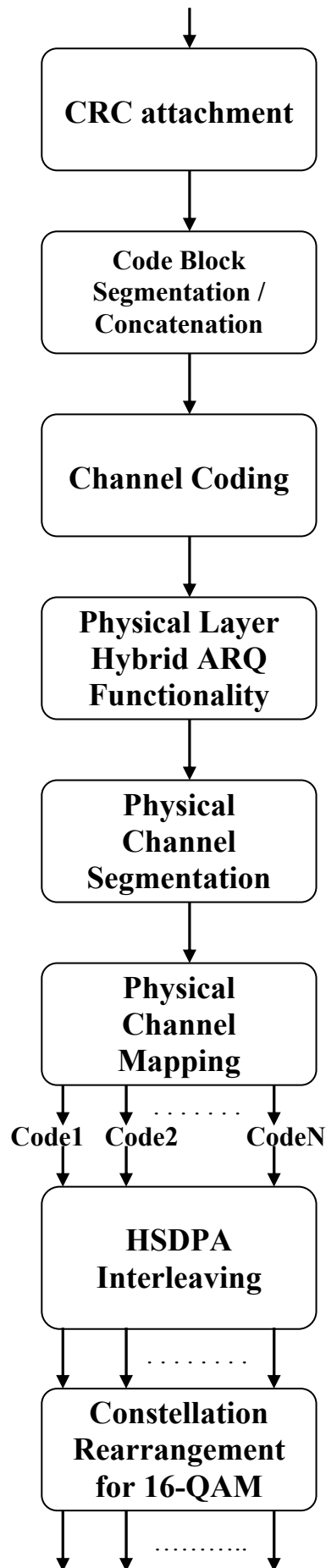
Πίνακας 2.1 : Κανάλια καθόδου στο UMTS για μετάδοση δεδομένων προς το χρήστη.

Τα βασικά πλεονεκτήματα του HS-DSCH έναντι του DSCH είναι τα εξής:

- Μεγαλύτερη φασματική αποδοτικότητα σε περιοχές χαμηλού SIR (μέτριες με μεγάλες αποστάσεις από το Node-B) εξαιτίας της εισαγωγής πιο αποδοτικής κωδικοποίησης και HARQ. Επίσης, η βελτιωμένη λειτουργία πολλαπλών κωδικών (multi-code operation) προσφέρει μεγάλη φασματική αποδοτικότητα, παρόμοια με αυτή του μεταβλητού S.F αλλά με μεγαλύτερη ανάλυση. Σε περιοχές με πολύ καλό SIR (περιοχές κοντά στο Node-B) η HSDPA προσφέρει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και άρα πολύ καλύτερη αξιοποίηση του καναλιού και του φάσματος.
- Η χρήση πολύ μικρότερου TTI (2 msec) από αυτό του DSCH (10-80 msec) προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και αποδοτικότητα στην διαχείριση των ραδιοπόρων και την καλύτερη πολυπλεξία ανομοιογενούς κίνησης και κίνησης με μεγαλύτερη ευαισθησία στην καθυστέρηση.

Παρακάτω φαίνεται (εικόνα 2.15) η επεξεργασία που υφίστανται στο φυσικό επίπεδο τα δεδομένα που καταφθάνουν από ανώτερα επίπεδα για μετάδοση μέσω του HS-DSCH.

Transport block from higher layers



Εικόνα 2.15 : Στάδια σχηματισμού ενός πλαισίου για το HS-DSCH κανάλι

Physical Layer Processing Chain of HS-DSCH channel

Το CRC (Cyclic Redundancy Check) που προστίθεται, χρησιμοποιείται για έλεγχο σφαλμάτων του μπλοκ επιπέδου μεταφοράς από τον δέκτη. Δυνατές τιμές μήκους για το CRC = 0, 8, 12, 16, 24.

Τα μπλοκ μεταφοράς τεμαχίζονται (ή συνενώνονται) αν χρειαστεί ώστε να σχηματισθεί ένα μπλοκ κωδικοποίησης (μέγιστο μήκος για turbo coding = 5114 bits). Η συνένωση ελαττώνει το πλεόνασμα από τα tail-bits του κωδικοποιητή και μερικές φορές βελτιώνει την απόδοση της κωδικοποίησης λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους του μπλοκ. Ο τεμαχισμός οδηγεί στην αποφυγή πολύ μεγάλων μπλοκ κωδικοποίησης τα οποία ανεβάζουν πολύ την πολυπλοκότητα υλικού.

Ο μόνος τύπος κωδικοποιητή που υλοποιείται στο H/W είναι Turbo-1/3. Ρυθμοί από 0.15 έως 0.98 επιτυγχάνονται μεταβάλλοντας το μέγεθος του μπλοκ μεταφοράς, την τεχνική διαμόρφωσης και τον αριθμό των multi-codes.

Υλοποιεί την HARQ λειτουργία. Τα bit που θα δώσει στην έξοδο εξαρτώνται από τον αριθμό των bit εισόδου, τον αριθμό των bit εξόδου (συνάρτηση του UE soft-buffering capability) και την παράμετρο RV (Redundancy Version).

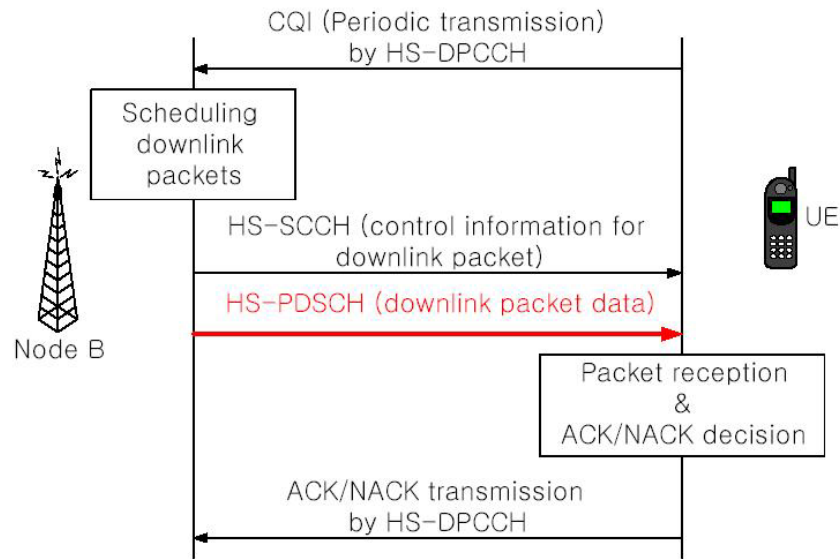
Η λειτουργία αυτή χρησιμοποιείται όταν χρησιμοποιούνται για μετάδοση περισσότεροι από ένας κωδικοί (multi-code transmission). Τα bit μοιράζονται ομοιόμορφα μεταξύ των κωδικών.

Η HSDPA χρησιμοποιεί μόνο intra-frame interleaving των 2 msec. Το interleaving γίνεται ανεξάρτητα για κάθε κωδικό στην περίπτωση του multi-code transmission.

Η λειτουργία αυτή εφαρμόζεται μόνο σε 16-QAM διαμορφωμένα bit κατά την επανεκπομπή αυτών ώστε τα bit που είχαν μεγαλύτερο BER πριν τώρα να έχουν μικρότερο και ανάποδα..

2.3.6 Σειρά εκτέλεσης λειτουργιών μετάδοσης στο HSDPA

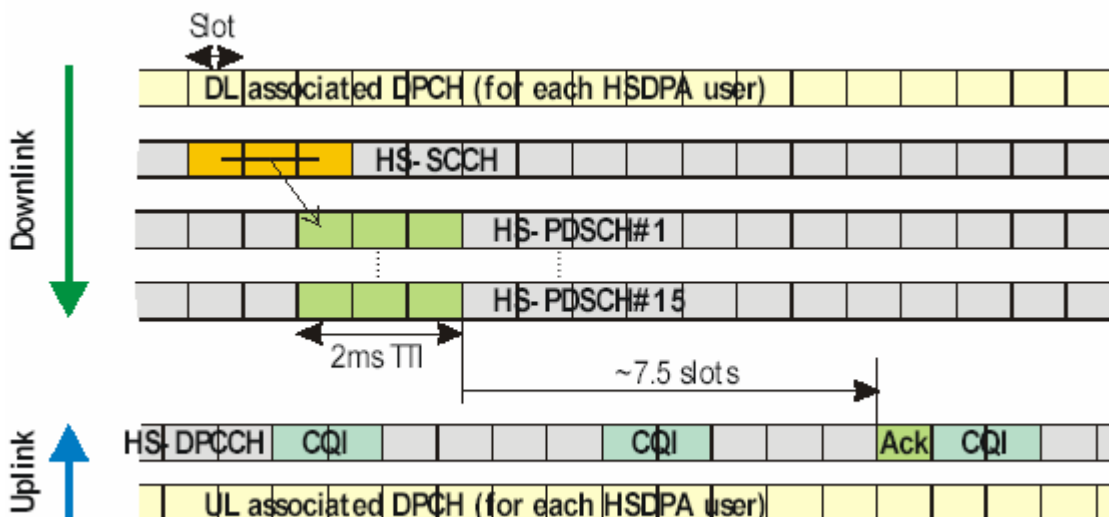
Στο σχήμα της εικόνας 2.16 φαίνεται η σειρά των κυκλικά επαναλαμβανόμενων λειτουργιών που εκτελούνται από και προς ένα HSDPA χρήστη όταν ο σταθμός βάσης έχει δεδομένα για μετάδοση.



Εικόνα 2.16 : Σειρά εκτέλεσης λειτουργιών κατά την επικοινωνία μέσω του HS-DSCH

* CQI = Channel Quality Indicator

Η χρονική συσχέτιση των λειτουργιών αυτών στα αντίστοιχα κανάλια της HSDPA αρχιτεκτονικής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 2.17):



Εικόνα 2.17 : Χρονική συσχέτιση λειτουργιών μετάδοσης, λήψης, αποκωδικοποίησης και επιβεβαίωσης στο HSDPA.

2.3.7 Μέθοδοι προσαρμογής της ζεύξης :

Το κριτήριο επιλογής του κατάλληλου MCS και του αριθμού των κωδικών που θα χρησιμοποιηθούν για μετάδοση μπορεί να βασιστεί σε αρκετά στοιχεία, μεταξύ των οποίων τα πιο βασικά είναι:

- Channel Quality Indicator (CQI) : Αποτελεί μια αναφορά του τερματικού προς το Node-B σχετικά με το MCS και τον αριθμό των κωδικών που μπορεί να υποστηρίξει κατά την επόμενη μετάδοση προς αυτό μέσω του HS-DSCH ώστε το αναμενόμενο BLER να μην είναι μεγαλύτερο από 10% για την πρώτη μετάδοση. Το RNC καθορίζει την περιοδικότητα με την οποία το UE πρέπει να αναφέρει το CQI, και η οποία μπορεί να πάρει τις τιμές 2, 4, 8, 10, 20, 40, 80, 100 msec [15]. Οι πίνακες με το σύνολο των CQI αναφορών μπορούν να βρεθούν στο [16].

- Μετρήσεις ισχύος στο συσχετισμένο DPCH: Η ισχύς εκπομπής στο συσχετισμένο DPCH μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να αποκτήσουμε γνώση για την τρέχουσα κατάσταση του καναλιού κάθε χρήστη. Το πλεονέκτημα της αξιοποίησης αυτής της πληροφορίας είναι ότι δεν απαιτείται επιπλέον σηματοδότηση και ότι η πληροφορία αυτή είναι διαθέσιμη ανά slot. Για να γίνει χρήση αυτής της πληροφορίας ο Node-B χρειάζεται έναν πίνακα με την σχετική μετατόπιση του Eb/No μεταξύ του DPCH και του HS-DSCH για τα διάφορα MCS και δεδομένου του επιθυμητού BLER. Επίσης, η τεχνική αυτή περιορίζεται στις περιπτώσεις όπου τα HS-DSCH και DPCH εφαρμόζονται στον ίδιο τύπο ανιχνευτή (π.χ. έναν συμβατικό RAKE) και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν το συσχετισμένο DPCH εισέρχεται σε λειτουργία soft-handover.

- Hybrid ARQ Acknowledgements : Οι επιβεβαιώσεις που χρησιμοποιούνται από το HARQ πρωτόκολλο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένδειξη για την ποιότητα της ζεύξης του χρήστη (σε σχέση με το τρέχον MCS και τον αριθμό των κωδικών). Παρόλα αυτά, αυτή η πληροφορία είναι διαθέσιμη μόνο κατά την διάρκεια εξυπηρέτησης του χρήστη και δεν παρέχει πληροφορία σχετικά με την στιγμιαία κατάσταση του καναλιού. Επίσης, η πληροφορία που δίνεται δεν είναι λεπτομερής, όπως αυτή των δύο προηγούμενων τεχνικών, αφού μεταφέρεται μέσω ενός μόνο bit.

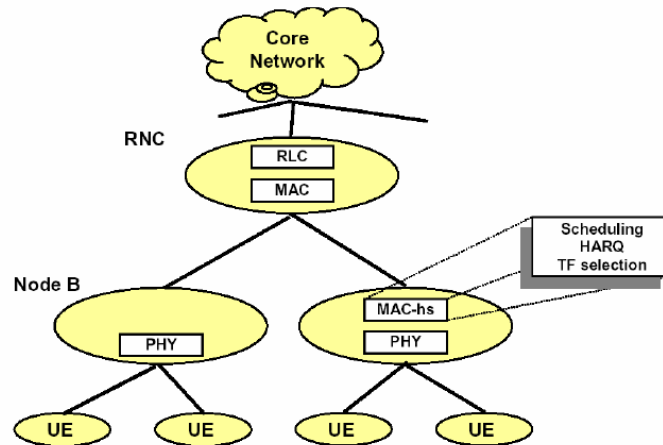
- Μέγεθος ουράς: Το ποσό των δεδομένων που βρίσκονται στον MAC-hs καταχωρητή κάθε χρήστη στο Node-B μπορεί επίσης να επηρεάσει την επιλογή του MCS και του αριθμού των κωδικών (π.χ. πολύ λίγη πληροφορία στον καταχωρητή μπορεί να μεταδοθεί με συνδυασμό MCS/αριθμού κωδικών ο οποίος δεν πετυχαίνει το μέγιστη δυνατή ρυθμαπόδοση αλλά μπορεί να μεταδώσει όλη την πληροφορία εντός ενός TTI με μικρότερο BLER).

2.4 Αλλαγές στην αρχιτεκτονική του WCDMA

Η αρχιτεκτονική HSDPA υλοποιείται πάνω από το WCDMA του UMTS και έτσι οι αλλαγές που απαιτούνται είναι μικρές. Οι κύριες διαφορές με το WCDMA έχουν να κάνουν με την εισαγωγή νέων καναλιών τόσο στο επίπεδο μεταφοράς όσο και στο φυσικό επίπεδο (HS-DSCH, HS-SCCH και HS-DPCCH) και την μεταφορά λειτουργιών από το RNC στο Node-B (εικόνα 2.18) ώστε οι αποφάσεις που αφορούν το ασύρματο κανάλι να λαμβάνονται από οντότητα η οποία βρίσκεται πιο κοντά σε αυτό και άρα να λαμβάνονται ταχύτερα .

Οι λειτουργίες του ARQ, του scheduling και κάποιες λειτουργίες MAC κατεβαίνουν στο Node-B όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Αυτό σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να γίνει με απλή αναβάθμιση του λογισμικού των πλακετών του Node-B [8],[12] Σε άλλες περιπτώσεις ίσως

χρειαστεί αντικατάσταση των πλακετών με νέες στις οποίες θα έχουν προστεθεί οι νέες λειτουργίες φυσικού επιπέδου που απαιτούνται για την υλοποίηση της HSDPA.

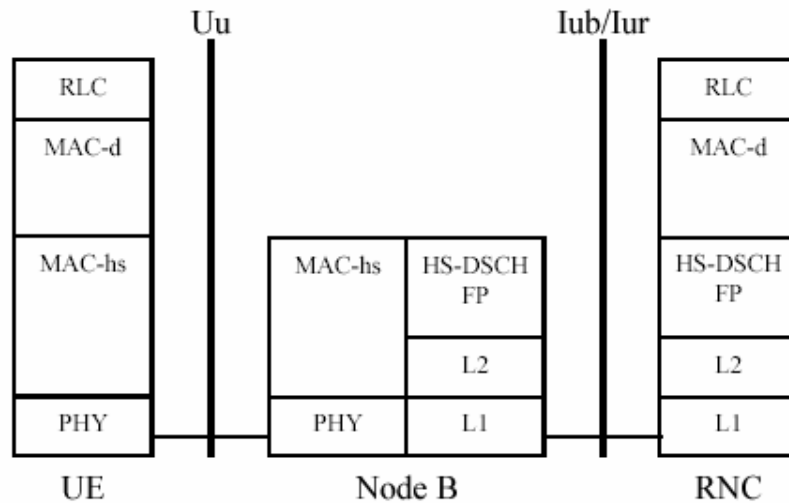


Εικόνα 2.18 : Μεταφορά λειτουργιών της HSDPA σε σχέση με το WCDMA

Λίγο πιο αναλυτικά έχουμε ότι στο RNC θα πρέπει να γίνει μια επέκταση των πρωτοκόλλων RRC και NBAP καθώς και κάποιες αλλαγές στα PDCP, RLC και MAC-d ώστε αυτά να υποστηρίξουν τις νέες λειτουργίες και γίνουν συμβατά με τα πρότυπα της 3GPP. Στο Node-B πρέπει να προστεθεί (εφ'όσον δεν υπάρχει) ένας διαμορφωτής 16-QAM (αυτό αυξάνει και τις απαιτήσεις γραμμικότητας ως προς πλάτος του διανύσματος σφάλματος (Error Vector Magnitude ή EVM) στην αλυσίδα των ενισχυτών ισχύος), να γίνουν αλλαγές στο NBAP πρωτόκολλο και να προστεθεί (εφ'όσον δεν υπάρχει) υλικό το οποίο να παρέχει την απαραίτητη επεξεργαστική ισχύ και αποθηκευτική ικανότητα για τις λειτουργίες της HSDPA.

Όπως είπαμε, κάθε χρήστης του HS-DSCH καναλιού διατηρεί παράλληλα και μια DCH σύνδεση. Το MAC πρωτόκολλο του RNC θα αποφασίσει μέσω ποίου καναλιού (DCH ή HS-DSCH) θα γίνει η μετάδοση του MAC-d PDU. Για μετάδοση μέσω του HS-DSCH έχει προστεθεί μια νέα οντότητα στο Node-B, που καλείται High Speed MAC (MAC-hs) και αναλαμβάνει την χρονοδρομολόγηση, την λειτουργία του HARQ και του AMC πάνω από το HS-DSCH κανάλι. Επίσης, το MAC-hs αναλαμβάνει και το χειρισμό της πληροφορίας που μεταδίδεται μέσω του HS-SCCH καναλιού καθόδου και μέσω του HS-DPCCH καναλιού ανόδου. Τέλος, το MAC-hs οφείλει να διατηρεί και ένα παράθυρο εκπομπής για τα μπλοκ δεδομένων που μεταδίδονται (στο Node-B) και λαμβάνονται (στο τερματικό). Το παράθυρο στο Node-B εξασφαλίζει μεγαλύτερες ρυθμοποδόσεις ενεργοποιώντας πολλαπλά SAW ARQ και ελαττώνοντας το «νεκρό» χρόνο αναμονής για την λήψη ενός ACK, ενώ το παράθυρο στον δέκτη απαιτείται για την επαναδιάταξη πακέτων που έχουν ληφθεί με μη κανονική σειρά εξαιτίας των πολλαπλών SAW ARQ. Η τοποθέτηση του MAC-hs στο Node-B, του επιτρέπει να αποκτά πρόσφατες αναφορές σχετικά με την κατάσταση της ζεύξης κάθε χρήστη καθώς και την εκτέλεση του HARQ από το φυσικό επίπεδο για ταχύτερες επανεκπομπές.

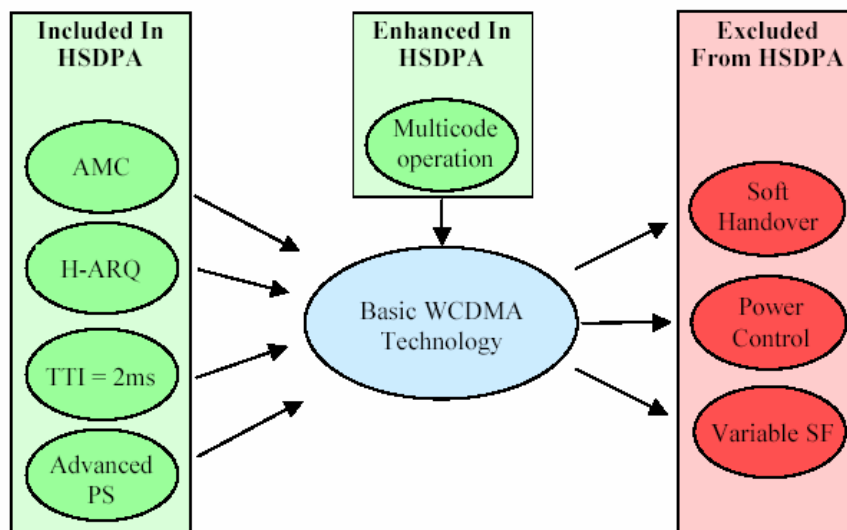
Το MAC-hs επιτρέπει μέχρι ένα μέγιστο αριθμό επανεκπομπών (επανεκπομπές L1 επιπέδου) για κάθε πακέτο που μεταδίδεται μέσω του HS-DSCH καναλιού. Οι επανεκπομπές μέσω του MAC-hs ελαττώνουν τον αριθμό των RLC επανεκπομπών και άρα την συνολική καθυστέρηση ή τις συνολικές απορρίψεις των SDU (TCP segments). Ο καθορισμός του μέγιστου αριθμού των επανεκπομπών ενός πακέτου από το MAC-hs εξαρτάται από το RTT της σύνδεσης (όσο μικρότερο RTT, τόσο λιγότερες επανεκπομπές προλαβαίνει να χειριστεί το MAC-hs πριν συμβεί timeout στο πρωτόκολλο TCP), αν και συνήθως τα περισσότερα πακέτα μεταδίδονται επιτυχώς σε 4 το πολύ μεταδόσεις. Αυξάνοντας πάντως κατά πολύ τον μέγιστο αριθμό επανεκπομπών στο L1 επίπεδο, το HS-DSCH απασχολείται (από κάποιο σημείο και μετά) για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να ελαττώνει σημαντικά την πιθανότητα RLC επανεκπομπής (γιατί από κάποιο σημείο και μετά οι L1 επανεκπομπές δεν βελτιώνουν σημαντικά το λαμβανόμενο (εικονικό) Es/No στον αποκωδικοποιητή).



Εικόνα 2.19 : Διαστρωμάτωση πρωτοκόλλων σε συστήματα που υλοποιούν την HSDPA.

Η αποθήκευση δεδομένων για μετάδοση μέσω του HS-DSCH στο Node-B επιβάλλει κάποιους περιορισμούς στην ελάχιστη αποθηκευτική ικανότητα του Node-B. Επίσης, η μετακίνηση των ουρών δεδομένων στο Node-B δημιουργεί την ανάγκη ενός μηχανισμού ελέγχου ροής (HS-DSCH Frame Protocol) που θα πρέπει να διατηρεί τους καταχωρητές γεμάτους. Το HS-DSCH Frame Protocol (εικόνα 2.19) θα χειρίζεται την μεταφορά δεδομένων από το Serving RNC στο Controlling RNC (αν εμπλέκεται το Iur interface) και από το Controlling RNC στο Node-B.

Επιπρόσθετα, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το HS-DSCH δεν υποστηρίζει soft-handover εξαιτίας την πολυπλοκότητας του συγχρονισμού μεταδόσεων από διάφορες κυψέλες. Παρόλα αυτά, το συσχετισμένο DPCCH με τον χρήστη μπορεί να λειτουργεί σε soft-handover mode. Μια συγκεντρωτική παρουσίαση των λειτουργιών που εισάγονται ή απομακρύνονται από την HSDPA σε σχέση με το WCDMA φαίνεται στην εικόνα 2.20.



Εικόνα 2.20 : Λειτουργίες που το HSDPA εισάγει και αφαιρεί από το WCDMA.

2.5 Δυνατότητες των HSDPA Τερματικών

Η απόδοση του HSDPA εξαρτάται επίσης από τις δυνατότητες του κάθε τερματικού (που καθορίζουν το κατά πόσο το κάθε τερματικό μπορεί να αξιοποιήσει τις αυξημένες δυνατότητες της νέας αρχιτεκτονικής). Τα HSDPA τερματικά χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τις δυνατότητές τους. Ένα παράδειγμα τέτοιων κατηγοριών [17] φαίνεται στον πίνακα 2.2:

Category	Codes	Inter-TTI Interval	Maximum Number of bits of an HS-DSCH Transport Block received within a TTI	Total Number of Soft bits	Modulation	Data Rate
1	5	3	7300	19200	QPSK/16QAM	1.2 Mbps
2	5	3	7300	28800	QPSK/16QAM	1.2 Mbps
3	5	2	7300	28800	QPSK/16QAM	1.8 Mbps
4	5	2	7300	38400	QPSK/16QAM	1.8 Mbps
5	5	1	7300	57600	QPSK/16QAM	3.6 Mbps
6	5	1	7300	67200	QPSK/16QAM	3.6 Mbps
7	10	1	14600	115200	QPSK/16QAM	7.2 Mbps
8	10	1	14600	134400	QPSK/16QAM	7.2 Mbps
9	15	1	20432	172800	QPSK/16QAM	10.2 Mbps
10	15	1	28776	172800	QPSK/16QAM	14.4 Mbps
11	5	2	3650	14400	QPSK only	0.9 Mbps
12	5	1	3650		QPSK only	1.8 Mbps

Πίνακας 2.2 : Κατηγορίες δυνατοτήτων για τερματικά που υποστηρίζουν την HSDPA

Οι στήλες του πίνακα εξηγούνται αμέσως παρακάτω:

Codes : Αριθμός κωδικών του HS-DSCH (CDMA κώδικες με SF=16) που μπορούν να αξιοποιηθούν ταυτόχρονα από το τερματικό.

Inter-TTI Interval: Καθορίζει το ελάχιστο διάστημα μεταξύ της εκκίνησης δύο διαδοχικών εκπομπών στο τερματικό μέσω του HS-DSCH καναλιού. Αν έχει τιμή «1» τότε το τερματικό είναι ικανό για λήψη πληροφορίας από το HS-DSCH σε κάθε TTI.

Maximum Number of bits of an HS-DSCH Transport Block received within a TTI : Ο αριθμός αυτός σε συνδυασμό με το Inter-TTI interval καθορίζει το μέγιστο ρυθμό δεδομένων για το τερματικό. Για παράδειγμα, στην κατηγορία 1, έχουμε 7300 bit ανά TTI, δηλαδή $7300 \times 500 = 3.650.000$ bit/sec αν η λήψη γινόταν σε κάθε TTI. Επειδή όμως λήψη μπορεί να γίνει μόνο κάθε 3 TTI ο μέγιστος (υποτίθεται απουσία σφαλμάτων στην μετάδοση και άρα απουσία επανεκπομπών) ρυθμός που μπορεί να υποστηρίξει το τερματικό θα είναι: $3.650.000 / 3 \text{ bit/sec} \approx 1.2 \text{ Mbps}$.

Total Number of Soft bits : Ο συνολικός αριθμός των soft bit για όλες τις HARQ διαδικασίες που τρέχουν στο τερματικό (και οι οποίες μπορούν να είναι μέχρι 8). Η παράμετρος αυτή μπορεί να επηρεάσει την επίδοση του τερματικού ιδιαίτερα όταν αυτό βρίσκεται σε τοποθεσία με κακής ποιότητας λήψη οπότε ο αριθμός των επανεκπομπών που απαιτούνται μπορεί να είναι υψηλός. Ένα τερματικό με χαμηλό αριθμό από soft bits μπορεί να μην είναι ικανό να υποστηρίξει IR για τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσής του και έτσι η απόδοσή του μπορεί να είναι κάπως χαμηλότερη από ένα άλλο τερματικό με μεγάλο αριθμό από soft bits.

Modulation : Τεχνικές διαμόρφωσης που υποστηρίζονται από το τερματικό.

Data Rate : Μέγιστος ρυθμός με τον οποίο το τερματικό μπορεί να λαμβάνει δεδομένα.

2.6 Ισχύς λήψης σήματος στο HS-DSCH κανάλι

Η απόφαση χρονοδρομολόγησης σε κάθε TTI εξαρτάται άμεσα από την μέγιστη ρυθμαπόδοση την οποία μπορεί να υποστηρίξει ο κάθε χρήστης στο TTI αυτό. Η ρυθμαπόδοση αυτή είναι απόρροια της κατάστασης της ζεύξης μεταξύ κάθε χρήστη και του Node-B ή για την ακρίβεια του λαμβανόμενου SINR κάθε χρήστη. Το SINR που λαμβάνει κάθε χρήστης εξαρτάται σε πρώτη φάση από το μέσο τοπικό SINR κάθε χρήστη (το οποίο είναι σταθερό για μικρές τοπικές μετακινήσεις του χρήστη) που καθορίζεται από το link-budget του χρήστη και τις μεταβολές γύρω από αυτό που οφείλονται στο multipath fading και την κινητικότητα του χρήστη. Οι τελευταίες είναι σημαντικές ακόμα και για μετακινήσεις του χρήστη κατά αποστάσεις της τάξης του μήκους κύματος του φορέα. Ένα παράδειγμα υπολογισμού του στιγμιαίου E_s/N_o (λόγος ισχύος συμβόλου προς πυκνότητα ισχύος θορύβου) κάποιου χρήστη φαίνεται στον πίνακα 2.3:

Example of an HS-DSCH Downlink instantaneous Link Budget			
Total BS Tx Power		20 W	A
BS Power Dedicated to HS-DSCH	-	80 %	B
HS-DSCH Power		16 W	$C=A*B$
HS-DSCH Power		42 dBm	$10*\log(C)$
Number of codes used by HS-DSCH	-	15	D
Power per HS-DSCH code		1.0667 W	$E=C/D$
Power per HS-DSCH code		30.3 dBm	$F=10*\log(E)$
Cable Loss	-	3 dB	G
Body Loss	-	1 dB	H
Antenna Gain	+	18 dB	I
AirPower / Code		44.3 dBm	$K=F-G-H+I$
BS – Mobile distance		300 m	
Path Loss	-	123 dB	L (Okumura-Hata model)
Shadow Fading	-	4 dB	M
Obstacle (inside car, trees, walls, ...) Fading	-	5 dB	N
Instantaneous Multipath Fading	-	2 dB	O
Code Power Received by the Mobile		- 89.7dBm	$P=K-L-M-N-O$
chiprate		3.84 Mcps	P
Spreading Factor (PN Sequence Length)		16	Q
Thermal Noise Density	-	-174 dBm/Hz	R
Mobile Station Receiver Noise Figure	-	8 dB	S
Receiver Noise Density		-166 dBm/Hz	$T=R+S$
Receiver Noise Power		-112.2 dBm	$U=T+10*\log(P/Q)$
Interference Margin	-	3 dB	V
Interference Plus Noise Power		-109.2 dBm	$W=U+V$
Received E_s/N_o (per code)		19.5 dB	$X=P+W$

Πίνακας 2.3 : Ενδεικτικό Link Budget για μια τυχαία στιγμή σε ένα HSDPA τερματικό

* Οι τιμές του μέσου SNR εξαρτώνται κυρίως από την απόσταση του χρήστη από το σταθμό βάσης.

Οι διάφορες γραμμές του παραπάνω πίνακα εξηγούνται αμέσως παρακάτω:

Total BS Tx Power : Η συνολική ισχύς εκπομπής που είναι διαθέσιμη (μέσω της γεννήτριας ή του ενισχυτή που βρίσκεται πριν από την κεραία) από τον σταθμό βάσης.

BS Power Dedicated to HS-DSCH : Ποσοστό της συνολικής ισχύς που δεσμεύεται για την εκπομπή του HS-DSCH καναλιού.

HS-DSCH Power : Η ισχύς του HS-DSCH καναλιού.

Number of codes used by HS-DSCH : Ο αριθμός των CDMA κωδικών με SF=16 που χρησιμοποιούνται από το HS-DSCH κανάλι.

Power per HS-DSCH code : Ισχύς που αναλογεί σε κάθε CDMA κώδικα του HS-DSCH καναλιού (υπόθεση ομοιόμορφης κατανομής της ισχύος στους διαθέσιμους κώδικες).

Cable Loss : Απώλειες στην ισχύ του σήματος λόγω της διάδοσης διαμέσω του καλωδίου που ενώνει την πηγή ισχύος με την κεραία. Περιλαμβάνει και τις απώλειες των συνδέσεων του καλωδίου.

Antenna Gain : Κέρδος στην ισχύ του σήματος προς την κατεύθυνση ενδιαφέροντος από την κεραία.

AirPower / Code : Ισχύς με την οποία ξεκινά την διάδοσή του (μόλις εκπεμφθεί από την κεραία) κάθε CDMA κωδικός του HS-DSCH.

BS – Mobile distance : Ευθεία απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης (Node-B) και κινητού τερματικού.

Path Loss : Απώλειες στην ισχύ του σήματος λόγω διάδοσης. Περιλαμβάνει μόνο τις απώλειες λόγω ελεύθερης διάδοσης.

Shadow Fading : Απώλειες στην ισχύ του σήματος λόγω παρεμβολής φυσικών εμποδίων (λόφοι, βουνά, κτίρια, κ.λ.π.) στην ευθεία που ενώνει το σταθμό βάσης με το τερματικό.

Obstacle Fading : Απώλειες στην ισχύ του σήματος που μπορεί να οφείλονται σε μικρά εμπόδια (αμάξωμα αυτοκινήτου, δέντρα) ή ειδικές καταστάσεις του τερματικού (π.χ κλήση εντός κτιρίου).

Instantaneous Multipath Fading : Απώλειες στην ισχύ του σήματος λόγω φαινομένου πολλαπλής διόδευσης.

Code Power Received by the Mobile : Η ισχύς με την οποία φθάνει το σήμα (για την ακρίβεια κάθε σήμα/κωδικός) στον δέκτη. Ισούται με την ισχύ με την οποία βγαίνει το σήμα στον αέρα μείον τις απώλειες κατά την διάδοσή του.

Thermal Noise Density : Πυκνότητα ισχύος θερμικού θορύβου.

Mobile Station Receiver Noise Figure : Αύξηση στο επίπεδο του θερμικού θορύβου, λόγω θορύβου εισαγόμενου από την λειτουργία της ίδιας της συσκευής του τερματικού.

Receiver Noise Density : Πυκνότητα ισχύος θορύβου (συνολικού και όχι μόνο θερμικού) στον δέκτη.

Receiver Noise Power : Ισχύς θορύβου στον δέκτη.

Interference Margin : Επιπρόσθετο περιθώριο στην στάθμη του θορύβου το οποίο εκφράζει τις παρεμβολές στον δέκτη από άλλα κανάλια του ίδιου ή διαφορετικού φορέα.

Interference Plus Noise Power : Ισχύς θορύβου και παρεμβολών (ισχύς ανεπιθύμητων σημάτων) στον δέκτη.

Received Es/No (per code) : Λόγος της λαμβανόμενης ισχύος σήματος (συμβόλου) προς θόρυβο (στον θόρυβο συμπεριλαμβάνονται και οι παρεμβολές) ανά κωδικό.

* Μελέτες σχετικά με την γενική λειτουργία και επιδόσεις της HSDPA αρχιτεκτονικής (χωρίς εξέταση της επίδρασης των αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης) μπορούν να βρεθούν στα [18], [19], [20], [21], [22].

3 Προσομοίωση της HSDPA αρχιτεκτονικής

3.1 Βασικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες του προσομοιωτή

Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας αναπτύχθηκε ένας προσομοιωτής ενός συστήματος HSDPA για μια κυψέλη. Η υλοποίηση έγινε σε περιβάλλον προγραμματισμού Delphi χρησιμοποιώντας στοιχεία διαδικαστικού και αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού. Ο προσομοιωτής που αναπτύχθηκε αποτελείται από 5000 γραμμές κώδικα, περίπου, που περιλαμβάνουν 4 βασικές μονάδες (units) οι οποίες υλοποιούν:

α) την μονάδα συντονισμού, με κύριες λειτουργίες: την εισαγωγή παραμέτρων προσομοίωσης, την αρχικοποίηση του προσομοιωτή, τον συντονισμό και κλήση διαδικασιών προσομοίωσης από άλλες μονάδες και την παρουσίαση ενδιάμεσων και τελικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

β) την μονάδα δικτυακής κίνησης, με κύρια λειτουργία την προσομοίωση των πηγών δικτυακής κίνησης, δηλαδή, την δημιουργία αφίξεων πακέτων με κατάλληλο ρυθμό και μεγέθη πακέτων.

γ) την μονάδα ασύρματων ζεύξεων, με κύρια λειτουργία την προσομοίωση της μέσης ισχύς λήψης των σημάτων καθώς και των μεταβολών που υφίσταται η ισχύς λήψης κάθε ζεύξης για κάθε χρήστη ως προς το χρόνο.

δ) την μονάδα σταθμού βάσης, με κύρια λειτουργία την προσομοίωση της λειτουργίας του χρονοδρομολογητή, των καταχωρητών, του εκτιμητή της κατάστασης του ασύρματου καναλιού και του HARQ.

The screenshot shows a software window titled 'Form1' with a menu bar (Application, Help) and a toolbar. The main area displays simulation results. At the top, there's a button 'Create a flow trace!' and a status bar indicating 'Simulation completed!' with a value of '50000'. Below this is a 'Simulate HSDPA' button. The interface is divided into two main sections: 'Individual Statistics (Select Flow)' and 'Total Statistics'. Each section contains a table of performance metrics.

Individual Statistics (Select Flow)		Total Statistics	
Arrivals :	79147		667987
Deliveries :	28847 or 36.45 %		164993 or 24.7 %
Timeouts :	0 or 0 %		0 or 0 %
Overflows :	50000 or 63.17 %		500000 or 74.85 %
MeanDelay :	346.3000 msec		601.6 msec
PeakDelay :	1200 msec		7032 msec
Bits Sended:	1539E5 Kbits or 17.48		659994.3 Kbits
Goodput:	1154 Kbps		6600 Kbps
Overall Tx Time :	11.1 %		100 %
Successful Tx Time :	10.75 %		89.13 %
Mean Tx Rate:	1.072E4 Kbps/Tx		7209 Kbps/Tx
Offered Load:	3166 Kbps		2.672E4 Kbps
Mean Es/No :	27.01 dB		

Ο προσομοιωτής μας υλοποιεί συνολικά 25 χρονοδρομολογητές και 8 πηγές δικτυακής κίνησης. Οι παράμετροι προσομοίωσης εισάγονται μέσω αρχείου κειμένου (.txt). Η φόρμα απεικόνισης των τελικών αποτελεσμάτων φαίνεται στην εικόνα 3.1. Ακολουθεί η επεξήγηση των στατιστικών που παρουσιάζονται στα τελικά αποτελέσματα:

ARRIVALS: Συνολικές αφίξεις πακέτων κατά την διάρκεια της προσομοίωσης

DELIVERIES: Συνολικός αριθμός πακέτων που μεταδόθηκαν επιτυχώς κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

TIMEOUTS: Αριθμός πακέτων που απορρίφθηκαν λόγω εκπνοής του χρόνου αναμονής κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

OVERFLOWS: Αριθμός πακέτων

Εικόνα 3.1 : Η φόρμα παρουσίασης αποτελεσμάτων του προσομοιωτή.

που απορρίφθηκαν λόγω υπερχείλισης του καταχωρητή κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

MEANDELAY: Μέση καθυστέρηση που υφίσταται ένα πακέτο από την στιγμή άφιξης μέχρι την ολοκλήρωση της μετάδοσής του (αναφέρεται μόνο στα πακέτα τα οποία μεταδόθηκαν επιτυχώς).

PEAKDELAY: Μέγιστη καθυστέρηση που υφίσταται ένα πακέτο από την στιγμή άφιξης μέχρι την ολοκλήρωση της μετάδοσής του (αναφέρεται μόνο στα πακέτα τα οποία μεταδόθηκαν επιτυχώς).

BITS_SENDED: Συνολικός αριθμός bit που μεταδόθηκαν επιτυχώς κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

GOODPUT: Μέση ρυθμαπόδοση (μέσος αριθμός bit που μεταδόθηκαν επιτυχώς ανά δευτερόλεπτο) κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

OVERALL Tx TIME: Ποσοστό του χρόνου προσομοίωσης κατά το οποίο έγιναν μεταδόσεις.

SUCCESSFULL Tx TIME: Ποσοστό του χρόνου προσομοίωσης κατά το οποίο έγιναν επιτυχείς μεταδόσεις.

MEAN Tx RATE: Μέση ρυθμαπόδοση των TTI στα οποία έγινε εκπομπή.

OFFERED LOAD: Μέσος ρυθμός άφιξης δεδομένων κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

Επίσης, ο προσομοιωτής μας έχει την δυνατότητα οπτικής απεικόνισης της λειτουργίας του. Η φόρμα οπτικής απεικόνισης φαίνεται στην εικόνα 3.2. Οι δύο στήλες στο αριστερό μέρος εμφανίζουν το μέγεθος της ουράς του καταχωρητή κάθε χρήστη σε πακέτα και σε bit, αντίστοιχα. Στο δεξιό μέρος εμφανίζονται, το μέσο Es/No της ζεύξης κάθε χρήστη, το στιγμιαίο (πραγματικό) Es/No καθώς και το εκτιμώμενο από το σταθμό βάσης Es/No της κάθε ζεύξης για το τρέχον TTI. Στο πάνω μέρος εμφανίζεται ο αύξων αριθμός του TTI το οποίο προσομοιώνεται και η επόμενη λειτουργία του προσομοιωτή που πρόκειται να εκτελεστεί. Στο κάτω μέρος φαίνεται ποιος χρήστης δρομολογήθηκε στο προηγούμενο TTI, με τι ρυθμό μετάδοσης, ποιο ήταν το MCS που χρησιμοποιήθηκε, ποιο το ελάχιστο Es/No που απαιτούνταν για την χρήση αυτού του MCS και αν

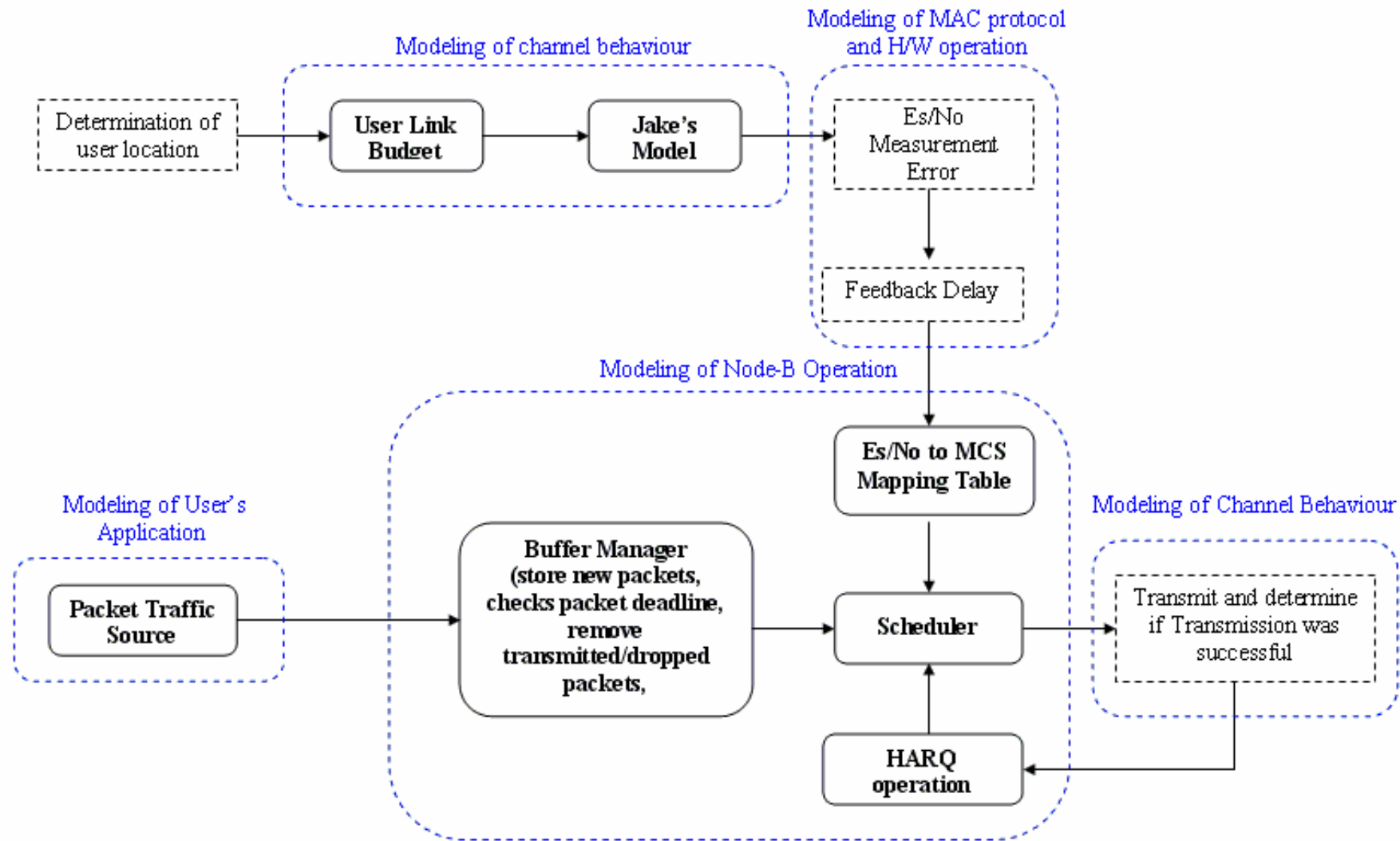


Εικόνα 3.2 : Η φόρμα παρουσίασης της λειτουργίας του προσομοιωτή σε πραγματικό χρόνο.

το αποτέλεσμα της μετάδοσης ήταν επιτυχές. Τέλος, στο μέσο της φόρμας εμφανίζεται ο καταχωρητής κάθε χρήστη (με κίτρινο είναι τα πακέτα που έχει αποθηκευμένα προς μετάδοση, με κόκκινο πακέτα που έχουν εκπνεύσει και πρόκειται να απορριφθούν (στην συγκεκριμένη εικόνα δεν υπάρχει κανένα)).

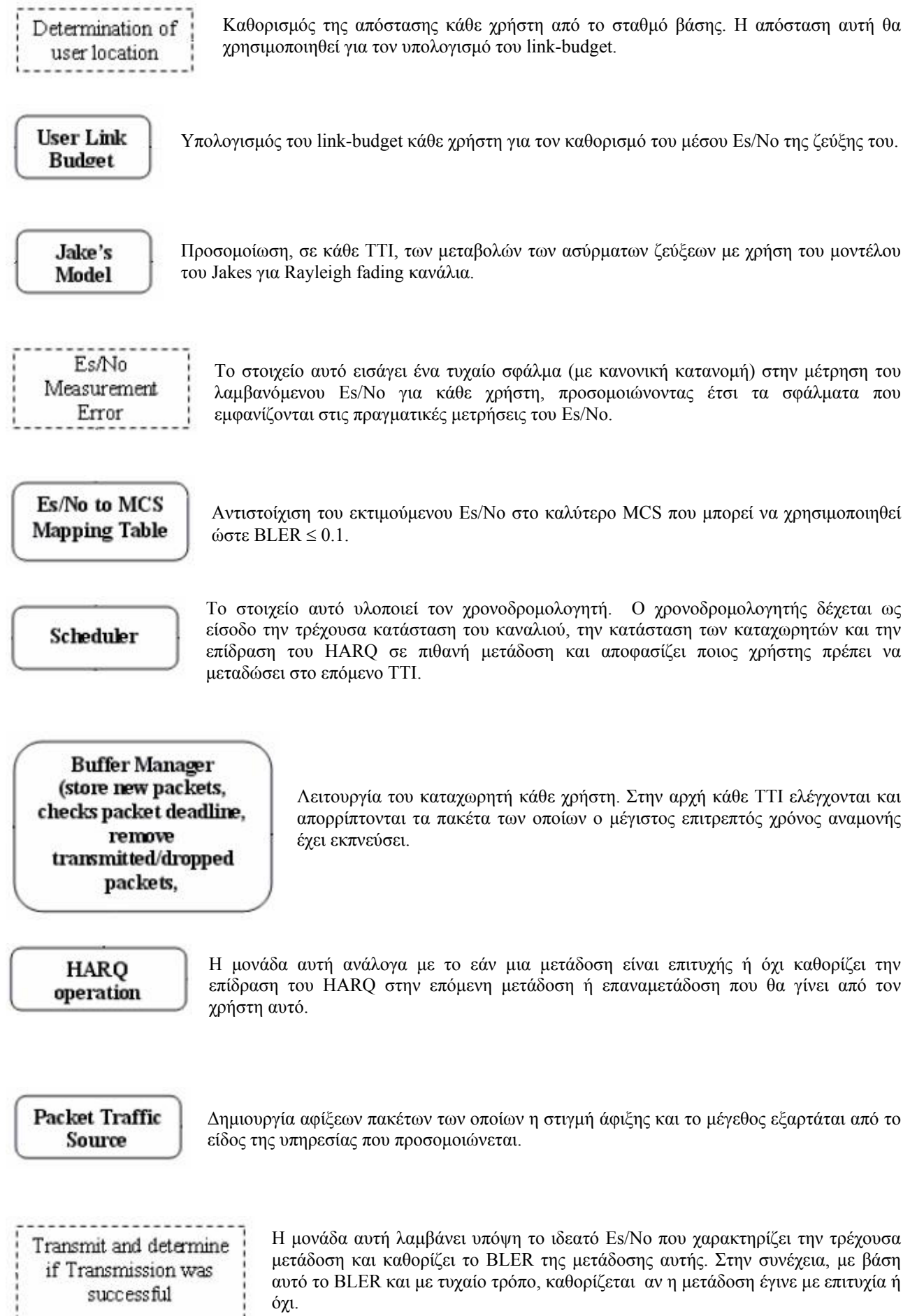
3.2 Λειτουργικά διαγράμματα του προσομοιωτή

Μια γενική άποψη της δομής του προσομοιωτή παρουσιάζεται στο διάγραμμα της εικόνας 3.3:

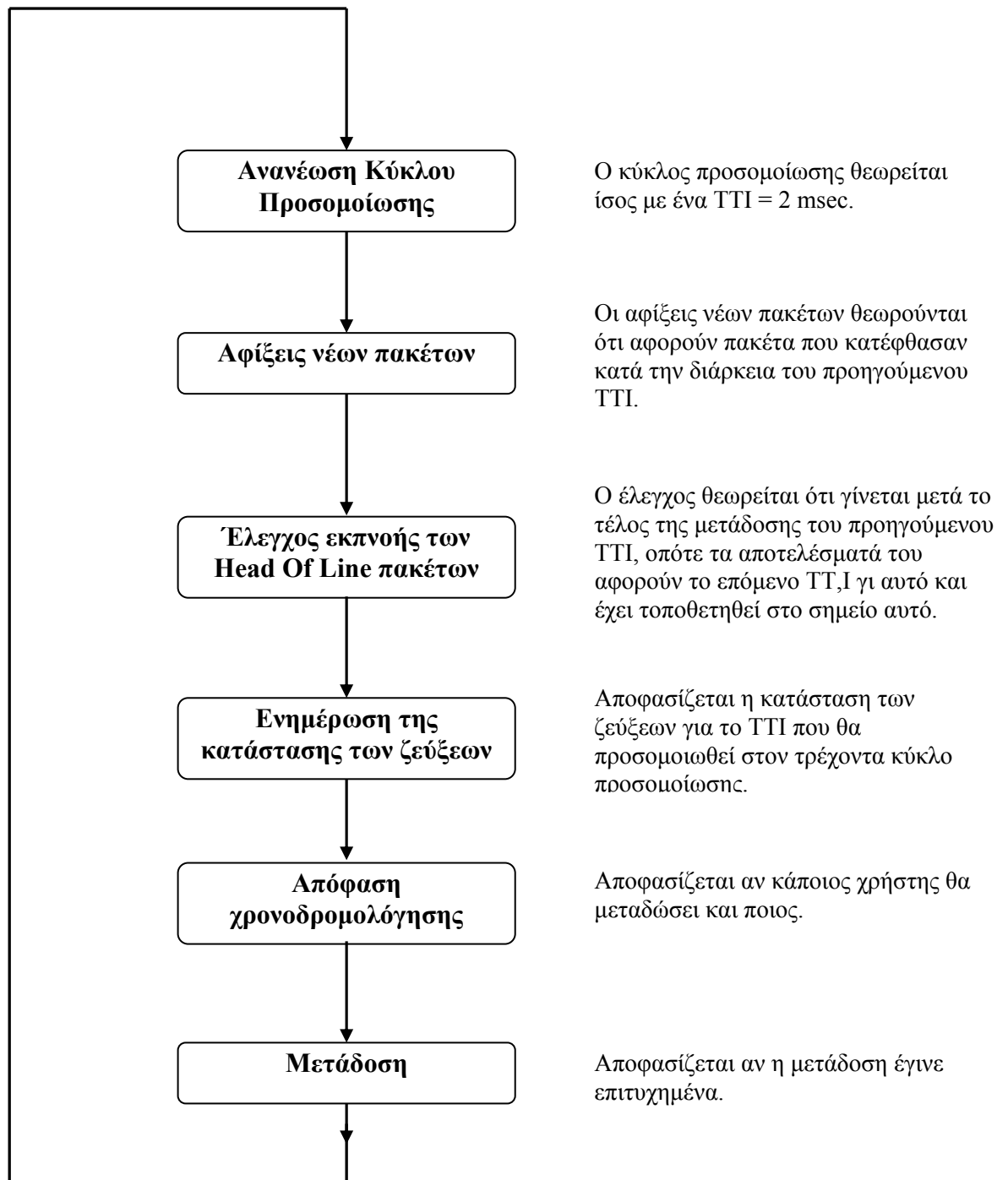


Εικόνα 3.3 : Δομικό διάγραμμα του προσομοιωτή

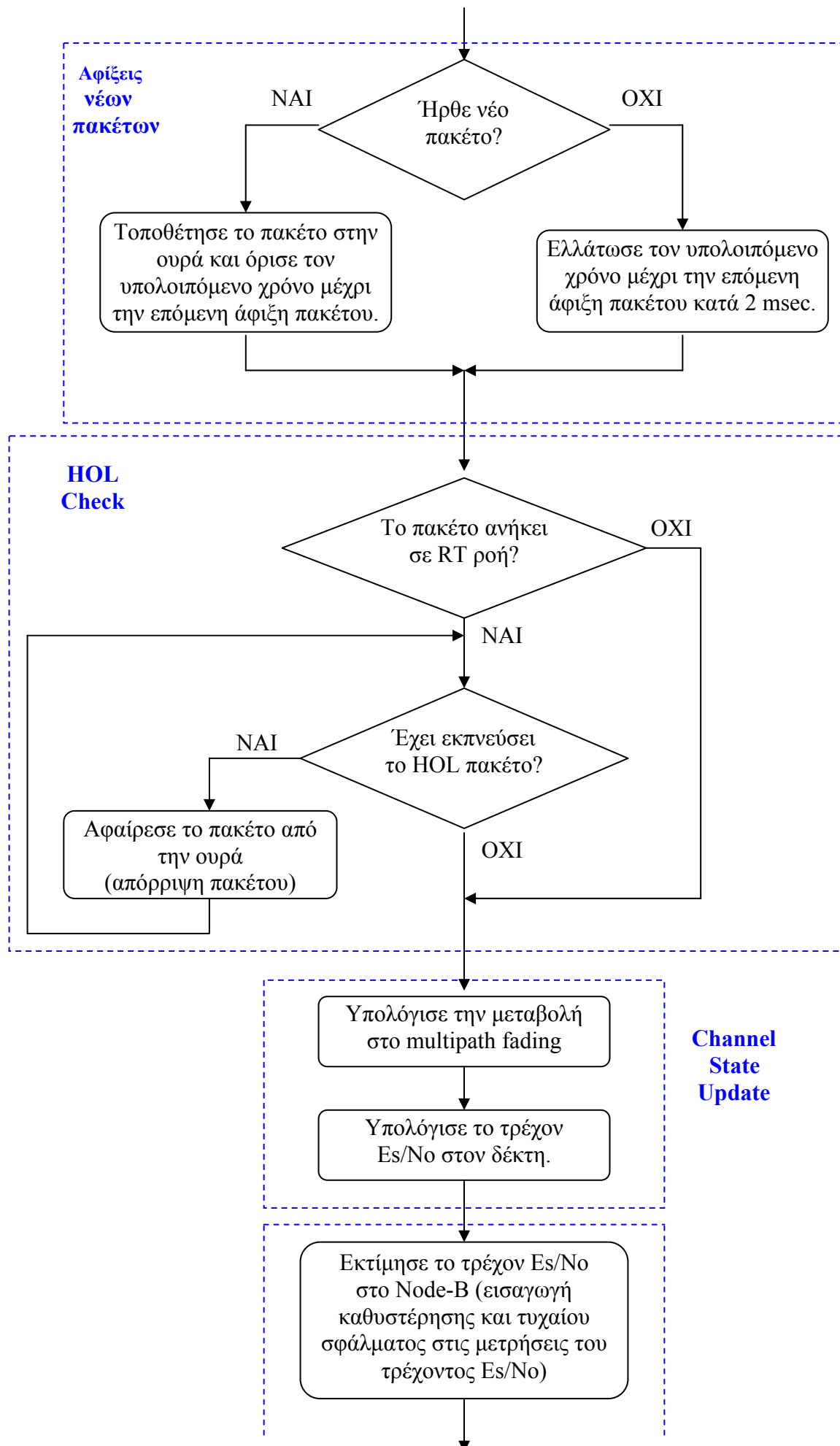
Επεξήγηση των στοιχείων του διαγράμματος :

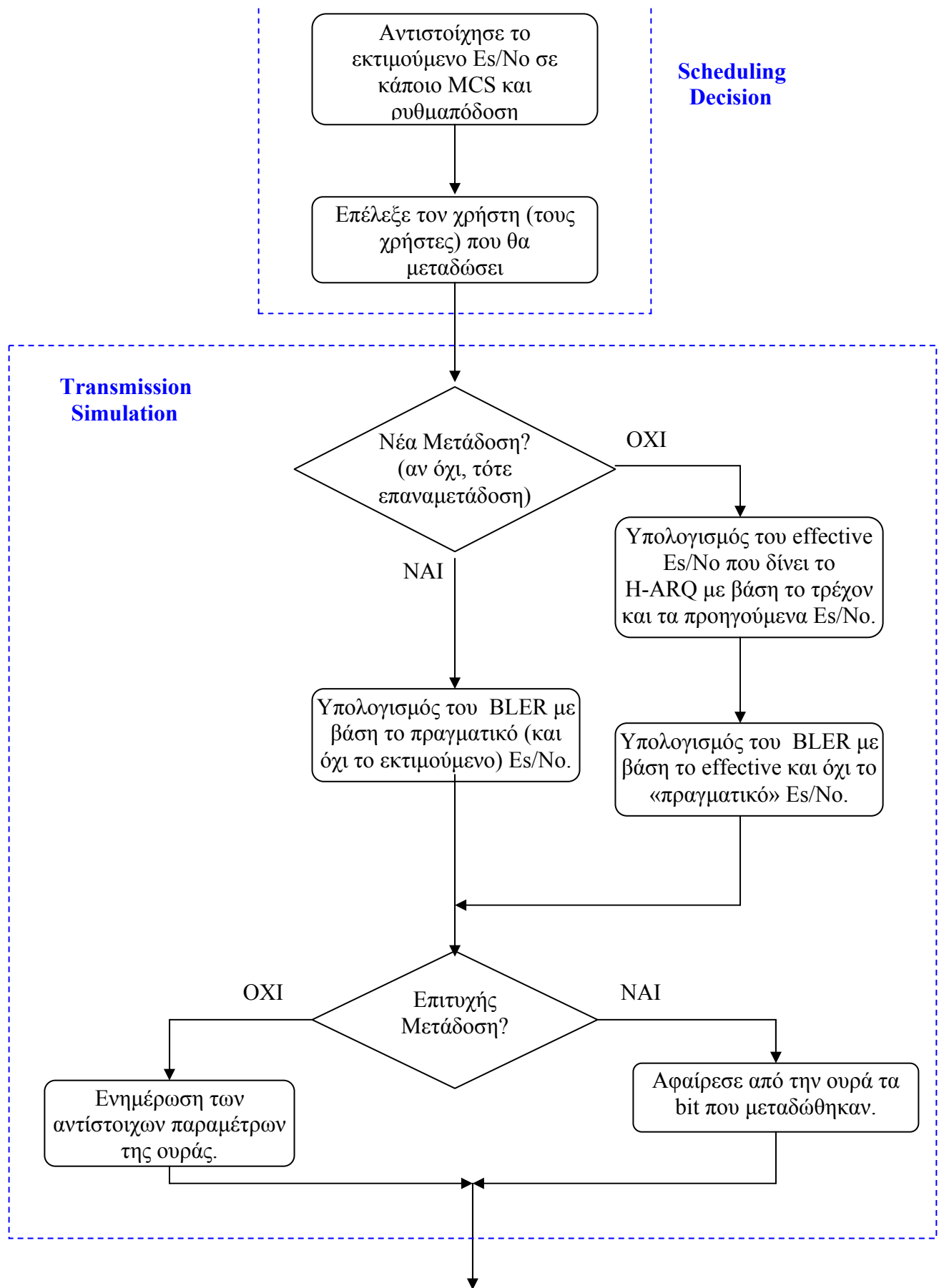


Ακολουθεί ένα συνοπτικό (εικόνα 3.4) και στην συνέχεια ένα πιο αναλυτικό διάγραμμα ροής (εικόνα 3.5) του προσομοιωτή. Η προσομοίωση προχωράει με βήματα του ενός TTI (2 msec).



Εικόνα 3.4 : Γενικό διάγραμμα ροής του προσομοιωτή





Εικόνα 3.5 : Αναλυτικό διάγραμμα ροής του προσομοιωτή

* Οι παραπάνω λειτουργίες εκτελούνται σε κάθε κύκλο προσομοίωσης.

3.3 Λεπτομέρειες υλοποίησης

3.3.1 Υπολογισμός του μέσου λαμβανόμενου SINR κάθε χρήστη

Ο υπολογισμός αυτός κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων έχει γίνει με δυο τρόπους. Σε περιπτώσεις που μας ενδιαφέρει να πάρουμε αριθμητικά αποτελέσματα για την λειτουργία του HSDPA (να μετρήσουμε τις επιδόσεις που μπορεί να δώσει στην πράξη), ο υπολογισμός γίνεται ως εξής:

α) ο χρήστης τοποθετείται με τυχαίο τρόπο (έτσι ώστε το σύνολο των χρηστών να είναι ομοιόμορφα τοποθετημένο εντός της κυψέλης) μέσα σε μια κυκλική κυψέλη,

β) με βάση την απόσταση χρήστη-σταθμού βάσης υπολογίζεται ένα ενδεικτικό Link Budget το οποίο και καθορίζει το μέσο λαμβανόμενο SINR του χρήστη καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης.

Στις υπόλοιπες (και περισσότερες) περιπτώσεις, όπου μας ενδιαφέρει η ποιοτική συμπεριφορά του συστήματος, το μέσο SINR προκαθορίζεται από εμάς ώστε να εξετάσουμε την συμπεριφορά του συστήματος κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, οι οποίες να είναι ενδεικτικές της λειτουργίας του συστήματος.

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι το μέσο λαμβανόμενο SINR θεωρείται σταθερό καθ'όλη την διάρκεια της προσομοίωσης αφού η μελέτη μας δεν ενδιαφέρεται για πολύ μεγάλες χρονικές κλίμακες (δηλαδή, για περιπτώσεις όπου κάποιος χρήστη περνάει ξαφνικά σε περιοχή με διαφορετική σκίαση) αλλά για μικρότερες χρονικά κλίμακες (της τάξης των μερικών δευτερολέπτων) οι οποίες και αποκαλύπτουν την ποιοτική συμπεριφορά του χρονοδρομολογητή.

Ένα τυπικό Link Budget του καναλιού καθόδου για την πρώτη περίπτωση φαίνεται στον πίνακα 3.1:

Example of HS-DSCH Downlink Link Budget			
Total BS Tx Power		20 W	A
BS Power Dedicated to HS-DSCH	-	80 %	B
HS-DSCH Power		16 W	$C=A*B$
HS-DSCH Power		42 dBm	$10*\log(C)$
Number of codes used by HS-DSCH	-	15	D
Power per HS-DSCH code		1.0667 W	$E=C/D$
Power per HS-DSCH code		30.3 dBm	$F=10*\log(E)$
Cable Loss	-	3 dB	G
Body Loss	-	1 dB	H
Antenna Gain	+	18 dB	I
AirPower / Code		44.3 dBm	$K=F-G-H+I$
BS – Mobile distance		300 m	
Path Loss	-	123 dB	L (Okumura-Hata model)
Shadow Fading	-	4 dB	M
Obstacle (inside car, trees, walls, ...) Fading	-	5 dB	N
Instantaneous Multipath Fading	-	2 dB	O
Code Power Received by the Mobile		- 89.7dBm	$P=K-L-M-N-O$
chiprate		3.84 Mcps	P
Spreading Factor (PN Sequence Length)		16	Q
Thermal Noise Density	-	-174 dBm/Hz	R
Mobile Station Receiver Noise Figure	-	8 dB	S
Receiver Noise Density		-166 dBm/Hz	$T=R+S$
Receiver Noise Power		-112.2 dBm	$U=T+10*\log(P/Q)$
Interference Margin	-	3 dB	V
Interference Plus Noise Power		-109.2 dBm	$W=U+V$
Received Es/No (per code)		19.5 dB	$X=P+W$

Πίνακας 3.1

Στα σενάρια που εξετάζουμε οι τιμές του μέσου SNR εξαρτώνται κυρίως από την απόσταση του χρήστη από το σταθμό βάσης. Σε πιο πραγματικά σενάρια η τιμή του μέσου λαμβανόμενου SIR είναι πιο πολύ εξαρτημένη και από άλλα φαινόμενα όπως η σκίαση, η τοποθεσία του χρήστη (π.χ εντός κτιρίου), η ευαισθησία του δέκτη του κινητού και άλλα, στα οποία εδώ δεν έχει δοθεί ιδιαίτερο βάρος (πολλά από αυτά έχουν ληφθεί υπόψη αλλά με μικρότερο εύρος τιμών από αυτές που μπορεί να πάρουν στην πραγματικότητα).

3.3.2 Υπολογισμός του Path Loss στο Link Budget

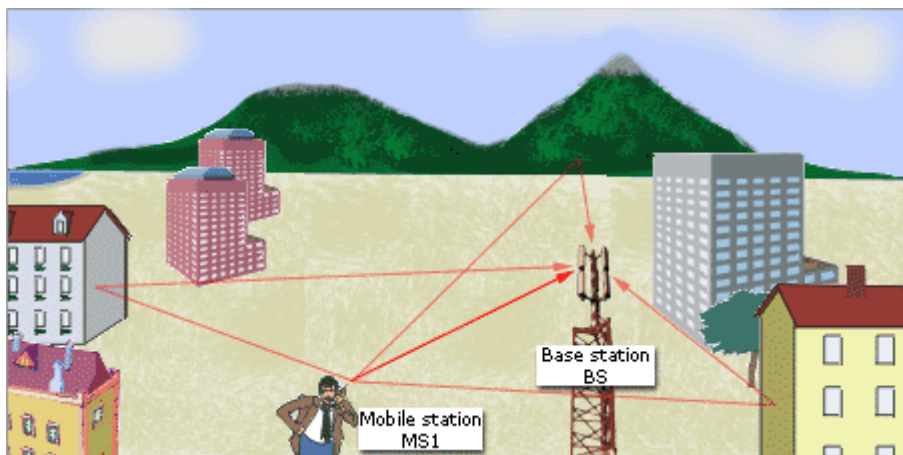
Για τον υπολογισμό των μέσων απωλειών στην ισχύ του σήματος εξαιτίας της διάδοσης του σήματος στο (αστικό) περιβάλλον χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο που προτείνεται από την ITU-R για Outdoor to indoor and pedestrian environment [23]. Το μοντέλο αυτό αναφέρεται σε μικρές κυψέλες και χαμηλή ισχύ εκπομπής και θεωρεί ότι σταθμοί βάσης με χαμηλό ύψος κεραίας είναι τοποθετημένοι σε εξωτερικούς χώρους και οι πεζοί χρήστες βρίσκονται στο δρόμο ή εντός κτιρίων και κατοικιών. Η σχέση που συνδέει την απόσταση του χρήστη από το σταθμό βάσης και τις απώλειες στην ισχύ είναι η εξής:

$$L = 40 \cdot \log_{10} R + 30 \cdot \log_{10} f + 49 \quad (dB)$$

, όπου η απόσταση R δίνεται σε χιλιόμετρα και η συχνότητα f του φορέα σε Hz. Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων που συμμετέχουν στο Link-Budget αναφέρονται στο Παράρτημα Α.

3.3.3 Υλοποίηση των μεταβολών του καναλιού

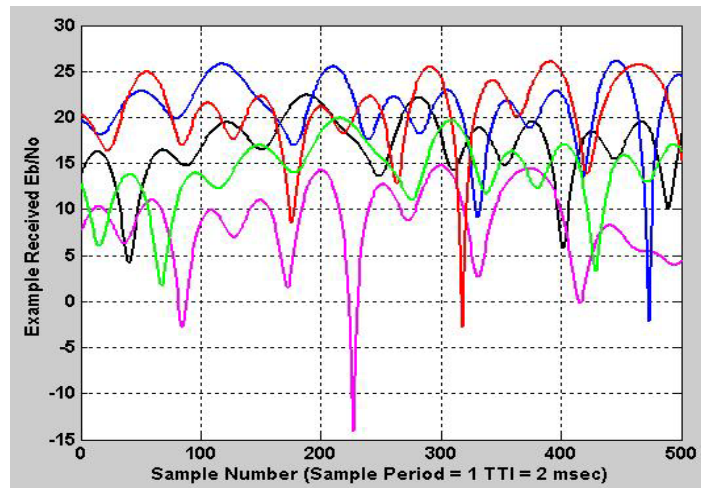
Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος ενός χρήστη μεταβάλλεται καθώς ο χρήστης ή το περιβάλλον του μετακινείται. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της πολλαπλής διόδευσης του σήματος [24]. Το εκπεμπόμενο από το σταθμό βάσης σήμα μεταδίδεται σε διάφορες κατευθύνσεις, ανακλάται, περιθλάται και σκεδάζεται [25] ακολουθώντας μονοπάτια διαφορετικού μήκους, οι διάφορες συνιστώσες του φθάνουν στον δέκτη με διαφορετική εξασθένιση, φάση και γωνία άφιξης η κάθε μια (εικόνα 3.6). Η σύνθεση όλων αυτών των συνιστωσών στον δέκτη δημιουργεί το τελικό λαμβανόμενο σήμα. Καθώς ο χρήστης ή το περιβάλλον του κινείται τα χαρακτηριστικά άφιξης κάθε συνιστώσας αλλάζουν, μεταβάλλοντας έτσι την ισχύ με την οποία λαμβάνεται το σήμα.



Εικόνα 3.6 : Το φαινόμενο της πολλαπλής διόδευσης

Το SNR που λαμβάνει κάθε χρήστης εξαρτάται σε πρώτη φάση από το μέσο τοπικό SNR κάθε χρήστη (το οποίο είναι σταθερό για μικρές τοπικές μετακινήσεις του χρήστη), που καθορίζεται από το link-budget του χρήστη, και τις μεταβολές γύρω από αυτό, που οφείλονται όπως είπαμε στο φαινόμενο της πολλαπλής διόδευσης και την κινητικότητα του χρήστη. Οι τελευταίες είναι σημαντικές ακόμα και για μετακινήσεις του χρήστη κατά αποστάσεις της τάξης του μήκους κύματος του φορέα. και έχει βρεθεί ότι μοντελοποιούνται ικανοποιητικά από μια Rayleigh διαδικασία [26]. Το μοντέλο που έχει χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσουμε τις μεταβολές λόγω πολλαπλής διόδευσης είναι το μοντέλο του προσομοιωτή που προτείνει ο Jakes στο [27] για Rayleigh Fading κανάλια. Μια καλή περιγραφή του μοντέλου του Jakes και ανάλυση των δυνατοτήτων του βρίσκεται και στο [28].

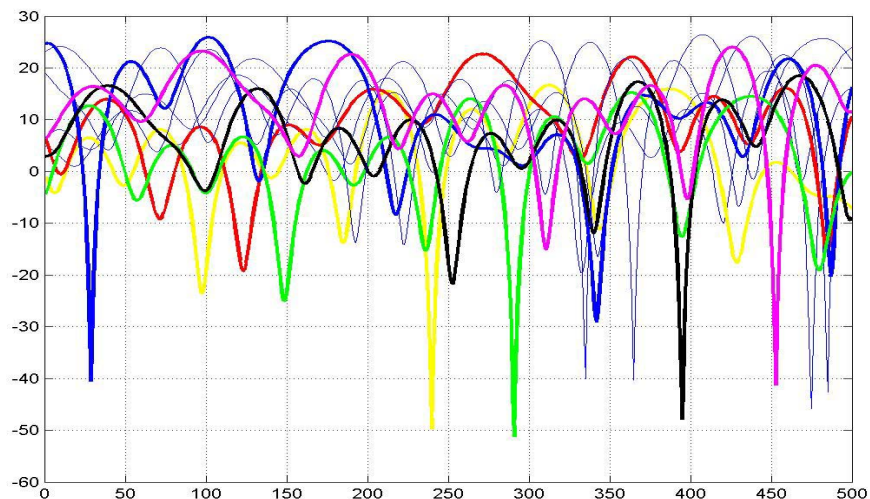
Ένα δείγμα μεταβολών (οι οποίες παράγονται με το μοντέλο του Jakes για Rayleigh Fading κανάλια) του E_s/N_0 5 χρηστών με διαφορετικό μέσο E_s/N_0 φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 3.7:



Εικόνα 3.7

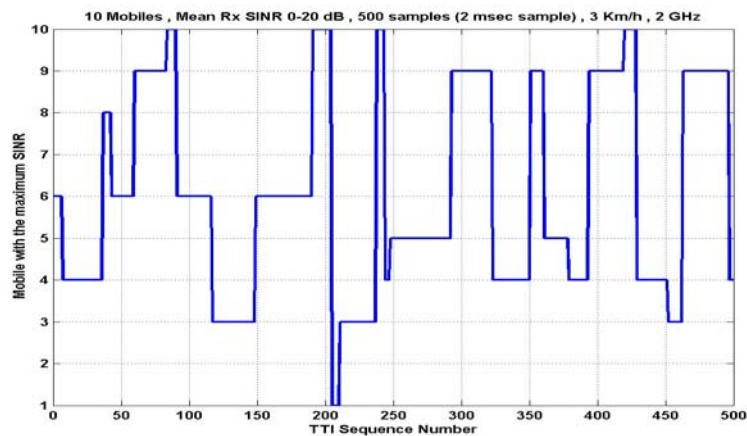
Οι μέσες τιμές των E_s/N_0 για το παραπάνω σχήμα είναι : μπλε = 20.9 , κόκκινο = 20.6 , μαύρο = 16.85 , πράσινο = 14.2 , ροζ = 8.6

Μια πιο πολυπληθής περίπτωση φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 3.8:



Εικόνα 3.8

Ο χρήστης με το καλύτερο λόγο E_s/N_0 , και άρα με την καλύτερη ρυθμαπόδοση κάθε στιγμή, φαίνεται (για το προηγούμενο σχήμα) στο σχήμα της εικόνας 3.9:



Εικόνα 3.9

3.3.4 Υλοποίηση του μηχανισμού εκτίμησης του καναλιού

Εξαιτίας της δομής και των πρωτοκόλλων επικοινωνίας των καναλιών του HSDPA υπάρχει μια καθυστέρηση μεταξύ της εκτίμησης της κατάστασης μιας ζεύξης και της στιγμής που θα γίνει η μετάδοση, η οποία αποφασίστηκε με βάση την εκτίμηση αυτή. Η καθυστέρηση αυτή, σε συνδυασμό με διάφορα σφάλματα στην εκτίμηση της ζεύξης, οδηγεί σε απόκλιση της αναμενόμενης από την παρατηρούμενη συμπεριφορά του καναλιού αυξάνοντας την πιθανότητα αποτυχημένης μετάδοσης. Η παραπάνω καθυστέρηση θεωρείται σταθερή κατά την διάρκεια της προσομοίωσης και ίση για όλους τους χρήστες. Το σφάλμα κατά την εκτίμηση παράγεται με τυχαίο τρόπο σε κάθε ΤΤΙ και θεωρείται ότι έχει log-normal κατανομή με κάποια τυπική απόκλιση που καθορίζεται από εμάς.

3.3.5 Υλοποίηση HARQ

Η επίδραση του HARQ είναι πολύ δύσκολο και πολύπλοκο να προσομοιωθεί με ακρίβεια και γι αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται παραδοχές που απλοποιούν την προσομοίωση του HARQ. Μια αρκετά δημοφιλής τεχνική που προσεγγίζει αρκετά καλά την επίδραση του HARQ χωρίς μεγάλη πολυπλοκότητα είναι αυτή που προτείνεται στο [14]. Την τεχνική αυτή θα χρησιμοποιήσουμε και εμείς για να υπολογίζουμε σε κάθε επαναμετάδοση ενός πακέτου το εικονικό Es/No που απολαμβάνει ο χρήστης και το οποίο θα είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό Es/No εξαιτίας της εκμετάλλευσης της πληροφορίας που μεταδόθηκε για το ίδιο πακέτο σε προηγούμενες αποτυχημένες εκπομπές του.

3.3.6 Υπολογισμός της πιθανότητας επιτυχούς μετάδοσης

Το ελάχιστο λαμβανόμενο Es/No που απαιτείται σε κάθε MCS για να επιτευχθεί BLER ίσο με 10% είναι αυτό που δίνεται από τους πίνακες αντιστοίχισης που θα χρησιμοποιήσουμε στις προσομοιώσεις μας. Όμως αυτό δεν μας λέει πώς μεταβάλλεται το BLER σε περίπτωση που το πραγματικό Es/No είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από το υπόψη Es/No. Μια ευρυστική προσέγγιση αυτή της συμπεριφοράς έχουμε εφαρμόσει στον προσομοιωτή μας χρησιμοποιώντας ως σημείο εκκίνησης κάποια πειραματικά αποτελέσματα [14] σχετικά με την συμπεριφορά αυτή. Η προσέγγισή μας δίνεται στον πίνακα 3.2:

Σχέση μεταξύ πραγματικού και ελάχιστου απαιτούμενου Es/No	BLER
$\text{Real_Es/No} - \text{Req_Es/No} > 2$	1 %
$2 > \text{Real_Es/No} - \text{Req_Es/No} > 0.5$	5 %
$ \text{Real_Es/No} - \text{Req_Es/No} < 0.5$	10 %
$-0.5 > \text{Real_Es/No} - \text{Req_Es/No} > -1.5$	25 %
$-1.5 > \text{Real_Es/No} - \text{Req_Es/No} > -3$	50 %
$-3 > \text{Real_Es/No} - \text{Req_Es/No}$	75 %

Πίνακας 3.2

, όπου: Real_Es/No και Req_Es/No είναι το πραγματικό και το ελάχιστο απαιτούμενο Es/No (σε dB) αντίστοιχα που αντιστοιχούν σε ένα τυχαίο ΤΤΙ. Το Req_Es/No εξαρτάται από το MCS που έχει επιλεγεί καθώς και τον αριθμό των κωδικών που χρησιμοποιούνται στο υπόψη ΤΤΙ.

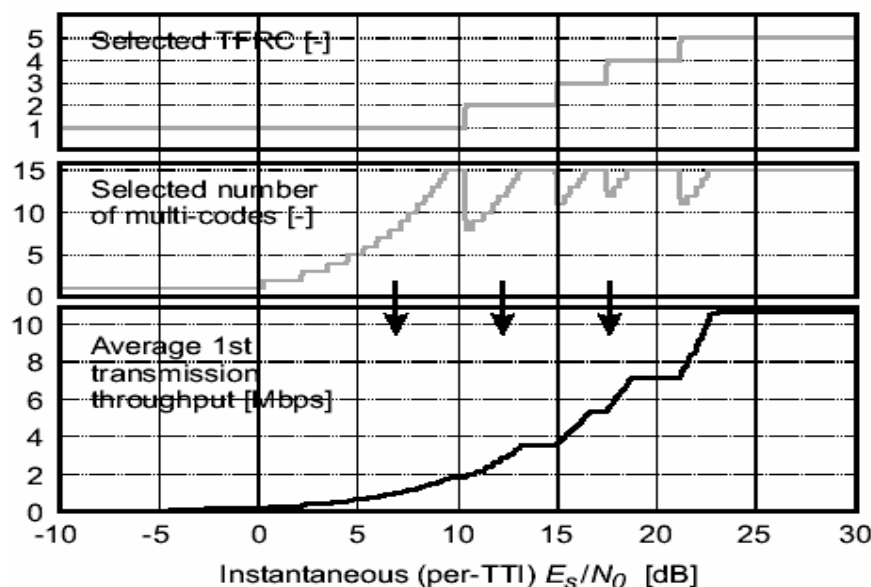
3.3.7 Διαχείριση των καταχωρητών

Ο καταχωρητής του προσομοιωτή διατηρεί ξεχωριστές ουρές πακέτων για κάθε χρήστη. Οι ουρές έχουν ένα μέγιστο μήκος τόσο σε πακέτα όσο και σε bit που μπορούν να αποθηκεύσουν. Το μήκος αυτό είναι ίδιο για όλες τις ουρές και ίσο με 100 πακέτα και 1.2 Mbit (100 πακέτα των 1.5 Kbyte) αντίστοιχα, εκτός κι αν αναφέρεται κάτι διαφορετικό. Ο μέγιστος αριθμός χρηστών που υποστηρίζονται έχει τεθεί ίσος με 100 και είναι αρκετά μεγάλος για τα σενάρια που θα μελετήσουμε. Οι λειτουργίες οι οποίες υποστηρίζονται και επιδρούν στον καταχωρητή παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω:

- Προσθήκη πακέτου: Ο τρόπος αποθήκευσης πακέτων σε μια ουρά είναι FIFO, δηλαδή όταν ένα νέο πακέτο καταφθάνει προστίθεται στο τέλος της ουράς ενός χρήστη εκτός κι αν η ουρά είναι “γεμάτη” (το πακέτο προκαλεί υπερχειλίση) οπότε και απορρίπτεται.
- Απομάκρυνση πακέτου: Η διαδικασία αυτή εκτελείται επί του HOL πακέτου όταν αυτό απορρίπτεται λόγω εκπνοής του χρόνου μετάδοσης ή λόγω ολοκλήρωσης της μετάδοσης του πακέτου.
- Έλεγχος εκπνοής χρόνου μετάδοσης: Η διαδικασία αυτή εκτελείται στην αρχή κάθε TTI επί των HOL πακέτων κάθε RT ουράς (ουράς με πακέτα Real-Time υπηρεσιών). Ο χρόνος μετάδοσης κάθε HOL πακέτου ελέγχεται και αν αυτός έχει εκπνεύσει τότε εκτελείται η διαδικασία απομάκρυνσης για το πακέτο αυτό. Στην περίπτωση που το HOL πακέτο μιας ουράς απορριφθεί ο έλεγχος συνεχίζεται για το επόμενο πακέτο της ίδιας ουράς (το νέο HOL πακέτο μετά την απόρριψη) μέχρις ότου να μην γίνει καμία απόρριψη.
- Μερική Μετάδοση: Επειδή το μέγεθος ενός πακέτου μπορεί να ξεπερνά τον αριθμό των bit που μπορούν να μεταδοθούν σε ένα TTI (ιδιαίτερα όταν η ζεύξη βρίσκεται σε άσχημη κατάσταση) ο προσομοιωτής θεωρεί ότι σε ένα TTI μπορεί να γίνει μερική μετάδοση του πακέτου και να απομακρυνθεί μόνο ένας αριθμός από bit και όχι ολόκληρο το πακέτο.

3.3.8 Αντιστοίχιση του λαμβανόμενου Es/No σε κάποιο MCS

Η αντιστοίχιση αυτή στηρίζεται σε κάποιες μετρήσεις της Nokia [29] οι οποίες δίνουν το ελάχιστο Es/No που απαιτείται για κάθε MCS ώστε να οι μεταδόσεις να έχουν BLER ίσο με 10%. Η σχέση



Εικόνα 3.10

μεταξύ Es/No, επιλεγόμενης τεχνικής για διαμόρφωση και κωδικοποίηση και ρυθμαπόδοσης φαίνεται πιο παραστατικά στο διάγραμμα της εικόνα 3.10 την οποία αναπαράγουμε από το [29].

* Από πλευρά φασματικής απόδοσης, είναι καλύτερα να αυξήσουμε τον αριθμό των κωδικών που δίνουμε στο χρήστη πριν περάσουμε σε ένα TFRC μεγαλύτερης τάξης.

* Όσο αυξάνεται ο αριθμός των κωδικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο TTI τόσο ελαττώνεται και η ισχύς που αντιστοιχεί στον κάθε κωδικό και άρα τόσο μεγαλύτερη είναι και η απαίτηση για Es/No στο λαμβανόμενο (μεικτό) σήμα.

* Οι καμπύλες αυτές προϋποθέτουν την απουσία σφαλμάτων στον αλγόριθμο προσαρμογής της ζεύξης. Σφάλματα όμως συμβαίνουν λόγω της καθυστέρησης από την στιγμή που το τερματικό κάνει την εκτίμηση του Es/No μέχρι ο σταθμός βάσης να ξεκινήσει μια εκπομπή στο HS-DSCH με βάση αυτή την εκτίμηση, λόγω σφαλμάτων στην μέτρηση της ποιότητας της ζεύξης από το τερματικό και λόγω σφαλμάτων στην μετάδοση του CQI (γύρω στο 10%). Έτσι, αν υπάρχει κάποια απόκλιση μεταξύ πραγματικής και εκτιμώμενης κατάστασης της ζεύξης, ο Node-B θα πρέπει να προσαρμόζεται σε αυτήν δυναμικά με τον χρόνο. Το σφάλμα στην προσαρμογή της ζεύξης συνήθως μοντελοποιείται μέσω μιας χρονικής καθυστέρησης του AMC (T_{delay}) που όπως είπαμε οφείλεται στην λειτουργία του MAC πρωτοκόλλου (η ελάχιστη καθυστέρηση είναι γύρω στα 6 msec) και κάποιας συνάρτησης σφάλματος με log-normal κατανομή και συγκεκριμένη τυπική απόκλιση (σ_{error} , γύρω στο 1 dB). Επειδή συμβαίνουν αυτά τα σφάλματα και η ταχύτητα προσαρμογής της ζεύξης είναι μικρότερη από αυτή του παραδοσιακού fast power control, δεν είναι δυνατόν στην πράξη να εγγυηθούμε error-free detection χωρίς να κάνουμε το AMC πολύ συντηρητικό.

* Μετρώντας στο πεδίο του SINR, η συνολική δυναμική περιοχή που καλύπτει η προσαρμογή (επιλογή της τεχνικής διαμόρφωσης, του ρυθμού κωδικοποίησης και του αριθμού των κωδικών που θα χρησιμοποιηθούν στην μετάδοση από το HS-DSCH) της ζεύξης στο HSDPA είναι της τάξης των 30 dB. Η δυναμική περιοχή του WCDMA με μεταβλητό Spreading Factor είναι περίπου 20 dB. Αυτό σημαίνει ότι η δυναμική περιοχή του HSDPA είναι περίπου 10 dB μεγαλύτερη. Όμως ταυτόχρονα, η δυναμική περιοχή του HSDPA είναι ελαφρά μετατοπισμένη προς τα πάνω (προς υψηλότερα SINR, ώστε να λειτουργεί με μεγαλύτερες ρυθμαποδόσεις), το οποίο ίσως να έχει κάποιο αντίκτυπο στην κάλυψη της κυψέλης και ιδιαίτερα χρηστών που βρίσκονται κοντά στα άκρα της.

Μια πιο αναλυτική αντιστοίχιση του λαμβανόμενου Es/No με την υποστηριζόμενη ρυθμαπόδοση φαίνεται στον πίνακα 3.3. Επιπλέον μελέτες των επιδόσεων διαφόρων συνδυασμών κωδικοποίησης και διαμόρφωσης κάτω από διάφορες συνθήκες λειτουργίας βρίσκονται στα [30], [31].

3.3.9 Επιλογή παραμέτρων λειτουργίας

Οι τιμές των παραμέτρων του HSDPA που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις δίνονται στο παράρτημα Α και έχουν επιλεγεί με βάση τεχνικές αναφορές εταιριών που συμμετέχουν στην 3GPP [32], [33], [34] και επιλογές που έχουν γίνει σε άρθρα τα οποία μελετούν τις επιδόσεις της HSDPA αρχιτεκτονικής.

Minimum Es/No Required (dB)	Number of Parallel Codes	Modulation	Coding Rate	Data Rate (Mbps)	Throughput (Mbps)	data bits per TTI	Info Bytes per TTI
-3	1	QPSK	1/4	0.48	0.12	960	30
0	2	QPSK	1/4	0.96	0.24	1920	60
2.2	3	QPSK	1/4	1.44	0.36	2880	90
3.5	4	QPSK	1/4	1.92	0.48	3840	120
4.5	5	QPSK	1/4	2.4	0.6	4800	150
5.2	6	QPSK	1/4	2.88	0.72	5760	180
6.1	7	QPSK	1/4	3.36	0.84	6720	210
6.7	8	QPSK	1/4	3.84	0.96	7680	240
7.2	9	QPSK	1/4	4.32	1.08	8640	270
7.5	10	QPSK	1/4	4.8	1.2	9600	300
7.8	11	QPSK	1/4	5.28	1.32	10560	330
8.1	12	QPSK	1/4	5.76	1.44	11520	360
8.4	13	QPSK	1/4	6.24	1.56	12480	390
8.7	14	QPSK	1/4	6.72	1.68	13440	420
9	15	QPSK	1/4	7.2	1.8	14400	450
10	8	QPSK	1/2	3.84	1.92	7680	480
10.5	9	QPSK	1/2	4.32	2.16	8640	540
10.9	10	QPSK	1/2	4.8	2.4	9600	600
11.3	11	QPSK	1/2	5.28	2.64	10560	660
11.7	12	QPSK	1/2	5.76	2.88	11520	720
12.1	13	QPSK	1/2	6.24	3.12	12480	780
12.5	14	QPSK	1/2	6.72	3.36	13440	840
12.8	15	QPSK	1/2	7.2	3.6	14400	900
15	11	QPSK	3/4	5.28	3.96	10560	990
15.6	12	QPSK	3/4	5.76	4.32	11520	1080
16.2	13	QPSK	3/4	6.24	4.68	12480	1170
16.8	14	QPSK	3/4	6.72	5.04	13440	1260
17.2	15	QPSK	3/4	7.2	5.4	14400	1350

18	12	16-QAM	1/2	11.52	5.76	23040	1440
18.8	13	16-QAM	1/2	12.48	6.24	24960	1560
19.6	14	16-QAM	1/2	13.44	6.72	26880	1680
20.4	15	16-QAM	1/2	14.4	7.2	28800	1800
21.2	11	16-QAM	3/4	10.56	7.92	21120	1980
21.6	12	16-QAM	3/4	11.52	8.64	23040	2160
21.9	13	16-QAM	3/4	12.48	9.36	24960	2340
22.2	14	16-QAM	3/4	13.44	10.08	26880	2520
22.5	15	16-QAM	3/4	14.4	10.8	28800	2700

Πίνακας 3.3 : Ο πίνακας δείχνει το ελάχιστο απαιτούμενο Es/No στον δέκτη για κάθε συνδυασμό τεχνικής κωδικοποίησης, τεχνικής διαμόρφωσης και αριθμού κωδικών που χρησιμοποιούνται στο HS-DSCH κανάλι, ώστε να πετύχουμε BLER = 10 %. Επίσης, για κάθε τέτοιο συνδυασμό φαίνεται και ο ρυθμός μετάδοσης καθώς και η ρυθμαπόδοση που πετυχαίνεται (5^η και 6^η στήλη αντίστοιχα). Η ρυθμαπόδοση υπολογίζεται από τον ρυθμό μετάδοσης αφού αφαιρέσουμε το ποσοστό του ρυθμού που καταναλώνεται για την μεταφορά των κωδικών bit. Αυτή είναι η ρυθμαπόδοση στο φυσικό επίπεδο. Η πραγματική ρυθμαπόδοση, ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται η πληροφορία επιπέδου εφαρμογής είναι στην πράξη αρκετά μικρότερη αφού στο φυσικό επίπεδο κάθε πακέτο μεταφέρει και τις επικεφαλίδες των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται από τα ανώτερα επίπεδα (δηλ. από τα επίπεδα MAC, Network, Transport, Session).

4 Best-Effort Χρονοδρομολόγηση

4.1 Εισαγωγή στην χρονοδρομολόγηση

Ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης είναι ένα σημαντικό εργαλείο διαχείρισης των πόρων σε 3G συστήματα κυψελωτής τηλεφωνίας λόγω της χρήσης τεχνικών μεταγωγής πακέτου και της ποικιλίας των υπηρεσιών που θα υποστηρίζονται από αυτά. Η αποδοτική ολοκλήρωση των νέων υπηρεσιών απαιτεί έναν έξυπνο αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης ο οποίος θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την ποικιλόμορφη φύση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης που εμφανίζουν οι περισσότερες δικτυακές υπηρεσίες, την μεταβαλλόμενη κατάσταση της ζεύξης κάθε χρήστη και των διαφορετικών απαιτήσεων για QoS που απαιτεί κάθε υπηρεσία, με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος. Η αποδοτική λειτουργία του χρονοδρομολογητή απαιτεί από αυτόν να έχει όσο το δυνατόν καλύτερη γνώση της τρέχουσας κατάστασης του συστήματος καθώς και την γενικότερης συμπεριφοράς αυτού. Η τελευταία μπορεί να εκτιμηθεί κρατώντας στατιστικά στοιχεία για κάποιες παραμέτρους (π.χ μέση λαμβανόμενη ισχύς καθώς μετακινείται ο χρήστης) καθώς και από πληροφορία που προέρχεται από ανώτερα επίπεδα (π.χ QoS απαιτήσεις κάθε υπηρεσίας, traffic contracts κ.α). Μερικά από τα πιο συνηθισμένα στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη από τον χρονοδρομολογητή είναι:

- Η εκτιμώμενη κατάσταση κάθε ζεύξης (π.χ η μέγιστη ρυθμαπόδοση που μπορεί να υποστηρίξει κάθε χρήστης την τρέχουσα στιγμή καθώς και το πώς (MCS , number of codes) επιτυγχάνεται αυτή).
- Η μέση κατάσταση (ή και άλλα στατιστικά στοιχεία) στην οποία βρίσκεται κάθε ζεύξη (π.χ η μέση τιμή της ρυθμαπόδοσης που μπορεί να υποστηρίξει κάθε χρήστης σε ένα χρονικό διάστημα αρκετά μεγαλύτερο του TTI)
- Το είδος της κίνησης που μεταφέρει κάθε χρήστης (πόσο ευαίσθητη στην καθυστέρηση είναι η πληροφορία)
- Πιθανός εγγυημένος ρυθμός μετάδοσης σε κάθε χρήστη (σε ένα UMTS σύστημα κάτι τέτοιο συχνά εκφράζεται με την κλάση εξυπηρέτησης (π.χ 16, 32, 64, 128 256 384 2048 Kbps) στην οποία ανήκει ο χρήστης ή κάθε εφαρμογή του χρήστη).
- Η κατάσταση του καταχωρητή κάθε χρήστη.
- Πόσο δίκαια αξιοποιήθηκε το BW στο, συνήθως πρόσφατο, παρελθόν (ή ισοδύναμα, το τρέχον QoS κάθε ροής).

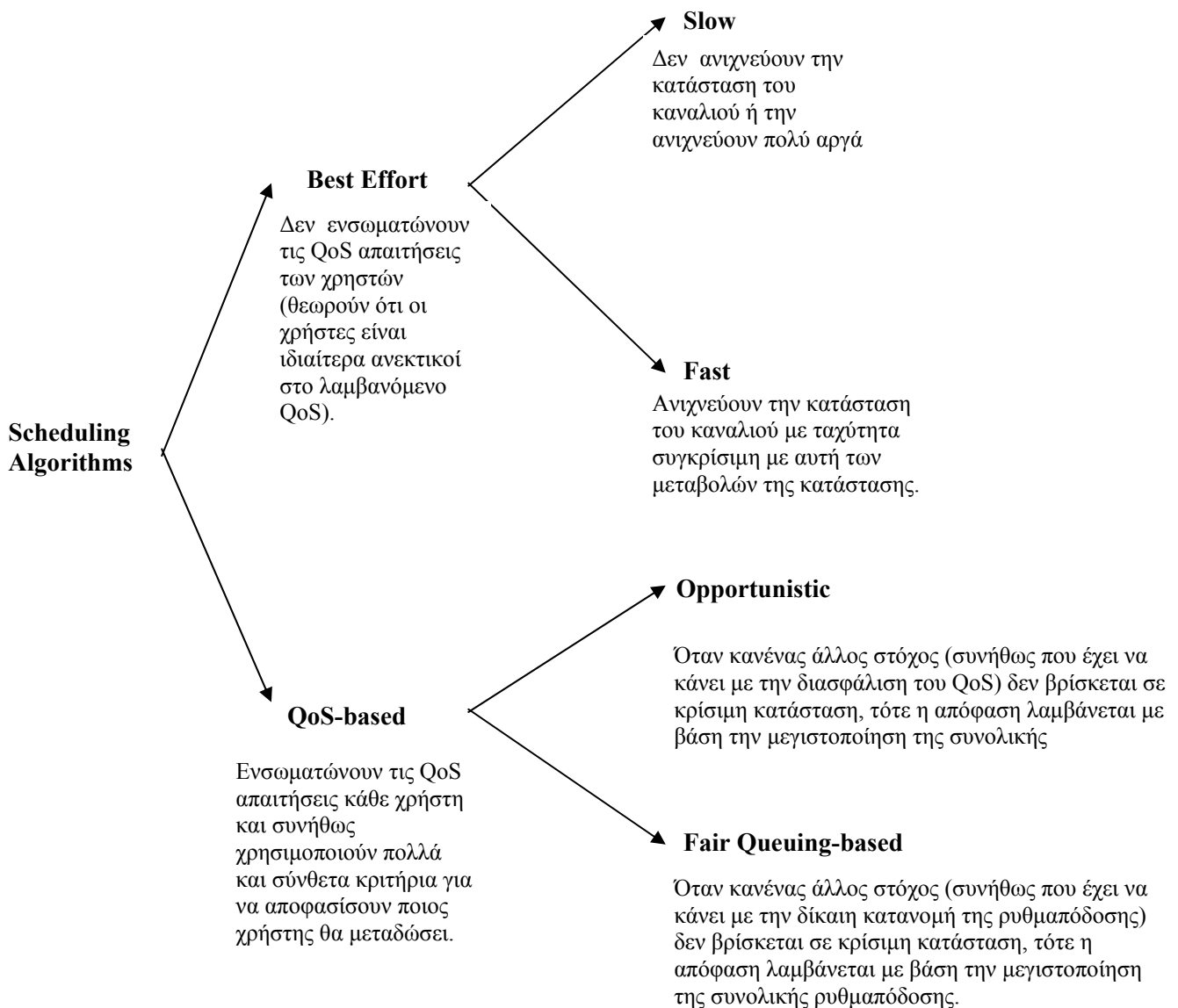
Η HSDPA αρχιτεκτονική έχει αρκετές παραμέτρους λειτουργίες. Οι περισσότερες από αυτές έχουν να κάνουν κυρίως με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί το σύστημα και η αλλαγή τους επηρεάζει καταλυτικά την απόδοση του συστήματος τόσο κάτω από τον ίδιο αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης όσο και την διαφορά στις επιδόσεις μεταξύ διαφορετικών χρονοδρομολογητών. Γι αυτό τις περισσότερες φορές χρειάζεται να εξειδικεύσουμε την περίπτωση την οποία μελετάμε. Οι πιο βασικές παράμετροι λειτουργίας είναι:

- Πόσοι κώδικες (από τους 16 με SF=16) είναι αφιερωμένοι στο HS-DSCH κανάλι (συνήθως από 7 έως 15)
- Ποια είναι η ακτίνα της κυψέλης (Cell Range) (συνήθως από 500 έως 1400 μέτρα)

- Οι δυνατότητες κάθε τερματικού (UE Terminal Capabilities)
- Η καθυστέρηση στην ανάδραση του CQI (Channel Estimation Feedback Delay) (συνήθως από 2 έως 6 msec το ελάχιστο)
- Η ταχύτητα του χρήστη (συνήθως από 3 έως 120 Km/hr. Μια ελάχιστη ταχύτητα για ένα χρήστη δικαιολογείται, ακόμα και όταν αυτός είναι ακίνητος, από την κίνηση αντικειμένων στον περιβάλλοντα χώρο του χρήστη, ιδιαίτερα σε αστικά περιβάλλοντα.)
- Το πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς (συνήθως TCP ή UDP)
- Το περιβάλλον λειτουργίας (π.χ απώλεια ορθογωνιότητας, κίνηση χρήστη στα όρια της κυψέλης, κ.α.)

4.2 Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης

Μια γενική κατηγοριοποίηση όλων των αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης που έχουν προταθεί για συστήματα με μεταβαλλόμενη κατάσταση ζεύξεων φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 4.1:



Εικόνα 4.1

Οι Slow αλγόριθμοι εμφανίζονται ως υποκατάστατα των Fast σε συστήματα που δεν μπορούν εκ' φύσεως ή δεν συμφέρει οικονομικά να τροφοδοτούνται με μια συνεχή εκτίμηση της κατάστασης της ζεύξης κάθε χρήστη σε μικρή χρονική κλίμακα και δεν θα μας απασχολήσουν εδώ. Οι Fair Queuing-based αλγόριθμοι είναι αλγόριθμοι οι οποίοι προέρχονται από τους Fair Queuing αλγόριθμους των ενσύρματων δικτύων και στους οποίους έχουν προστεθεί στοιχεία τα οποία να προωθούν και την μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης. Πολύ λίγοι τέτοιοι αλγόριθμοι έχουν προταθεί, οι οποίοι παρουσιάζουν μια σχετικά υψηλή πολυπλοκότητα και γι αυτό ούτε αυτή η κατηγορία θα μας απασχολήσει εδώ. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστούν Fast Best Effort αλγόριθμοι, ενώ στο επόμενο κεφάλαιο θα μελετηθούν Opportunistic QoS-based αλγόριθμοι.

4.3 Best Effort αλγόριθμοι

4.3.1 Παρουσίαση Best-Effort αλγορίθμων

Οι αλγόριθμοι της κατηγορίας αυτής είναι από τους πρώτους που προτάθηκαν για το HSDPA και παρόμοια συστήματα (πολλαπλών χρηστών με μεταβαλλόμενες συνθήκες καναλιού). Είναι αλγόριθμοι απλοί, μικρής πολυπλοκότητας κυρίως δανεισμένοι από τα ενσύρματα κανάλια. Οι βασικότεροι από αυτούς παρουσιάζονται στην συνέχεια:

Max C/I : Μεταδίδουμε προς το χρήστη με τον μεγαλύτερο στιγμιαίο ρυθμό μετάδοσης (και όχι το μεγαλύτερο στιγμιαίο Es/No). Ο κύριος στόχος του αλγόριθμου είναι η μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης της κυψέλης.

Round Robin (RR) : Όλοι οι χρήστες με πακέτα για μετάδοση εξυπηρετούνται εκ περιτροπής. Γνωστός και ως Fair Resource ή Fair-Time αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης. Αλγόριθμος γνωστός από τα ενσύρματα δίκτυα που μοιράζει το χρόνο ίσα σε όλους τους χρήστες, αλλά δεν εκμεταλλεύεται τις μεταβολές της κατάστασης των ζεύξεων (σε παρόμοιο σκεπτικό κινείται και ο Weighted Round Robin).

Fair Throughput : Ο χρήστης που εξυπηρετείται σε κάθε TTI επιλέγεται έτσι ώστε όλοι οι χρήστες με πακέτα προς εκπομπή να απολαμβάνουν την ίδια μέση ρυθμαπόδοση (όσο γίνεται). Η μέση ρυθμαπόδοση κάθε χρήστη μετράται στο τέλος κάθε TTI εντός ενός χρονικού παραθύρου το οποίο επιλέγεται κατά βούληση μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$Short_Throughput[i+1] = \left(1 - \frac{1}{b}\right) \cdot Short_Throughput[i] + \frac{1}{b} \cdot Bits_Sended[i]$$

όπου : Bits_Sended είναι ο αριθμός των bit που μεταδόθηκαν για την συγκεκριμένη ροή στο TTI που πέρασε. Το μέγεθος του παραθύρου εκφράζει το πόσο συνεχής ή εκρηκτική απαιτείται να είναι η εξυπηρέτηση της ροής ενός χρήστη (πόσο μπορεί να περιμένει ένας χρήστης για να εξυπηρετηθεί).

Max Queue : Κάθε φορά εξυπηρετείται ο χρήστης με το μεγαλύτερο μέγεθος ουράς. Το βασικό σκεπτικό του αλγορίθμου είναι: α) η αποφυγή υπερχείλισης της ουράς κάθε χρήστη (στόχος που κληρονομήθηκε από τα ενσύρματα δίκτυα κυρίως) , και β) η ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού πακέτων στο σύστημα (ιδέα που έχει να κάνει περισσότερο με ασύρματα δίκτυα). Και οι δύο στόχοι επιτυγχάνονται κάτω από κάποιες ειδικές συνθήκες.

Earliest Deadline First (EDF) : Κάθε φορά εξυπηρετείται ο χρήστης του οποίου το HOL (Head of Line) πακέτο έχει την μεγαλύτερη ευαισθησία στην καθυστέρηση (το deadline του εκπνέει πρώτο από όλα). Το βασικό σκεπτικό είναι η ελαχιστοποίηση των απορρίψεων πακέτων λόγω εκπνοής του χρόνου μετάδοσης και άρα η εξυπηρέτηση της μέγιστης δυνατής κίνησης. Και εδώ ο στόχος επιτυγχάνεται κάτω από ειδικές συνθήκες.

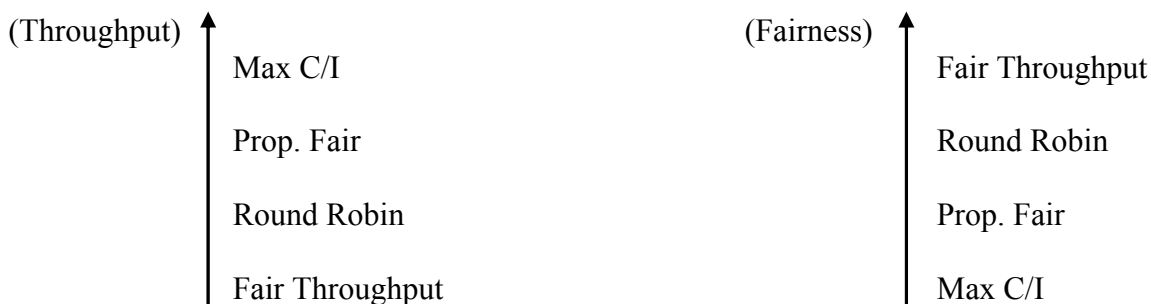
Class-based : Οι χρήστες χωρίζονται σε κλάσεις διαφορετικών προτεραιοτήτων σύμφωνα με τις οποίες γίνεται και η χρονοδρομολόγηση.

Proportional Fair (Resource) ή PropFair : Κάθε φορά επιλέγεται ο χρήστης με τον μεγαλύτερο λόγο στιγμιαίου προς μέσο ρυθμό μετάδοσης. Όπως και ο Fair Throughput και εδώ χρησιμοποιείται ένα παράθυρο εντός του οποίου μετράται ο μέσος υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης του χρήστη (ως προς το χρόνο). Το σκεπτικό είναι να δρομολογούμε όλους τους χρήστες με (σχεδόν) ίση πιθανότητα αλλά κάθε χρήστης να μεταδίδει σε στιγμές που το κανάλι του βρίσκεται σε κατάσταση καλύτερη (ή αρκετά καλύτερη, ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών) από την μέση κατάσταση του καναλιού.

Proportional C/I Fair ή PropCIFair : Ο αλγόριθμος PropFair παρουσιάζει ένα τεχνικό πρόβλημα στην πράξη (όπως θα φανεί και στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρακάτω). Για χρήστες με πολύ καλή ζεύξη ο ρυθμός μετάδοσης που υποστηρίζεται σε κάθε ΤΤΙ παραμένει σταθερός (και ίσος με τον μέγιστο). Έτσι, ο λόγος του στιγμιαίου προς μέσο ρυθμό μετάδοσης παραμένει σχεδόν πάντα κοντά στη μονάδα κάτι το οποίο δυσκολεύει τον χρήστη από το να αποκτήσει το δικαίωμα μετάδοσης ακόμα και όταν υπάρχει σχετικά μικρός αριθμός χρηστών αφού για να συμβεί κάτι τέτοιο θα πρέπει οι αντίστοιχοι λόγοι όλων των υπόλοιπων χρηστών να πέσουν κάτω από την μονάδα. Η αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου γίνεται αν, αντί για τον λόγο του στιγμιαίου προς μέσο ρυθμό μετάδοσης, χρησιμοποιήσουμε τον λόγο της στιγμιαίας προς μέση ισχύ λήψης του σήματος (ή , ισοδύναμα, την διαφορά αυτής σε dB).

4.3.2 Σχολιασμός Best-Effort αλγορίθμων

Σχολιασμός: Οι Max-Queue , EDF και Class-based είναι αλγόριθμοι που έχουν προέλθει από τα ενσύρματα δίκτυα και έχει αποδειχθεί ότι οι επιδόσεις τους στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι πολύ χαμηλές. Οι Max C/I, RR, Fair Throughput και ο Prop.Fair έχουν μελετηθεί περισσότερο, άλλοι λόγω ικανοποιητικών επιδόσεων και άλλοι ως αναφορά για τις επιδόσεις των υπολοίπων. Οι επιδόσεις τους έχουν, σε γενικές γραμμές, ως εξής:



Επειδή η μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης είναι πάντα από τους βασικούς στόχους σε ένα τέτοιο σύστημα, η επιλογή ενός αλγορίθμου που δεν επιδιώκει κάτι τέτοιο (δεν λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του καναλιού) θεωρείται σοβαρό μειονέκτημα. Έτσι, από τους παραπάνω αλγόριθμους σημαντικοί υποψήφιοι θεωρούνται μόνο οι Max C/I και Prop.Fair. Οι υπόλοιποι μερικές φορές χρησιμοποιούνται ως σημείο αναφοράς για τις επιδόσεις των υπολοίπων. Όλοι πάντως οι αλγόριθμοι αυτοί εμφανίζουν κάποια βασικά ελαττώματα και ιδίως σε συστήματα τα οποία συνδυάζουν διάφορα είδη κίνησης, Real-Time και Non-Real-Time, Greedy με bursty και periodic, low and high delay required, κ.ο.κ (π.χ ftp, www, streaming, gaming, κ.λ.π.). Μια σύντομη κριτική τους παρουσιάζεται στον πίνακα 4.1:

Scheduler	Traffic Cases	
	Non-Real-Time	Real-Time
Max C/I	Ο αλγόριθμος αυτός δεν ενδιαφέρεται για την μεγιστοποίηση του αριθμού των χρηστών στο σύστημα αφού δίνει όλο το BW στους χρήστες με το καλύτερο κανάλι. Δεν μπορεί να εγγυηθεί τίποτα για το QoS των χρηστών. Όλα εξαρτώνται από την ποιότητα της ζεύξης τους σε σχέση με την ποιότητα της ζεύξης των υπόλοιπων χρηστών.	
Round Robin	Αφιερώνει σταθερό χρόνο σε κάθε χρήστη και άρα δεν ενδιαφέρεται για την μεγιστοποίηση του αριθμού των χρηστών. Κάποιοι χρήστες μπορεί να απολαμβάνουν πολύ μεγαλύτερο από το ελάχιστο απαιτούμενο QoS, ενώ κάποιοι άλλοι πολύ μικρότερο (θεωρεί ότι όλοι οι χρήστες έχουν τις ίδιες ανάγκες σε BW και το ίδιο κανάλι). Δεν ενδιαφέρεται επίσης για την μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης. Ακόμα και αν θεωρήσουμε δεδομένο ότι σε κάθε ένα από τους N χρήστες αφιερώνουμε το 1/N του συνολικού χρόνου (π.χ των συνολικών TTI ανά sec) αυτός δεν είναι ο καλύτερος τρόπος να επιλέξουμε τις χρονικές στιγμές μετάδοσης του κάθε χρήστη. Αυτό ισχύει και για το Weighted Round Robin (WRR).	
Max Queue	Καμία πρόνοια για μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης αλλά ούτε και της εξασφάλισης του απαιτούμενου QoS. Ο πιο άπληστος (greedy) χρήστης καταλαμβάνει και το μεγαλύτερο τμήμα του BW. Οι RT ροές είναι εντελώς απροστάτευτες. Ένα ακόμη κλασσικό παράδειγμα αλγορίθμου που προέρχεται από τα ενσύρματα δίκτυα.	
Fair Throughput	Δίνει σε όλους τους χρήστες την ίδια ρυθμαπόδοση ακόμα και αν αυτή δεν είναι αναγκαία (ή δεν είναι αρκετή, αλλά αυτό ίσως είναι κάτι που θα πρέπει να προβλέπεται από ένα μηχανισμό ελέγχου πρόσβασης). Με άλλα λόγια δεν γίνεται καμία προσπάθεια για μεγιστοποίηση του αριθμού των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν. Ακόμα και όταν όλοι οι χρήστες έχουν σχεδόν την ίδια ρυθμαπόδοση δεν γίνεται καμία προσπάθεια για μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης.	
EDF	Not applicable! Αν εφαρμοστεί δεν μπορεί να προστατέψει τα διάφορα είδη χρηστών από τους «άπληστους» χρήστες επειδή τα πακέτα των τελευταίων θα έχουν πάντα το μικρότερο deadline μιας και οι καταχωρητές τους είναι πάντα γεμάτοι.	Καμία πρόνοια για μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης. Όταν κανένα deadline δεν είναι κρίσιμο τότε η αξιοποίηση των πόρων δεν είναι καθόλου ικανοποιητική. Δεν λαμβάνει υπόψη άλλες παραμέτρους του QoS των RT εφαρμογών όπως το ρυθμό απόρριψης πακέτων (ούτε το delay jitter, το οποίο όμως είναι λιγότερο σημαντικό).
Class-based	Η εξυπηρέτηση ανά κλάση δεν μεγιστοποιεί σε καμία περίπτωση την συνολική ρυθμαπόδοση, ούτε και εξασφαλίζει το απαιτούμενο QoS κάθε χρήστη. Ο συνδυασμός των κλάσεων με οποιοδήποτε από τους παραπάνω δεν αναιρεί τα προβλήματα που αυτοί παρουσιάζουν.	
Proportional Fair	Αν και προωθεί την μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης (προσεγγίζοντας τους ίδιους χρόνους μετάδοσης για κάθε χρήστη, αλλά επιλέγοντας τις στιγμές που μεταδίδει κάθε χρήστης ως αυτές στις οποίες ο χρήστης παρουσιάζει την καλύτερη δυνατή ποιότητα καναλιού) δεν προσπαθεί να μεγιστοποιήσει τον αριθμό των χρηστών με ικανοποιητικό QoS. Κάποιοι χρήστες μπορεί να έχουν ρυθμαπόδοση αρκετά μεγαλύτερη της απαιτούμενης ενώ κάποιοι άλλοι αρκετά μικρότερη.	Σε RT εφαρμογές δεν προωθεί την εξυπηρέτηση κρίσιμων πακέτων αν το κανάλι δεν είναι σε αρκετά καλή κατάσταση (ακόμα και αν ο ρυθμός μετάδοσης είναι ικανοποιητικός).

Πίνακας 4.1

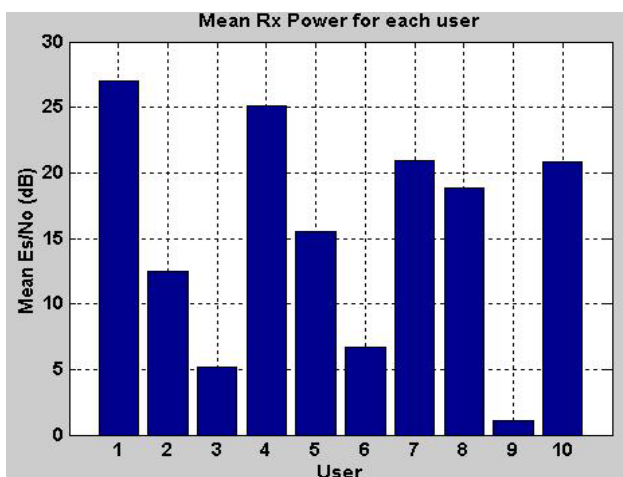
4.4 Προσομοιώσεις

Μέχρι τώρα οι προσομοιώσεις Best Effort αλγορίθμων που έχουν γίνει στα πλαίσια μελέτης των επιδόσεων του HSDPA περιλαμβάνουν μικρά υποσύνολα των αλγορίθμων αυτών και είτε δεν παρουσιάζουν πολλά στοιχεία για την συμπεριφορά τους είτε δεν τους εφαρμόζουν σε σενάρια NRT κίνησης, η οποία είναι και ο πιο κατάλληλος υποψήφιος για τέτοιου είδους αλγορίθμους. Πιο συγκεκριμένα, τέτοιες αναφορές μπορούν να βρεθούν για τους εξής αλγορίθμους: RR [35], [14], [38], [39], [40], [36], [37], FairThroughput [14], [37], MaxC/I [35], [14], [38], [39], [40], [36], [41], [37], PropFair [39], [40], [37], Max Queue [42], [36], Max R-Throughput⁻¹, [35], [38], [41], CARR [35]. Παρακάτω πραγματοποιούμε προσομοιώσεις σύγκρισης των πιο σημαντικών (από άποψη επιδόσεων) Best-Effort αλγορίθμων.

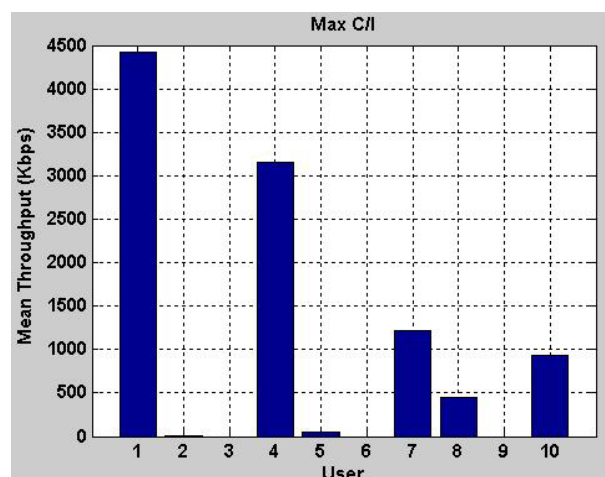
4.4.1 Σύγκριση αλγορίθμων κάτω από FTP κίνηση

Παρακάτω (εικόνες 4.2 - 4.8) παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων των πιο αξιόλογων, από πλευράς επιδόσεων, Best-Effort αλγορίθμων για μια διάρκεια 50.000 TTI (100 sec).

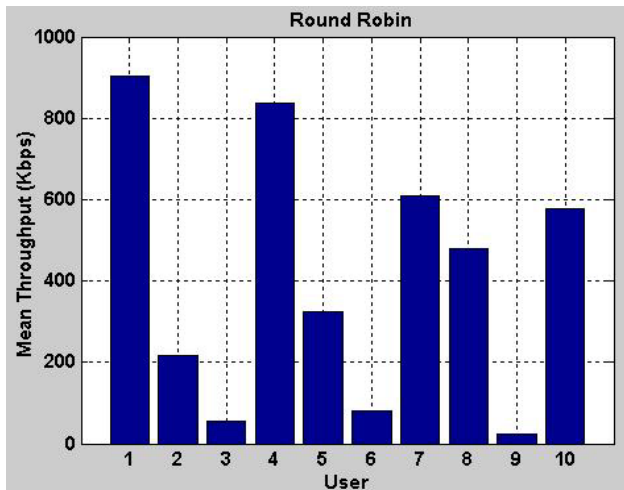
ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	Είδος Κίνησης	FTP
	Περιγραφή κίνησης	Οι χρήστες θεωρούνται ότι έχουν πάντα πακέτα για μετάδοση (greedy users).
	Αριθμός Χρηστών	10
	Επιλογή του μέσου Es/No	Ομοιόμορφα και τυχαία καταναμημένα εντός της κυψέλης (σε σενάρια με διαφορετικό αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης αλλά ίδιο αριθμό χρηστών προσπαθούμε να κρατάμε την ίδια ρίζα παραγωγής τυχαίων αριθμών ώστε τα κανάλια των χρηστών να έχουν ίδια συμπεριφορά (κυρίως το ίδιο μέσο Es/No) ώστε να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τους αλγόριθμους)
	Απαιτούμενο QoS	-
	Αλγόριθμοι Χρονοδρομολόγησης	Max C/I RR PropFair PropCIFair FairThroughput



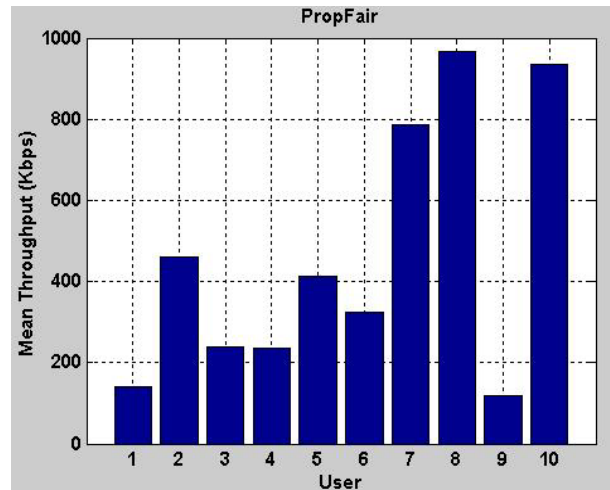
Εικόνα 4.2 : Μέσο λαμβανόμενο Es/No για κάθε χρήστη (αναφορά για τις εικόνες 4.3 έως 4.7)



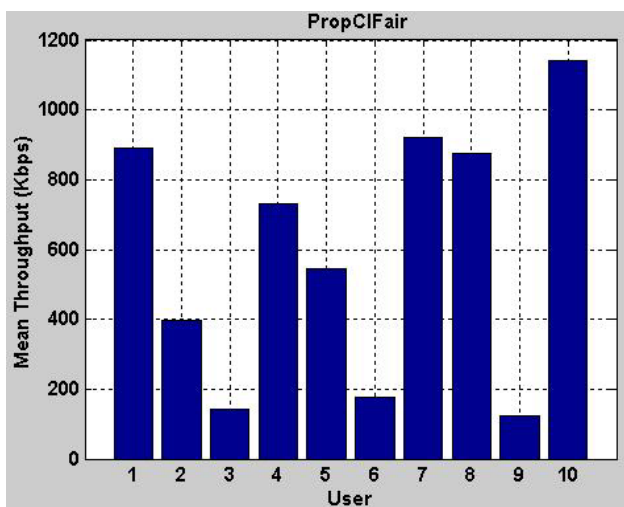
Εικόνα 4.3 : Μέση ρυθμαπόδοση (σε Kbps) κάθε χρήστη για τον Max C/I αλγόριθμο.



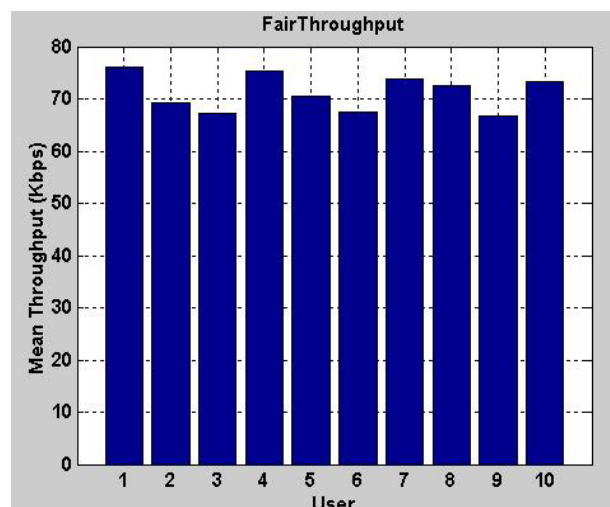
Εικόνα 4.4 : Μέση ρυθμαπόδοση (σε Kbps) κάθε χρήστη για τον Round Robin αλγόριθμο



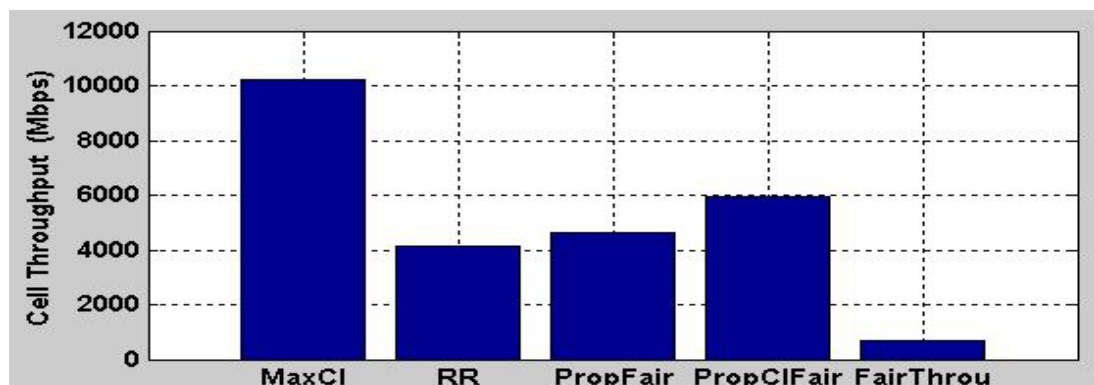
Εικόνα 4.5 : Μέση ρυθμαπόδοση (σε Kbps) κάθε χρήστη τον PropFair αλγόριθμο.



Εικόνα 4.6 : Μέση ρυθμαπόδοση (σε Kbps) κάθε χρήστη για τον PropCIFair αλγόριθμο



Εικόνα 4.7 : Μέση ρυθμαπόδοση (σε Kbps) κάθε χρήστη για τον FairThroughput αλγόριθμο



Εικόνα 4.8 : Συνολική ρυθμαπόδοση κυψέλης για κάθε αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης σε Kbps.

Παρατηρήσεις/Σχολιασμός αποτελεσμάτων :

Max C/I : Μόνο οι χρήστες που είναι κοντά στο σταθμό βάσης (1,4,7,8,10) απολαμβάνουν ικανοποιητική ρυθμαπόδοση. Από τους υπόλοιπους χρήστες μερικοί (2,5) δεν κερδίζουν το κανάλι παρά μόνο σε ελάχιστες στιγμές όπου τυχαίνει η ζεύξη τους να παρουσιάζει μια κορυφή και η ζεύξη των 1,4,7,8,10 να παρουσιάζει αρκετή εξασθένιση, ενώ άλλοι δεν μεταδίδουν ποτέ (3,6,9).

Φυσικά, όπως είναι αναμενόμενο, ο αλγόριθμος αυτός δίνει πολύ υψηλή συνολική ρυθμαπόδοση. Επίσης, πρέπει να σημειώσουμε ότι η χρήση του C/I αντί του ρυθμού μετάδοσης που αντιστοιχεί στο C/I θα οδηγούσε σε ακόμα πιο άδικη κατανομή των πόρων του συστήματος, γιατί οι πόροι δεν θα μοιράζονταν μεταξύ των χρηστών με πολύ καλό κανάλι αλλά θα δίνονταν αποκλειστικά στο χρήστη με το καλύτερο κανάλι. Και αυτό γιατί από κάποιο C/I και πάνω η ρυθμαπόδοση που μπορεί να υποστηρίξει ο χρήστης δεν αλλάζει (είναι ίση με την μέγιστη) και άρα ο χρήστης επιλέγεται τυχαία μεταξύ αυτών που υποστηρίζουν το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης (μεταξύ των 1,4,7,8,10).

Round Robin : Όλοι οι χρήστες λαμβάνουν μια σχετικά ικανοποιητική ρυθμαπόδοση. Ο χρόνος μοιράζεται ίσα σε όλους και ο καθένας απολαμβάνει ρυθμαπόδοση ανάλογη με την ποιότητα της ζεύξης του. Χρήστες με κακή ποιότητα ζεύξης απολαμβάνουν χαμηλή ρυθμαπόδοση (π.χ οι χρήστες 3 και 9 , αλλά και πάλι η ρυθμαπόδοσή τους είναι ανεκτή και όχι μηδενική όπως στην περίπτωση του Max C/I). Ακόμα, παρατηρούμε ότι το μέσο Tx Rate των χρηστών είναι σχεδόν ίσο με αυτό που θα είχαν αν μετέδιδαν σε στιγμές όπου το Es/No είναι σχεδόν ίσο με το μέσο Es/No αυτών. Αυτό σημαίνει ότι το Es/No που έχουν στα TTI στα οποία μεταδίδουν είναι σχεδόν ομοιόμορφα καταναμεμημένο (κατά τις στιγμές που μεταδίδουν) γύρω από την μέση τιμή του. Βλέπουμε επίσης, ότι οι χρήστες με πολύ καλή ζεύξη (χρήστες 1,4,7,10) έχουν μικρότερο BLER από τους άλλους, κάτι αναμενόμενο αφού για σημαντικό τμήμα του χρόνου τους το Es/No τους είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό που χρειάζεται για να μεταδώσει με τον μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης που υποστηρίζει το σύστημα. Η συνολική ρυθμαπόδοση είναι χαμηλότερη από αυτή του Max C/I αλλά όχι ιδιαίτερα χαμηλή (για αριθμό χρηστών ικανοποιητικό, ώστε να μην έχουμε μόνο χρήστες με άσχημη ζεύξη). Αύξηση του αριθμού των χρηστών όμως, θα οδηγήσει αναπόφευκτα σε χρήστες με μη ικανοποιητική ρυθμαπόδοση.

PropFair : Για χρήστες οι οποίοι δεν είναι μόνιμα στον μέγιστο ρυθμό, το ποσοστό του χρόνου που ο PropFair αφιερώνει σε αυτούς δεν παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις. Ως προς αυτή την παράμετρο μοιάζει με τον Round Robin, αλλά η επιλογή των TTI στα οποία θα εκπέμψει κάθε χρήστης γίνεται με καλύτερο τρόπο έτσι ώστε οι ρυθμαποδόσεις των χρηστών (καθώς και η συνολική ρυθμαπόδοση) να είναι μεγαλύτερες. Πρόβλημα παρουσιάζεται σε χρήστες με πολύ καλή ζεύξη γιατί ο ρυθμός που υποστηρίζουν είναι σχεδόν πάντα ο ίδιος (ο μέγιστος). Έτσι, ο λόγος του στιγμιαίου ρυθμού μετάδοσης προς τον μέσο ρυθμό μετάδοσης είναι πάντα κοντά ή ίσος με την μονάδα. Όταν όμως υπάρχουν αρκετοί χρήστες σχεδόν πάντα θα υπάρχει κάποιος με τον παραπάνω λόγο αρκετά μεγαλύτερο από την μονάδα ώστε να κερδίσει το κανάλι. Έτσι, οι χρήστες με πολύ καλό κανάλι δεν μπορούν να κερδίσουν εύκολα το κανάλι και η ρυθμαπόδοσή τους πέφτει απότομα (όπως φαίνεται στο παράδειγμα ο χρήστης με το καλύτερο κανάλι παρουσιάζει σχεδόν ίδια ρυθμαπόδοση με τον χρήστη με το χειρότερο κανάλι).

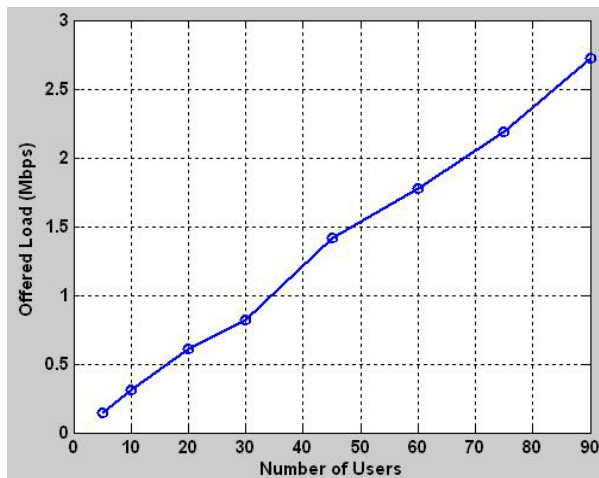
FairThroughput : Ο χρόνος μοιράζεται στους χρήστες με τέτοιο τρόπο ώστε η ρυθμαπόδοσή τους να είναι σχεδόν ίδια. Αυτό όμως κατεβάζει την συνολική ρυθμαπόδοση της κυψέλης σε επίπεδα μη αποδεκτά! Όσο ελαττώνουμε το μέγεθος του παραθύρου στο οποίο μετράμε την βραχυπρόθεσμη ρυθμαπόδοση του χρήστη τόσο ο αλγόριθμος συγκλίνει προς τον Max C/I (δίνεται προτεραιότητα στους χρήστες με καλή ζεύξη αφού το χρονικό διάστημα για το οποίο οι χρήστες με άσχημη ζεύξη μπορούν να μονοπωλήσουν το κανάλι, για να εξισώσουν την ρυθμαπόδοσή τους με αυτή των χρηστών με καλό κανάλι, ελαττώνεται). Καθώς όλο και περισσότεροι χρήστες μπαίνουν στο σύστημα, η ρυθμαπόδοση κάθε χρήστη ελαττώνεται με μικρά βήματα ενώ η συνολική ρυθμαπόδοση αυξάνεται με μεγαλύτερα βήματα (πίνακας #). Για παράδειγμα περνώντας από τους 5 στους 10 χρήστες έχουμε περίπου 18 % μείωση της ρυθμαπόδοσης κάθε χρήστη, αλλά 60 % αύξηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης. Παρόμοια, από τους 10 στους 20 χρήστες έχουμε πάλι περίπου 18 % ελάττωση της ρυθμαπόδοσης κάθε χρήστη αλλά περίπου 65 % αύξηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης. (Η τιμή της παραμέτρου b είναι ίση με 500, αν και για το σενάριο που εξετάζεται δεν διαδραματίζει σημαντικό ρόλο.)

PropCIFair : Ο αλγόριθμος προσφέρει μια ικανοποιητική ελάχιστη ρυθμαπόδοση σε όλους τους χρήστες και μια υψηλή ρυθμαπόδοση κυψέλης (καλύτερη από όλους τους υπόλοιπους αλγορίθμους εκτός από τον MaxCI).

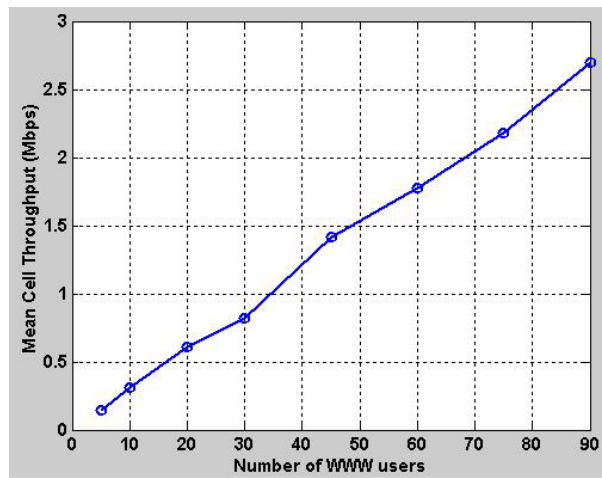
4.4.2 Συμπεριφορά του Max C/I σε εκρηκτική κίνηση

ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	Είδος Κίνησης	WWW
	Περιγραφή κίνησης	Η κίνηση καταφθάνει σε ριπές. Οι αφίξεις των ριπών είναι Poisson και το μέγεθος κάθε ριπής ακολουθεί μια Truncated εκθετική κατανομή με ελάχιστη, μέση και μέγιστη τιμή ίση με 2, 25 και 100 KByte αντίστοιχα.
	Αριθμός Χρηστών	5 - 90
	Επιλογή του μέσου Es/No	Ομοιόμορφα και τυχαία καταναμεμένα εντός της κυψέλης.
	Απαιτούμενο QoS	
	Αλγόριθμοι Χρονοδρομολόγησης	Max C/I

Για να μελετήσουμε ακόμα περισσότερο την συμπεριφορά του Max C/I , προσομοιώσαμε την λειτουργία του για 1.6 λεπτά (100 sec) λειτουργίας και για 5 έως 90 www (bursty) χρήστες. Δεν χρησιμοποιήθηκε deadline ώστε να αποφύγουμε απορρίψεις πακέτων λόγω καθυστέρησης. Χρησιμοποιήθηκαν καταχωρητές των 150 KB. Μερικά από τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα (εικόνες 4.9-4.17):



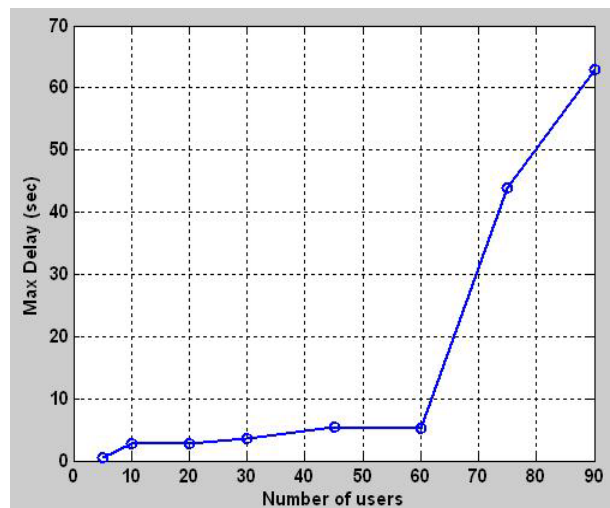
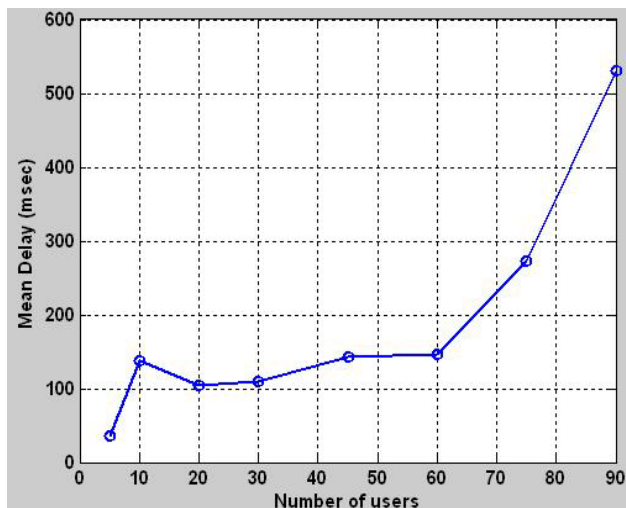
Εικόνα 4.9



Εικόνα 4.10

Παρατήρηση 1^η : Στην περίπτωση του Web browsing η πληροφορία που θέλει να κατεβάσει ο χρήστης δεν είναι πολύ μεγάλη ή τουλάχιστον έρχεται σε σχετικά μικρά κομμάτια. Το προσφερόμενο φορτίο στο δίκτυο είναι ανάλογο του αριθμού των χρηστών όπως φαίνεται και παραπάνω. Οι χρήστες δεν είναι greedy και δεν μονοπωλούν το κανάλι ακόμα και αν έχουν την δυνατότητα να το κάνουν παρά μόνο σε λίγες εξαιρέσεις (μεγάλη ριπή δεδομένων σε χρήστη με κακή ποιότητα ζεύξης, ο οποίος έχει και την δυνατότητα να μονοπωλήσει το κανάλι).

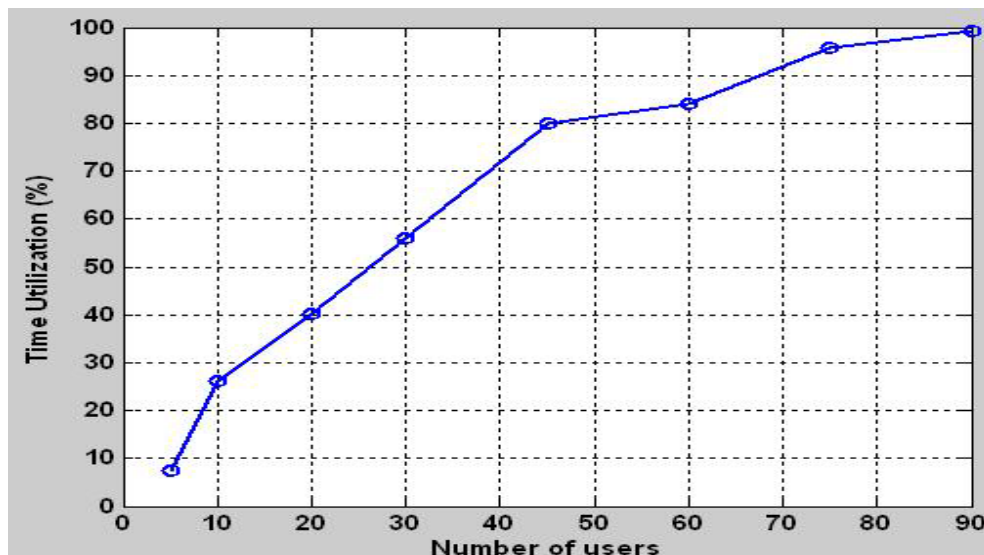
Παρατήρηση 2^η : Γενικά, η ρυθμαπόδοση της κυψέλης στον Max C/I αυξάνεται με τον αριθμό των χρηστών, εφ'όσον το προσφερόμενο φορτίο δεν είναι μεγαλύτερο από την χωρητικότητα του συστήματος.



Παρατήρηση 3^η : Η μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτου αυξάνεται με τον αριθμό των χρηστών (κάτι αναμενόμενο). Η μέση καθυστέρηση ενός packet burst (ή packet call ή ανάσυρση μια ιστοσελίδας) είναι ίση με την μέση καθυστέρηση πακέτου (θεωρήσαμε πακέτα των 1500 byte) επί τον μέσο αριθμό πακέτων ανά ιστοσελίδα.

π.χ για 50 χρήστες
 Mean web page retrieve delay =
 $150 \text{ msec/packet} \cdot 25 \text{ Kbyte/page} \cdot 1/1500$
 $\text{packet/byte} = 2.5 \text{ sec/page}$

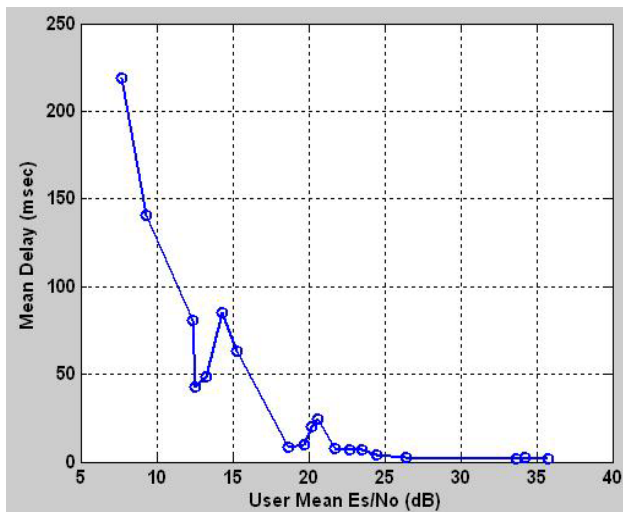
Παρατήρηση 4^η : Η μέγιστη καθυστέρηση μετάδοσης πακέτου γίνεται απαράδεκτη για χρήστες πάνω από 60. Ωστόσο, αυτή η πολύ υψηλή τιμή της μέγιστης καθυστέρησης αντιστοιχεί στον χειρότερο (από άποψη καναλιού) χρήστη και όχι για όλο το χρονικό διάστημα της σύνδεσής του. Αυτό φαίνεται καλύτερα από το αναλυτικό διάγραμμα των καθυστερήσεων στο παράδειγμα των 20 χρηστών που παρουσιάζεται παρακάτω.



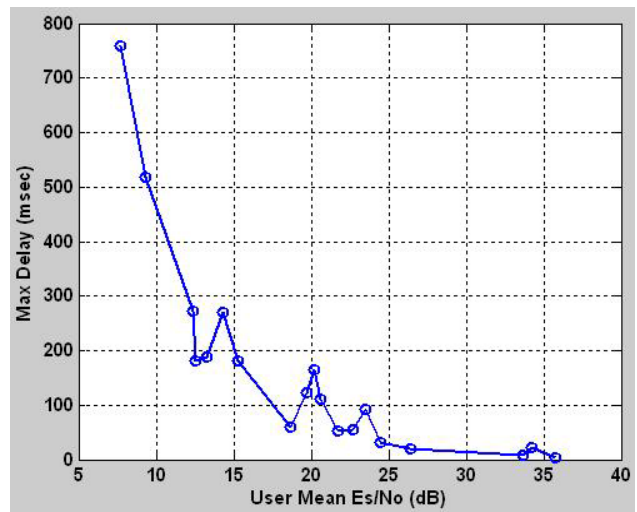
Εικόνα 4.13

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει ότι τα φορτία που εισάγουμε στο σύστημα δεν είναι μεγαλύτερα από αυτά που το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει (αφού το Time Utilization είναι μικρότερο του 100% για χρήστες λιγότερους από 90).

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 20 ΧΡΗΣΤΩΝ



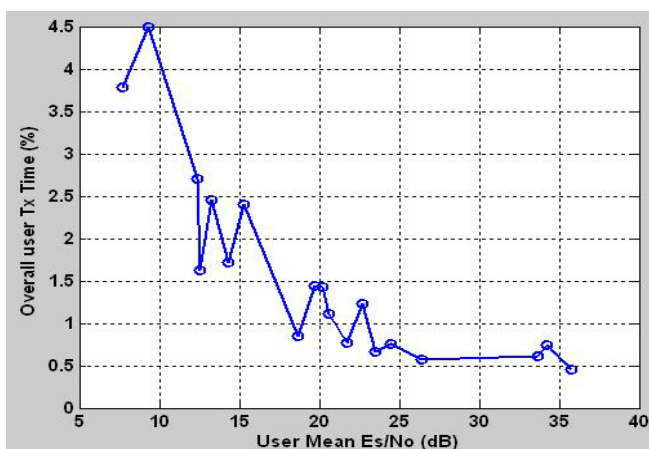
Εικόνα 4.14



Εικόνα 4.15

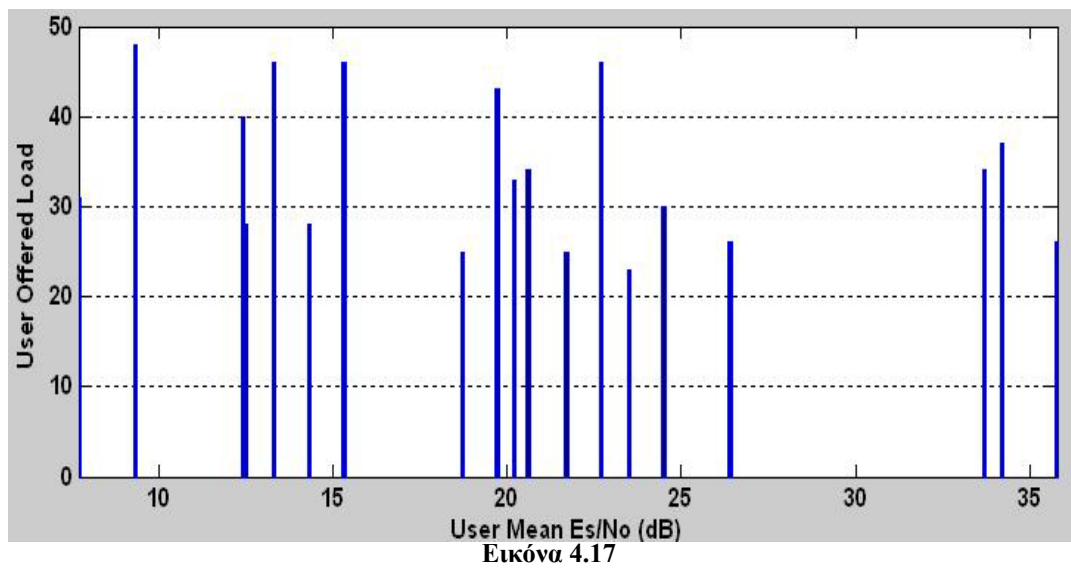
Παρατήρηση 5^η : Ο Max C/I εξυπηρετεί όλους τους χρήστες με σειρά καλύτερης ζεύξης. Με άλλα λόγια ο Max C/I ελαττώνει τον συνολικό όγκο των δεδομένων προς μετάδοση με όσο μεγαλύτερο ρυθμό γίνεται. Όπως αναμένουμε όσο αυξάνει το μέσο C/I του χρήστη τόσο μικρότερες θα είναι και οι καθυστερήσεις που αυτός βλέπει. Μικρές αποκλίσεις στον κανόνα αυτό μπορεί να εμφανιστούν γιατί οι καθυστερήσεις κάθε χρήστη εξαρτώνται και από το φορτίο του, το οποίο δεν είναι εντελώς ίδιο από για κάθε χρήστη (βλέπε τελευταίο διάγραμμα του παραδείγματος).

Παρατήρηση 6^η : Όπως φαίνεται οι μέγιστες καθυστερήσεις κάθε χρήστη είναι αρκετά χαμηλότερες από αυτή του χρήστη με το χειρότερο κανάλι (2 msec , δεν φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα) και πάλι ελαττώνονται όσο καλύτερεύει το κανάλι. 17 στους 20 χρήστες έχουν μέγιστη καθυστέρηση μικρότερη των 300 msec.



Εικόνα 4.16

Παρατήρηση 7^η : Μπορούμε να πούμε ότι όσο πιο άσχημο κανάλι έχει ένας χρήστης τόσο περισσότερος χρόνος αφιερώνεται σε αυτόν (σε συνθήκες χαμηλού φορτίου) ώστε να εξυπηρετηθεί το φορτίο του. Στην πράξη, για χρήστες με κακής ποιότητας κανάλι και υψηλό φορτίο ο χρόνος που αυτοί μεταδίδουν μπορεί να είναι μικρότερος από αυτόν που απαιτούν γιατί ένα μέρος των πακέτων θα απορρίπτεται λόγω υπερχειλίσσης του καταχωρητή ή εκπνοής του deadline των πακέτων.



Εικόνα 4.17

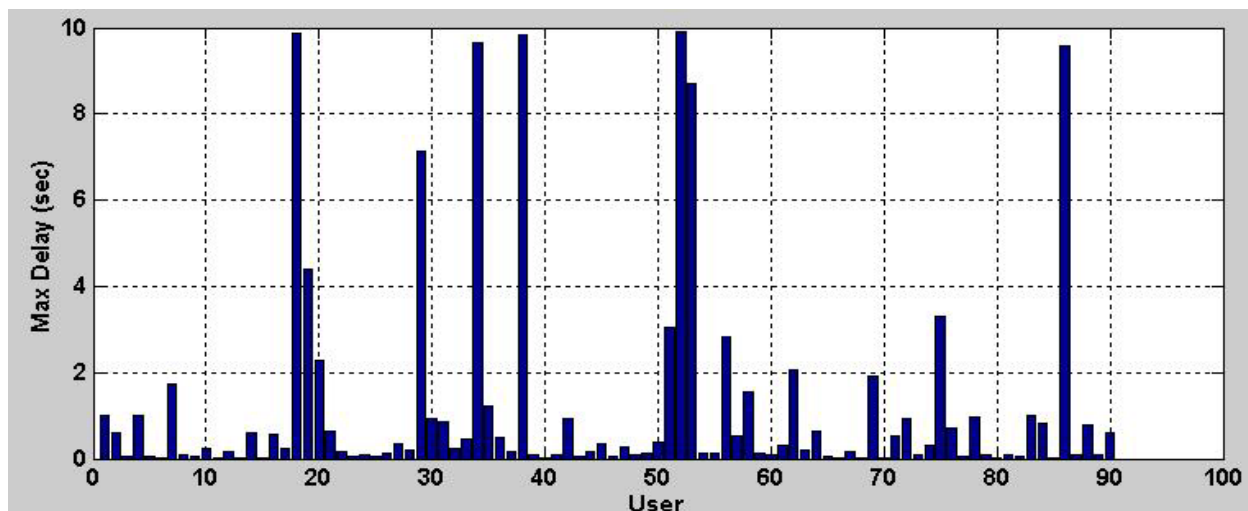
Παρατήρηση 8^η : Το προσφερόμενο φορτίο κάθε χρήστη (μέσος ρυθμός άφιξης δεδομένων για εξυπηρέτηση/ μετάδοση) για το παραπάνω παράδειγμα των 20 χρηστών.

Max C/I - (with Deadlines)

Επαναλαμβάνοντας τις παραπάνω προσομοιώσεις αλλά χρησιμοποιώντας τώρα ένα χαλαρό deadline των 10 sec για κάθε πακέτο τα αποτελέσματα δεν αλλάζουν πολύ. Για χαμηλό φορτίο (<60 χρηστών) η συμπεριφορά είναι σχεδόν η ίδια. Για την περίπτωση των 90 χρηστών παρουσιάζεται απώλεια πακέτων λόγω καθυστέρησης γύρω στο 1 %. Αυτή η απώλεια προέρχεται από λίγους χρήστες με πολύ άσχημο κανάλι οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλό ποσοστό απόρριψης πακέτων. Συγκεκριμένα από τους 90 έχουμε:

- 86 χρήστες με ποσοστό απορριφθέντων πακέτων 0 %
- 1 χρήστη με ποσοστό απορριφθέντων πακέτων 1.84 %
- 1 χρήστη με ποσοστό απορριφθέντων πακέτων 21 %
- 1 χρήστη με ποσοστό απορριφθέντων πακέτων 27.3 %
- 1 χρήστη με ποσοστό απορριφθέντων πακέτων 61.8 %

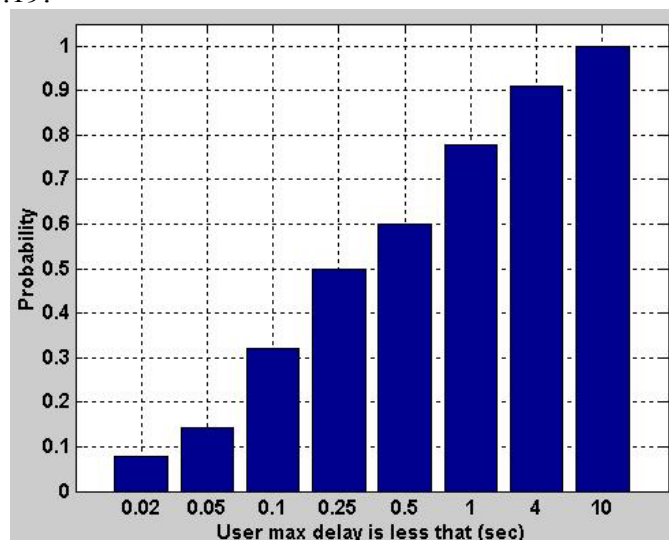
Επίσης, αν και η μέγιστη καθυστέρηση που παρουσιάζει το σύνολο των χρηστών είναι το όριο απόρριψης (10 sec) η μέγιστη καθυστέρηση κάθε χρήστη φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 4.18:



Εικόνα 4.18

Πολύ λίγοι χρήστες παρουσιάζουν υψηλή καθυστέρηση (πάνω από 4 sec) , για την ακρίβεια μόνο 8 από τους 90 χρήστες!

Το διάγραμμα αθροιστικής κατανομής των πιθανοτήτων της μέγιστης καθυστέρησης χρήστη φαίνεται στην εικόνα 4.19:

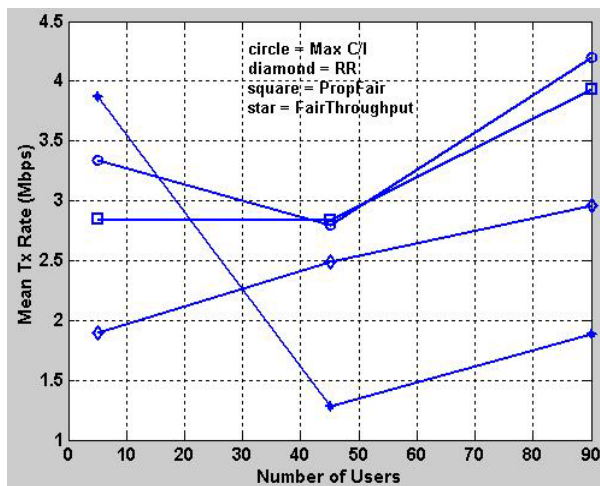


Εικόνα 4.19

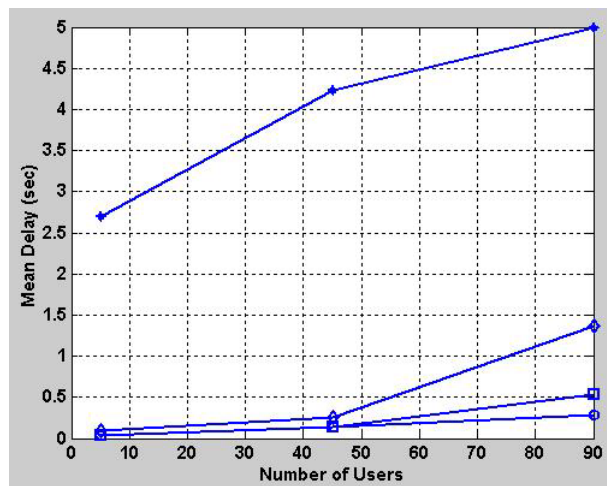
4.4.3 Σύγκριση αλγορίθμων κάτω από εκρηκτική κίνηση

ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	Είδος Κίνησης	WWW
	Περιγραφή κίνησης	Η κίνηση καταφθάνει σε ριπές. Οι αφίξεις των ριπών είναι Poisson και το μέγεθος κάθε ριπής ακολουθεί μια Truncated εκθετική κατανομή με ελάχιστη, μέση και μέγιστη τιμή ίση με 2, 25 και 100 KByte αντίστοιχα.
	Αριθμός Χρηστών	5 / 45 / 90
	Επιλογή του μέσου Es/No	Ομοιόμορφα και τυχαία κατανεμημένα εντός της κυνέλης.
	Απαιτούμενο QoS	-
	Αλγόριθμοι Χρονοδρομολόγησης	Max C/I RR PropFair FairThroughput

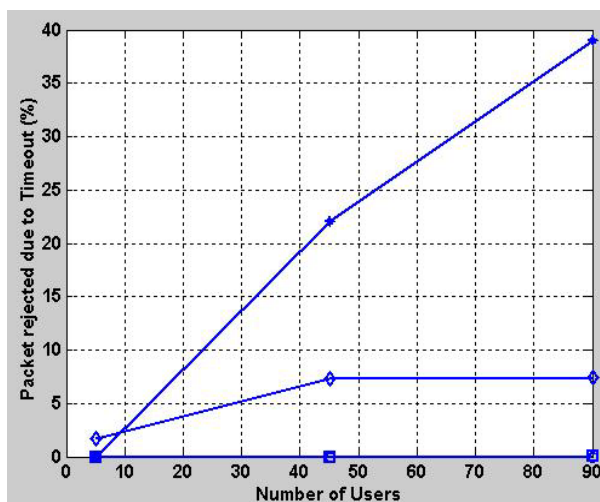
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στα διαγράμματα των εικόνων 4.20-4.23.



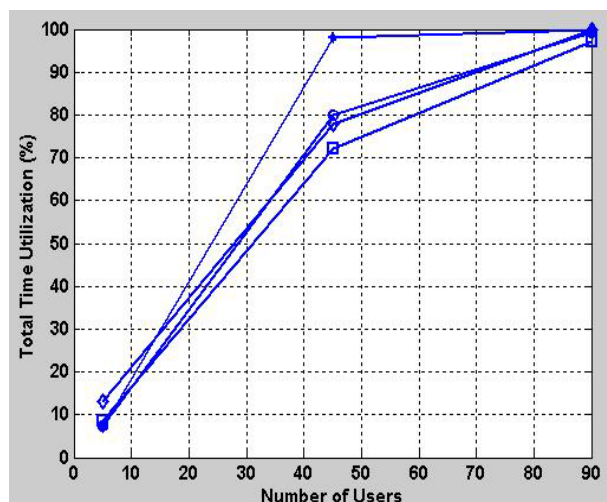
Εικόνα 4.20



Εικόνα 4.21



Εικόνα 4.22



Εικόνα 4.23

Σχολιασμός αποτελεσμάτων : Ο Fair Throughput αυξάνει κατά πολύ τις καθυστερήσεις των πακέτων. Αυτό οφείλεται κάπως στον χαμηλό ρυθμό μετάδοσης που χρησιμοποιείται κατά μέσο όρο αλλά κυρίως στο ότι οι χρήστες με κακή ποιότητα ζεύξης αποκτούν προτεραιότητα λόγω του γεγονότος ότι η ρυθμαπόδοσή τους είναι χαμηλή. Λίγο χειρότερη απόδοση από τους άλλους δύο

παρουσιάζει ο RR αφού δεν λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του καναλιού κατά την απόφαση της δρομολόγησης. Επίσης, η προτεραιότητα των χρηστών με κακή ζεύξη δρα καταλυτικά αυξάνοντας σημαντικά το ποσοστό χρόνου που χρησιμοποιείται το κανάλι αλλά κατεβάζοντας κατά πολύ την αποδοτικότητα της χρήσης του και κατά συνέπεια οδηγώντας και σε αυξημένες απορρίψεις πακέτων (ιδιαίτερα σε στιγμές που κάποια ριπή δεδομένων καταφθάνει για μετάδοση προς κάποιο χρήστη με ιδιαίτερα άσχημη ζεύξη). Άξιο προσοχής είναι και το γεγονός ότι ο Max-C/I παρόλο που λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του καναλιού η μετάδοση των πακέτων κάθε χρήστη δεν γίνεται τις στιγμές που αυτός υποστηρίζει αρκετά μεγάλο ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με τον μέσο ρυθμό μετάδοσης αυτού. Αυτό ισχύει κυρίως για τους χρήστες με τις καλύτερες ζεύξεις σχετικά με τους υπόλοιπους οι οποίοι μεταδίδουν λόγω της υψηλής ρυθμαπόδοσης και όχι λόγω της “σχετικά” υψηλής ρυθμαπόδοσης, όμως οι χρήστες αυτοί είναι και αυτοί που μεταδίδουν το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου.

4.5 Γενική κριτική Best-Effort αλγορίθμων

Έχει ήδη τονισθεί [43] και γίνεται φανερό και από τις προσομοιώσεις μας ότι η διαστρωματική σχεδίαση (cross-layer design) ενός αλγορίθμου χρονοδρομολόγησης αποτελεί απαραίτητο στοιχείο στην προσπάθεια πλήρους αξιοποίησης της χωρητικότητας του συστήματος σε ασύρματα διαμοιραζόμενα κανάλια. Αλγόριθμοι οι οποίοι δεν χρησιμοποιούν πληροφορία φυσικού επιπέδου στις αποφάσεις που λαμβάνονται στο MAC επίπεδο (π.χ RR και FairThroughput) παρουσιάζουν πολύ χαμηλές επιδόσεις. Την καλύτερη συμπεριφορά μεταξύ των Best-Effort αλγορίθμων φαίνεται να παρουσιάζει ο PropCIFair, ο οποίος κατανέμει σχετικά δίκαια (ως προς την ποιότητα της ζεύξης κάθε χρήστη) τους πόρους του συστήματος κρατώντας σχετικά υψηλά την ρυθμαπόδοση της κυψέλης και προσφέροντας, κάτω από κάποιες συνθήκες όχι τόσο ελαστικές, μια ικανοποιητική ελάχιστη ρυθμαπόδοση σε κάθε χρήστη. Παρ’ολαυτά, κανένας από τους αλγόριθμους αυτούς δεν μπορεί να εγγυηθεί την ικανοποίηση κάποιου QoS σε ένα χρήστη από την στιγμή που αυτός γίνεται δεκτός στο σύστημα, ακόμα και αν αυτό είναι εφικτό. Κάποιοι χρήστες μπορεί να επιτυγχάνουν απαράδεκτα χαμηλές ρυθμαποδόσεις, ενώ την ίδια στιγμή κάποιοι άλλοι να επιτυγχάνουν ρυθμαποδόσεις πάρα πολύ υψηλές. Τα κυριότερα προβλήματα των Best-Effort αλγορίθμων παρουσιάζονται συνοπτικά στην συνέχεια.

- **Max C/I** : ΟΙ ΚΑΛΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ ΜΟΝΟΠΩΛΟΥΝ ΤΟ ΚΑΝΑΛΙ (Δίνει όλο το BW στους χρήστες με το καλύτερο κανάλι. Δεν μπορεί να εγγυηθεί τίποτα για το QoS των χρηστών αφού όλα εξαρτώνται από την ποιότητα της ζεύξης τους σε σχέση με την ποιότητα της ζεύξης των υπόλοιπων χρηστών. «Άπληστοι» χρήστες (π.χ ftp), με καλές ζεύξεις μπορούν να μονοπωλήσουν το κανάλι αφήνοντας ανικανοποίητους τους υπόλοιπους χρήστες)
- **Fair Throughput** : ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ ΡΥΘΜΑΠΟΔΟΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ (Χρήστες με ιδιαίτερα άσχημη ζεύξη αποκτούν πλεονέκτημα και ρίχνουν κατά πολύ την συνολική ρυθμαπόδοση της κυψέλης. Επίσης, δεν γίνεται καμμία εκμετάλλευση των μεταβολών της κατάστασης των ζεύξεων)
- **Round Robin** : ΑΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (Δεν εκμεταλλεύεται τις μεταβολές της κατάστασης των ζεύξεων, αφού δεν λαμβάνει υπόψη την κατάστασή τους, και άρα δεν συμβάλλει στην μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης. Επίσης, δεν ενδιαφέρεται για την ποιότητα υπηρεσίας που απολαμβάνει κάθε χρήστης)
- **Proportional Fair** : ΑΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (Η σχετική κατάσταση των πολύ καλών ζεύξεων δεν μεταβάλλεται ικανοποιητικά ώστε να πάρει τιμές αρκετά μεγαλύτερες από την μονάδα και έτσι οι ζεύξεις αυτές δυσκολεύονται να κερδίσουν το κανάλι)

παρουσιάζοντας χαμηλή ρυθμαπόδοση. Επίσης, δεν αντιμετωπίζει το γεγονός ότι μερικοί χρήστες μπορεί να έχουν μια πολύ υψηλή ρυθμαπόδοση ενώ άλλοι μικρότερη από την ελάχιστη αποδεκτή και δεν μπορεί να αναγνωρίσει την ευαισθησία των RT εφαρμογών)

- **PropCIFair** : ΕΛΛΕΙΨΗ ΕΓΓΥΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ (Μερικοί χρήστες μπορεί να έχουν μια πολύ υψηλή ρυθμαπόδοση ενώ άλλοι μικρότερη από την ελάχιστη αποδεκτή)

- **Max Queue** : ΟΙ ΑΠΛΗΣΤΟΙ ΧΡΗΣΤΕΣ ΜΟΝΟΠΩΛΟΥΝ ΤΟ ΚΑΝΑΛΙ (Δεν λαμβάνεται καμιά πρόνοια για μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης αλλά ούτε και της εξασφάλισης του απαιτούμενου QoS. Ο πιο άπληστος (greedy) χρήστης διατηρεί και το μεγαλύτερο μήκος ουράς καταλαμβάνοντας και το μεγαλύτερο, τμήμα του BW.)

- **EDF** : ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΟ ΣΕ REAL-TIME ΚΙΝΗΣΗ - ΧΑΜΗΛΗ ΡΥΘΜΑΠΟΔΟΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ (Καμιά πρόνοια δε λαμβάνεται για μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης. Όταν κανένα deadline δεν είναι κρίσιμο τότε η αξιοποίηση των πόρων δεν είναι καθόλου ικανοποιητική, αφού δεν εκμεταλλεύεται τις μεταβολές της κατάστασης των ζεύξεων. Δεν λαμβάνει υπόψη άλλες παραμέτρους του QoS των RT εφαρμογών όπως το ρυθμό απόρριψης πακέτων (ούτε το delay jitter, το οποίο όμως είναι λιγότερο σημαντικό)).

- **Class-based** : ΧΑΜΗΛΗ ΡΥΘΜΑΠΟΔΟΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ – ΑΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ (Ο αλγόριθμος αυτός δεν εκμεταλλεύεται τις μεταβολές των ζεύξεων ούτε και μπορεί να εγγυηθεί την ποιότητα υπηρεσίας που απαιτεί κάθε χρήστης. Η εξυπηρέτηση ανά κλάση δεν μεγιστοποιεί σε καμιά περίπτωση την συνολική ρυθμαπόδοση, ούτε και εξασφαλίζει το απαιτούμενο QoS κάθε χρήστη. Ο συνδυασμός των κλάσεων με οποιονδήποτε από τους παραπάνω αλγόριθμους δεν αναιρεί τα μειονεκτήματα του αλγορίθμου).

5 QoS-based Χρονοδρομολόγηση

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάμε αλγορίθμους οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη την ποιότητα εξυπηρέτησης που απαιτεί ή απολαμβάνει κάθε χρήστης και προσπαθούν να διασφαλίσουν όσο καλύτερα γίνεται μια ελάχιστη ποιότητα υπηρεσίας για κάθε έναν από αυτούς. Στην συνέχεια θα εξετάσουμε και θα μελετήσουμε τις επιδόσεις παλαιότερων QoS-based αλγορίθμων και θα προτείνουμε ένα νέο αλγόριθμο με βελτιωμένες επιδόσεις σε σχέση με παλαιότερους.

5.2 1^η γενιά QoS-based αλγορίθμων

5.2.1 Δομή αλγορίθμων 1^{ης} γενιάς

Το κύριο πρόβλημα των παραπάνω Best-Effort αλγορίθμων μπορεί να εντοπιστεί στο ότι έχουν ένα και μοναδικό στόχο ο οποίος από μόνος του σπάνια, ή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, μπορεί να καλύψει την απαιτούμενη συμπεριφορά. Έτσι, το επόμενο βήμα στην ανάπτυξη αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης ήταν να συνδυαστούν περισσότεροι από μία παράμετροι βελτιστοποίησης στο ίδιο κριτήριο χρονοδρομολόγησης. Επειδή, η μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης είναι ένα απαραίτητο στοιχείο στην όλη προσπάθεια (αφού η HSDPA αρχιτεκτονική σχεδιάστηκε για την αύξηση της ρυθμαπόδοσης στο κανάλι καθόδου), θα πρέπει στο κριτήριο να υπάρχει σίγουρα ένας όρος ο οποίος θα αντιστοιχεί στον τρέχοντα ρυθμό μετάδοσης που υποστηρίζει ο χρήστης (R_i για τον χρήστη i). Ο άλλος όρος που εισάγεται είναι κάποιος όρος σχετικός με το QoS του χρήστη (το απαιτούμενο ή το στιγμιαία απολαμβανόμενο από τον χρήστη). Γενικά, οι αλγόριθμοι αυτοί δρομολογούν πακέτο στο χρήστη i με βάση το κριτήριο:

$$\arg \max_i \{R_i \cdot w_i\}$$

Μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης όταν ο στόχος που εκφράζει ο άλλος όρος είναι σχετικά ικανοποιημένος (έχει τιμή κοντά στη μονάδα) ή δεν εμφανίζει μεγάλες αποκλίσεις (δηλ. ο άλλος όρος έχει περίπου την ίδια τιμή για όλους τους χρήστες).

Δύο όροι σημαίνει βελτιστοποίηση με βάση δυο διαφορετικούς στόχους. Το ποιός είναι ο πιο βασικός στόχος εξαρτάται από το εύρος των τιμών που παίρνει ο κάθε όρος. Το πόσο ελαστικός είναι κάθε στόχος εξαρτάται από την κλίση του αντίστοιχου όρου (πόσο γρήγορα μεγαλώνει η τιμή του καθώς απόμακρυνόμαστε από την επιθυμητή κατάσταση που εκφράζει ο αντίστοιχος στόχος)

Συνήθως στην θέση αυτή μπαίνει όρος που να εκφράζει το QoS satisfaction ή dissatisfaction του χρήστη. Για να γίνει αυτό θα πρέπει:
α) να προτρέπει επιλογή του χρήστη i όταν το QoS dissatisfaction του χρήστη i είναι μεγαλύτερο από αυτό των υπόλοιπων χρηστών,
β) οι μεταβολές των τιμών του w να υπερκαλύπτουν αυτές των τιμών του R όταν το σύστημα βρίσκεται μακριά από την ιδανική κατάσταση του QoS (π.χ οι τιμές του R μπορούν να γίνουν το πολύ διπλάσιες της μέσης τιμής του, ενώ αυτές του w δεκαπλάσιες) και αυτό γιατί πρωταρχικό μέλημα πρέπει να είναι η επίτευξη του ελάχιστου αποδεκτού QoS και στην συνέχεια η μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης.

Εικόνα 5.1

Οι αλγόριθμοι που στηρίζονται στην παραπάνω προσέγγιση (εικόνα 5.1) έχουν ως κύριο σκοπό την εξασφάλιση της ποιότητας της υπηρεσίας που προσφέρεται σε κάθε χρήστη και όταν αυτό έχει επιτευχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό τότε ο αλγόριθμος αλλάζει συμπεριφορά (κάτι που γίνεται σταδιακά ώστε να μην εκθέσουμε σε μεγάλο κίνδυνο το QoS των χρηστών) και προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την συνολική ρυθμαπόδοση δρομολογώντας κυρίως με βάση τον ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει κάθε χρήστης. Το w μπορεί να είναι μια απλή μετρική όπως το μέγεθος της ουράς του χρήστη ή κάτι πιο σύνθετο.

5.2.2 Βασικότεροι εκπρόσωποι 1^{ης} γενιάς

Οι βασικότεροι αλγόριθμοι που μελετήθηκαν καθώς και τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζουν είναι :

Max R-Queue : Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί ένα συμβιβασμό μεταξύ των αλγορίθμων Max C/I και Max Queue. Ο χρήστης που εξυπηρετείται κάθε φορά είναι αυτός που έχει το μεγαλύτερο γινόμενο του ρυθμού μετάδοσης επί το μέγεθος της ουράς. Όταν τα μεγέθη των ουρών είναι περίπου ίσα τότε ο αλγόριθμος δρομολογεί το χρήστη με το καλύτερο κανάλι (προωθεί την μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης). Αλλιώς, επιλέγει με βάση το μέγεθος της ουράς (ελαχιστοποίηση των απορρίψεων λόγω υπερχειλίσης του καταχωρητή).

Σχόλιο : Τα προβλήματα του αλγορίθμου είναι: α) δεν περιορίζει τους άπληστους χρήστες, β) δεν αναγνωρίζει πακέτα εφαρμογών ευαίσθητων στην καθυστέρηση, γ) γενικότερη αδυναμία αποτύπωσης των QoS απαιτήσεων στο κριτήριο χρονοδρομολόγησης με εξαίρεση την περίπτωση streaming ροών.

Max R-Delay : Όταν η καθυστέρηση του HOL πακέτου κάθε χρήστη είναι περίπου ίδια, τότε ο χρήστης επιλέγεται με βάση το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει. Αλλιώς, δίνεται προτεραιότητα στους χρήστες με την μεγαλύτερη καθυστέρηση.

Σχόλιο : Τα προβλήματα του αλγορίθμου είναι: α) οι άπληστοι χρήστες δεν περιορίζονται, β) δεν υπάρχουν διαβαθμίσεις στην ευαισθησία της καθυστέρησης, γ) γενικότερη αδυναμία αποτύπωσης των QoS απαιτήσεων στο κριτήριο χρονοδρομολόγησης με εξαίρεση την περίπτωση των streaming ροών.

Max R-(Throughput)⁻¹ : Ο αλγόριθμος αυτός προτάθηκε στο [44] και αναλύθηκε περισσότερο στο [45]. Ο χρήστης που εξυπηρετείται κάθε φορά είναι αυτός που έχει το μεγαλύτερο γινόμενο ρυθμού μετάδοσης δια την βραχυπρόθεσμη μέση ρυθμαπόδοση του χρήστη (η οποία μετράται εντός ενός χρονικού παραθύρου). Με άλλα λόγια, όταν η ρυθμαπόδοση των χρηστών είναι περίπου ίδια, τότε ο χρήστης επιλέγεται με βάση το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει. Αλλιώς, δίνεται προτεραιότητα στους χρήστες με μικρή ρυθμαπόδοση. Η ρυθμαπόδοση αυτή μετράται, στην αρχή κάθε TTI, με ένα αναδρομικό τύπο της μορφής:

$$Throu(n) = \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \cdot Throu(n-1) + \beta \cdot Bits_sended$$

, όπου Throu είναι η ρυθμαπόδοση που απολαμβάνει ο χρήστης, Bits_sended είναι τα bits που στάλθηκαν στο προηγούμενο TTI και για το “β” έχει επιλεγεί η τιμή 500. Η τιμή του Bits_Sended είναι μηδέν για χρήστες που δεν μετέδωσαν. Η τιμή του Throu ανανεώνεται σε κάθε TTI μόνο για τους χρήστες οι οποίοι έχουν πληροφορία για μετάδοση, έτσι ώστε η δυνατότητα μετάδοσης κάθε χρήστη να μην γίνεται για αντιστάθμιση ενός χαμηλού συντελεστή δραστηριότητας, ο οποίος μπορεί να διαφέρει κατά πολύ από χρήστη σε χρήστη.

Σχόλιο : Μικρό παράθυρο υπολογισμού της βραχυπρόθεσμης ρυθμαπόδοσης μας οδηγεί σε μεγάλη εξάρτηση των αποφάσεων από την βραχυπρόθεσμη ρυθμαπόδοση και άρα σε συμπεριφορά

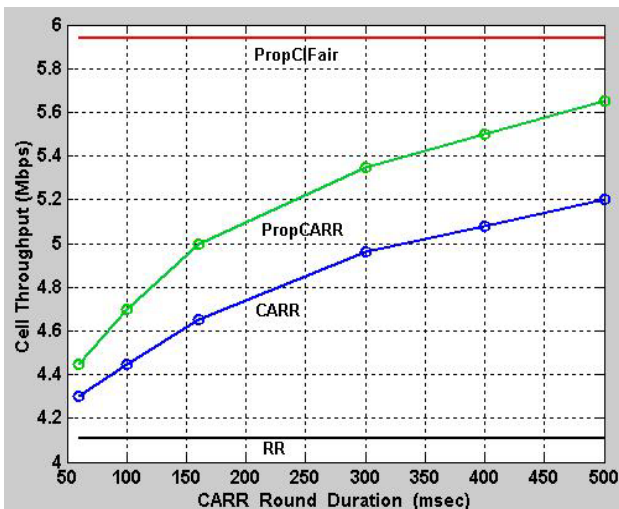
παρόμοια με αυτή του Fair Throughput αλγορίθμου, ενώ μεγάλο παράθυρο οδηγεί σε συμπεριφορά παρόμοια με αυτή του Max C/I αλγορίθμου. Ένα μεγάλο παράθυρο αυξάνει και την μέγιστη καθυστέρηση πρόσβασης που μπορεί να συναντήσει ένας χρήστης. Οπότε, η ιδανική τιμή είναι ένα μέτριο παράθυρο. Η ύπαρξη του παράγοντα της ρυθμαπόδοσης που απολαμβάνει κάθε χρήστης περιορίζει εν μέρει τους άπληστους χρήστες (το κατά πόσο εξαρτάται από το παράθυρο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ρυθμαπόδοσης). Το βασικό μειονέκτημα, όπως και στον PropCIFair, είναι ότι ο αλγόριθμος δεν προσπαθεί να εγγυηθεί κάποιο συγκεκριμένο QoS αλλά απλά εισάγει κάποια έννοια δικαιοσύνης στην κατανομή των πόρων (το λαμβανόμενο QoS μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερο ή μικρότερο του απαιτούμενου).

** Σημείωση: Ο MaxCIThroughput είναι στην πραγματικότητα ο αλγόριθμος στον οποίο δόθηκε αρχικά η ονομασία “Proportional Fair”. Σε πολλά άρθρα όμως η ονομασία αυτή χρησιμοποιήθηκε καταχρηστικά για τον αλγόριθμο που και εμείς αναφέρουμε ως Proportional Fair, άλλες φορές λόγω σύγχυσης και άλλες για λόγους αποδοτικότητας αφού η χρήση της βραχυπρόθεσμης ρυθμαπόδοσης στον παρονομαστή του κριτηρίου δημιουργεί κάποια προβλήματα όπως αναφέρεται στα [13][37]. Για λόγους καθαρά πρακτικούς θα διατηρήσουμε αυτή την καταχρηστική σύμβαση με μια αυστηρή επισήμανση για μη περαιτέρω σύγχυση των δύο αυτών αλγορίθμων οι οποίοι χρησιμοποιούν την ονομασία αυτή.*

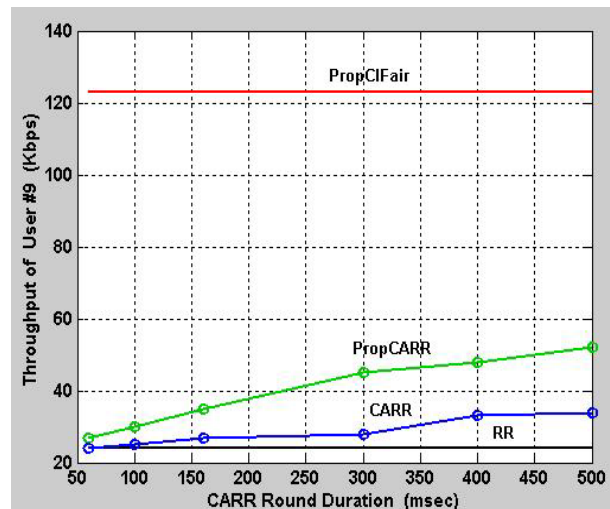
PropFairThroughput : Αυτή είναι μια παραλλαγή του $Max R \cdot (Throughput)^{-1}$ στην οποία τη θέση του ρυθμού μετάδοσης έχει πάρει ο λόγος της στιγμιαίας προς μέση λαμβανόμενη ισχύ. Είναι δηλαδή, ένας συνδυασμός του PropFair με τον FairThroughput (σε αντίθεση με τον $Max R \cdot (Throughput)^{-1}$ που είναι συνδυασμός του MaxC/I με τον FairThroughput). Ο PropFairThrou προσπαθεί να εξομαλύνει τις διαφορές μεταξύ των ρυθμαποδόσεων κάθε χρήστη αλλά δίνει κάποια προτεραιότητα στους χρήστες που έχουν κάθε στιγμή σχετικά καλό κανάλι (μπορεί να είναι οποιοσδήποτε χρήστης). Κάτι παρόμοιο κάνει και ο $Max R \cdot (Throughput)^{-1}$ αλλά η προτεραιότητα δίνεται σε χρήστες που πετυχαίνουν κάθε στιγμή υψηλό ρυθμό μετάδοσης (στο μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου οι χρήστες αυτοί είναι συγκεκριμένοι).

Channel Aware Round Robin (CARR) : Ο αλγόριθμος αυτός [35] αποτελεί μια τροποποίηση του RR η οποία διατηρεί το δικαίωμα όλων των χρηστών για ίσο χρόνο πρόσβασης στο κανάλι και ταυτόχρονα λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του καναλιού πριν αποφασίσει ποιος χρήστης θα εκπέμψει. Ο χρόνος πρόσβασης διαιρείται σε κύκλους πρόσβασης των οποίων η διάρκεια σε TTI είναι πολλαπλάσια του αριθμού των χρηστών. Για παράδειγμα, αν έχουμε N χρήστες και η διάρκεια του κύκλου είναι $k \cdot N$, τότε κάθε χρήστης δικαιούται να μεταδώσει σε k TTI του κύκλου. Στην αρχή κάθε κύκλου το δικαίωμα πρόσβασης κάθε χρήστη τίθεται ίσο με k . Μετά από κάθε μετάδοση το δικαίωμα πρόσβασης του χρήστη ελαττώνεται κατά ένα. Σε κάθε TTI ο χρήστης που επιλέγεται για μετάδοση είναι αυτός με τον μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης μεταξύ των χρηστών με μη μηδενικό δικαίωμα πρόσβασης. Αν κατά την διάρκεια ενός κύκλου αδειάσουν οι καταχωρητές όλων των χρηστών με μη μηδενικό δικαίωμα πρόσβασης, τότε ο κύκλος τερματίζεται αυτόματα και ένας νέος αρχίζει. Αυτή είναι η βασική έκδοση του αλγορίθμου και συμβολίζεται με CARR(1,N). Γενικεύσεις του CARR έχουν προταθεί για την καλύτερη υποστήριξη ενός soft QoS. Για παράδειγμα στο CARR(1,N+x), έχουμε ένα κύκλο από $N+x$ TTIs, από τα οποία τα N χρησιμοποιούνται όπως και πριν, ενώ στα x από αυτά η μετάδοση γίνεται από το χρήστη με τον μεγαλύτερο δυνατό ρυθμό μετάδοσης (χρησιμοποιούνται για την αύξηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης). Στο CARR(k,k·N) σε κάθε χρήστη αντιστοιχούν k TTI για κάθε κύκλο διάρκειας $k \cdot N$. Η αύξηση του μεγέθους του κύκλου πρόσβασης μας επιτρέπει να εκμεταλλευθούμε καλύτερα τις μεταβολές στην κατάσταση των ζεύξεων. Το πόσο μπορούμε να μεγαλώσουμε τον κύκλο πρόσβασης εξαρτάται από τις απαιτήσεις των εφαρμογών σε καθυστέρηση και μεταβολές στην καθυστέρηση. Τέλος, έχει προταθεί και χρήση του CARR με κάτω όριο στον ρυθμό μετάδοσης. Έτσι, ένας χρήστης δεν επιλέγεται για μετάδοση εάν ο ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει τη δεδομένη στιγμή δεν ξεπερνά ένα κάτω όριο. Το πόσο επηρεάζει η ύπαρξη ενός κάτω ορίου την ποιότητα υπηρεσιών του χρήστη εξαρτάται από την διάρκεια του κύκλου πρόσβασης και το είδος της εφαρμογής.

PropCARR : Μια έκδοση του CARR η οποία όπως θα φανεί στην συνέχεια έχει καλύτερες επιδόσεις από τον CARR. Η μόνη διαφορά του PropCARR (ή Proportional CARR) από τον CARR είναι ότι ο χρήστης δεν επιλέγεται με βάση το μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης αλλά με βάση την σχετικά καλύτερη ζεύξη (χρήση του ίδιου κριτηρίου με το PropCIFair). Η συμπεριφορά των CARR και PropCARR βρίσκεται κάπου ανάμεσα σε αυτή του RR και του PropCIFair. Οι επιδόσεις τους εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την διάρκεια του κύκλου πρόσβασης. Μικρός κύκλος πρόσβασης σημαίνει και μικρή δυνατότητα για αξιοποίηση των μεταβολών του καναλιού (multiuser diversity). Μεγαλύτερες διάρκειες κύκλου οδηγούν σε μεγαλύτερες ρυθμαποδόσεις τόσο για κάθε χρήστη όσο και για την κυψέλη αλλά αυξάνουν και την μέγιστη καθυστέρηση πρόσβασης που μπορεί να αντιμετωπίσει ένας χρήστης. Οι επιδόσεις των αλγορίθμων σε σχέση με τις επιδόσεις των RR και PropCIFair για την περίπτωση των 10 χρηστών και διάφορα μεγέθη κύκλου πρόσβασης παρουσιάζονται στον πίνακα #. Τα βασικά στοιχεία των επιδόσεών τους φαίνονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.2 και 5.3:



Εικόνα 5.2 : Σύγκριση της συνολικής ρυθμαπόδοσης της κυψέλης των CARR και PropCARR ως προς αυτή των RR και PropCIFair.

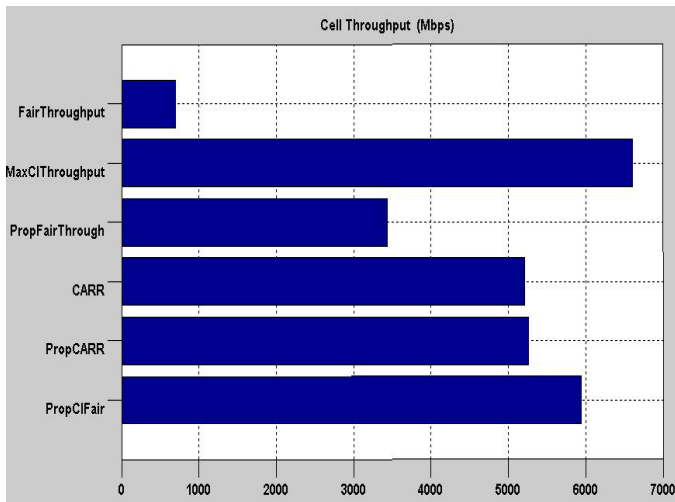


Εικόνα 5.3 : Σύγκριση της ρυθμαπόδοσης του χρήστη με της χειρότερης ζεύξης (χρήστης #9) των CARR και PropCARR με αυτή των RR και PropCIFair.

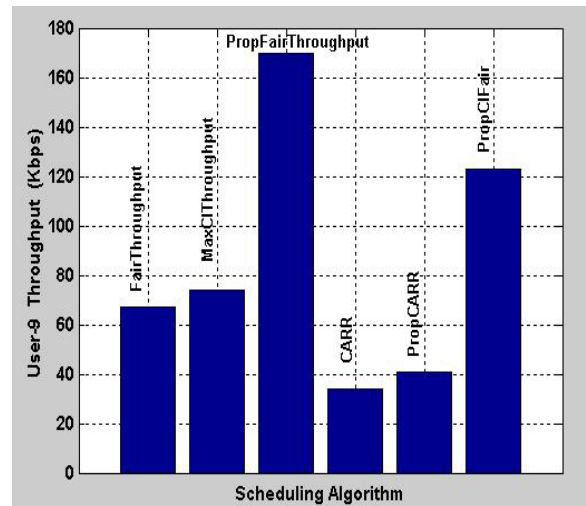
Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα των εικόνων 5.2 και 5.3 , η επίδοση των CARR και PropCARR βρίσκεται μεταξύ των RR και PropCIFair. Ο PropCARR συμπεριφέρεται καλύτερα από τον CARR μιας και κάνει καλύτερη επιλογή των στιγμών στις οποίες εκπέμπει κάθε χρήστης. Συγκεκριμένα, ανάλογα με το μέγεθος τους κύκλου που χρησιμοποιείται, βελτιώνει την συνολική ρυθμαπόδοση, σε σχέση με τον CARR, από 3.5% μέχρι 10.5%. Επίσης, η ρυθμαπόδοση του χρήστη με την χειρότερη ζεύξη βελτιώνεται μέχρι και 60% για τα μεγέθη κύκλου που έχουν χρησιμοποιηθεί. Αν και η αύξηση της διάρκειας του κύκλου πρόσβασης οδηγεί σε καλύτερες ρυθμαποδόσεις, αυξάνει το άνω όριο στην καθυστέρηση πρόσβασης κάθε χρήστη. Επίσης, η επιλογή της διάρκειας του κύκλου εξαρτάται και από τον αριθμό των χρηστών. Αν η διάρκεια του κύκλου κρατηθεί σταθερή και ο αριθμός των χρηστών αυξηθεί τότε οι επιδόσεις του CARR/PropCARR θα ελαττωθούν. Από την άλλη κρατώντας σταθερό τον αριθμό των TTI ανά χρήστη σε κάθε κύκλο, μια σημαντική αύξηση στον αριθμό των χρηστών θα οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των καθυστερήσεων πρόσβασης κάθε χρήστη.

5.2.3 Σύγκριση αλγορίθμων 1^{ης} γενιάς

Παρακάτω (εικόνες 5.4 και 5.5) παρουσιάζονται κάποια συγκριτικά διαγράμματα των βασικότερων QoS-based αλγορίθμων 1^{ης} γενιάς, όσον αφορά την ρυθμαπόδοση κυψέλης και την ρυθμαπόδοση του χρήστη με το χειρότερο κανάλι.

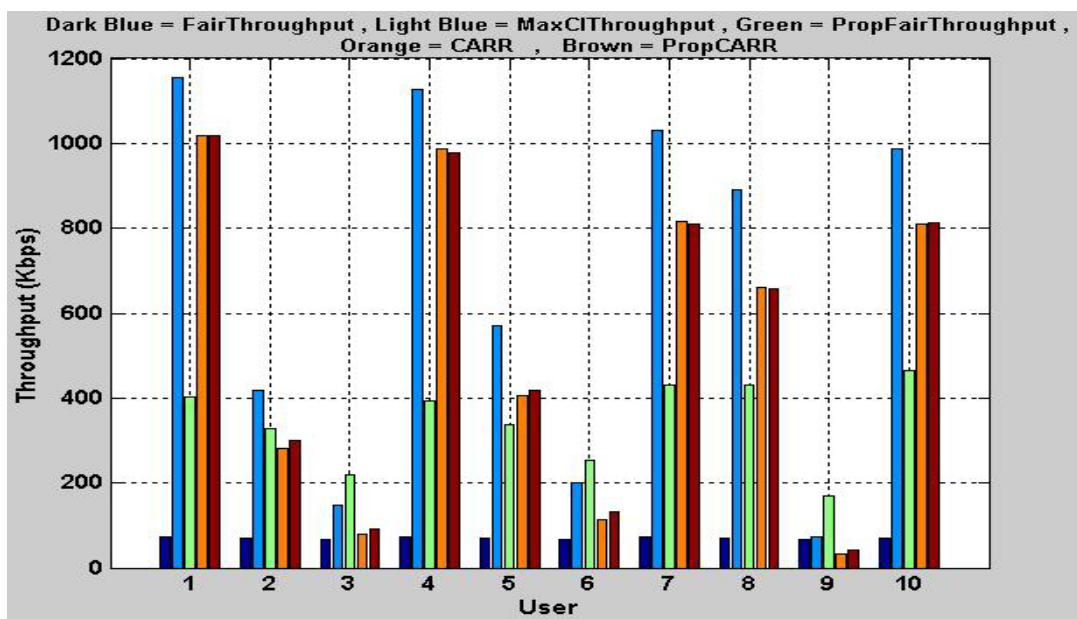


Εικόνα 5.4



Εικόνα 5.5

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα οι αλγόριθμοι αυτοί δεν προσφέρουν καλύτερες ρυθμιζόμενες στην κυψέλη (συγκριτικά με τον PropCIFair τον οποίο έχουμε θεωρήσει από τους καλύτερους Best-Effort αλγορίθμους) με εξαίρεση την ελαφρώς καλύτερη ρυθμιζόμενη κυψέλης του MaxCIThroughput. Για να επιτευχθεί όμως η ρυθμιζόμενη αυτή, ο MaxCIThroughput ελαττώνει αρκετά (σχεδόν στο μισό) την ρυθμιζόμενη του χρήστη με το χειρότερο κανάλι (χρήστης-9). Από την άλλη, ο μόνος αλγόριθμος που βελτιώνει την ρυθμιζόμενη του χρήστη με το χειρότερο κανάλι είναι ο PropFairThroughput, ο οποίος όμως πετυχαίνει σχεδόν την μισή ρυθμιζόμενη κυψέλης. Με λίγα λόγια οι παραπάνω QoS-based αλγόριθμοι δεν αποτελούν μια ελκυστική εναλλακτική λύση έναντι των Best-Effort αλγορίθμων. Ο λόγος της προβληματικής συμπεριφοράς των αλγορίθμων αυτών βρίσκεται στο γεγονός ότι, οι περισσότεροι από αυτούς, δεν αποτυπώνουν με ικανοποιητικό τρόπο στο κριτήριο χρονοδρομολόγησης, τις απαιτήσεις κάθε χρήστη σε QoS και άρα δεν έχουν την ικανότητα να επιλέγουν με αποδοτικό τρόπο ποια ΤΤΙ θα αφιερώνουν στην μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμιζόμενης και ποια στην υποστήριξη του QoS κάθε χρήστη. Στο διάγραμμα της εικόνας 5.6 παρουσιάζεται ένα αναλυτικό διάγραμμα της ρυθμιζόμενης κάθε χρήστη.



Εικόνα 5.6

5.3 Εξάρτηση αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης

Ένας τρόπος κατηγοριοποίησης και περιγραφής της δομής των αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης είναι το είδος της εξάρτησης το οποίο χρησιμοποιούν για την λήψη απόφασης σχετικά με το ποιος θα μεταδώσει στο επόμενο TTI. Οι εξαρτήσεις αυτές μπορούν να είναι τεσσάρων ειδών:

- (1) Pre-allocation : Σε αυτή την περίπτωση το ποιος θα μεταδώσει στα επόμενα TTI έχει προαποφασιστεί σύμφωνα με κάποιο σχέδιο και δεν εξαρτάται από στοιχεία για την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος (της ροής, των ζεύξεων, των καταχωρητών).
- (2) Channel dependence : Εδώ η απόφαση χρονοδρομολόγησης εξαρτάται από την συμπεριφορά του καναλιού (στιγμιαία κατάσταση ή/και στατιστικά σχετικά με την κατάσταση του καναλιού κάθε χρήστη)
- (3) Buffer/Flow-state dependence : Η εξάρτηση εδώ αναφέρεται στην τρέχουσα κατάσταση του καταχωρητή μιας ροής (π.χ queue size, HOL_packet deadline, packet arrival rate)
- (4) QoS achieved: Οι αποφάσεις χρονοδρομολόγησης εξαρτώνται από το απολαμβανόμενη ποιότητα υπηρεσιών κάθε χρήστη. Η ποιότητα υπηρεσιών εκφράζεται συνήθως μέσω: i) της ρυθμαπόδοσης, ii) της καθυστέρησης, iii) των μεταβολών της καθυστέρησης, και iv) του ποσοστού απόρριψης πακέτων, που απολαμβάνει κάθε χρήστης.
- (5) QoS required: Οι αποφάσεις χρονοδρομολόγησης εξαρτώνται από τις απαιτήσεις κάθε χρήστη για ποιότητα υπηρεσιών. Η ποιότητα υπηρεσιών εκφράζεται συνήθως μέσω: i) της ρυθμαπόδοσης, ii) της καθυστέρησης, iii) των μεταβολών της καθυστέρησης, και iv) του ποσοστού απόρριψης πακέτων, που απαιτεί κάθε χρήστης.

Αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης	Είδος εξάρτησης					
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Max C/I		–	✓	–	–	–
Proportional Fair		–	✓	–	–	–
Round Robin		✓	–	–	–	–
Fair Throughput		–	–	–	✓	–
EDF		–	–	✓	–	–
Max Queue		–	–	✓	–	–
Class-based		✓	–	–	–	–
Max R·Queue		–	✓	✓	–	–
Max R·Delay		–	✓	✓	–	–
Max R·(Throughput)⁻¹		–	✓	–	✓	–
PropFairThroughput		–	✓	–	✓	–
CARR		✓	✓	–	–	–
PropCARR		✓	✓	–	–	–

Πίνακας 5.1

Οι εξαρτήσεις των αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης που έχουμε εξετάσει μέχρι τώρα φαίνονται στην πίνακα 5.1. Όπως παρατηρούμε, ούτε οι Best Effort αλγόριθμοι, ούτε οι QoS-based ^{1ης} γενιάς ενσωματώνουν στο κριτήριο χρονοδρομολόγησης κάποια εξάρτηση από τις απαιτήσεις κάθε χρήστη σε ποιότητα υπηρεσιών και αυτό είναι και το βασικό μειονέκτημά τους, όσον αφορά την εξασφάλιση μιας ελάχιστης ποιότητας υπηρεσιών σε κάθε χρήστη κάτω από ένα εύρος σεναρίων δικτυακής κίνησης.

5.4 Βασικές αρχές σχεδίασης QoS-based αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης

Όπως είδαμε μέχρι τώρα κανένας αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης που εξετάσαμε δεν μπορεί να προσφέρει ούτε τις ελάχιστες εγγυήσεις για μια ελάχιστη ποιότητα υπηρεσιών σε ένα περιβάλλον άπληστων χρηστών. Κάτω από διαφορετικά είδη κίνησης μερικοί από τους παραπάνω αλγορίθμους δίνουν κάποιες εγγυήσεις όσον αφορά την μακροπρόθεσμη ρυθμαπόδοση κάθε χρήστη (βλέπε παραγράφους 4.4.2 και 4.4.3). Επανατοποθετώντας το θέμα της χρονοδρομολόγησης, θα εισάγουμε αμέσως παρακάτω κάποια γενικά κριτήρια τα οποία πιστεύουμε ότι πρέπει να αποτελούν κατευθυντήριες γραμμές στην σχεδίαση ενός αλγορίθμου χρονοδρομολόγησης για ένα σύστημα με ποικιλομορφία στα είδη δικτυακής κίνησης που διακινούνται μέσα από αυτό.

Ο κύριος τρόπος χρέωσης των υπηρεσιών δεδομένων (η παρουσία των οποίων αποτελεί και το έναυσμα για μια προσπάθεια αύξησης της ρυθμαπόδοσης στο κανάλι καθόδου) στα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα είναι η ογκοχρέωση. Οπότε, η βέλτιστη οικονομική αξιοποίηση και κατά συνέπεια βιωσιμότητα και εκμετάλλευση των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για αυξημένη ρυθμαπόδοση (beamforming, AMC, κ.α) επιβάλλει την μεγιστοποίηση του όγκου δεδομένων που διακινείται μέσω του διαθέσιμου BW ανά sec. Ο στόχος αυτός μας παρακινεί να δώσουμε κάθε στιγμή όση προτεραιότητα παραπάνω γίνεται σε χρήστες με στιγμιαία καλό κανάλι (χρήστες με μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης). Για να γίνει κάτι τέτοιο ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του καναλιού κάθε χρήστη. Το πόσο βάρος θα δοθεί σε μια τέτοια παράμετρο εξαρτάται και από τους άλλους στόχους.

Στόχος #1

**Μεγιστοποίηση
του Cell
Throughput**

Αν οι χρήστες που χρησιμοποιούν το δίκτυο δεν λαμβάνουν ένα ελάχιστο QoS, το οποίο εκφράζει τον ελάχιστο βαθμό ικανοποίησης ώστε ο χρήστης να συνεχίσει να χρησιμοποιεί την υπηρεσία, τότε οι πόροι που δεσμεύουμε γι αυτόν χάνονται άδικα (μας προσφέρουν ένα προσωρινό κέρδος το οποίο δεν θα κρατήσει για πολύ). Για να εξασφαλίσουμε το QoS των χρηστών απαιτούνται δύο πράγματα:

Στόχος #2

**Εξασφάλιση του
απαιτούμενου
QoS στους
εξυπηρετούμενους
χρήστες**

α) Ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης να λαμβάνει υπόψη την τρέχουσα ποιότητα υπηρεσίας κάθε χρήστη και να την διατηρεί όσο καλύτερα γίνεται πάνω από το ελάχιστο αποδεκτό όριο (για να εγγυηθούμε σίγουρη και σταθερή ποιότητα υπηρεσίας χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη την τρέχουσα κατάσταση (κάτι δύσκολο στην περίπτωσή μας αφού το κανάλι του χρήστη καθώς και τα υπόλοιπα λειτουργικά χαρακτηριστικά του δικτύου μεταβάλλονται συνεχώς) θα πρέπει να αφιερώσουμε ένα σταθερό ποσοστό των πόρων στο χρήστη, αρκετά μεγαλύτερο από αυτό που τελικά χρειάζεται). β) Νέοι χρήστες των οποίων το QoS δεν μπορεί να υποστηριχθεί θα οδηγήσουν σε παραβίαση του ελάχιστου αποδεκτού QoS άλλων χρηστών και δεν θα πρέπει να γίνονται αποδεκτοί (αποδοχή μιας σύνδεσης και διακοπή της μετά από λίγο ή εξυπηρέτησή της με μη αποδεκτό QoS οδηγεί σε αγανάκτηση του χρήστη με το σύστημα). Αυτό επιβάλλει την χρήση ενός μηχανισμού ελέγχου πρόσβασης στο σύστημα. Στον στόχο αυτό μπορούμε να ενσωματώσουμε και την δίκαιη κατανομή του υπολειπόμενου BW στους χρήστες ώστε να ελαχιστοποιήσουμε την πιθανότητα κάποιος χρήστης να φύγει από το σύστημά μας και να ζητήσει εξυπηρέτηση από άλλο σύστημα.

Για να εξασφαλίσουμε ότι πάντα (ή έστω τις περισσότερες φορές) θα υπάρχει αρκετό προσφερόμενο φορτίο για να αξιοποιήσουμε (οικονομικά) το BW του συστήματος, θα πρέπει να μεγιστοποιήσουμε τον αριθμό των χρηστών οι οποίοι χρησιμοποιούν το σύστημά μας κάθε στιγμή (και οι οποίοι θα είναι πιθανοί χρήστες και σε μελλοντικές στιγμές). Αυτό σημαίνει ότι δεν θα πρέπει λίγοι χρήστες να καταναλώνουν όλο το BW αν αυτό δεν είναι αναγκαίο. Ο στόχος #2 μας διαβεβαιώνει ότι το αναγκαίο BW για κάθε χρήστη είναι αυτό που προσφέρει στο χρήστη το ελάχιστο αποδεκτό QoS γι αυτόν. Οπότε, ο αλγόριθμος θα πρέπει να περιορίζει το τμήμα του BW που αφιερώνεται σε κάθε χρήστη στο αναγκαίο, αν χρειαστεί, αλλιώς να μοιράζει όλο το υπολειπόμενο BW στους χρήστες που υπάρχουν. Αυτό βέβαια ελαττώνει το βραχυπρόθεσμο κέρδος με προοπτική η ελάττωση αυτή να υπερκεραστεί από την αύξηση του μακροπρόθεσμου κέρδους (προοπτική το σύστημά μας να εμφανίζει σπάνια έλλειψη προσφερόμενου φορτίου).

Στόχος #3

Μεγιστοποίηση του αριθμού των χρηστών

Οι παραπάνω στόχοι μπορούν να συγκεντρωθούν στον παρακάτω περιγραφικό κανόνα σχετικά με την λειτουργία ενός αλγορίθμου χρονοδρομολόγησης:

Περιγραφικός κανόνας: Ένας αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης θα πρέπει να δίνει προτεραιότητα στον χρήστη του οποίου η σχετική διαφορά του QoS που απολαμβάνει με το QoS που απαιτεί είναι η μικρότερη μεταξύ των χρηστών (στόχος 2 και 3, η χρήση του QoS ως βάση απόφασης προωθεί το στόχο 2, ενώ η απόδοση προτεραιότητας στο χρήστη με τον μικρότερο βαθμό ικανοποίησης του QoS του προωθεί το στόχο 3 αφού εξασφαλίζει ότι κανένας χρήστης δεν θα λάβει QoS αρκετά μεγαλύτερο από το ελάχιστο που απαιτεί τη στιγμή που ένας άλλος χρήστης λαμβάνει QoS μικρότερο από το ελάχιστο που απαιτεί). Όταν αυτή η διαφορά είναι θετική και ικανοποιητικά μεγάλη για όλους τους χρήστες τότε μπορούμε προσωρινά να παραμελήσουμε την εξασφάλιση του QoS (αφού δεν κινδυνεύουμε να πέσουμε κάτω από το απαιτούμενο QoS για κανένα χρήστη) και να προωθήσουμε την μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης (στόχος 1).

Φυσικά, ο παραπάνω κανόνας αποτελεί μόνο μια περιγραφή της γενικότερης λειτουργίας του αλγορίθμου και δεν μας παρέχει λεπτομέρειες υλοποίησης, όπως: το πώς θα αξιολογήσουμε το QoS των χρηστών ή το πότε ακριβώς θα γίνεται η μετάβαση από την εξασφάλιση του QoS στην μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης.

5.5 Περιγραφή των QoS απαιτήσεων για Real-Time και Non Real-Time υπηρεσίες

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να εισάγουμε και ένα τρόπο περιγραφής των QoS απαιτήσεων κάθε χρήστη (για την ακρίβεια κάθε υπηρεσίας, αλλά υποθέτουμε ότι μία σύνδεση και άρα μια υπηρεσία αντιστοιχεί σε κάθε χρήστη). Ο συνηθέστερος τρόπος που χρησιμοποιείται στην βιβλιογραφία και θα ακολουθήσουμε και εμείς είναι ότι το QoS εκφράζεται για τις Non Real-Time (NRT) υπηρεσίες με την εξής μορφή:

$$R_i \geq r_i \quad (I)$$

ενώ για τις Real-Time (RT) υπηρεσίες με την μορφή:

$$Prob\{D_i > T_i\} \leq \delta_i \quad (II)$$

Δηλαδή, για τις NRT ροές επιθυμούμε μια ελάχιστη ρυθμαπόδοση ενώ για τις RT ροές επιθυμούμε σχεδόν όλα τα πακέτα να μεταδίδονται με καθυστέρηση μικρότερη μιας μέγιστης ανεκτής. Η υποστήριξη μιας ελάχιστης ρυθμαπόδοσης από τον κανόνα (II) γίνεται εύκολα με χρήση της παρακάτω τεχνικής [46],[47]:

Θεωρούμε ότι κάθε ουρά i σχετίζεται με ένα εικονικό συσσωρευτή κουπονιών. Τα κουπόνια καταφθάνουν στο συσσωρευτή με σταθερό ρυθμό ίσο με r_i . Σε κάθε ΤΤΙ η απόφαση για το ποιος θα μεταδώσει γίνεται με τον αντίστοιχο κανόνα χρονοδρομολόγησης μόνο που για μια NRT ροή το D_i δεν είναι η καθυστέρηση του HOL πακέτου του χρήστη i αλλά η καθυστέρηση του αρχαιότερου κουπονιού στον συσσωρευτή κουπονιών i . Μόλις η εξυπηρέτηση μιας NRT ροής ολοκληρωθεί ο αριθμός των κουπονιών στον αντίστοιχο συσσωρευτή ελαττώνεται κατά το αντίστοιχο ποσό δεδομένων που μεταδόθηκαν. Επειδή ο ρυθμός άφιξης κουπονιών στον συσσωρευτή είναι σταθερός η μόνη πληροφορία που χρειαζόμαστε για τον συσσωρευτή είναι ο αριθμός των κουπονιών σε αυτόν. Ο αριθμός των κουπονιών δια τον ρυθμό άφιξης αυτών μας δίνει την καθυστέρηση του αρχαιότερου κουπονιού στον συσσωρευτή. Οι τιμές των T_i και δ_i που θα χρησιμοποιηθούν για τις NRT ροές επιλέγονται ανάλογα με το πόσο μπορεί να καθυστερήσει η ικανοποίηση του QoS μιας NRT ροής.

5.6 2^η γενιά QoS-based αλγορίθμων

5.6.1 Παλιότεροι αλγόριθμοι

Η υλοποίηση του περιγραφικού κανόνα της παραγράφου 5.4 μας οδηγεί στην δεύτερη γενιά QoS-based αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης, όπως θα τους ονομάσουμε, που έχουν αναπτυχθεί στην βιβλιογραφία. Οι αλγόριθμοι αυτοί χαρακτηρίζονται από συνθετότερα κριτήρια χρονοδρομολόγησης στα οποία ενσωματώνονται μηχανισμοί διασφάλισης του QoS κάθε χρήστη, τόσο για RT όσο και για NRT υπηρεσίες. Οι πιο γνωστοί από τους αλγόριθμους αυτού του είδους, οι οποίοι έχουν δείξει και αρκετά καλή συμπεριφορά στην πράξη είναι οι εξής:

M-LWDF (Modified Largest Weighted Delay First) : Ο αλγόριθμος αυτός [48] αποτελεί έναν από τους πρώτους αλγόριθμους του είδους και περιγράφεται από το εξής κριτήριο:

$$\begin{array}{l} \text{schedule the user that} \\ \text{maximizes the ratio} \end{array} \quad \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot a_i \cdot D_i$$

, όπου : R_i είναι ο (εκτιμώμενος) ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει ο χρήστης κάθε στιγμή και D_i είναι η καθυστέρηση του HOL πακέτου της ουράς κάθε χρήστη (υποθέτουμε μία εφαρμογή ανά χρήστη).

Μια προτεινόμενη τιμή για το a_i είναι : $a_i = \frac{-\log(\delta_i)}{T_i}$, (τα δ_i και T_i εξηγήθηκαν στην παράγραφο 5.5), οπότε το κριτήριο γίνεται:

$$\begin{array}{l} \text{schedule the user that} \\ \text{maximizes the ratio} \end{array} \quad \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \left(-\log(\delta_i) \cdot \frac{D_i}{T_i} \right)$$

Η εκλογή αυτή δικαιολογείται μαθηματικά αλλά και λογικά από το σκεπτικό ότι δίνεται περισσότερη προτεραιότητα σε χρήστες με πιο αυστηρό περιορισμό του QoS, γιατί σε περίπτωση που η κατάσταση της ζεύξης κάποιων χρηστών χειροτερέψει οι χρήστες αυτοί είναι που θα κινδυνέψουν περισσότερο με υποβάθμιση του QoS (παράδοση πακέτων με υπερβολική καθυστέρηση ή απόρριψη πακέτων).

EXPONENTIAL-RULE : Ο αλγόριθμος αυτός προτάθηκε για πρώτη φορά στο [48] και αναλύθηκε στο [49]. Το σκεπτικό του είναι παρόμοιο με αυτό του M-LWDF και εκφράζεται από το κριτήριο:

$$\begin{array}{l} \text{schedule the user that} \\ \text{maximizes the ratio} \end{array} \quad a_i \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \exp\left(\frac{a_i \cdot D_i - \overline{a \cdot D}}{1 + \sqrt{a \cdot D}}\right)$$

Για “λογικές” τιμές των παραμέτρων a και γ , ο αλγόριθμος προσπαθεί να εξισώσει τις ζυγισμένες καθυστερήσεις $a_i \cdot D_i$ όλων των ουρών, όταν οι διαφορές τους είναι μεγάλες. Αν μια από τις ουρές έχει μεγαλύτερη ζυγισμένη καθυστέρηση από τις άλλες ουρές περισσότερο από $\sqrt{a \cdot D}$, τότε ο όρος του εκθέτη γίνεται πολύ μεγάλος και επιβάλλεται στην κατάσταση του καναλιού (εφ’όσον ο ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει το κανάλι είναι μη-μηδενικός). Από την άλλη για μικρές διαφορές στις ζυγισμένες καθυστερήσεις, ο όρος του εκθέτη είναι περίπου μονάδα και ο αλγόριθμος συμπεριφέρεται όπως ο Proportional Fair αλγόριθμος. Έτσι, ο αλγόριθμος προσαρμόζει ομαλά την συμπεριφορά του μεταξύ των δύο αυτών καταστάσεων. Η μονάδα στον παρονομαστή βρίσκεται εκεί για να αποτρέπει πιθανή εκτίναξη της τιμής του εκθέτη στα ύψη όταν οι ζυγισμένες διαφορές είναι μικρές.

Οι επινοητές αυτού του κριτηρίου παρατηρούν ότι ο δεύτερος όρος (η μέση τιμή) στον αριθμητή του δεύτερου κλάσματος βρίσκεται εκεί για λόγους κατανόησης της λειτουργίας του αλγορίθμου και η απόρριψη αυτού του όρου δεν αλλάζει την λειτουργία του αλγορίθμου. Γι αυτό σε μερικά άρθρα ο Exponential-Rule αναφέρεται ή προσομοιώνεται με την εξής μορφή:

$$\begin{array}{l} \text{schedule the user that} \\ \text{maximizes the ratio} \end{array} \quad a_i \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \exp\left(\frac{a_i \cdot D_i}{1 + \sqrt{a \cdot D}}\right)$$

Η παράμετρος a_i επιλέγεται όπως και στον M-LWDF.

CD-EDD (Channel-Dependent Earliest Due Date) : Ο αλγόριθμος αυτός [50] αποτελεί μια τροποποίηση του M-LWDF και εκφράζεται από το κριτήριο:

$$\begin{array}{l} \text{schedule the user that} \\ \text{maximizes the ratio} \end{array} \quad a_i \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \left(-\log(\delta_i) \cdot \frac{D_i/T_i}{T_i - D_i} \right)$$

Η παράμετρος a_i επιλέγεται όπως και στον M-LWDF

* Σε όλους τους παραπάνω αλγόριθμους καθώς και για τη συνέχεια υποτίθεται ότι το R δεν είναι ο τρέχον ρυθμός μετάδοσης αλλά η ισχύς λήψης του σήματος, κάτι που βέβαια συνδέεται άμεσα με τον ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει ο χρήστης αλλά δεν παρουσιάζει το πρόβλημα που αναπτύχθηκε κατά την ανάλυση των Best-Effort αλγορίθμων για τους χρήστες με πολύ καλή ποιότητας ζεύξης.

* Οι MLWDF και Exponential Rule αναπτύχθηκαν αρχικά για την HDR αρχιτεκτονική του cdma2000 αλλά μπορούν να εφαρμοστούν και στο HSDPA χωρίς κανένα πρόβλημα μιας και το σκεπτικό στο οποίο είναι βασισμένες οι HDR [51],[52] και HSDPA είναι το ίδιο και η λειτουργία τους αρκετά παρόμοια.

5.6.2 Προτεινόμενος Αλγόριθμος (α)

5.6.2.1 Βασική μορφή αλγορίθμου: Ο αλγόριθμος Expro-Linear, που αποτελεί την βασική μορφή του Expro-pred-weī αλγορίθμου που προτείνουμε, αποτελεί μια τροποποίηση του Exponential-Rule και δίνεται από το εξής κριτήριο:

$$\begin{array}{l} \text{schedule the user that} \\ \text{maximizes the ratio} \end{array} \quad a_i \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \exp(a_i \cdot D_i)$$

Η παράμετρος a_i επιλέγεται όπως και στον M-LWDF

Το κίνητρο επιλογής του κριτηρίου αυτού βρίσκεται στο γεγονός ότι οι υπόλοιποι αλγόριθμοι αδυνατούν να αναγνωρίσουν κάποιες κρίσιμες καταστάσεις χρονοδρομολόγησης, κάτι το οποίο θα φανεί αμέσως παρακάτω.

5.6.2.2 Κίνητρο Ανάπτυξης (της βασικής έκδοσης του αλγορίθμου) : Το βασικό κίνητρο για την ανάπτυξη του αλγορίθμου μας ήταν η συμπεριφορά των υπόλοιπων αλγορίθμων κάτω από κάποιες ειδικές συνθήκες χρονοδρομολόγησης. Οι περιπτώσεις αυτές παρουσιάζονται θεωρητικά στον πίνακα 5.2 ενώ στον πίνακα 5.3 παρουσιάζεται ένα αριθμητικό παράδειγμα για κάθε περίπτωση και η συμπεριφορά του κάθε αλγορίθμου συγκρινόμενη με την επιθυμητή συμπεριφορά. Υψηλό *cruciality* στον πίνακα σημαίνει ότι η καθυστέρηση του HOL πακέτου βρίσκεται κοντά στον χρόνο εκπνοής της ζωής του πακέτου. Η απομάκρυνση του παρονομαστή του Expro-drop στον Expro-Linear, αφήνει από την μία, πιο ελεύθερο τον αλγόριθμο να αυξήσει την συνολική ρυθμαπόδοση όταν δεν κινδυνεύει η ποιότητα υπηρεσίας κανενός χρήστη και από την άλλη εκφράζει πιο άμεσα τον κίνδυνο που διατρέχει το HOL πακέτο κάθε χρήστη να παραβιάσει τα ελάχιστα αποδεκτά όρια του QoS αφού ο κίνδυνος αυτός δεν εξαρτάται πια από την κατάσταση των άλλων χρηστών. Το σύμβολο ✓ εκφράζει επιθυμητή συμπεριφορά του αλγορίθμου.

ΕΙΔΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΧΡΟΝΟΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ				
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ	Μικρό <i>Cruciality</i> αλλά με μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των χρηστών	Μεγάλα <i>Cruciality</i> με σχετικά μικρές αποκλίσεις μεταξύ των χρηστών	Ίδιο <i>Relative</i> αλλά διαφορετικό <i>Absolute Cruciality</i>	
M-LWDF	Ενεργοποιεί τον όρο του κριτηρίου που αναφέρεται στο QoS αν και δεν είναι αναγκαίο.	Οι αποκλίσεις του υποστηριζόμενου ρυθμού μετάδοσης μεταξύ των χρηστών μπορούν να υπερκεράσουν το <i>cruciality</i> του QoS.	Αδυναμία διαχωρισμού των περιπτώσεων.	<u>Σημείωση 1^η</u> : Γενικά, όσο πιο αργά ενεργοποιείται ο όρος του QoS τόσο μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση κυψέλης επιτυγχάνουμε (αλλά δεν συμβαίνει πάντα και ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχουν Greedy χρήστες, οπότε η ρυθμαπόδοση της κυψέλης εξαρτάται από τον αριθμό των χρηστών που μπορούμε να υποστηρίξουμε). <u>Σημείωση 2^η</u> : Ο όρος R στα κριτήρια (που αφορά τον υποστηριζόμενο ρυθμό μετάδοσης) είναι απαραίτητος για να αυξήσουμε την ρυθμαπόδοση με σχετικά δίκαιο τρόπο όταν το QoS κανενός χρήστη δεν βρίσκεται κίνδυνο.
CD-EDD	Ενεργοποιεί τον όρο του κριτηρίου που αναφέρεται στο QoS αν και δεν είναι αναγκαίο.	✓	✓	
EXPO-DROP	✓	Απαιτούνται μεγάλες αποκλίσεις στις καθυστερήσεις ώστε να ενεργοποιηθεί ο όρος του κριτηρίου που αφορά το QoS.	✓	
EXPO-FULL	✓	Απαιτούνται μεγάλες αποκλίσεις στις καθυστερήσεις ώστε να ενεργοποιηθεί ο όρος του κριτηρίου που αφορά το QoS.	✓	
EXPO-LINEAR	✓	✓	✓	

Πίνακας 5.2

Scheduling Scheme		Case Description		
	(επεξήγηση αριθμητικών τιμών)	Μικρό QoS-cruciality με μεγάλες αποκλίσεις	Μεγάλα QoS cruciality με σχετικά μικρές αποκλίσεις	Ίδιο Relative αλλά διαφορετικό Absolute QoS cruciality (όλα τα υπόλοιπα είναι ίδια ή σχεδόν ίδια)
	Τιμές που παίρνουν οι παράμετροι του κριτηρίου χρονοδρομολόγησης	$\delta_1 = 0.01$, $\delta_2 = 0.01$ $T_1 = 0.05 \text{ sec}$, $T_2 = 0.05 \text{ sec}$ $R_1 = 360 \text{ Kbps}$, $\overline{R_1} = 360 \text{ Kbps}$ $R_2 = 740 \text{ Kbps}$, $\overline{R_2} = 1320 \text{ Kbps}$ $D_1 = 0.005 \text{ sec}$, $D_2 = 0.01 \text{ sec}$	$\delta_1 = 0.01$, $\delta_2 = 0.01$ $T_1 = 0.05 \text{ sec}$, $T_2 = 0.05 \text{ sec}$ $R_1 = 360 \text{ Kbps}$, $\overline{R_1} = 360 \text{ Kbps}$ $R_2 = 740 \text{ Kbps}$, $\overline{R_2} = 1320 \text{ Kbps}$ $D_1 = 0.032 \text{ sec}$, $D_2 = 0.048 \text{ sec}$	$\delta_1 = 0.01$, $\delta_2 = 0.01$ $T_1 = 0.05 \text{ sec}$, $T_2 = 0.1 \text{ sec}$ $R_1 = 360 \text{ Kbps}$, $\overline{R_1} = 360 \text{ Kbps}$ $R_2 = 1440 \text{ Kbps}$, $\overline{R_2} = 1320 \text{ Kbps}$ $D_1 = 0.04 \text{ sec}$, $D_2 = 0.08 \text{ sec}$
M-LWDF	Priority of user 1	0.2	1.28	1.6
	Priority of user 2	0.22	1.08	1.74
CD-EDD	Priority of user 1	4.4	71	160
	Priority of user 2	5.6	538	87
Expo-Full	Priority of user 1	37	35	40
	Priority of user 2	24	26	21.8
Expo-drop	Priority of user 1	45	70	81
	Priority of user 2	29	52	44
Expo-Linear	Priority of user 1	49	144	198
	Priority of user 2	33	153	108
		<u>Who should be scheduled:</u> User-1 <u>Who is scheduled:</u> M-LWDF: User-2 CD-EDD: User-2 Expo-Full: User-1 Expo-drop: User-1 Expo-Linear: User-1	<u>Who should be scheduled:</u> User-2 <u>Who is scheduled:</u> M-LWDF: User-1 CD-EDD: User-2 Expo-Full: User-1 Expo-drop: User-1 Expo-Linear: User-2	<u>Who should be scheduled:</u> User-1 <u>Who is scheduled:</u> M-LWDF: User-2 CD-EDD: User-1 Expo-Full: User-1 Expo-drop: User-1 Expo-Linear: User-1

Πίνακας 5.3

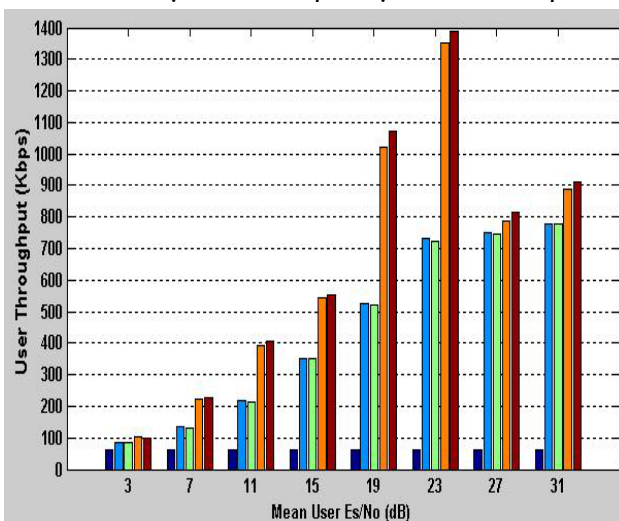
* Το “priority” του πίνακα 5.3 δεν είναι παρά η τιμή του ορίσματος του κριτηρίου χρονοδρομολόγησης. Ο χρήστης με την μεγαλύτερη τιμή επιλέγεται κάθε φορά για μετάδοση από τον αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης.

5.6.2.3 Προσομοιώσεις κάτω από NRT κίνηση

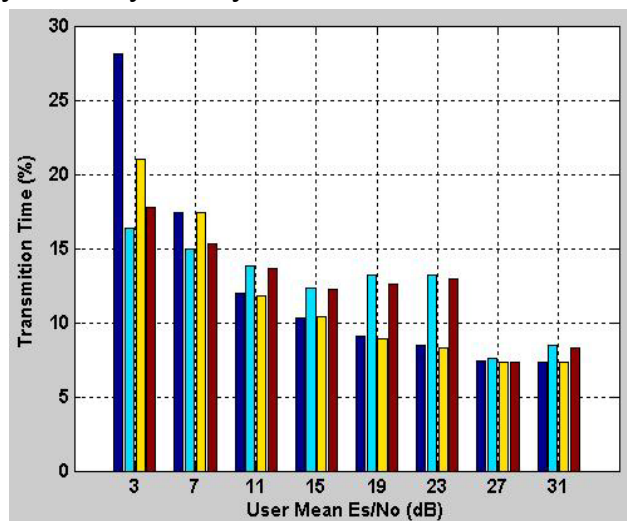
Στην συνέχεια ακολουθούν κάποιες ενδεικτικές προσομοιώσεις των παραπάνω αλγορίθμων για σενάρια NRT κίνησης.

ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ #1 : Προσομοιώνουμε τους αλγορίθμους M-LWDF, Expro-drop, CD_EDD και Expro-Rule σε ένα σενάριο 8 FTP χρηστών. Οι μέσες τιμές του Es/No κάθε χρήστη είναι κατάλληλα επιλεγμένες ώστε να φανεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου για ένα εύρος τιμών του μέσου Es/No και είναι: User1 : 3 dB, User2 : 7 dB, User3 : 11 dB, User 4: 15 dB, User5 : 19 dB, User6 : 23 dB, User 7 : 27 dB, User 8 : 31 dB. Το απαιτούμενο QoS είναι κοινό για όλους τους χρήστες και ίσο με 64 Kbps . Επίσης, έχουμε $T_i = 1\text{sec}$ και $\delta_i = 10^{-2}$.

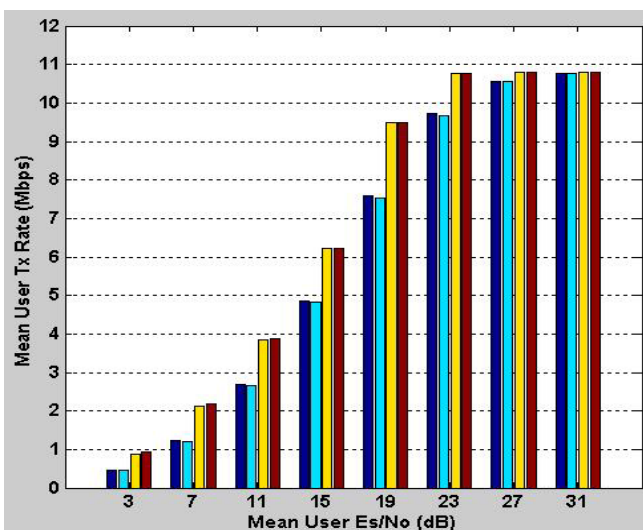
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στις εικόνες 5.7 – 5.10.



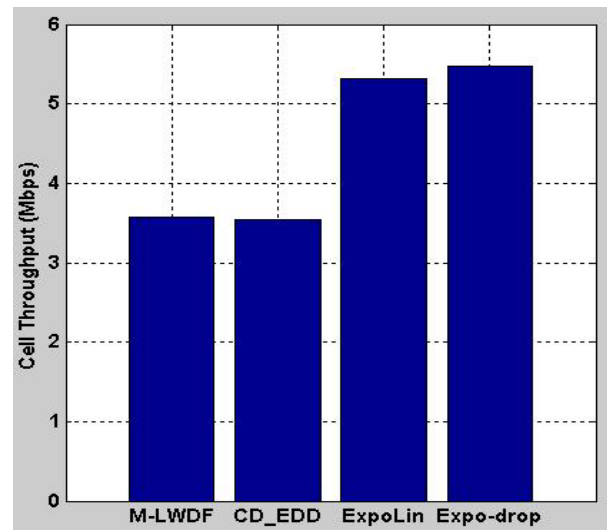
Εικόνα 5.7 : Η ρυθμαπόδοση κάθε χρήστη για καθένα από τους 4 αλγορίθμους που εξετάζουμε. Η πρώτη στήλη δείχνει την ελάχιστη απαίτηση κάθε χρήστη σε ρυθμαπόδοση, ενώ οι υπόλοιπες τέσσερις στήλες αντιστοιχούν με την σειρά στους MLWDF, CD_EDD, Expro-Linear και Expro-drop αλγόριθμους αντίστοιχα. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται και το μέσο Es/No κάθε χρήστη.



Εικόνα 5.8 : Ποσοστό του χρόνου που αφιερώνεται σε κάθε χρήστη για μεταδόσεις για καθέναν από τους 4 αλγορίθμους που εξετάζουμε. Η αντιστοίχιση των αλγορίθμων με τις στήλες του διαγράμματος είναι ίδια με αυτή της εικόνας 5.7



Εικόνα 5.9: Μέσος ρυθμός με τον οποίο μεταδίδει κάθε χρήστης για καθένα από τους τέσσερις αλγόριθμους.

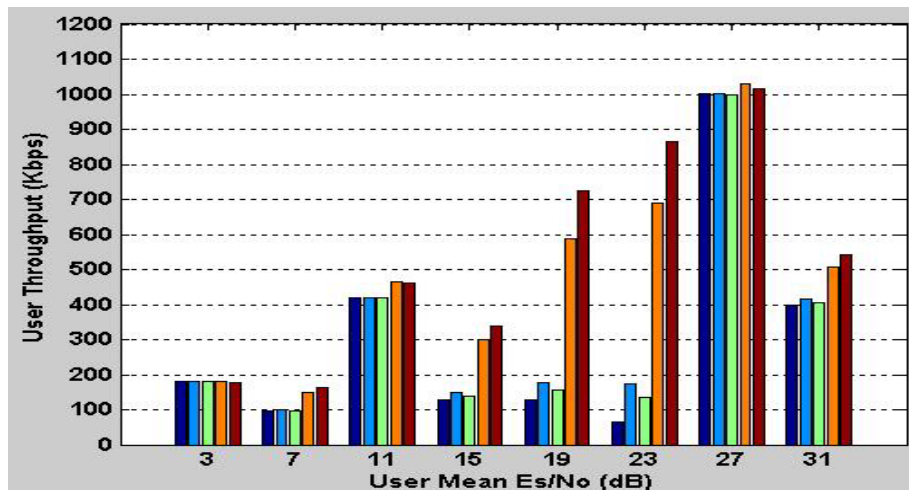


Εικόνα 5.10 : Η συνολική ρυθμαπόδοση κυψέλης που πετυχαίνει κάθε αλγόριθμος

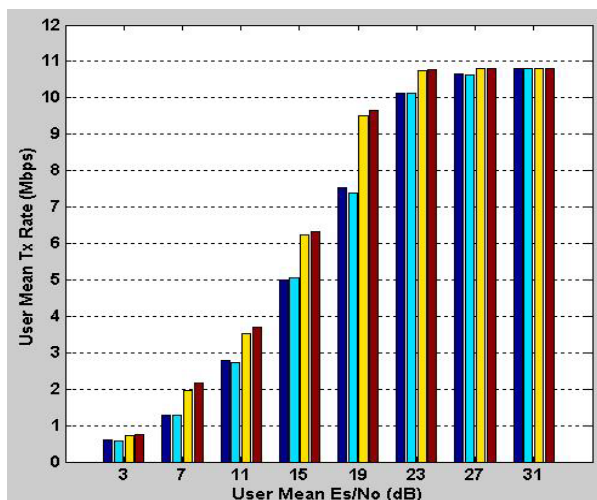
Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα : Όπως παρατηρούμε ενώ όλοι οι αλγόριθμοι πετυχαίνουν για κάθε χρήστη ρυθμαπόδοση μεγαλύτερη από την ελάχιστη αποδεκτή (Εικόνα 5.7) , η συνολική ρυθμαπόδοση (Εικόνα 5.10) των MLWDF και CD_EDD είναι πολύ χαμηλότερη (περίπου 35% μικρότερη) από αυτή των Expo-drop και Expo-Linear. Η μεγάλη αυτή διαφορά στην συνολική ρυθμαπόδοση είναι σημαντική για ένα HSDPA σύστημα. Οι δύο τελευταίοι αλγόριθμοι έχουν σχεδόν την ίδια συνολική ρυθμαπόδοση (ο Expo-drop έχει λίγο μεγαλύτερη). Η υπεροχή τους στηρίζεται στο ότι: α) σχεδόν όλοι οι χρήστες μεταδίδουν σε στιγμές με μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης (Εικόνα 5.9) , και β) στο ότι εξαιτίας του (α) οι χρήστες με χαμηλή ποιότητα ζεύξης καταναλώνουν λιγότερους πόρους (Εικόνα 5.8) του καναλιού (οι 2 πρώτοι χρήστες (3 και 7 dB) στους MLWDF και CD_EDD απασχολούν το κανάλι πολύ λιγότερο χρόνο από τους Expo-drop και Expo-Linear) πετυχαίνοντας την ίδια στιγμή μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση.

ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ #2 : Στην συνέχεια προσομοιώνουμε τους αλγορίθμους M-LWDF, Expo-drop, CD_EDD και Expo-Rule σε ένα σενάριο 8 FTP χρηστών. Οι μέσες τιμές του Es/No κάθε χρήστη είναι κατάλληλα επιλεγμένες ώστε να φανεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου για ένα εύρος τιμών του μέσου Es/No και είναι: User1 : 3 dB, User2 : 7 dB, User3 : 11 dB, User 4: 15 dB, User5 : 19 dB, User6 : 23 dB, User 7 : 27 dB, User 8 : 31 dB. Το απαιτούμενο QoS είναι για κάθε χρήστη είναι: User1 : 180 Kbps, User2 : 96 Kbps, User3 : 420 Kbps, User 4: 128 Kbps, User5 : 128 Kbps, User6 : 64 Kbps, User 7 : 1 Mbps, User 8 : 400 Kbps. Επίσης, έχουμε $T_i = 1\text{sec}$ και $\delta_i = 10^{-2}$.

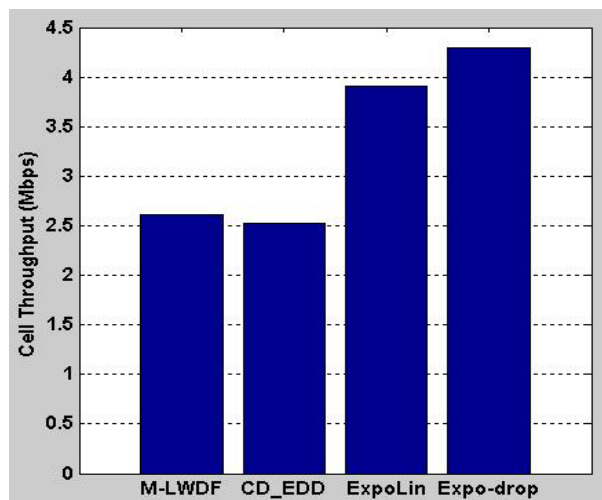
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στις εικόνες 5.11 – 5.13.



Εικόνα 5.11 : Η ρυθμαπόδοση κάθε χρήστη για καθένα από τους 4 αλγορίθμους που εξετάζουμε. Η πρώτη στήλη δείχνει την ελάχιστη απαίτηση κάθε χρήστη σε ρυθμαπόδοση



Εικόνα 5.12 : Μέσος ρυθμός με τον οποίο μεταδίδει κάθε χρήστης για καθένα από τους τέσσερις αλγόριθμους.

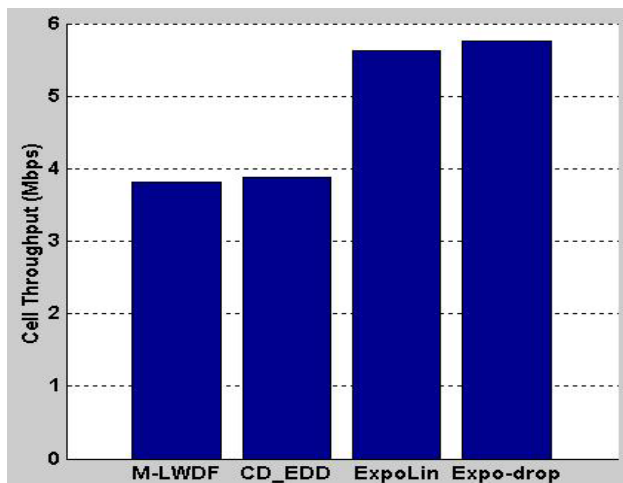


Εικόνα 5.13 : Η συνολική ρυθμαπόδοση κυψέλης που πετυχαίνει κάθε αλγόριθμος.

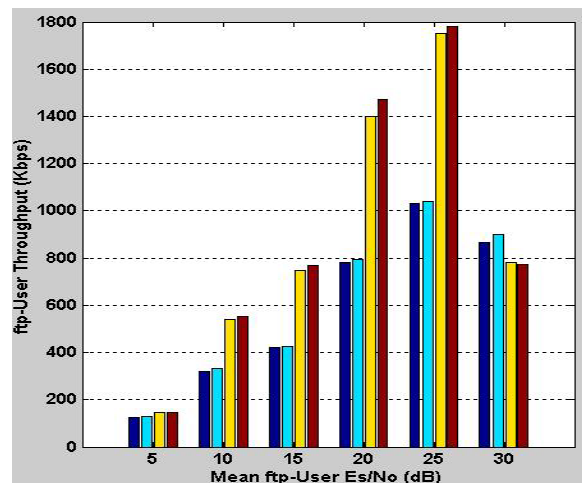
Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα : Όπως και πριν έτσι και εδώ και οι τέσσερις αλγόριθμοι εξασφαλίζουν την ελάχιστη αποδεκτή ρυθμαπόδοση σε κάθε χρήστη (Εικόνα 5.11) αλλά οι MLWDF και CD_EDD πετυχαίνουν αρκετά μικρότερη συνολική ρυθμαπόδοση (Εικόνα 5.13) από ότι οι Expo-Linear και Expo-drop (γύρω στο 35% μικρότερη συνολική ρυθμαπόδοση). Επίσης, και εδώ ο μέσος ρυθμός με τον οποίο μεταδίδει κάθε χρήστης είναι μεγαλύτερος στους Expo-Linear και Expo-drop (Εικόνα 5.12) με μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο τελευταίων.

ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ #3 : Στην συνέχεια προσομοιώνουμε τους αλγόριθμους M-LWDF, Expo-drop, CD_EDD και Expo-Rule σε ένα σενάριο 9 WWW και 6 FTP χρηστών. Οι μέσες τιμές του Es/No κάθε χρήστη είναι κατάλληλα επιλεγμένες ώστε να φανεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου για ένα εύρος τιμών του μέσου Es/No και είναι για τους WWW χρήστες: User1 : 3 dB, User2 : 7 dB, User3 : 11 dB, User 4: 15 dB, User5 : 19 dB, User6 : 23 dB, User 7 : 27 dB, User 8 : 31 dB, User 9 : 35 dB, ενώ για τους FTP χρήστες: User1 : 5 dB, User2 : 10 dB, User3 : 15 dB, User 4: 20 dB, User5 : 25 dB, User6 : 30 dB Το απαιτούμενο QoS είναι 64 Kbps για κάθε FTP χρήστη. Επίσης, για τους FTP χρήστες είναι $T_i = 1\text{sec}$ και $\delta_i = 10^{-2}$, ενώ για τους WWW χρήστες είναι: $T_i = 4\text{sec}$ και $\delta_i = 10^{-2}$

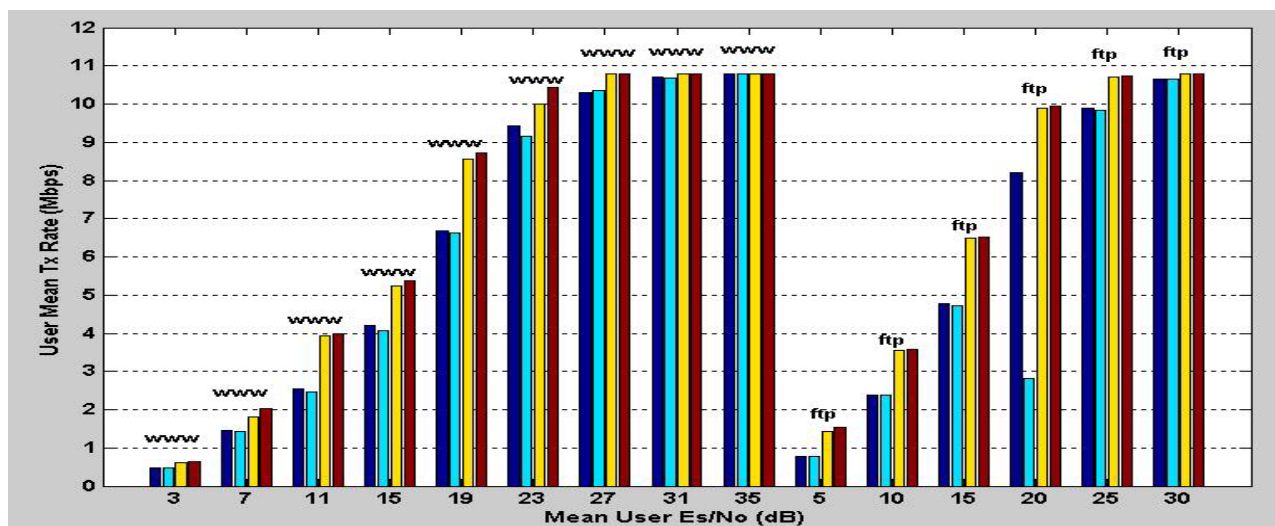
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στις εικόνες 5.14-5.20.



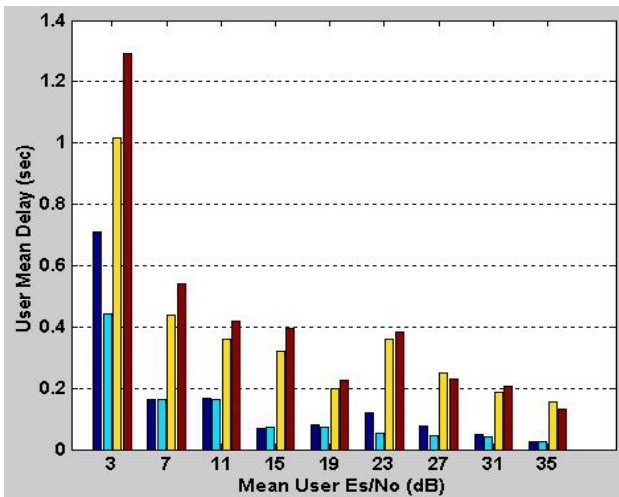
Εικόνα 5.14 : Η συνολική ρυθμαπόδοση τη κυψέλης για καθένα από τους τέσσερις αλγορίθμους.



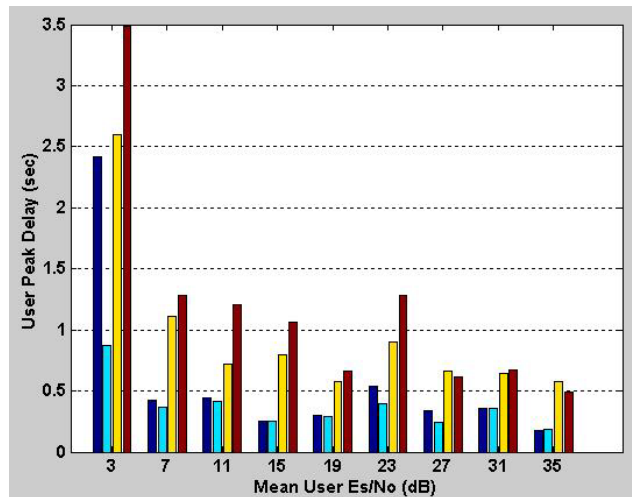
Εικόνα 5.15 : Η μέση ρυθμαπόδοση που πετυχαίνει κάθε ftp χρήστης. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται και το μέσο Es/No κάθε ftp χρήστη.



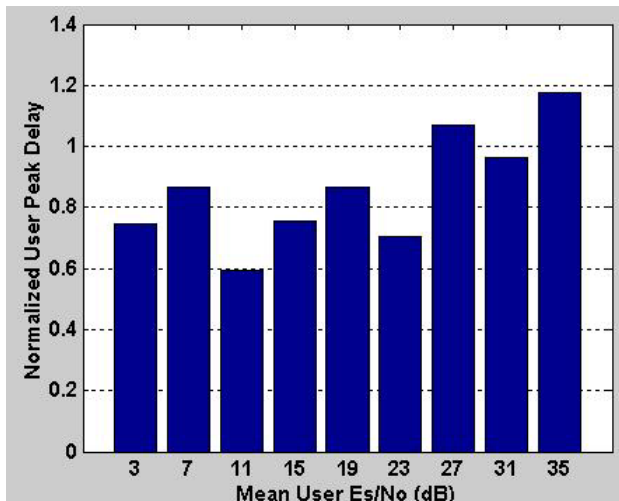
Εικόνα 5.16 : Ο μέσος ρυθμός μετάδοσης για τους WWW και τους FTP χρήστες. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται και το μέσο Es/No κάθε χρήστη.



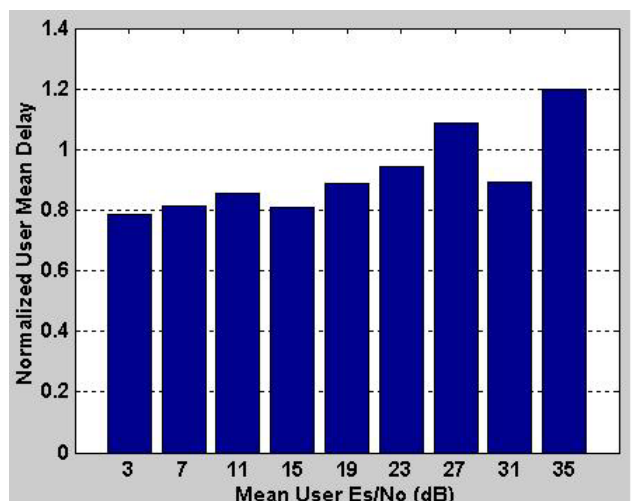
Εικόνα 5.17 : Η μέση καθυστέρηση μετάδοσης ενός πακέτου για κάθε WWW χρήστη που επιτυγχάνεται από κάθε αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης.



Εικόνα 5.18 : Η μέγιστη καθυστέρηση μετάδοσης ενός πακέτου για κάθε WWW χρήστη που επιτυγχάνεται από κάθε αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης.



Εικόνα 5.19 : Η μέγιστη καθυστέρηση κάθε WWW χρήστη που πετυχαίνει ο Expro-Linear. Το διάγραμμα είναι κανονικοποιημένο ως προς τις αντίστοιχες καθυστερήσεις του Expro-drop.



Εικόνα 5.20 : Η μέση καθυστέρηση κάθε WWW χρήστη που πετυχαίνει ο Expro-Linear. Το διάγραμμα είναι κανονικοποιημένο ως προς τις αντίστοιχες καθυστερήσεις του Expro-drop.

Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα : Και εδώ η συνολική ρυθμαπόδοση των Expro-Linear και Expro-drop (Εικόνα 5.14) είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των άλλων δύο (γύρω στο 50% μεγαλύτερη). Αυτό οφείλεται στις αρκετά υψηλότερες ρυθμαποδόσεις των ftp χρηστών (Εικόνα 5.15) που επιτυγχάνονται μέσω καλής επιλογή του χρόνου στον οποίο οι χρήστες θα μεταδώσουν. Αυτό γίνεται φανερό και από την υψηλή μέση τιμή του ρυθμού μετάδοσης που επιτυγχάνει κάθε ftp χρήστης (Εικόνα 5.16). Η χαμηλή ρυθμαπόδοση των MLWDF και CD_EDD είναι το τίμημα για την διατήρηση αρκετά χαμηλών καθυστερήσεων στους WWW χρήστες (Εικόνες 5.17 και 5.18). Οι καθυστερήσεις των Expro-drop και Expro-Linear είναι υψηλότερες αλλά σε αποδεκτά επίπεδα. Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι παρόλο που ο Expro-Linear έχει σχεδόν την ίδια συνολική ρυθμαπόδοση με τον Expro-drop ο πρώτος παρουσιάζει αρκετά χαμηλότερες καθυστερήσεις στους WWW χρήστες από τον δεύτερο. Συγκεκριμένα, ο Expro-Linear αυξάνει λίγο την καθυστέρηση των χρηστών με χαμηλή καθυστέρηση για να ελαττώσει αρκετά την καθυστέρηση των χρηστών που παρουσιάζουν υψηλή καθυστέρηση. Η μεγαλύτερη μεταξύ των χρηστών μέση και μέγιστη καθυστέρηση ελαττώνεται στον Expro-Linear κατά 20% και 25% αντίστοιχα σε σχέση με τον

Expo-drop, ενώ η συνολική ρυθμαπόδοση ελαττώνεται κατά 2.3%. Αυτή είναι μια καλή ανταλλαγή!

5.6.3 Προτεινόμενος αλγόριθμος (β)

5.6.3.1 Τροποποιήσεις της βασικής μορφής

Παρακάτω θα εξετάσουμε τους αλγόριθμους των παραγράφων 5.6.1 και 5.6.2 αλλά και κάποιες τροποποιημένες εκδόσεις τους σε σενάρια με RT κίνηση ή συνδυασμό RT και NRT κίνησης. Οι τροποποιήσεις έχουν να κάνουν με την ιδέα του balancing που εισάγεται στους αλγορίθμους αυτούς στο [50]. Στον δικό μας αλγόριθμο θα χρησιμοποιήσουμε μια τεχνική balancing, λίγο διαφορετική από αυτή που χρησιμοποιείται στον CD_EDD, η οποία παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις. Οι αλγόριθμοι που θα προσομοιωθούν και συγκριθούν είναι οι :

- **Expo-drop** : Ο Exponential Rule από τον οποίο έχει απομακρυνθεί η μέση τιμή από τον αριθμητή του κλάσματος μέσα στο εκθετικό.
- **MLWDF**
- **CD_EDD**
- **CD_EDD_balanced** : Ο CD_EDD με την τεχνική balancing που προτείνεται στο [50].
- **CD_EDD_weight** : Ο CD_EDD με την τεχνική balancing που προτείνουμε εμείς.
- **Expo-Linear**
- **Expo-weight** : Ο Expo-Linear με την τεχνική balancing που προτείνουμε εμείς.
- **Expo-predict** : Ο Expo-Linear στον οποίο έχουμε προσθέσει μια τεχνική αποφυγής άσκοπων απορρίψεων πακέτων.
- **Expo-pred-wei** : Ο Expo-Linear μαζί με τις δύο τεχνικές των Expo-weight και Expo-predict.
- **Expo-balanced** : Ο Expo-Linear μαζί με την τεχνική balancing του CD_EDD.

και παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στον πίνακα 5.4.

5.6.3.2 Κίνητρο ανάπτυξης

Κίνητρο Ανάπτυξης του Expo-weight (τροποποιημένη έκδοσης του Expo-Linear) : Στον αλγόριθμο Expo-weight χρησιμοποιούμε μια τροποποίηση της balancing τεχνικής του CD_EDD. Η τροποποίηση αναφέρεται στο γεγονός ότι η μέση τιμή του αριθμού των απορριφθέντων πακέτων (Drops) υπολογίζεται μόνο για τις RT ροές που έχουν πακέτα για μετάδοση. Αυτό γίνεται με το εξής σκεπτικό: Έστω ότι έχουμε 5 RT ροές A,B,ΓΔ, και Ε με τις εξής απώλειες πακέτων: 2 πακέτα για τις τρεις πρώτες και 12 πακέτα για τις άλλες δύο. Ο μέσος όρος των απωλειών για όλες τις RT ροές είναι 6. Έστω ακόμα ότι μόνο οι τρεις πρώτες (A,B και Γ) έχουν πακέτα για μετάδοση. Στην περίπτωση αυτή αν χρησιμοποιήσουμε την τεχνική balancing του CD_EDD τότε οι A,B και Γ θα εμφανίσουν μειωμένη προτεραιότητα χωρίς αυτό να βοηθά στην εξισορρόπηση του QoS dissatisfaction μεταξύ των RT ροών. Αντίθετα, η ελάττωση της προτεραιότητας για τις A,B και Γ θα τις φέρει σε μειονεκτική θέση έναντι των NRT ροών χωρίς να υπάρχει λόγος. Κατά συνέπεια αυτή η τεχνική balancing μπορεί να οδηγήσει σε μεροληψία του χρονοδρομολογητή υπέρ των NRT ροών οι οποίες όμως είναι από τη φύση τους και οι πιο ανεκτικές στην υποβάθμιση του QoS , οπότε κάτι τέτοιο δεν είναι επιθυμητό. Στην περίπτωση του Expo-weight κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει γιατί ο μέσος όρος των απωλειών θα υπολογιστεί μόνο για τις RT ροές με πακέτο και θα είναι ίσος με 2.

Κίνητρο Ανάπτυξης του Expo-predict (τροποποιημένη έκδοσης του Expo-Linear) : Η διαφορά τους Expo-predict από τον Expo-Linear βρίσκεται στην εισαγωγή ενός συντελεστή ο οποίος παίρνει μεγάλη τιμή όταν υπάρχει πακέτο το οποίο εκπνέει σε ελάχιστα TTI και το οποίο μπορεί να

μεταδοθεί μέσα σε ένα TTI. Το κίνητρο για την εισαγωγή αυτής της τροποποίησης ήταν η παρατήρηση ότι ένας σημαντικός αριθμός πακέτων που απορρίπτεται θα μπορούσε να μεταδοθεί μέσα σε ένα μόνο TTI, κάτι το οποίο θα μπορούσε να αποφευχθεί. Η τιμή που παίρνει ο συντελεστής όταν μια τέτοια κατάσταση εμφανίζεται (αλλιώς παίρνει τιμή μονάδα) πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπερκεράσει τις μεταβολές των τιμών των όρων που αφορούν την κατάσταση του καναλιού (καθώς και το balancing στον αλγόριθμο Expro-pred-wei).

Αλγόριθμος	Επιλογή του χρήστη που μεγιστοποιεί το παρακάτω κριτήριο :	Σημειώσεις
MLWDF	$-\log(\delta_i) \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \frac{D_i}{T_i}$	Τα T_i και δ_i λαμβάνονται από τον περιορισμό: $\Pr ob\{Delay > T_i\} \leq \delta_i$ και είναι εκφρασμένα σε sec.
CD_EDD	$-\log(\delta_i) \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \frac{D_i}{T_i \cdot (T_i - D_i)}$	$\frac{R_i}{R_i} = 10^{(R_{i,dB} - \overline{R_{i,dB}})/10}$
CD_EDD_balanced	$-\log(\delta_i) \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \frac{D_i}{T_i \cdot (T_i - D_i)} \cdot \frac{Drops_i}{Drops}$	Σε περίπτωση Non-Real-Time ροής το κλάσμα με τα Drops γίνεται μονάδα (όπως επίσης και σε περίπτωση όπου δεν υπάρχουν καθόλου απορρίψεις).
Expo-drop	$-\frac{\log(\delta_i)}{T_i} \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \exp\left\{-\log(\delta_i) \cdot \frac{D_i}{T_i \cdot (1 + \sqrt{a \cdot D})}\right\}$	
Expo-Linear	$-\frac{\log(\delta_i)}{T_i} \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \exp\left\{-\log(\delta_i) \cdot \frac{D_i}{T_i}\right\}$	
Expo-weighted	$\begin{aligned} &-\frac{\log(\delta_i)}{T_i} \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \exp\left\{-\log(\delta_i) \cdot \frac{D_i}{T_i}\right\} \quad , \text{ for Non Real Time flows} \\ &-\frac{\log(\delta_i)}{T_i} \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \exp\left\{-\log(\delta_i) \cdot \frac{D_i}{T_i}\right\} \cdot RT_{on} \cdot \frac{Drops_i}{\sum_{j \in ON} Drops_j} \quad , \text{ for Real Time flows} \end{aligned}$	Σε περίπτωση που ο αριθμητής (το $Drops_i$) είναι μηδέν ενώ ο παρονομαστής δεν είναι μηδέν, ο αριθμητής τίθεται ίσος με την μονάδα. RT_{on} = ο αριθμός των Real-Time ροών που έχουν πακέτα για μετάδοση.
Expo-predict	$-\frac{\log(\delta_i)}{T_i} \cdot coef_ER \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \exp\left\{-\log(\delta_i) \cdot \frac{D_i}{T_i}\right\}$	If (Real-Time Flow) <u>AND</u> $(T_i - \delta_i) < 4$ <u>AND</u> Rate>HOLBitsLeft Then coef_ER = 10 else coef_ER = 1
Expo-pred-wei	$\begin{aligned} &-\frac{\log(\delta_i)}{T_i} \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot \exp\left\{-\log(\delta_i) \cdot \frac{D_i}{T_i}\right\} \quad , \text{ for Non Real Time flows} \\ &-\frac{\log(\delta_i)}{T_i} \cdot \frac{R_i(t)}{R_i} \cdot coef \cdot \exp\left\{-\log(\delta_i) \cdot \frac{D_i}{T_i}\right\} \quad , \text{ for Real Time flows} \end{aligned}$ $coef = \begin{cases} coef_ER & , \text{ if (Real - Time flow) AND } (Ti - Di < 4) \\ RT_{on} \cdot \frac{Drops_i}{\sum_{j \in ON} Drops_j} & , \text{ if (Real - Time flow) AND } (Ti - Di \geq 4) \text{ AND (there are drops)} \\ 1 & , \text{ in other case} \end{cases}$	

Πίνακας 5.4

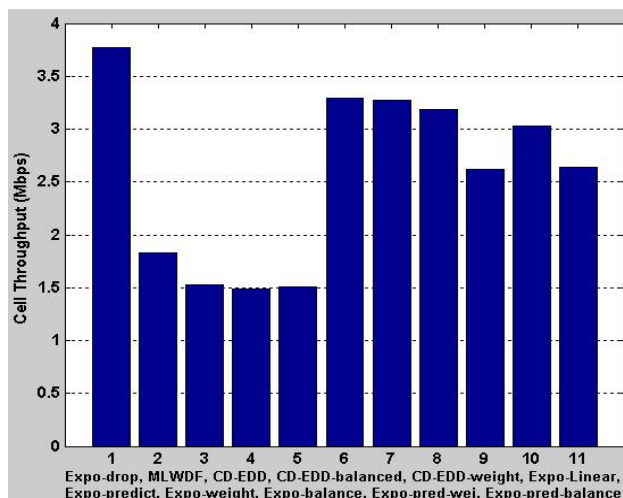
5.6.3.3 Προσομοιώσεις κάτω από συνδυασμένη RT και NRT κίνηση

Στην συνέχεια ακολουθούν κάποιες ενδεικτικές προσομοιώσεις των παραπάνω αλγορίθμων για σενάρια RT κίνησης ή συνδυασμένης RT και NRT κίνησης. Ο λόγος που δεν προσομοιώσαμε τους τροποποιημένους αλγορίθμους για NRT κίνηση είναι ότι οι αλγόριθμοι αυτοί απουσία RT κίνησης εκφυλίζονται στις βασικές εκδόσεις αυτών.

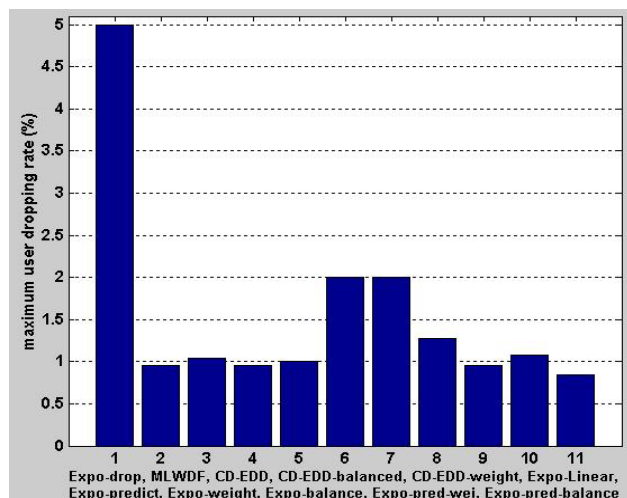
ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ #4 : Στην συνέχεια προσομοιώνουμε τους Expo-drop, MLWDF, CD_EDD, CD_EDD_balanced, CD_EDD_mybalance, Expo-Linear, Expo-predict, Expo-weight, Expo-balanced, Expo-pred-wei και Expo-pred-balanced σε ένα σενάριο 8 VIDEO και 6 FTP χρήστες. Οι μέσες τιμές του Es/No κάθε χρήστη είναι κατάλληλα επιλεγμένες ώστε να φανεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου για ένα εύρος τιμών του μέσου Es/No και είναι για τους VIDEO χρήστες: User1 : 5 dB, User2 : 8 dB, User3 : 10 dB, User 4: 13 dB, User5 : 16 dB, User6 : 19 dB, User 7 : 22 dB, User 8 : 25 dB, ενώ για τους FTP χρήστες: User1 : 7 dB, User2 : 14 dB, User3 : 21 dB, User 4: 28 dB. Η ελάχιστη απαιτούμενη ρυθμαπόδοση είναι 64 Kbps για κάθε FTP χρήστη. Επίσης, για τους FTP χρήστες είναι $T_i = 1\text{sec}$ και $\delta_i = 10^{-2}$, ενώ για τους VIDEO χρήστες είναι: $T_i = 400\text{m sec}$ και $\delta_i = 10^{-2}$. Ο ρυθμός παραγωγής δεδομένων από κάθε πηγή VIDEO είναι 128 Kbps.

Παρατήρηση : Για Video κίνηση αυτό που μας ενδιαφέρει δεν είναι η ρυθμαπόδοση αλλά το ποσοστό των πακέτων που απορρίπτονται (δηλαδή, η καθυστέρησή τους ξεπερνά την ελάχιστη αποδεκτή). Γι αυτό σε συνδυασμούς RT και NRT κίνησης τα κριτήρια επίδοσης των αλγορίθμων είναι: α) αν οι NRT λαμβάνουν την ελάχιστη αποδεκτή ρυθμαπόδοση, β) η συνολική ρυθμαπόδοση της κυψέλης ,και γ) το dropping rate των RT χρηστών.

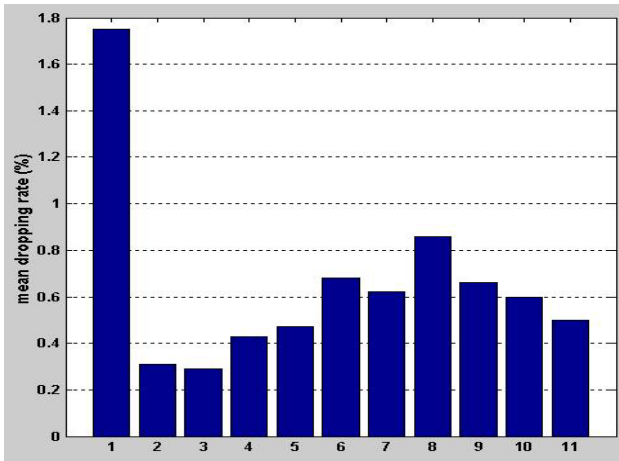
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στις εικόνες 5.21-5.24.



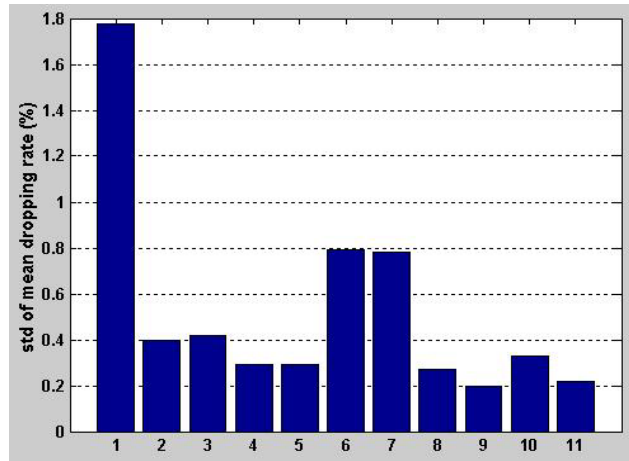
Εικόνα 5.21 : Η συνολική ρυθμαπόδοση κυψέλης που πετυχαίνει κάθε αλγόριθμος.



Εικόνα 5.22 : Το μέγιστο dropping rate μεταξύ των RT χρηστών που πετυχαίνει κάθε αλγόριθμος.



Εικόνα 5.23 : Η μέση τιμή του dropping rate των RT χρηστών που πετυχαίνει κάθε αλγόριθμος.



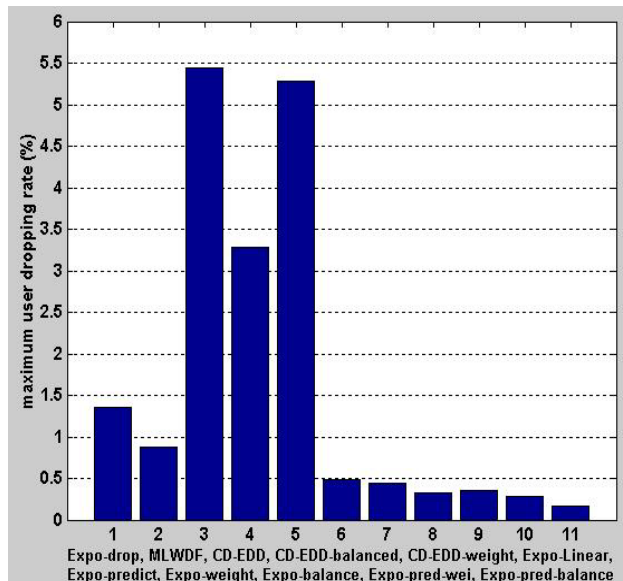
Εικόνα 5.24 : Η τυπική απόκλιση του dropping rate των RT χρηστών που πετυχαίνει κάθε αλγόριθμος.

Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα :

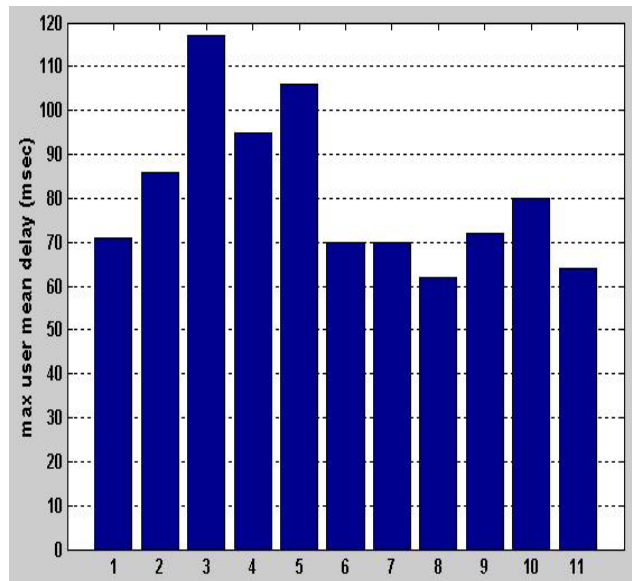
- Οι MLWDF και CD_EDD αποτυγχάνουν να διατηρήσουν μια υψηλή συνολική ρυθμαπόδοση (Εικόνα 5.21) σε αντίθεση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους. Θεωρώντας ότι ως προς την συνολική ρυθμαπόδοση ο αλγόριθμός μας θα πρέπει έχει επιδόσεις παρόμοιες (σχεδόν το ίδιο υψηλές) με τον Expo-drop θέτουμε ως ένα ad-hoc κατώφλι στην συνολική ρυθμαπόδοση ίσο με τα 3 Mbps (σχεδόν διπλάσιο από αυτό των MLWDF και CD_EDD). Οι αλγόριθμοι που επιτυγχάνουν τον στόχο αυτό είναι οι Expo-Linear, Expo-predict, Expo-weight και Expo-pred-wei.
- Από τους Expo-Linear, Expo-predict, Expo-weight και Expo-pred-wei , οι δύο τελευταίοι πετυχαίνουν και πολύ καλές επιδόσεις ως προς την ελάττωση του μέγιστου dropping-rate (Εικόνα 5.22) που παρουσιάζεται μεταξύ των χρηστών. Οι επιδόσεις τους είναι πολύ κοντά στα επίπεδα των MLWDF και Expo-drop οι οποίοι μέχρι τώρα θεωρούνται από τους καλύτερους αλγορίθμους σε RT κίνηση.
- Αξίζει επίσης να παρατηρήσουμε ότι η εφαρμογή ενός balancing αλγορίθμου δεν επηρεάζει σημαντικά (τουλάχιστον στο σενάριο αυτό) τις επιδόσεις του CD_EDD σε αντίθεση με τον Expo-Linear του οποίου οι επιδόσεις βελτιώνονται σημαντικά.
- Η ελάττωση του μέγιστου dropping rate με την εφαρμογή balancing (σε οποιοδήποτε αλγόριθμο) οφείλεται, εν μέρει, στην εξισορρόπηση του dropping rate μεταξύ των χρηστών (Εικόνα 5.24). Οι χρήστες με χαμηλό dropping rate αυξάνουν τις απώλειές τους, ενώ χρήστες με υψηλό dropping rate τις ελαττώνουν. Η μεταβολή του μέσου dropping rate (Εικόνα 5.23) είναι ένας δείκτης του κατά πόσο αποδοτικά γίνεται αυτή η ανταλλαγή.

ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ #5 : Στην συνέχεια προσομοιώνουμε τους Expo-drop, MLWDF, CD_EDD, CD_EDD_balanced, CD_EDD_mybalance, Expo-Linear, Expo-predict, Expo-weight, Expo-balanced, Expo-pred-wei και Expo-pred-balanced σε ένα σενάριο 10 VIDEO και 20 WWW χρήστες. Οι μέσες τιμές του Es/No κάθε χρήστη είναι κατάλληλα επιλεγμένες ώστε να φανεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου για ένα εύρος τιμών του μέσου Es/No και είναι για τους VIDEO χρήστες: User1 : 8 dB, User2 : 10 dB, User3 : 12 dB, User 4: 14 dB, User5 : 16 dB, User6 : 18 dB, User7 : 20 dB, User8 : 22 dB, User9 : 24 dB, User10 : 28 dB, ενώ για τους WWW χρήστες: User1 : 7 dB, User2 : 8 dB, User3 : 9 dB, User 4: 10 dB, User5 : 12 dB, User6 : 13 dB, User7 : 14 dB, User8 : 16 dB, User9 : 17 dB, User10 : 19 dB, User11 : 21 dB, User12 : 23 dB, User13 : 25 dB, User14 : 27 dB, User15 : 29 dB, User16 : 31 dB, User17 : 5 dB, User18 : 10 dB, User19 : 14 dB, User20 : 18 dB. Επίσης, για τους WWW χρήστες είναι $T_i = 4 \text{ sec}$ και $\delta_i = 10^{-2}$, ενώ για τους VIDEO χρήστες είναι: $T_i = 400 \text{ m sec}$ και $\delta_i = 10^{-2}$. Ο ρυθμός παραγωγής δεδομένων από κάθε πηγή VIDEO είναι 128 Kbps.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στις εικόνες 5.25-5.28.

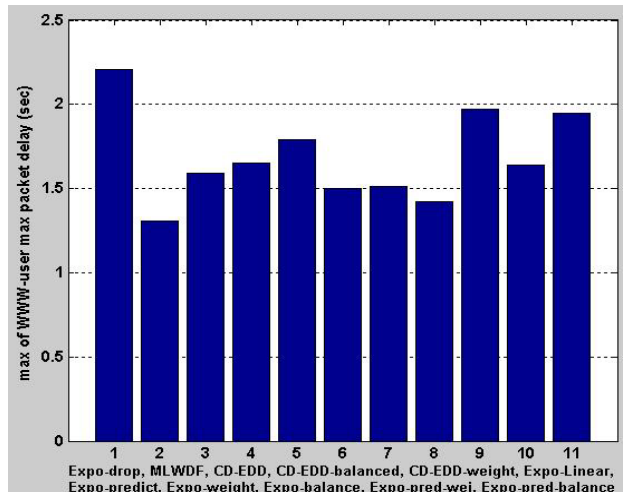


Εικόνα 5.25 : Το μέγιστο dropping rate μεταξύ των VIDEO χρηστών που πετυχαίνει κάθε αλγόριθμος.

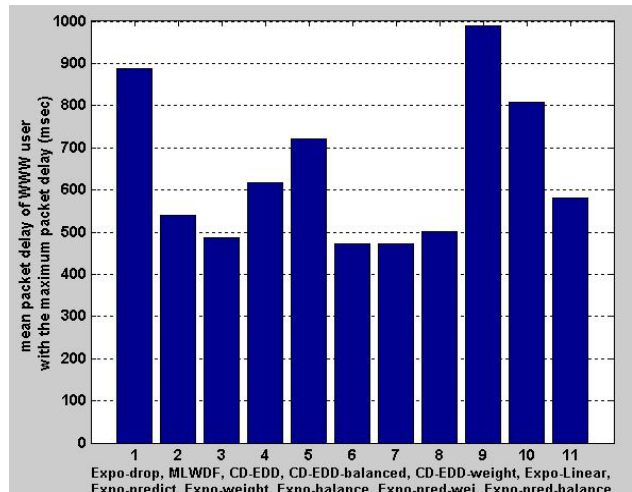


Εικόνα 5.26 : Η μέγιστη τιμή μεταξύ των μέσων καθυστερήσεων των VIDEO χρηστών που πετυχαίνει κάθε αλγόριθμος.

Στο επόμενο διάγραμμα (εικόνα 5.27) απεικονίζεται η μέγιστη τιμή μεταξύ των μέγιστων καθυστερήσεων κάθε WWW χρήστη. Ακολουθεί ένα διάγραμμα (εικόνα 5.28) με την μέση καθυστέρηση του χρήστη ο οποίος αντιστοιχεί στην μέγιστη καθυστέρηση του προηγούμενου διαγράμματος.



Εικόνα 5.27 : Η μέγιστη τιμή μεταξύ των μέγιστων καθυστερήσεων των WWW χρηστών που πετυχαίνει κάθε αλγόριθμος



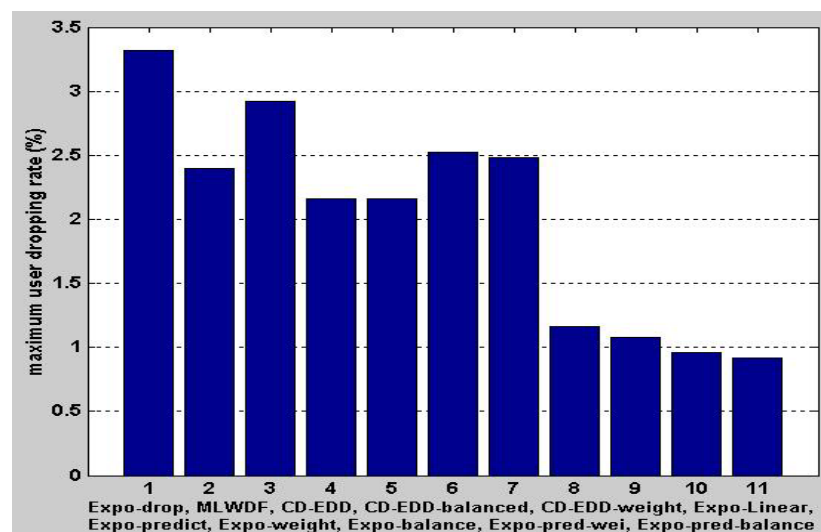
Εικόνα 5.28 : Η αντίστοιχη μέση καθυστέρηση του WWW χρήστη που αντιστοιχεί στην αντίστοιχη στήλη της εικόνας 5.27.

Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα : Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα ο Expo-Linear και οι τροποποιημένες εκδόσεις του παρουσιάζουν πολύ καλύτερη συμπεριφορά από τον CD_EDD και αρκετά καλύτερη από τους Expo-drop και MLWDF, όσον αφορά το μέγιστο dropping rate (Εικόνα 5.25). Σχετικά με τις καθυστερήσεις, οι επιδόσεις των Expo-Linear και Expo-drop βρίσκονται στα ίδια επίπεδα και είναι καλύτερες από αυτές των άλλων δύο (Εικόνα 5.26). Οι καθυστερήσεις των www χρηστών, τόσο η μέγιστη (Εικόνα 5.27) όσο και η ελάχιστη καθυστέρηση (Εικόνα 5.28) του χειρότερου (ως προς τις καθυστερήσεις) χρήστη, παραμένουν σε ανεκτά επίπεδα.

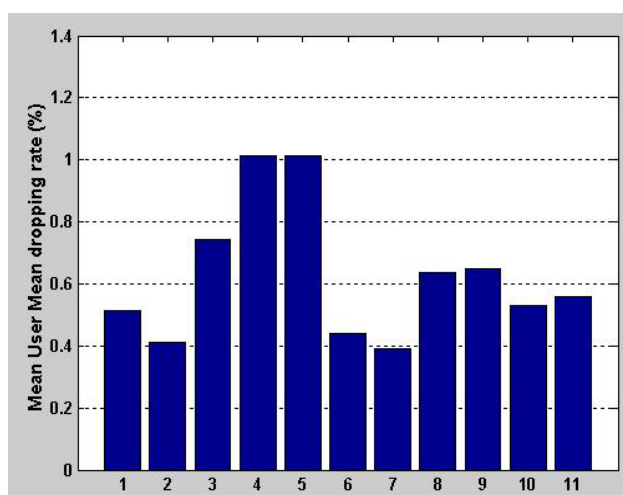
5.6.3.4 Προσομοιώσεις κάτω από RT κίνηση

ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ #6 : Στην συνέχεια προσομοιώνουμε τους Expro-drop, MLWDF, CD_EDD, CD_EDD_balanced, CD_EDD_mybalance, Expro-Linear, Expro-predict, Expro-weight, Expro-balanced, Expro-pred-wei και Expro-pred-balanced σε ένα σενάριο με 10 VIDEO χρήστες. Οι μέσες τιμές του Es/No κάθε χρήστη είναι κατάλληλα επιλεγμένες ώστε να φανεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου για ένα εύρος τιμών του μέσου Es/No και είναι για τους VIDEO χρήστες: User1 : 5 dB, User2 : 7 dB, User3 : 9 dB, User4 : 11 dB, User5 : 13 dB, User6 : 15 dB, User 7 : 17 dB, User 8 : 19 dB, User 9 : 21 dB, User 10 : 23 dB. Επίσης, είναι $T_i = 400msec$ και $\delta_i = 10^{-2}$. Ο ρυθμός παραγωγής δεδομένων από κάθε πηγή VIDEO είναι 128 Kbps.

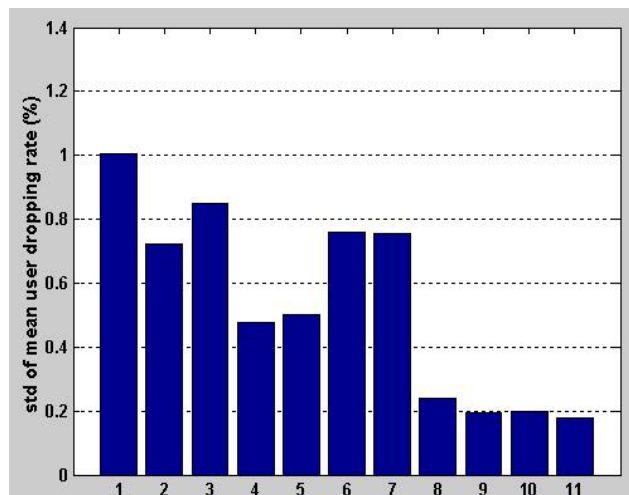
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στις εικόνες 5.29-5.31.



Εικόνα 5.29 : Το μέγιστο dropping rate μεταξύ των VIDEO χρηστών που πετυχαίνει κάθε αλγόριθμος.



Εικόνα 5.30 : Η μέση τιμή των μέσων καθυστερήσεων μετάδοσης πακέτου κάθε VIDEO χρήστη που εμφανίζει κάθε αλγόριθμος.

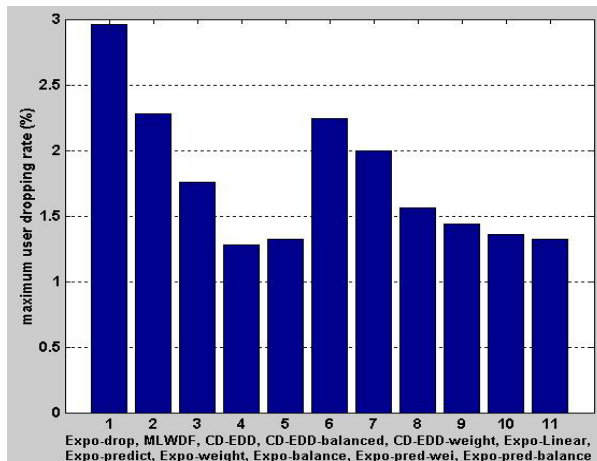


Εικόνα 5.31 : Η τυπική απόκλιση των μέσων καθυστερήσεων μετάδοσης πακέτου κάθε VIDEO χρήστη που εμφανίζει κάθε αλγόριθμος.

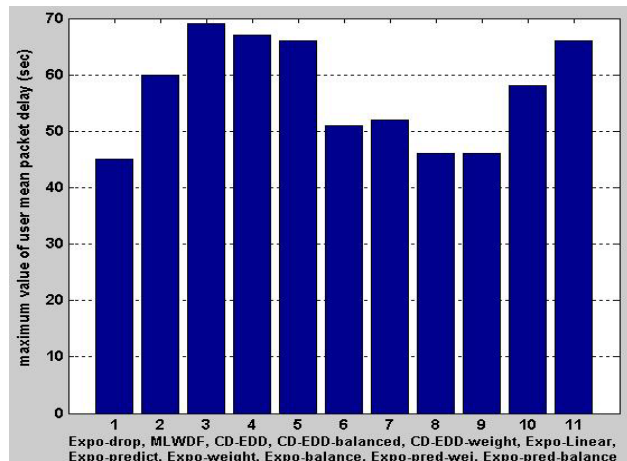
Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα : Όλες οι τροποποιήσεις/βελτιώσεις του Expo-Linear (4 τελευταίοι αλγόριθμοι) παρουσιάζουν αρκετά καλύτερη επίδοση, όσον αφορά την ελάττωση του μέγιστου dropping rate, σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγόριθμους (Εικόνα 5.29). Σε αντίθεση με το προηγούμενο σενάριο, εδώ οι βελτιωμένες εκδόσεις του Expo-Linear πετυχαίνουν πολύ καλύτερο balancing των απωλειών σε σχέση με αυτό που πετυχαίνει ο CD_EDD (Εικόνα 5.31).

ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ #7 : Στην συνέχεια προσομοιώνουμε τους Expo-drop, MLWDF, CD_EDD, CD_EDD_balanced, CD_EDD_mybalance, Expo-Linear, Expo-predict, Expo-weight, Expo-balanced, Expo-pred-wei και Expo-pred-balanced σε ένα σενάριο με 15 VIDEO χρήστες. Οι μέσες τιμές του Es/No κάθε χρήστη είναι κατάλληλα επιλεγμένες ώστε να φανεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου για ένα εύρος τιμών του μέσου Es/No και είναι για τους VIDEO χρήστες: User1 : 10 dB, User2 : 12 dB, User3 : 12 dB, User 4: 14 dB, User5 : 14 dB, User6 : 16 dB, User7 : 16 dB, User8 : 18 dB, User9 : 18 dB, User10 : 20 dB, User11 : 20 dB, User12 : 22 dB, User13 : 22 dB, User14 : 24 dB, User15 : 26 dB. Επίσης, είναι $T_i = 200m \text{ sec}$ και $\delta_i = 10^{-2}$. Ο ρυθμός παραγωγής δεδομένων από κάθε πηγή VIDEO είναι 128 Kbps.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στις εικόνες 5.32-5.33.



Εικόνα 5.32 : Το μέγιστο dropping rate μεταξύ των χρηστών που πετυχαίνει κάθε αλγόριθμος.



Εικόνα 5.33 : Η μέγιστη μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτου που εμφανίζει ο κάθε αλγόριθμος.

Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα : Όλες οι τροποποιήσεις/βελτιώσεις του Expo-Linear (4 τελευταίοι αλγόριθμοι) παρουσιάζουν αρκετά καλή επίδοση, η οποία κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με αυτήν του CD_EDD-balanced (Εικόνα 5.32). Η μέγιστη καθυστέρηση μεταξύ των χρηστών είναι κάπως αυξημένη τόσο για τους αλγόριθμους MLWDF και CD_EDD (Εικόνα 5.33), όσο και για τις εκδόσεις του Expo-Linear που συνδυάζουν κάποια τεχνική balancing με τον Expo-predict (δύο τελευταίοι αλγόριθμοι).




5.6.4 Γενικά συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε ένας μεγάλος αριθμός από τους κυριότερους QoS-based αλγόριθμους που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Επίσης, προτείναμε και μελετήσαμε, κάτω από ένα αρκετά ευρύ φάσμα σεναρίων δικτυακής κίνησης, ένα νέο αλγόριθμο (Expro-pred-wei), οποίος προέρχεται από βασικές τροποποιήσεις ενός παλιότερου αλγόριθμου (Exponential Rule). Η συμπεριφορά και οι επιδόσεις του Expro-pred-wei συγκρίθηκαν με άλλους (κυρίαρχους μέχρι τώρα στην βιβλιογραφία) QoS-based αλγόριθμους και βρέθηκε ότι εμφανίζει αρκετά καλύτερη συμπεριφορά από τους υπόλοιπους. Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των επιδόσεων του Expro-pred-wei σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγόριθμους που προσομοιώθηκαν :

1. Στην περίπτωση των FTP χρηστών με χαμηλές απαιτήσεις ρυθμαπόδοσης (σενάριο #1) ο Expro-Linear καταφέρνει να διατηρήσει το ίδιο υψηλά επίπεδα ρυθμαπόδοσης με τον Expro-drop. Οι ρυθμαποδόσεις τους είναι περίπου 50% μεγαλύτερες από αυτές των MLWDF και CD_EDD.
2. Στην περίπτωση των FTP χρηστών με πιο εξειδικευμένες απαιτήσεις ρυθμαπόδοσης (σενάριο #2) ο Expro-Linear καταφέρνει, επίσης, να διατηρήσει το ίδιο υψηλά επίπεδα ρυθμαπόδοσης με τον Expro-drop. Οι ρυθμαποδόσεις τους είναι περίπου 60% μεγαλύτερες από αυτές των MLWDF και CD_EDD.
3. Στην περίπτωση FTP και WWW χρηστών (σενάριο #3) ο Expro-Linear για άλλη μια φορά διατηρεί το ίδιο υψηλά επίπεδα ρυθμαπόδοσης με τον Expro-drop. Οι ρυθμαποδόσεις τους είναι περίπου 50% μεγαλύτερες από αυτές των MLWDF και CD_EDD.
4. Στην περίπτωση του σεναρίου με VIDEO χρήστες χαμηλών απαιτήσεων σε καθυστέρηση (σενάριο #6), ο Expro-pred-wei πετυχαίνει από τις καλύτερες επιδόσεις. Οι CD_EDD και MLWDF αποδίδουν μέτρια, ενώ ο Expro-drop παρουσιάζει πολύ χαμηλές επιδόσεις. Το dropping rate του Expro-pred-wei είναι περίπου 60% μικρότερο από αυτά των CD_EDD και MLWDF και 70% μικρότερο από αυτό του Expro-drop.
5. Στην περίπτωση του σεναρίου με VIDEO χρήστες υψηλών απαιτήσεων σε καθυστέρηση (σενάριο #7), οι Expro-pred-wei και CD_EDD πετυχαίνουν σχεδόν την ίδια απόδοση. Τα dropping rate τους είναι περίπου 40% μικρότερα από αυτό του MLWDF και περίπου 55% μικρότερα από αυτό του Expro-drop.
6. Στην περίπτωση του σεναρίου με VIDEO και FTP χρήστες (σενάριο #4), οι MLWDF και CD_EDD πετυχαίνουν τα ίδια επίπεδα dropping rate με αυτά του Expro-pred-wei αλλά η συνολική τους ρυθμαπόδοση τους είναι περίπου 50% μικρότερη από αυτή του Expro-pred-wei. Από την άλλη η ρυθμαπόδοση του Expro-drop είναι 25% μεγαλύτερη του Expro-pred-wei αλλά το dropping rate που επιτυγχάνει είναι 500% μεγαλύτερο από αυτό του Expro-pred-wei.
7. Στην περίπτωση του σεναρίου με VIDEO και WWW χρήστες (σενάριο #5), όλοι οι αλγόριθμοι πετυχαίνουν σχετικά καλές επιδόσεις όσον αφορά την καθυστέρηση των www χρηστών. Το dropping rate όμως που επιτυγχάνει ο Expro-pred-wei είναι 80% μικρότερο από αυτό του Expro-drop, 68% μικρότερο από αυτό του MLWDF και 92% μικρότερο από αυτό του CD_EDD.

Ένα συγκριτικό διάγραμμα των επιδόσεων του Expro-pred-wei σε σχέση πάντα με τις επιδόσεις των Expro-drop, MLWDF και CD_EDD φαίνεται στην εικόνα 5.33. Όπως παρατηρούμε, ενώ και οι τρεις άλλοι αλγόριθμοι παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά κάτω από συγκεκριμένα σενάρια κίνησης, μόνο ο Expro-pred-wei καταφέρνει να διατηρήσει υψηλές επιδόσεις κάτω από όλες τις περιπτώσεις σεναρίων κίνησης.

	MLWDF	CD_EDD	Expo-drop	Expo-pred-wei
FTP1	a	a	a	a
FTP2	a	a	a	a
FTP+WWW (Throughput)				
FTP+WWW (www Delay)	a	a	a	a
VIDEO+FTP (Throughput)	a	a	a	a
VIDEO+FTP (Dropping)	a	a	a	a
VIDEO+WWW (Dropping)	a	a	a	a
VIDEO+WWW (www Delay)	a	a	a	a
VIDEO	a	a	a	a
STRICT VIDEO	a	a	a	a

 = Υψηλή επίδοση
  = Μέτρια επίδοση
  = Χαμηλή επίδοση

Εικόνα 5.33 : Συγκριτικό διάγραμμα επιδόσεων των MLWDF, CD_EDD, Expo-drop και Expo-pred-wei.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι ο Expo-pred-wei πετυχαίνει πολύ καλά επίπεδα διασφάλισης του QoS κάθε χρήστη και παράλληλα διατηρεί υψηλά επίπεδα ρυθμαπόδοσης σε όλα τα σενάρια κίνησης που εξετάστηκαν. Οι πολύ καλές επιδόσεις και η ανεξαρτησία των επιδόσεων του Expo-pred-wei από τα είδος κίνησης που εξυπηρετεί κάνει τον Expo-pred-wei ελκυστικό για χρήση σε συστήματα ανεξάρτητα με το είδος της κίνησης που αυτά καλούνται να εξυπηρετήσουν. Κάτι τέτοιο είναι πολύ επιθυμητό αφού σε συστήματα τα οποία υποστηρίζουν πολλές και διαφορετικές υπηρεσίες το είδος της κίνησης που διακινείται αλλάζει κατά διαστήματα. Σε τέτοια συστήματα (μεταξύ των οποίων και τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς) οι επιδόσεις του αλγορίθμου χρονοδρομολόγησης που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να παραμένουν υψηλές και ανεπηρέαστες από το είδος της κίνησης.

5.7 Γενίκευση της μορφής των QoS-based αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης :

Στην συνέχεια παρουσιάζουμε μια γενικευμένη μορφή στην οποία ανήκουν όλοι οι QoS-based αλγόριθμοι 2^{ης} γενιάς (τα κριτήρια χρονοδρομολόγησης αυτών) οι οποίοι παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.6. Η μορφή αυτή είναι:

$$a_i \cdot \frac{R_i}{R_i} \cdot f(\beta_i \cdot QoS_risk) \cdot \gamma_i$$

Στον πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων της γενικευμένης μορφής για τους QoS-based αλγόριθμους 2^{ης} γενιάς.

	a_i	β_i	QoS risk	f (x) =	γ_i
M-LWDF	$-\log(\delta_i)$	–	$\frac{D_i}{T_i}$	x	–
CD_EDD	$-\log(\delta_i)$	–	$\frac{D_i}{T_i \cdot (T_i - D_i)}$	x	–
CD_EDD_balanced	-	-	$\frac{D_i}{T_i \cdot (T_i - D_i)}$	x	$\frac{Drops_i}{Drops}$
Exponential Rule	$\frac{-\log(\delta_i)}{T_i}$	$-\log(\delta_i)$	$\frac{D_i}{T_i \cdot (1 + \sqrt{a \cdot D})}$	$\exp(x)$	–
Expo-Linear	$\frac{-\log(\delta_i)}{T_i}$	$-\log(\delta_i)$	$\frac{D_i}{T_i}$	$\exp(x)$	–
Expo_weight	$\frac{-\log(\delta_i)}{T_i}$	$-\log(\delta_i)$	$\frac{D_i}{T_i}$	$\exp(x)$	$\frac{Drops_i}{\sum_{j \in ON} Drops_j} \cdot RT_{ON}$
Expo_predict	$\frac{-\log(\delta_i)}{T_i} \cdot coef_ER$	$-\log(\delta_i)$	$\frac{D_i}{T_i}$	$\exp(x)$	$\frac{Drops_i}{\sum_{j \in ON} Drops_j} \cdot RT_{ON}$
Expo_pred_wei	$\frac{-\log(\delta_i)}{T_i} \cdot coef_ER$	-	$\frac{D_i}{T_i}$	$\exp(x)$	$\frac{Drops_i}{\sum_{j \in ON} Drops_j} \cdot RT_{ON}$

Πίνακας 5.5

* Μια προηγούμενη πρόταση για μια γενικευμένη μορφή έκφρασης αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης έγινε στο [53], η οποία όμως δεν μπορεί να περιλάβει αλγορίθμους όπως ο Exponential Rule και ο CD_EDD.

Επεξήγηση των όρων που αποτελούν τη γενική μορφή :

- Το κλάσμα $\frac{R_i}{R_i}$ εκφράζει την σχετική κατάσταση του καναλιού του χρήστη για την τρέχουσα στιγμή. Δείχνει πόσο καλύτερη από την μέση κατάσταση του καναλιού είναι η τρέχουσα κατάσταση του καναλιού.
- Ο παράγοντας “QoS risk” εκφράζει το πόσο κινδυνεύουμε να παραβιάσουμε τους QoS περιορισμούς του χρήστη, όσον αφορά πάντα την κατάσταση του HOL πακέτου. Ο παράγοντας αυτός είναι μια ένδειξη για το πόσο πρέπει να βιαστούμε να εξυπηρετήσουμε το αντίστοιχο πακέτο.
- Ο συντελεστής “ a_i ” δίνει ένα γενικότερο βάρος στους χρήστες των οποίων το QoS είναι πιο απαιτητικό από τους υπόλοιπους.
- Η συνάρτηση “ f ” καθορίζει το πόσο γρήγορα/απότομα μεταβαίνουμε από την κατάσταση όπου η χρονοδρομολόγηση γίνεται με στόχο την μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης στην κατάσταση όπου γίνεται με στόχο την διασφάλιση του απαιτούμενου QoS για όλους τους χρήστες. Γενικά, η συνάρτηση αυτή έχει τιμή κοντά στην μονάδα (που σημαίνει ότι δεν δίνεται ιδιαίτερο βάρος στο QoS που απολαμβάνει κάθε χρήστης την τρέχουσα στιγμή) όταν το τρέχον QoS κάθε χρήστη είναι αρκετά μεγαλύτερο από το ελάχιστο αποδεκτό (το απαιτούμενο QoS δηλαδή) και παίρνει τιμές αρκετά μεγαλύτερες από την μονάδα όταν το QoS ενός χρήστη κινδυνεύει να παραβιάσει τις QoS απαιτήσεις του χρήστη.
- Ο συντελεστής “ β_i ” εκφράζει έναν παράγοντα ασφαλείας στην ενεργοποίηση της συνάρτησης “ f ” δίνοντας προβάδισμα (ταχύτερη ενεργοποίηση) σε χρήστες των οποίων η παραβίαση του QoS είναι πιο απαγορευτική από τους υπόλοιπους (αυτό δεν σημαίνει και ότι το ελάχιστο αποδεκτό QoS είναι και ιδιαίτερα απαιτητικό. Μπορεί οι περιορισμοί στις καθυστερήσεις που απαιτούνται, να είναι σχετικά χαλαροί αλλά να μην πρέπει να παραβιάζονται σχεδόν ποτέ).
- Ο ρόλος του συντελεστή “ γ_i ” είναι να ισορροπήσει (να μοιράσει ομοιόμορφα) τις απώλειες του QoS κάθε χρήστη, ή καλύτερα τις αποκλίσεις του QoS κάθε χρήστη από το αντίστοιχο (ελάχιστο) απαιτούμενο QoS με σκοπό να ελαττωθεί η μέγιστη απόκλιση που μπορεί να έχει κάθε χρήστης. Αυτό βέβαια μπορεί να επιφέρει αύξηση στην συνολική υποβάθμιση του QoS (π.χ να αυξηθούν οι συνολικές απορρίψεις πακέτων αλλά να μειωθεί ο μέγιστος ρυθμός απόρριψης που μπορεί να υφίσταται ένας χρήστης), αλλά συνήθως αυτό που είναι πρωτεύουσας σημασίας είναι η εξασφάλιση του ελάχιστου αποδεκτού QoS για κάθε χρήστη.

5.8 Βελτιστότητα ρυθμαπόδοσης (Throughput Optimallity)

Στην συνέχεια θα παραθέσουμε ορισμένα στοιχεία σχετικά με την συμπεριφορά των αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης για μη άπληστους χρήστες (χρήστες με πεπερασμένο και συγκεκριμένο μέσο ρυθμό άφιξης δεδομένων για μετάδοση). Στο [54] οι συγγραφείς δείχνουν ότι σε ένα ασύρματο σύστημα με N ουρές και έναν εξυπηρετητή, όπου η διαδικασία άφιξης σε κάθε ουρά είναι μια i.i.d διαδικασία Bernoulli και οι μεταβολές της κατάστασης του καναλιού κάθε χρήστη είναι επίσης μια i.i.d διαδικασία Bernoulli (έλλειψη συσχέτισης μεταξύ διαδοχικών καταστάσεων του καναλιού και άρα αδυναμία εκτίμησης της τρέχουσας κατάστασης), η πολιτική η οποία ελαχιστοποιεί τον συνολικό αριθμό των πακέτων στο σύστημα (με στατιστική έννοια) είναι αυτή που εξυπηρετεί κάθε φορά την μεγαλύτερη ουρά. Η έλλειψη συσχέτισης στις μεταβολές του καναλιού μπορεί να απαντηθεί σε περιπτώσεις όπου η διάρκεια του ΤΠΙ είναι αρκετά μεγαλύτερη από την χρονική κλίμακα των μεταβολών του καναλιού (η τελευταία εξαρτάται από την ταχύτητα του χρήστη).

Ωστόσο, αν τα κανάλια είναι συσχετισμένα τότε είναι ευνόητο ότι μια πολιτική χρονοδρομολόγησης που δεν λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του καναλιού, όπως η προηγούμενη, θα έχει πολύ χαμηλές επιδόσεις. Στο [55] οι συγγραφείς μελετούν το πρόβλημα της χρονοδρομολόγησης πολλαπλών Real-Time ροών διάμεσο ενός διαμοιραζόμενου καναλιού το οποίο θεωρείται ON-OFF. Παρατηρείται ότι μια έκδοση του EDD, η οποία λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του καναλιού κάθε στιγμή, είναι, για τις περισσότερες τιμές παραμέτρων του καναλιού (αλλά όχι όλες) οι οποίες παρουσιάζουν πρακτικό ενδιαφέρον, βέλτιστη από πλευράς ελαχιστοποίησης του αριθμού των πακέτων που χάνονται λόγω εκπνοής του μέγιστου χρόνου αναμονής.

Περνώντας σε κανάλια με πολλαπλές καταστάσεις εισάγεται [49] η έννοια του Throughput Optimallity. Ένας κανόνας χρονοδρομολόγησης καλείται throughput optimal αν κάνει το σύστημα ευσταθές, εφ'όσον η ευστάθεια είναι εφικτή από οποιονδήποτε άλλο κανόνα. Η ευστάθεια αφορά το μέγεθος των ουρών κάθε χρήστη. Με άλλα λόγια, ένας throughput optimal αλγόριθμος υποστηρίζει την μεγαλύτερη δυνατή περιοχή αρίξεων από οποιονδήποτε άλλο αλγόριθμο.

Throughput Optimal αλγόριθμοι:

Αλγόριθμοι που έχουν αποδειχθεί ως throughput optimal είναι οι εξής:

- Ο M-LWDF κανόνας σύμφωνα με τον οποίο κάθε φορά δρομολογείται ένας μόνο χρήστης ο οποίος επιλέγεται από το κριτήριο: $\arg \max_j \{ \gamma_j \cdot R_j \cdot (D_j)^\beta \}$, όπου R_j είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει ο χρήστης j κάθε στιγμή και D_j είναι η καθυστέρηση του HOL πακέτου της ουράς του χρήστη j (για FIFO queuing). Ο κανόνας αυτός είναι throughput optimal [48] για οποιεσδήποτε θετικές παραμέτρους γ_j και β .

- Ο M-LWWF [48], ο οποίος είναι ίδιος με τον M-LWDF αλλά την θέση της HOL καθυστέρησης του χρήστη j (D_j) έχει πάρει το μέγεθος της ουράς του χρήστη j (Q_j): $\arg \max_j \{ \gamma_j \cdot R_j \cdot (Q_j)^\beta \}$

- Ο Exponential Rule κανόνας, σύμφωνα με τον οποίο κάθε φορά δρομολογείται ένας μόνο χρήστης ο οποίος επιλέγεται από το κριτήριο: $\arg \max_j \left\{ \gamma_j \cdot R_j \cdot \exp \left(\frac{a_j \cdot V_j}{\beta + (\bar{V})^\eta} \right) \right\}$, για

οποιεσδήποτε θετικές παραμέτρους γ_j , a_j και β και οποιαδήποτε τιμή του $\eta \in (0,1)$ και όπου στη θέση του V μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε η καθυστέρηση W (EXP-W) είτε το μήκος της ουράς Q (EXP-Q). Και αυτός ο κανόνας έχει δειχθεί [49] ότι είναι throughput optimal.

Από την άλλη έχειδειχθεί ότι οι Max C/I, Max R·Throughput⁻¹ και Proportional Fair δεν είναι throughput optimal.

Η throughput optimal ιδιότητα ενός αλγορίθμου το μόνο που μπορεί να εγγυηθεί είναι η ευστάθεια των ουρών, εφ'όσον αυτή είναι εφικτή. Η ευστάθεια μπορεί να μεταφραστεί σε εξασφάλιση της εξυπηρέτησης όλων πακέτων που καταφθάνουν κάτω από την υπόθεση απείρου μήκους καταχωρητή. Δεν προσφέρεται καμιά εγγύηση από άποψης καθυστέρησης και άρα στην πράξη η ιδιότητα αυτή (από μόνη της) δεν μπορεί υπό πραγματικές συνθήκες να εγγυηθεί απώλειες εξαιτίας υπερβολικής καθυστέρησης ή υπερχείλισης του καταχωρητή. Αποτελεί όμως μια πρώτη εγγύηση ότι ο αλγόριθμος που έχουμε σχεδιάσει (και ίσως να μην έχουμε δοκιμάσει στην πράξη) μπορεί να χειριστεί την εισερχόμενη κίνηση, και ίσως να προσφέρει εγγυήσεις αν ρυθμίζουμε δυναμικά τις παραμέτρους του αλγορίθμου. Η ρύθμιση των παραμέτρων του κριτηρίου μεταβάλλει την κατανομή των καθυστερήσεων που υφίστανται τα πακέτα.

6 Επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας του HSDPA

6.1 Καθορισμός της διαμέτρου της κυψέλης

Ο καθορισμός της ακτίνας της HSDPA κυψέλης εξαρτάται από το Link Budget ανόδου του WCDMA. Μερικά παραδείγματα για διάφορα περιβάλλοντα κυψελών μπορούμε να δούμε στον πίνακα 6.1.

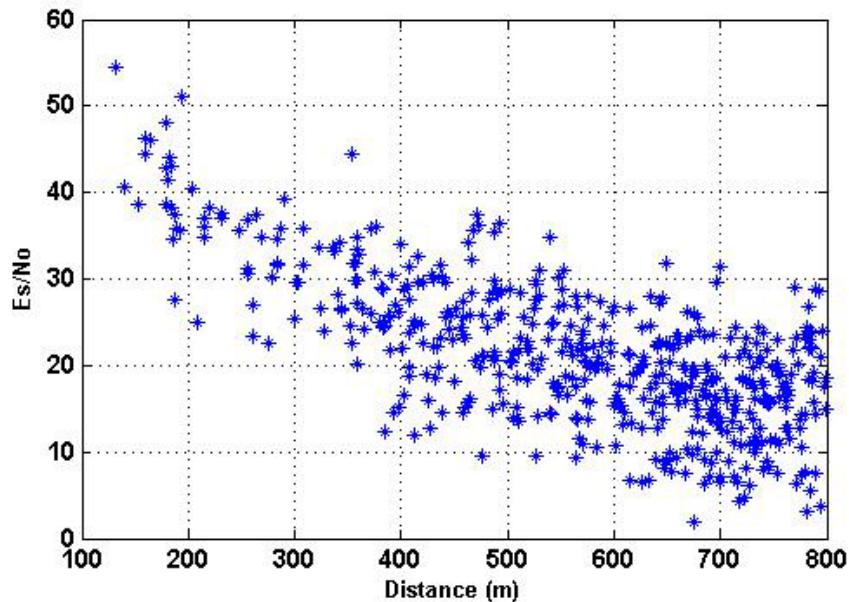
	Dense Urban	Urban	Rural
Network Parameters			
Data Rate	64 Kbps	64 Kbps	64 Kbps
FER	10 %	10 %	10 %
UL Loading	65 %	65 %	65 %
Cell Edge Reliability	90 %	90 %	90 %
Area Reliability	96 %	96 %	97 %
Log-Normal Fading Std	12 dB	10 dB	8 dB
Log-Normal Fading Margin	15.4 dB	12.8 dB	10.3 dB
In-Building Penetration	18 dB	15 dB	12 dB
Body Loss	1 dB	1 dB	1 dB
Soft Handover Gain @ 50% Correlation	3 dB	3 dB	3 dB
Eb/No Required	4.3 dB	4.3 dB	4.3 dB
Node B Parameters			
Node B Antenna Gain	18 dBi	18 dBi	18 dBi
Node B Cable Losses	3 dB	3 dB	3 dB
Node B Noise Figure	4 dB	4 dB	4 dB
Thermal Noise Floor	-173.8 dBm/Hz	-173.8 dBm/Hz	-173.8 dBm/Hz
Rise Over Thermal at Node B	4.6 dB	4.6 dB	4.6 dB
Interference Noise Power	-99.4 dBm	-99.4 dBm	-99.4 dBm
Rx Sensitivity	-112.9 dBm	-112.9 dBm	-112.9 dBm
UE Parameters			
UE Tx Power (mW)	126 mW	126 mW	126 mW
UE Tx Power (dBm)	21 dBm	21 dBm	21 dBm
UE Antenna Gain	0 dB	0 dB	0 dB
UE Tx EIRP	21 dBm	21 dBm	21 dBm
Max Path Loss	117.5 dB	123.1 dB	128.6 dB
Cell Radius	500 m	825 m	2.037 Km

Πίνακας 6.1

Στην προτελευταία γραμμή φαίνεται η μέγιστη αποδεκτή απώλεια στην ισχύ του σήματος λόγω ελεύθερης διάδοσης και η απόσταση στην οποία αυτή αντιστοιχεί σύμφωνα με τις συστάσεις του Rec. ITU-R M.1225 for UMTS για την κατηγορία χρηστών Outdoor to Indoor and Pedestrian.

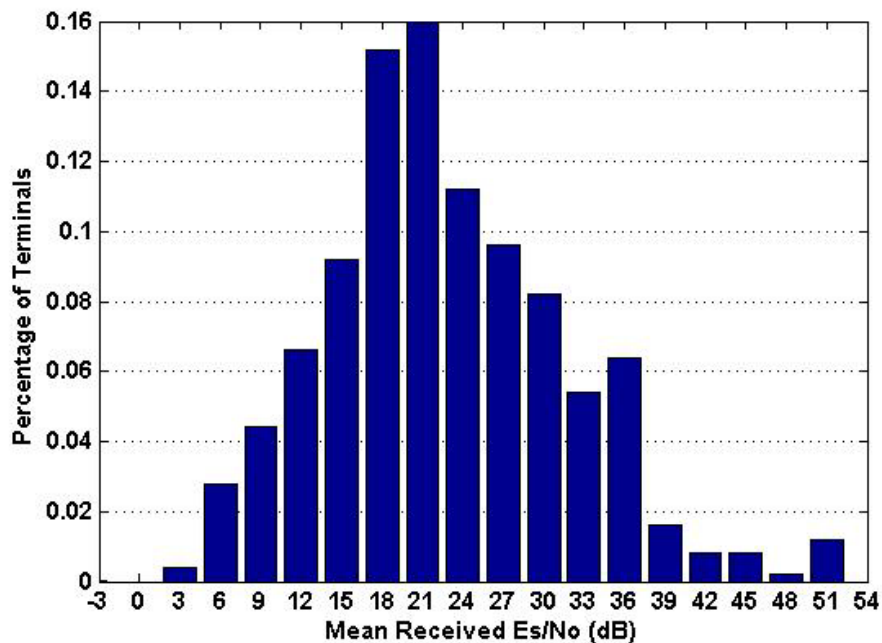
6.2 Κατανομή της μέσης ισχύς λήψης μέσα στην κυψέλη

Ένα διάγραμμα τυπικών μέσων E_s/N_0 που απολαμβάνουν οι χρήστες στο HSDPA ως συνάρτηση της απόστασής τους από το σταθμό βάσης φαίνεται στην εικόνα 6.1. Για τον υπολογισμό της εξασθένισης λόγω ελεύθερης διάδοσης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Rec. ITU-R M.1225 for UMTS για την κατηγορία χρηστών Outdoor to Indoor and Pedestrian.



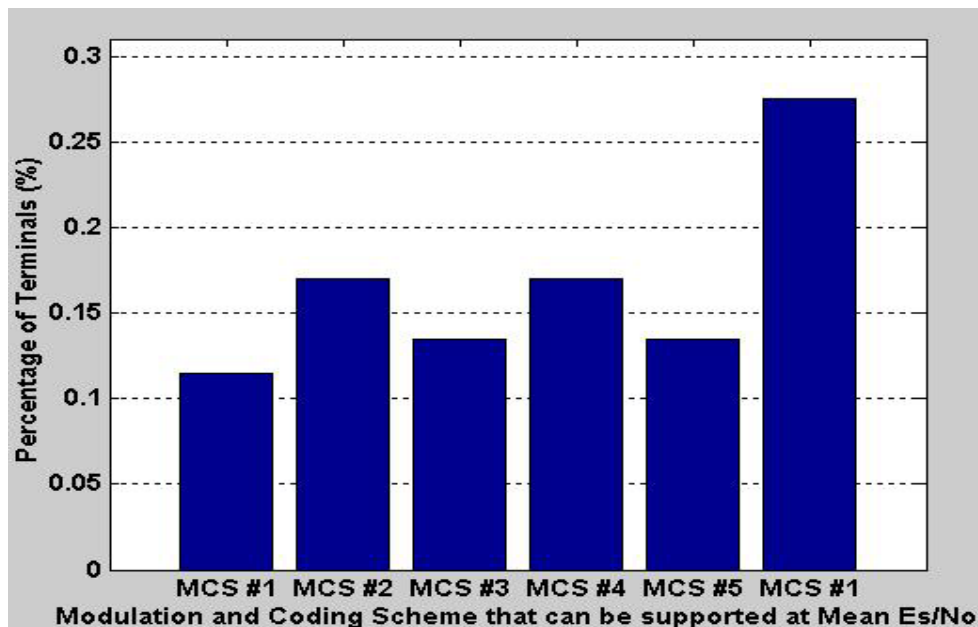
Εικόνα 6.1

Η μέση ισχύς λήψης (E_s/N_0), ανά χρήστη, για μια κυψέλη αυτής της διαμέτρου έχει μια ενδεικτική κατανομή που φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 6.2:



Εικόνα 6.2

Το MCS που μπορεί να υποστηρίξει κάποιος χρήστης σύμφωνα με το μέσο E_s/N_0 (αφού το E_s/N_0 αυτού μεταβάλλεται με το χρόνο λόγω κίνησης του χρήστη ή αντικειμένων του περιβάλλοντα χώρου του) αυτού έχει μια ενδεικτική κατανομή η οποία φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 6.3 :

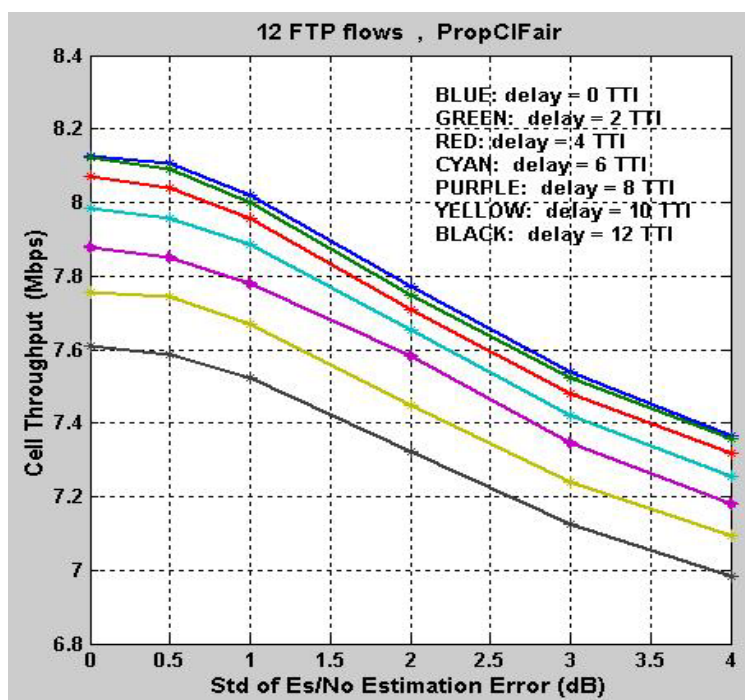


Εικόνα 6.3

6.3 Επίδραση σφαλμάτων εκτίμηση της λαμβανόμενης ισχύς στις επιδόσεις των αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης

Όπως αναφέραμε και νωρίτερα η εκτίμηση της λαμβανόμενης ισχύς του σήματος κάθε χρήστη δεν είναι τέλεια. Από την στιγμή που θα γίνει η εκτίμηση μέχρι την στιγμή που θα γίνει μια εκπομπή με βάση την εκτίμηση αυτή, υπάρχει μια καθυστέρηση που οφείλεται στην λειτουργία του MAC πρωτοκόλλου του HSDPA. Επίσης, για λόγους που έχουμε επίσης αναφέρει, υπάρχει και κάποιο σφάλμα στην μέτρηση της λαμβανόμενης ισχύς (γι αυτό και λέμε ότι έχουμε εκτίμηση και όχι μέτρηση της λαμβανόμενης ισχύς). Το μέγεθος του σφάλματος και της καθυστέρησης στην εκτίμηση επιδρά στην ορθότητα λήψης των αποφάσεων χρονοδρομολόγησης και άρα στις

επιδόσεις του συστήματος. Μια άποψη για το μέγεθος της επίδρασης φαίνεται στα διαγράμματα των εικόνων 6.3 και 6.4.

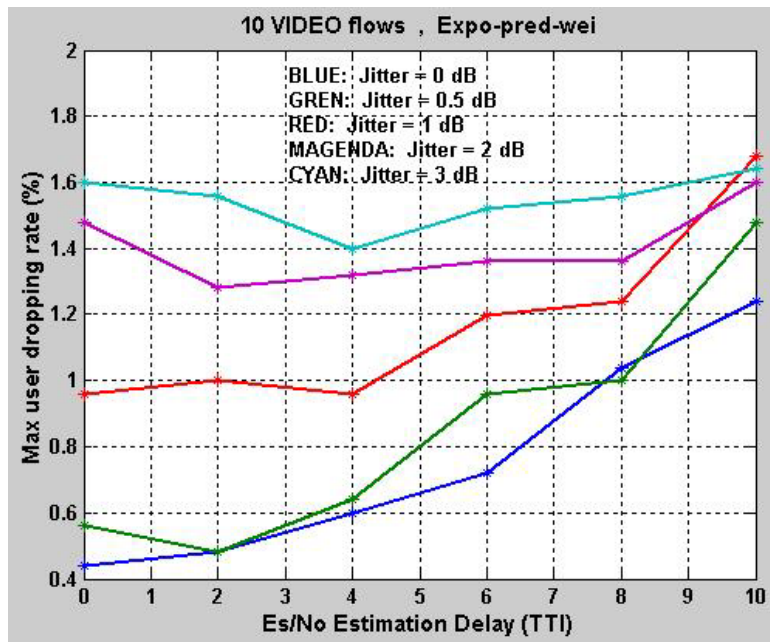


Εικόνα 6.3

Το διάγραμμα της εικόνας 6.3 αντιστοιχεί σε ένα σενάριο με 10 FTP χρήστες των οποίων η μέση λαμβανόμενη ισχύς είναι 22.8 , 9.86 , 22.7 , 22.1 , 1.62 , 6.86 , 29.7 , 6.08 , 19.1 , 25.4 , 44.3 και 15.4 dB αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο PropCIFair. Όπως βλέπουμε, καθυστέρηση στην εκτίμηση μέχρι 4 TTI (8 msec) και τυπική απόκλιση (γκαουσιανού, όπως έχουμε μοντελοποιήσει) σφάλματος μέχρι 1 dB δεν ελαττώνουν κατά πολύ την συνολική ρυθμαπόδοση του

συστήματος. Περαιτέρω καθυστερήσεις και μέγεθος σφάλματος όμως μπορούν να προκαλέσουν σημαντική ελάττωση των επιδόσεων.

Το διάγραμμα της εικόνας 6.4 αντιστοιχεί σε ένα σενάριο με 10 VIDEO χρήστες των οποίων η μέση λαμβανόμενη ισχύς είναι 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23 dB αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος



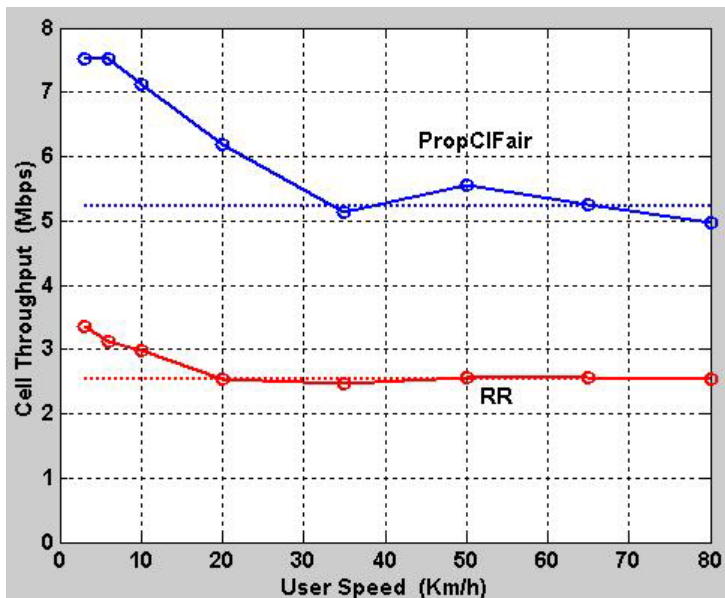
Εικόνα 6.4

χρονοδρομολόγησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο Expo-pred-wei. Όπως παρατηρούμε, για χαμηλές τιμές στην τυπική απόκλιση του σφάλματος (≤ 1 dB) η καθυστέρηση στην εκτίμηση μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις επιδόσεις του συστήματος. Αντίθετα, για μεγαλύτερες τιμές σφάλματος οι επιδόσεις είναι σχεδόν ανεπηρέαστες από την καθυστέρηση. Επίσης, για τιμές τυπικής απόκλισης μέχρις 0.5 dB οι επιδόσεις μεταβάλλονται ελάχιστα, ενώ για τιμές από 1 dB και πάνω έχουμε σημαντική ελάττωση των επιδόσεων.

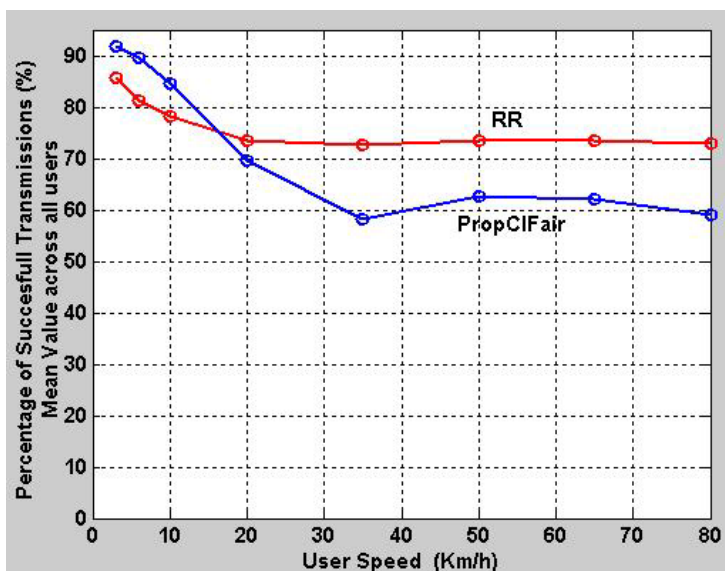
6.4 Επίδραση της ταχύτητας χρήστη στις επιδόσεις των αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης

Στην συνέχεια εξετάζουμε την επίδραση της ταχύτητας των χρηστών στις επιδόσεις των αλγορίθμων. Εξετάζουμε δύο σενάρια. Στο πρώτο έχουμε επιλέξει τους αλγορίθμους PropCIFair και RR, τον πρώτο ως καλύτερο εκπρόσωπο της κατηγορίας Best-Effort αλγορίθμων και τον δεύτερο γιατί δεν λαμβάνει υπόψη την κατάσταση των ζευξέων στην χρονοδρομολόγηση. Το σενάριο αυτό περιλαμβάνει 12 FTP χρήστες, των οποίων το μέσο Es/No είναι 4 dB, 6 dB, 8 dB, 10 dB, 12 dB, 14 dB, 16 dB, 18 dB, 20 dB, 22 dB, 24 dB και 26 dB, αντίστοιχα.. Στο δεύτερο σενάριο επιλέξαμε τους Expo-pred-wei και CD_EDD_balanced ως εκπρόσωπους της κατηγορίας των QoS-based αλγορίθμων. Το σενάριο περιλαμβάνει 8 VIDEO και 4 FTP χρήστες, των οποίων το μέσο Es/No είναι 5 dB, 8 dB, 10 dB, 13 dB, 16 dB, 19 dB, 22 dB, 25 dB, 7 dB, 14 dB, 21 dB και 28 dB αντίστοιχα. Και στα δύο σενάρια έχουμε θεωρήσει ένα σφάλμα μέτρησης των Es/No το οποίο ακολουθεί κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με 1 dB. Επίσης, καθυστέρηση μεταξύ του μετρούμενου και του πραγματικού Es/No θεωρείται ίση με 3 TTI (δηλαδή ίση με 6 msec). Όλοι οι χρήστες έχουν την ίδια ταχύτητα η οποία κυμαίνεται από 3 έως 80 Km/h.

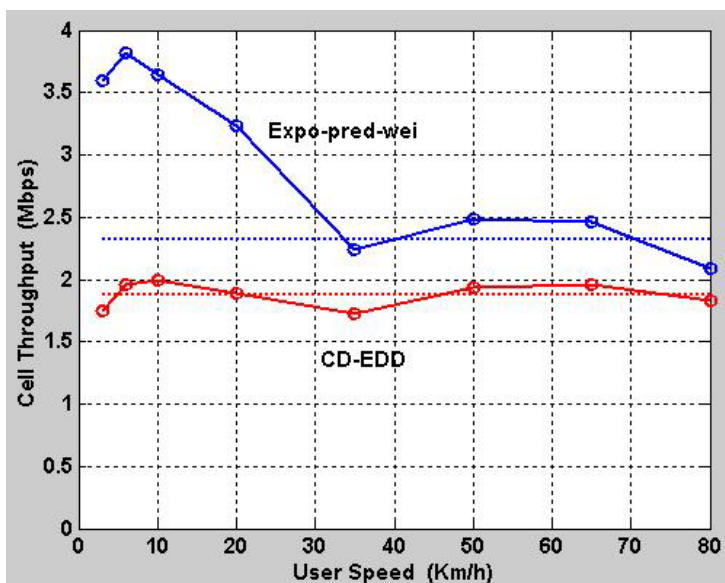
Η συνολική ρυθμαπόδοση της κυψέλης για κάθε αλγόριθμο και για διαφορετικές ταχύτητες χρηστών, στο πρώτο σενάριο, φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 6.5 (συμπαγείς γραμμές). Παρατηρούμε ότι, αρχικά, όσο η ταχύτητα αυξάνεται τόσο ελαττώνεται και η ρυθμαπόδοση της κυψέλης και για τους δύο αλγορίθμους. Αυτό είναι κάτι αναμενόμενο αφού η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε ολοένα και πιο γρήγορες μεταβολές στην κατάσταση του καναλιού και άρα ολοένα και λιγότερο αξιόπιστες αναφορές σχετικά με την κατάσταση της ζεύξης κάθε χρήστη φθάνουν στον σταθμό βάσης. Από κάποια ταχύτητα και πάνω η υποβάθμιση της ποιότητας των αναφορών δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ταχύτητα και ουσιαστικά μένει σχεδόν σταθερή



Εικόνα 6.5



Εικόνα 6.6



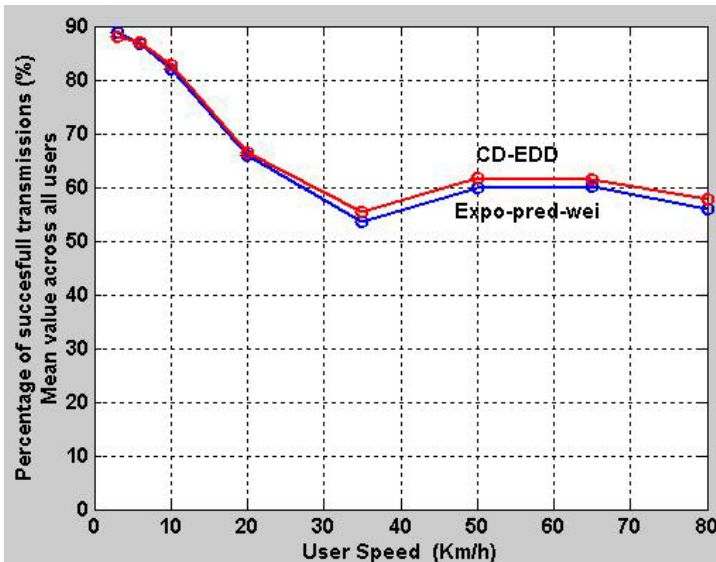
Εικόνα 6.7

γύρω από μια μέση τιμή (διακεκομμένες γραμμές). Αυτό συμβαίνει γιατί οι μεταβολές στις ζεύξεις γίνονται τόσο γρήγορα ώστε οι αναφορές δεν συσχετίζονται καθόλου με την τρέχουσα κατάσταση των ζεύξεων. Έτσι, περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας δεν επιδυνώνει την κατάσταση. Η ταχύτητα πάνω από την οποία συμβαίνει αυτό είναι γύρω στα 35 Km/h για τον PropCIFair και γύρω στα 20 Km/h για τον RR. Αυτή η μέση τιμή είναι μικρότερη από την τιμή της συνολικής ρυθμαπόδοσης για ταχύτητα 3 Km/h κατά 24% και 30% για τους Round Robin και PropCIFair, αντίστοιχα.. Αυτό δείχνει μια εξάρτηση του PropCIFair από τις αναφορές για την κατάσταση των ζεύξεων, το οποίο είναι αναμενόμενο. Παρόμοια εξάρτηση, μικρότερη όμως, φαίνεται να εμφανίζει και ο RR, κάτι το οποίο δεν είναι αναμενόμενο αφού ο RR δεν λαμβάνει υπόψη την κατάσταση των ζεύξεων για να αποφασίσει ποιος χρήστης θα μεταδώσει.

Στο σχήμα της εικόνας 6.6 βλέπουμε το ποσοστό των επιτυχημένων μεταδόσεων του σταθμού βάσης για καθένα από τους δύο αλγόριθμους. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα των χρηστών τόσο πιο αναξιόπιστες είναι οι αναφορές σχετικά με την κατάσταση των ζεύξεων και έτσι τόσο ελαττώνεται και το ποσοστό των επιτυχημένων μεταδόσεων (ως προς τον συνολικό αριθμό μεταδόσεων). Αξιοσημείωτο είναι ότι για ταχύτητες μεγαλύτερες των 15 Km/h ο PropCIFair παρουσιάζει μεγαλύτερο ποσοστό αποτυχημένων μεταδόσεων από τον RR, αλλά παρόλα αυτά διατηρεί μεγαλύτερη συνολική ρυθμαπόδοση. Η μεγαλύτερη πτώση στο ποσοστό αυτό του PropCIFair οφείλεται στην μεγάλη εξάρτηση των αποφάσεων του αλγορίθμου από την πληροφορία που έχει για την κατάσταση των ζεύξεων.

Η συνολική ρυθμαπόδοση της κυψέλης για κάθε αλγόριθμο και για διαφορετικές ταχύτητες χρηστών, στο δεύτερο σενάριο, φαίνεται στο σχήμα της εικόνας

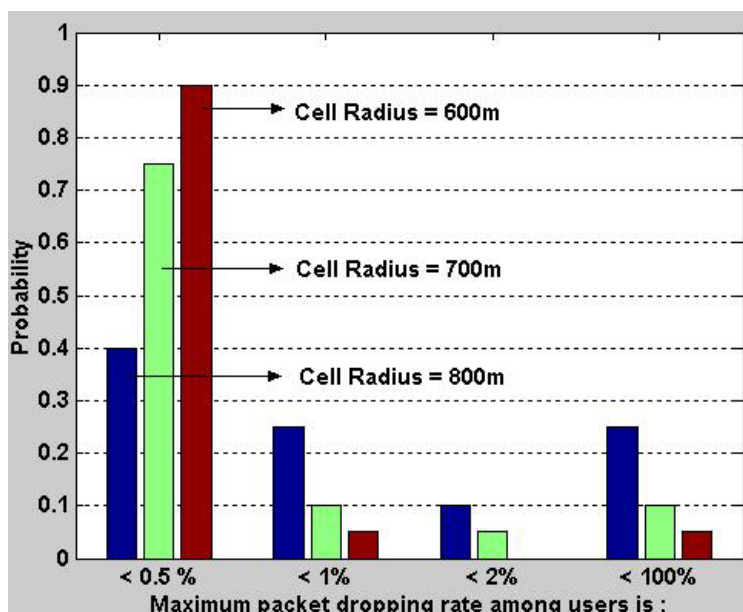
6.7 (συμπαγείς γραμμές). Παρατηρούμε ότι η ρυθμαπόδοση του Expo-pred-wei πέφτει καθώς η ταχύτητα αυξάνεται μέχρι τα 35 Km/h και στην συνέχεια σταθεροποιείται γύρω από 2.32 Mbps, δηλαδή 36% χαμηλότερα από την ρυθμαπόδοσή του στα 3 Km/h. Αντίθετα, ο CD_EDD, παρά την χαμηλότερη ρυθμαπόδοση που επιτυγχάνει, δείχνει να μην επηρεάζεται σημαντικά από την ταχύτητα των χρηστών. Οι επιδόσεις του μένουν σχεδόν σταθερές για ταχύτητες από 3 έως 80 Km/h. Την ίδια στιγμή παρατηρούμε στο σχήμα της εικόνας 6.8 ότι τα ποσοστά επιτυχημένων μεταδόσεων βρίσκονται στα ίδια επίπεδα για τους δύο αλγορίθμους και για όλες τις ταχύτητες χρηστών. Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι: α) η εξάρτηση της επιτυχίας των μεταδόσεων από την αξιοπιστία της πληροφορίας σχετικά με την κατάσταση των ζεύξεων είναι όπως παρατηρούμε κοινή και στους δύο αλγορίθμους, και β) η εξάρτηση της ρυθμαπόδοσης από την αξιοπιστία της πληροφορίας σχετικά με την κατάσταση των ζεύξεων είναι πολύ μεγαλύτερη στον Expo-pred-wei από ότι στον CD_EDD. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στον CD_EDD το ένα μεγάλο μέρος της ρυθμαπόδοσης (γύρω στο 40%-50%) οφείλεται στους VIDEO χρήστες, ενώ το υπόλοιπο δεν στηρίζεται στην επιλογή στιγμών μετάδοσης με πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στον Expo-pred-wei.



Εικόνα 6.8

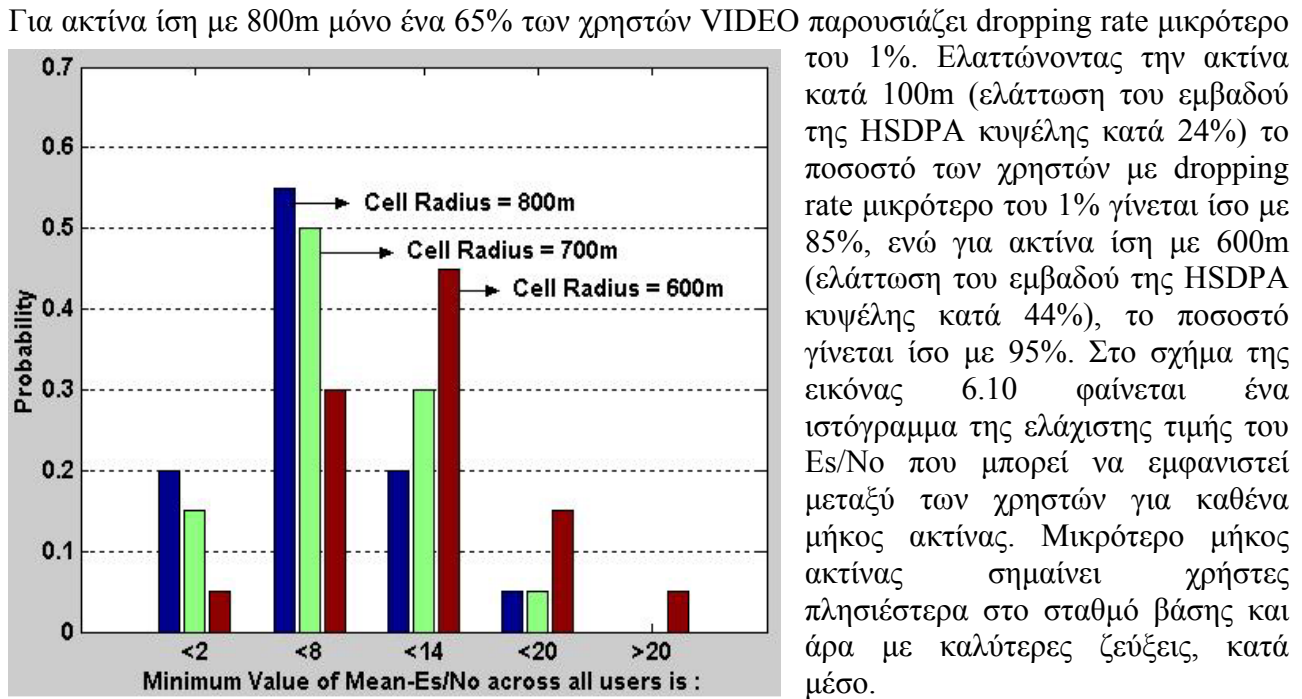
6.5 Επίδραση της ακτίνας της κυψέλης στις επιδόσεις της HSDPA

Στην συνέχεια ακολουθεί μια μικρή μελέτη της επίδρασης της ακτίνας της HSDPA κυψέλης στις επιδόσεις του συστήματος. Καταρχάς, θεωρούμε ένα σενάριο 15 χρηστών VIDEO, στο οποίο ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για χρονοδρομολόγηση είναι ο Expo-pred-wei. Επίσης, θεωρούμε τρεις διαφορετικές ακτίνες για μια HSDPA κυψέλη : 800m, 700m και 600m. Η HSDPA κυψέλη



Εικόνα 6.9

μπορεί να ταυτίζεται με μια UTMIS κυψέλη, αλλά μπορεί και να καλύπτει μόνο τμήμα αυτής (ελαττώνοντας την ισχύ στον καθοδικό κανάλι ελέγχου της HSDPA δεν επιτρέπουμε την χρήση του HS-DSCH σε χρήστες που βρίσκονται πέρα από κάποια απόσταση από το σταθμό βάσης). Χρησιμοποιώντας 20 διαφορετικές ρίζες για την γεννήτρια τυχαίων αριθμών παράγουμε 20 σενάρια τυχαία κατανομημένων χρηστών για καθεμία από τις ακτίνες κυψέλης. Ένα ιστόγραμμα κατανομής του μέγιστου dropping rate που υφίστανται οι χρήστες σε όλα τα σενάρια παρουσιάζεται στο σχήμα της εικόνας 6.9 για κάθε τιμή της ακτίνας.



Η επιλογή της ακτίνας της HSDPA κυψέλης αποτελεί ένα συμβιβασμό μεταξύ: α) των υποχρεώσεων του παροχέα κινητών υπηρεσιών (τί ποσοστό κάλυψης απαιτείται, αν απαιτείται, να επιτυγχάνει), β) του φορτίου του δικτύου (χαμηλό φορτίο οδηγεί τον παρόχέα σε αύξηση της ακτίνας της HSDPA κυψέλης ώστε να προσθέσει και άλλους χρήστες στο σύστημα) και, γ) την αποδοτικότητα αξιοποίησης του φάσματος (πολλοί HSDPA χρήστες με χαμηλές τιμές στο Es/No μπορεί να καταναλώνουν πολλούς πόρους του συστήματος για να πετύχουν πολύ μικρές ρυθμαποδόσεις κάτι το οποίο συνήθως δεν είναι ούτε δίκαιο αλλά ούτε και οικονομικά συμφέρον).

7. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Όπως είδαμε, για να αξιοποιήσουμε στο μέγιστο βαθμό την χωρητικότητα του καναλιού καθόδου, η HSDPA αρχιτεκτονική θα πρέπει να συνοδεύεται από έναν έξυπνο αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης. Ο κύριος και διπλός στόχος ενός τέτοιου αλγορίθμου είναι η παράλληλη μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης και διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσιών των χρηστών. Οι Best-Effort αλγόριθμοι αποδείχθηκαν (κεφάλαιο 4) αρκετά αποδοτικοί όσον αφορά την μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης στην κυψέλη αλλά αδυνατούν χειριστούν σύνθετες καταστάσεις διαφάλισης ποιότητας υπηρεσιών. Η εφαρμογή τους είναι ελκυστική μόνο κάτω από ορισμένα σενάρια δικτυακής κίνησης και μάλιστα σενάρια τα οποία δεν περιλαμβάνουν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Από την άλλη, οι QoS-based αλγόριθμοι εμφανίζονται ικανότεροι στον χειρισμό υπηρεσιών πραγματικού χρόνου και στην διασφάλιση μιας ελάχιστης ποιότητας εξυπηρέτησης για κάθε χρήστη (κεφάλαιο 5). Το κύριο μειονέκτημα των αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης που έχουν προταθεί μέχρι τώρα αδυνατούν να πετύχουν αυτό το διπλό στόχο που αναφέραμε παραπάνω κάτω από ένα εύρος σεναρίων δικτυακής κίνησης. Στην εργασία αυτή προτείναμε ένα νέο αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης (Expro-pred-wei) και δείξαμε ότι παρουσιάζει μεγάλη ευρωστία στα σενάρια κίνησης. Ο Expro-pred-wei, σύμφωνα με τις προσομοιώσεις μας, παρουσιάζει εξαιρετικές επιδόσεις κάτω από αρκετά σενάρια κίνησης τα οποία περιλαμβάνουν περιπτώσεις υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, μη πραγματικού χρόνου ή και συνδυασμού αυτών των δύο. Τέλος, όπως είδαμε (κεφάλαιο 6), σημαντική είναι και η υλοποίηση της αρχιτεκτονικής με τέτοιο τρόπο ώστε οι μηχανισμοί μετρήσεων οι οποίοι χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης να δίνουν γρήγορες και ακριβείς μετρήσεις. Σε αντίθετη περίπτωση, η επίδοση του αλγορίθμου χρονοδρομολόγησης μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά, ανάλογα πάντοτε με τον αλγόριθμο και το είδος κίνησης που εξυπηρετείται από αυτόν.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η διαχείριση των πόρων ενός συστήματος που υλοποιεί την HSDPA αρχιτεκτονική απαιτεί ένα εύρωστο και αποδοτικό αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης αλλά ταυτόχρονα αποτελεί και μια σύνθετη διαδικασία η οποία δεν περιορίζεται στην χρονοδρομολόγηση πακέτων για υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου. Η αποδοτική χρήση της HSDPA απαιτεί και την περαιτέρω μελέτη κάποιων επιπλέον στοιχείων τα οποία αναφέρονται συνοπτικά στην συνέχεια:

- Η απόδοση και οι παράμετροι λειτουργίας ενός αλγορίθμου χρονοδρομολόγησης εξαρτώνται άμεσα από τις παραμέτρους λειτουργίας της HSDPA (π.χ καθυστέρηση ανάδρασης της εκτίμησης του καναλιού, ταχύτητα κίνησης των χρηστών, διαθέσιμη ισχύς εκπομπής στο HS-DSCH, LOS/NLOS ζεύξη κινητού-σταθμού βάσης, κ.α). Όμως η HSDPA είναι ένα σύστημα στο οποίο οι παράμετροι λειτουργίας μπορεί να διαφέρουν από δίκτυο σε δίκτυο αλλά και από κυψέλη σε κυψέλη. Ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης θα πρέπει να προσαρμόζεται σε τέτοιες αλλαγές με σκοπό την βέλτιστη λειτουργία του.
- Η αρχιτεκτονική HSDPA σχεδιάστηκε έτσι ώστε να υποστηρίζει ταυτόχρονη μετάδοση σε περισσότερους του ενός χρήστες με σκοπό την πλήρη αξιοποίηση του καναλιού καθόδου, όταν αυτό δεν μπορεί να γίνει από ένα χρήστη μόνο. Η δυνατότητα αυτή θα πρέπει να αξιοποιηθεί αν θέλουμε να πετύχουμε την μέγιστη δυνατή ρυθμαπόδοση στο κανάλι καθόδου.

- Οι υψηλές επιδόσεις ενός αλγορίθμου χρονοδρομολόγησης στην διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας κάθε χρήστη οφείλεται στην ικανότητα αυτού για αρκετά καλή αξιοποίηση της χωρητικότητας του καναλιού (αξιοποίηση των μεταβολών της κατάστασης των ζεύξεων). Η ικανοποιητική όμως λειτουργία του αλγορίθμου χρονοδρομολόγησης στηρίζεται στην υπόθεση ότι το φορτίο το οποίο καλείται να εξυπηρετήσει (όγκος δεδομένων και απαιτήσεις σε καθυστέρηση) δεν είναι μεγαλύτερο από την χωρητικότητα του καναλιού. Για να εξασφαλίσουμε κάτι τέτοιο χρειάζεται ένας μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης, ο οποίος θα απορρίπτει νέους χρήστες των οποίων η ποιότητα εξυπηρέτησης όχι μόνο δεν μπορεί να εγγυηθεί αλλά θα οδηγήσει την ποιότητα εξυπηρέτησης και άλλων, ήδη υπό εξυπηρέτηση, χρηστών κάτω από την ελάχιστη αποδεκτή. Ο αλγόριθμος ελέγχου πρόσβασης είναι άμεσα εξαρτώμενος από τον αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης που χρησιμοποιείται στο ίδιο σύστημα και το κατά πόσο αποδοτικά αξιοποιεί ο τελευταίος την χωρητικότητα του καναλιού καθόδου.
- Η δυνατότητα της HSDPA για ενσωμάτωση της υπηρεσίας τηλεφωνικής συνομιλίας είναι μια πρόταση που έχει γίνει με σκοπό την ολοκλήρωση όλων των υπηρεσιών κάτω από ένα κοινό πλαίσιο διαχείρισης πόρων και ίσως την πιο αποδοτική αξιοποίηση των δυνατοτήτων της HSDPA.

Συντομογραφίες :

3GPP = 3 rd Generation Partnership Project	ITU = International Telecommunications Union
AMC = Adaptive Modulation and Coding	MAC = Medium Access Control
AMR = Adaptive Multi-Rate	MCS = Modulation and Coding Scheme
ARIB = Association of Radio Industry Business	MMS = Multimedia Message Service
BER = Bit Error Rate	MS = Mobile Station
BLER = Block Error Rate	NRT = Non Real Time
BPSK = Binary Phase Shift Keying	PoC = Push-to-talk Over Cellular
BS = Base Station	PS = Packet Switched
CC= Chase Combining	PSTN = Public Switch Telephone System
CDMA = Code Division Multiple Access	QAM = Quadrature Amplitude Modulation
CIR = Carrier-to-Interference Ratio	QoS = Quality of Service
CQI = Channel Quality Indicator	QPSK = Quadrature Phase Shift Keying
CRC = Cyclic Redundancy Code	RAN = Radio Access Network
CS = Circuit Switched	RLC = Radio Link Control
dB = decibel	RNC = Radio Network Controller
DCH = Dedicated Channel	RT = Real Time
DL = Downlink	SAW = Stop and Wait
DPCH = Dedicated Physical Channel	SC = Soft Combining
DS-CDMA = Direct Sequence CDMA	SINR = Signal to Noise plus Interference Ratio
DTX = Discontinuous Transmission	SIR = Signal to Interference Ratio
EIRP = Effective Isotropic Radiation Power	SF= Spreading Factor
ETSI = European Telecommunications Standards Institute	SMS = Short Message Service
FER = Frame Error Rate	TCP = Transport Control Protocol
FIFO = First In First Out	TDD = Time Division Duplexing
FDD = Frequency Division Duplexing	TFCI = Transport Format Combination Indicator
FTP = File Transfer Protocol	TTI = Transmission Time Interval
GPRS = General Packet Radio System	VAD = Voice Activity Detection
GSM = Global System for Mobile communications	VoIP = Voice over IP
HARQ = Hybrid Automatic Repeat Request	UDP = User Datagram Protocol
HLR = Home Location Register	UE = User Equipment
HOL = Head Of Line	UL = Uplink
HSDPA = High Speed Downlink Packet Access	UMTS = Universal Mobile Telecommunication System
HS_DSCH = High Speed Downlink Shared Channel	USIM = UMTS Subscriber Identity Module
IMT = International Mobile Telephony	UTRAN = UMTS Terrestrial RAN
IR = Incremental Redundancy	WCDMA = Wideband Code Division Multiple Access
ISDN = Integrated Services Digital Network	

Βιβλιογραφία / Αρθρογραφία :

- [1]. “UMTS Overview” , Ericsson, Techical Report, ERA/UX/T-99:108, 1999
- [2]. “WCDMA for UMTS”, Harri Holma and Anti Toskala, John Wiley & Sons, 3rd Edition, 2004
- [3]. “System Description UMTS – UMTS PLMN”, A50016-D1701-V11-2-7618, Siemens AG, 2001
- [4]. “An overview of CDMA evolution towards Wideband CDMA”, Ramjee Prasad and Tero Ojanpera, IEEE Communications Surveys, Fourth Quarter 1998, vol.1, No.1
- [5]. 3GPP Technical Report TR 25.858 v5.0.0 (2002-03), High Speed Downlink Packet Access: Physical Layer Aspects (Release 5)
- [6]. “WCDMA Evolved: The first step – HSDPA” , White Paper, ERICSSON, May 2004
- [7]. “Nokia High Speed Packet Access Solution” , White Paper, NOKIA , 2004
- [8]. “3G Evolution Towards High Speed Downlink Packet Access”, White Paper, ALCATEL, 4th quarter 2003-1st quarter 2004
- [9]. “HSDPA for Improved Downlink Data Transfer”, White Paper, QUALCOMM CDMA Technologies, October 2004
- [10]. “Evolving WCDMA”, Tomas Hedberg and Stefan Parkvall, Ericsson Review N.2, 2000
- [11]. “More for Less”, HSDPA 3G, issue `6 – June 2004 , www.lucent.com
- [12]. “HSDPA and Beyond”, Nortel Networks, White Paper, 2005
- [13]. “Packet Scheduling and Quality of Service in HSDPA”, Pablo Jose and Ameigeiras Guitierrez, Ph.D Thesis, Aalborg University, October 2003
- [14]. “Performance and Modeling of WCDMA/HSDPA Transmission/H-ARQ Schemes”, F. Fraderiksen and T.E. Kolding, in Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), September 2002
- [15]. 3GPP Technical Specification 25.331
- [16]. 3GPP Technical Specification 25.214
- [17]. 3GPP Technical Specification 25.306, UE Radio Access Capabilities, version 5.1.0, June 2002
- [18]. “Throughput of High Speed Downlink Packet Access for UMTS”, T.J. Mousley, Conference on 3G Mobile Communication Technologies, Conf. Publ. No.477, March 2001
- [19]. “Performance study of the high speed downlink packet access (HSDPA) in a WCDMA network”, Eeva Poutiainen, Raymond Kwan, Seppo Hamalainen and Peter Chong, CDMA International Conference (CIC) , Nov. 2001
- [20]. “A Throughput Study for the High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) with different multicode selections in a WCDMA network”, Raymond Kwan, Eeva Poutiainen, Peter Chong and Seppo Hamalainen, Finnish Wireless Communication Workshop (FWCW) , Oct-Nov. 2001
- [21]. “Performance of the Medium Access Control Protocol for the High Speed Downlink Packet Access”, Gregory Manuel and Mika Rinne, IASTED international conference on Communication Systems and Networks, September 2003
- [22]. “High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) – A Means of Increasing Downlink Capacity in WCDMA Cellular?” , Ingo Forkel and Hartmut Klenner, 5th European Wireless Conference, February 2004
- [23]. “Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000” , Rec. ITU-R M.1225, 1997

- [24]. "Wireless Communications : Principles and Practice", Theodore Rappaport, Prentice Hall, Second Edition 2002
- [25]. "VHF/UHF/Microwave Radio Propagation: A Primer for Digital Experimenters" , Barry McLarnon, Available at: http://www.ictp.trieste.it/~radionet/2000_school/lectures/carlo/linkloss/index
- [26]. "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part I : Characterization", Bernard Sklar, IEEE Communications Magazine, July 1997
- [27]. Microwave Mobile Communications, W.C. Jakes, Piscataway, NJ, IEEE Press, 1994
- [28]. "Limitations of Sum-of-Sinusoids Fading Channel Simulators", Marius F. Pop and Norman C. Beaulieu, IEEE Transactions on Communications, vol.49, no.4, April 2001
- [29]. "Performance Aspects of WCDMA Systems with High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)", Troels E. Kolding, Frank Frederiksen and Preben E. Mogensen, IEEE Vehicular Technology Conference, September 2002
- [30]. "Performance Evaluation of Modulation and Coding Schemes Proposed for HSDPA in 3.5G UMTS Networks", Troels E. Kolding, Frank Frederiksen and Preben E. Mogensen, Proc. of the Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), pp.307-312, vol.1, September 2001
- [31]. "Hybrid ARQ and Adaptive Modulation and Coding Schemes for High Speed Downlink Packet Access", Martin Döttling, Jürgen Michel and Bernhard Raaf, IEEE PIMRC 2002
- [32]. "Common HSDPA system simulation assumptions", Nokia, Ericsson, Motorola, TSG-R1 document, TSGR#15(00)1094, Berlin, Germany, 22-25th, August 2000
- [33]. "Evaluation Methods for High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)", Motorola, TSG-R1 document, TSGR#14(00)0909, Oulu, Finland, 4-7th, July 2000
- [34]. "HSDPA system performance based on simulation" , Motorola, 3GPP Technical Report, TSG RAN WG1, TSGR1#16(00)1240, Oct. 2000
- [35]. "Channel-Aware Soft Bandwidth Guarantee Scheduling for Wireless Packet Access", Hung-yu Wei and Rauf Izmailov, WCNC ' 2004, March 2004
- [36]. "Performance of UMTS High Speed Downlink Packet Access for Data Streaming Applications", T.J. Mousley, 3G Mobile Communication Technologies, Conference Publication No.489, May 2002
- [37]. "Evaluation of Scheduling Algorithms for a Web Browsing Service in WCDMA High Speed Downlink Shared Channel", Jonas Oberg, Master Thesis, Lulea University of Technology, Dep. of Computer Science and Electrical Engineering, 2002
- [38]. "Evolving WCDMA for Improved High Speed Mobile Internet", Stefan Parkvall, Janne Peisa, Anders Furuskar, Maria Samuelsson and Magnus Persson, Proceedings of Future Telecommunications Conference (FTC), Beijing, China, November 2001
- [39]. "Radio Link Performance of High-Speed Packet Transmission in HSDPA", Nobuhiko Miki, Akihito Morimoto, Sadayuki Abeta and Mamoru Sawahashi, 2002
- [40]. "Comparison of packet scheduling algorithms focusing on user throughput in high speed downlink packet", Yoshiaki Ofuji, Akihito Morimoto, Sadayuki Abeta and Mamoru Sawahashi, (Wireless Laboratories, NTT DoCoMo, Inc.), PIMRC 2002
- [41]. "Performance of WCDMA High Speed Packet Data", Anders Furuskar, Stefan Parkvall, Magnus Persson and Maria Samuelsson, 2002
- [42]. "Fast Scheduling Policies using WCDMA High Speed Downlink Packet Access", Michele Boaretto, Diego Angelini and Michele Zorzi, IEEE Vehicular Technology Conference, October 2003
- [43]. "Cross-layer Design for Wireless Networks", Sanjay Shakkottai, Theodore S. Rappaport and Peter C. Karlsson, WNGG Technical Report, Wireless Networking and Communications Group, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Texas at Austin, June 2003

- [44]. "Data Throughput of CDMA-HDR a High Efficiency-High Data Rate Personal Communication Wireless System", A. Jalali, R. Padovani and R. Pankaj, Proc. VTC-2000, Vol.3, Spring
- [45]. "Link and System Performance Aspects of Proportional Fair Scheduling in WCDMA/HSDPA", Troels E. Kolding, Vehicular Technology Conference, 2003, Fall
- [46]. Sanjay Shakkotai and Alexander L. Stolyar, "Scheduling Algorithms for a Mixture of Real-Time and Non-Real-Time Data in HDR", Proc. of 17th International Teletraffic Congress, (ITC-17), pp.793-804, September 2001
- [47]. "Providing Quality of Service over a Shared Wireless Link", Matthew Andrews, Krishnan Kumaran, Kavita Ramanan, Alexander Stolyar, Phil Whiting and Rajiv Vijayakumar, IEEE Communications Magazine, February 2001
- [48]. "CDMA Data QoS Scheduling on the Forward Link Variable Channel Conditions", Matthew Andrews, Krishnan Kumaran, Kavita Ramanan, Alexander Stolyar, Rajiv Vijayakumar and Phil Whiting, Bell Labs Technical Report, April. 2000
- [49]. "Scheduling for Multiple Flows Sharing a Time-Varying Channel: The Exponential Rule", Sanjay Shakkotai and Alexander Stolyar, Bell Labs Technical Report, December 2000
- [50]. "Channel-Quality Dependent Earliest Deadline Due Fair Scheduling Schemes for Wireless Multimedia Networks", Ahmed K.F. Khattab and Khaled M.F. Elsayed, ACM MSWiM, October 2004
- [51]. "CDMA/HDR: A Bandwidth-Efficient High-Speed Wireless Data Service for Nomadic Users", Paul Bender, Peter Black, Mathew Grob, Roberto Padovani, Nagabhushana Sindhushayana and Andrew Viterbi, QUALCOMM Incorporated, IEEE Communications, pp.70-77, July 2000
- [52]. "cdma2000 1xEV-DO: A 3G Wireless Internet Access System", Richard Parry, IEEE Potentials, July 2002
- [53]. "A comparison of Opportunistic Scheduling Algorithms for Streaming Media in High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA)", Arsalan Farrokhi, Florian Blomer and Vikram Krishnamurty, Second International Workshop on Multimedia Interactive Protocols and Systems, MIPS 2004
- [54]. "Dynamic Server Allocation to Parallel Queue with Randomly Varying Connectivity", L. Tassiulas and A. Ephremides, IEEE Trans. Info. Theory, vol.30, No.2, March 1993
- [55]. "Scheduling Real-Time Traffic with Deadlines Over a Wireless Channel", Proc. ACM Workshop on Wireless and Mobile Multimedia, S. Shakkotai and R. Srikant, Seattle, WA, August 1999

Παράρτημα Α : Παράμετροι προσομοίωσης

		Assumption	Comments
General Parameters			
Carrier Frequency		2 GHz	
Cell Range (min-max UE distance)		800 m	
Cellular Layout		Circular	A reasonable assumption for simulating a single cell.
HSDPA Parameters			
chip-rate		3.84 Mcps	
Spreading Factor		16	
Number of HS-DSCH multi-codes		15	
HS-DSCH/Node-B Power Ratio		80 %	
Frame (TTI) Length		2 msec	
MCS set		QPSK ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$) 16-QAM ($\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$)	
Channel Estimation Feedback Delay		0	
Channel Estimation Error Std		1 dB	
System Loading Factor		0.65	
Node B Parameters			
Node-B Tx Power		20 Watt	
BS Antenna Gain		18 dBi	
Cable Loss		3 dB	
Node-B antenna height		30 m	
Channel Parameters			
Propagation Model		Rec. ITU-R M.1225 for UMTS Outdoor to Indoor and Pedestrian users	
Shadow Fading	Model	Log-Normal	
	Std	7 dB	
Multipath Channel Model		Jake's Model	
Other losses (trees, car roof, walls,...)		4 + std (6)	
Mobility Parameters			
UE Speed		3 Km/h	
UE Mobility Model		local mobility	shadow fading doesn't change throughout simulation
H-ARQ Parameters			
ε		QPSK=0.93 , 16QAM=0.92	Pedestrian-A
η		(1.02,1.07,1.32,1.35,1.87)	Pedestrian-A
UE Parameters			
Thermal Noise Density		-174 dBm/Hz	
Rx Noise Figure		8 dB	
Body Loss		1 dB	
UE antenna Gain		0 dB	

UE antenna height	1.5 m	
Traffic Parameters		
Number of Users	Various	
Traffic Type	Various	
Mean data-rate request per user	-	

* Αυτές είναι οι κύριες παράμετροι που υλοποιούνται στις προσομοιώσεις της διατριβής. Σε οποιοδήποτε σημείο κάποια από αυτές αλλάζει θα αναφέρεται και δεν θα επαναλαμβάνονται όλες οι παράμετροι.

Παράρτημα Β : Jake's Implementation of Clarke's Model for Rayleigh Fading Channels

Ο Jakes ξεκινά την ανάπτυξη του μοντέλου του με μια έκφραση του λαμβανόμενου σήματος ως μια υπέρθεση κυμάτων (καθένα από τα οποία αναπαριστά την συνιστώσα του σήματος που προέρχεται από ένα συγκεκριμένο μονοπάτι) θέτοντας τις καθυστερήσεις κάθε μονοπατιού ίσες με μηδέν:

$$R(t) = E_o \cdot \sum_{n=1}^N C_n \cdot \sigma\upsilon\nu(\omega_c \cdot t + \omega_m \cdot t \cdot \sigma\upsilon\nu A_n + \phi_n)$$

, όπου ω_m είναι η μέγιστη μετατόπιση γωνιακής συχνότητας Doppler, ω_c η γωνιακή συχνότητα του μεταδιδόμενου σήματος, C_n είναι μια τυχαία μεταβλητή για την εξασθένιση του σήματος από το ν-οστό μονοπάτι και A_n μια τυχαία μεταβλητή για την γωνία άφιξης της ν-οστής συνιστώσας του σήματος ως προς την κατεύθυνση κίνησης του δέκτη ϕ_n . Κανονικοποιώντας το σήμα ώστε να έχει ισχύ μονάδα παίρνουμε :

$$R(t) = \sqrt{2} \cdot \sum_{n=1}^N C_n \cdot \sigma\upsilon\nu(\omega_c \cdot t + \omega_m \cdot t \cdot \sigma\upsilon\nu A_n + \phi_n)$$

Στην συνέχεια γίνεται η υπόθεση : $C_n = \frac{1}{\sqrt{N}}$ και χωρίζουμε τους όρους εντός του συνημιτόνου σε δύο μέρη:

$$R(t) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{N}} \cdot \sum_{n=1}^N \sigma\upsilon\nu[\omega_c \cdot t + (\omega_m \cdot t \cdot \sigma\upsilon\nu A_n + \phi_n)]$$

Αναπτύσσουμε την τελευταία σχέση χρησιμοποιώντας την τριγωνομετρική ταυτότητα:

$$\sigma\upsilon\nu(\alpha + \beta) = \sigma\upsilon\nu(\alpha) \cdot \sigma\upsilon\nu(\beta) - \eta\mu(\alpha) \cdot \eta\mu(\beta)$$

και παίρνουμε :

$$R(t) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{N}} \cdot \sum_{n=1}^N [\sigma\upsilon\nu(\omega_m \cdot t \cdot \sigma\upsilon\nu A_n + \phi_n) \cdot \sigma\upsilon\nu(\omega_c \cdot t) - \eta\mu(\omega_m \cdot t \cdot \sigma\upsilon\nu A_n + \phi_n) \cdot \eta\mu(\omega_c \cdot t)]$$

Δηλαδή, το σήμα μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει δύο ορθογώνιες συνιστώσες :

$$R_c(t) = \sum_{n=1}^N \sigma\upsilon\nu(\omega_m \cdot t \cdot \sigma\upsilon\nu A_n + \phi_n) \quad \text{και} \quad R_s(t) = \sum_{n=1}^N \eta\mu(\omega_m \cdot t \cdot \sigma\upsilon\nu A_n + \phi_n)$$

, αφού :

$$R(t) = R_c(t) \cdot \sigma\upsilon\nu(\omega_c \cdot t) + R_s(t) \cdot \eta\mu(\omega_c \cdot t)$$

Υποθέτοντας επίσης ότι : $A_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N}$, $n = 1, \dots, N$ και επιλέγοντας το N έτσι ώστε:

$N = 4 \cdot M + 2$, με το M να είναι φυσικός, ο αριθμός των διακριτών μετατοπίσεων συχνότητας Doppler ελαττώνεται από N σε M+1. Για να καταλάβουμε πως γίνεται αυτό θα θεωρήσουμε την

περίπτωση του R_c . Βγάζοντας την επίδραση του ϕ_n έξω από την παρένθεση του συνημιτόνου και αντικαθιστώντας το A_n έχουμε :

$$R_c(t) = \sum_{n=1}^{4 \cdot M+2} \sigma \nu B_n \cdot \sigma \nu \left(\omega_m \cdot t \cdot \sigma \nu \frac{2\pi \cdot n}{N} \right)$$

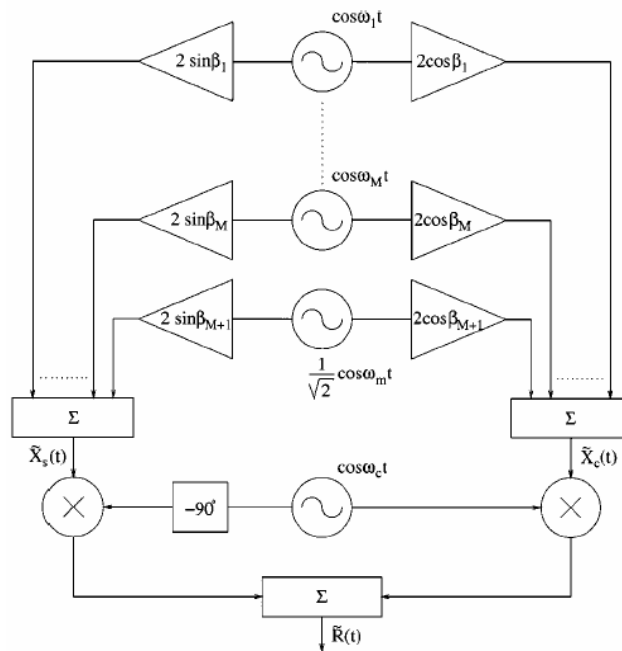
Η γωνιακή συχνότητα του συνημιτόνου είναι εξαρτημένη από το n και την ονομάζουμε ω_n .

$$R_c(t) = \sum_{n=1}^{4 \cdot M+2} \sigma \nu B_n \cdot \sigma \nu (\omega_n \cdot t)$$

Ο όρος αυτός, εκτός από τις γωνιακές συχνότητες 0 και π , μπορεί να περιέχει και επιπλέον τετράδες συχνοτήτων (ο συνολικός αριθμός των συχνοτήτων του R_c αυξάνεται κατά 4 κάθε φορά που το M μεγαλώνει κατά μια μονάδα) οι οποίες είναι συμμετρικές στον τριγωνομετρικό κύκλο (τετράδες του τύπου: $(\theta, \pi-\theta, \pi+\theta, -\theta)$). Εξαιτίας των σχέσεων:

$$\begin{aligned} \sigma \nu(-\theta) &= \sigma \nu(\theta) \\ \sigma \nu(\pi - \theta) &= -\sigma \nu(\theta) \\ \sigma \nu(\pi + \theta) &= -\sigma \nu(\theta) \end{aligned}$$

Όλες οι συχνότητες του R_c για $N > M+1$ μπορούν να παραχθούν από τις συχνότητες του R_c για $N < M+1$. Παρόμοια συμβαίνει και για το R_s , και άρα το σήμα μας μπορεί να δημιουργηθεί με την χρήση $M+1$ ταλαντωτών χαμηλής συχνότητας. Το μπλοκ διάγραμμα του προσομοιωτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (όπου έχουν παραληφθεί οι σταθερές κανονικοποίησης) :



, όπου οι ορθογώνιες συνιστώσες του δίνονται από τις σχέσεις:

$$\tilde{X}_c(t) = \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \left(\sqrt{2} \cdot \sigma \nu B_{m+1} \cdot \sigma \nu (\omega_m \cdot t) + 2 \cdot \sum_{n=1}^M \sigma \nu B_n \cdot \sigma \nu (\omega_n \cdot t) \right)$$

και :

$$\tilde{X}_s(t) = \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \left(\sqrt{2} \cdot \eta \mu B_{m+1} \cdot \sigma \nu (\omega_m \cdot t) + 2 \cdot \sum_{n=1}^M \eta \mu B_n \cdot \sigma \nu (\omega_n \cdot t) \right)$$

Παράρτημα Γ : Μοντελοποίηση του Hybrid ARQ στον προσομοιωτή του HSDPA

Η υλοποίηση της λειτουργίας του HARQ βασίζεται σε ένα μοντέλο το οποίο προτείνεται στο [14]. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, το εικονικό E_s/N_o που απολαμβάνει ένα μεταδιδόμενο πακέτο δίνεται από την σχέση:

$$\left(\frac{E_s}{N_o}\right)_{C,n} = \varepsilon^{n-1} \cdot \eta(ECR, M)_n \cdot \sum_{k=1}^n \left(\frac{E_s}{N_o}\right)_k$$

με:

$$\eta(ECR, M)_n = \begin{cases} \eta(ECR, M) & , \alpha\nu_n \geq 2 \\ 1 & , \alpha\lambda\lambda\iota\omega\tau\iota\kappa\alpha \end{cases}$$

και:

M = η τάξη του διαμορφωτή που χρησιμοποιείται στην τρέχουσα επανα/μετάδοση του πακέτου

ECR = το code-rate της πρώτης μετάδοσης

$\left(\frac{E_s}{N_o}\right)_{C,n}$ = το συνδυασμένο (ιδεατό) E_s/N_o μετά από n μεταδόσεις

ε = η αποδοτικότητα του Chase Combining (CC).

η = το κέρδος του Incremental Redundancy (IR). Η τιμή του “ η ” είναι μονάδα όταν χρησιμοποιείται μόνο CC.

Όπως είναι αναμενόμενο, σύμφωνα με τη σχέση αυτή η αποδοτικότητα του CC mode λειτουργίας του HARQ σε κάθε νέα επανεκπομπή είναι σταθερή, ενώ η αποδοτικότητα του IR σε κάθε νέα επανεκπομπή ελαττώνεται όσο αυξάνεται ο συνολικός αριθμός των επανεκπομπών. Οι τιμές των “ ε ” και “ η ” για BLER=10% , ταχύτητα χρήστη ίση με 3 Km/h και για τις περιπτώσεις χρηστών Ped-A και Veh-A έχουν εκτιμηθεί στο [14] και είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις μας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ : Πίνακες με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων

Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Χρήστης #8	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	27	12.5	5.15	25.1	15.5	6.7	20.9	18.8	1.1	20.8	-
Μέση Ρυθμαπόδοση	4.42 Mbps	0.11 Kbps	0	3.15 Mbps	47 Kbps	0	1.22 Mbps	452 Kbps	0	929 Kbps	10.23 Mbps
Μέσο Tx Rate	10.67 Mbps	5.52 Mbps	0	10.65 Mbps	8.94 Mbps	0	10.5 Mbps	10.35 Mbps	0	10.63 Mbps	10.61 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	42.5 %	0.004 %	0%	30.5 %	0.63 %	0	12.4 %	4.77 %	0 %	9.21 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	41.4 %	0.002	0%	29.6 %	0.53 %	0	11.6 %	4.35 %	0 %	8.73 %	96.2 %

Πίνακας E.1 : Ενότητα 4.4.1 – Max C/I – 10 χρήστες

Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	27	12.5	5.15	25.1	15.5	-
Μέση Ρυθμαπόδοση	1.81 Mbps	441 Kbps	114 Kbps	1.67 Mbps	644 Kbps	4.69 Mbps
Μέσο Tx Rate	9.41 Mbps	2.48 Mbps	661 Kbps	8.79 Mbps	3.67 Mbps	5 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	19.1 %	17.9 %	17.8 %	18.9 %	17.7 %	91.5 %

Πίνακας E.2 : Ενότητα 4.4.1 – Round Robin – 5 χρήστες

Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Χρήστης #8	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	27	12.5	5.15	25.1	15.5	6.7	20.9	18.8	1.1	20.8	-
Μέση Ρυθμαπόδοση	905 Kbps	217 Kbps	56 Kbps	838 Kbps	325 Kbps	80 Kbps	610 Kbps	479 Kbps	24 Kbps	576 Kbps	4.11 Mbps
Μέσο Tx Rate	9.41 Mbps	2.49 Mbps	660 Kbps	8.79 Mbps	8.96 Mbps	932 Kbps	6.68 Mbps	5.39 Mbps	273 Kbps	6.29 Mbps	4.46 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	9.56 %	8.85 %	8.83 %	9.44 %	8.96 %	8.89 %	9.08 %	8.91 %	8.94 %	9.11 %	90.6 %

Πίνακας Ε.3 : Ενότητα 4.4.1 – Round Robin – 10 χρήστες

Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Χρήστης #8	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	27	12.5	5.15	25.1	15.5	6.7	20.9	18.8	1.1	20.8	-
Μέση Ρυθμαπόδοση	455 Kbps	110 Kbps	28 Kbps	417 Kbps	161 Kbps	40 Kbps	308 Kbps	242 Kbps	12 Kbps	286 Kbps	4.27 Mbps
Ποσοστό του χρόνου που μετέδωσε	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	100 %
Ποσοστό του χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	4.79 %	4.45 %	4.4 %	4.7 %	4.43 %	4.42 %	4.58 %	4.53 %	4.43 %	4.54 %	90.6 %
Στατιστικά	Χρήστης #11	Χρήστης #12	Χρήστης #13	Χρήστης #14	Χρήστης #15	Χρήστης #16	Χρήστης #17	Χρήστης #18	Χρήστης #19	Χρήστης #20	
Μέσο Es/No (dB)	13.32	16.5	19.1	12.4	5.5	24.8	13	23.7	25	29.74	
Μέση Ρυθμαπόδοση	107 Kbps	165 Kbps	223 Kbps	91 Kbps	30 Kbps	365 Kbps	100 Kbps	326 Kbps	367 Kbps	453 Kbps	
Ποσοστό του χρόνου που μετέδωσε	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	
Ποσοστό του χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	4.38 %	4.43 %	4.5 %	4.43 %	4.35 %	4.68 %	4.64 %	4.61 %	4.69 %	4.78 %	

Πίνακας Ε.4 : Ενότητα 4.4.1 – Round Robin – 20 χρήστες

Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Χρήστης #8	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	27	12.5	5.15	25.1	15.5	6.7	20.9	18.8	1.1	20.8	-
Μέση Ρυθμαπόδοση	142 Kbps	460 Kbps	238 Kbps	236 Kbps	412 Kbps	324 Kbps	787 Kbps	968 Kbps	120 Kbps	936 Kbps	4.62 Mbps
Μέσο Tx Rate	10.7 Mbps	4.56 Mbps	1.75 Mbps	10.73 Mbps	6.58 Mbps	2.27 Mbps	10.5 Mbps	9.87 Mbps	893 Kbps	10.53 Mbps	5.12 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	1.36 %	11.7 %	16.3 %	2.29 %	7.44 %	17 %	7.95 %	10.8 %	15.7 %	9.4 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	1.32 %	10.2 %	13.8 %	2.2 %	6.33 %	14.4 %	7.49 %	9.78 %	13.6 %	8.88 %	87.9 %

Πίνακας Ε.5 : Ενότητα 4.4.1 – Proportional Fair – 10 χρήστες

Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Χρήστης #8	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	27	12.5	5.15	25.1	15.5	6.7	20.9	18.8	1.1	20.8	-
Μέση Ρυθμαπόδοση	890 Kbps	396 Kbps	144 Kbps	730 Kbps	544 Kbps	178 Kbps	921 Kbps	874 Kbps	123 Kbps	1.14 Mbps	5.94 Mbps
Μέσο Tx Rate	10.8 Mbps	4.85 Mbps	1.87 Mbps	10.8 Mbps	6.86 Mbps	2.47 Mbps	10.61 Mbps	9.84 Mbps	803 Kbps	10.6 Mbps	6.37 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	8.32 %	9.56 %	9.29 %	6.82 %	9.4 %	8.67 %	9.06 %	9.72 %	18 %	11.13 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	8.24 %	8.27 %	7.79 %	6.76 %	8 %	7.27 %	8.66 %	8.85 %	15.7 %	10.74 %	90.3 %

Πίνακας Ε.6 : Ενότητα 4.4.1 – PropCIFair – 10 χρήστες

Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	27	12.5	5.15	25.1	15.5	-
Μέση Ρυθμαπόδοση	270 Kbps	265 Kbps	264 Kbps	269 Kbps	266 Kbps	1.33 Mbps
Μέσο Tx Rate	8.52 Mbps	1.55 Mbps	496 Kbps	7.54 Mbps	2.61 Mbps	1.48 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	3.3 %	19.6 %	61.7 %	3.79 %	11.6 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	3.13 %	17.3 %	54.5 %	3.53 %	10.3 %	88.8 %

Πίνακας Ε.7 : Ενότητα 4.4.1 – FairThroughput – 5 χρήστες

Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Χρήστης #8	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	27	12.5	5.15	25.1	15.5	6.7	20.9	18.8	1.1	20.8	-
Μέση Ρυθμαπόδοση	73 Kbps	68.7 Kbps	68 Kbps	72.4 Kbps	69 Kbps	68 Kbps	72 Kbps	71 Kbps	67 Kbps	71 Kbps	700 Kbps
Μέσο Tx Rate	9.4 Mbps	1.5 Mbps	361 Kbps	8.78 Mbps	2.88 Mbps	496 Kbps	6.75 Mbps	4.63 Mbps	163 Kbps	5.29 Mbps	780 Kbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	0.796 %	5.16 %	21.8 %	0.88 %	2.75 %	15.9 %	1.17 %	1.7 %	48.3 %	1.45 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	0.768 %	4.6 %	19.2 %	0.82 %	2.45 %	14 %	1.06 %	1.55 %	42.8 %	1.32 %	88.6 %

Πίνακας Ε.8 : Ενότητα 4.4.1 – FairThroughput – 10 χρήστες

Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Χρήστης #8	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Κοψέλης
Μέσο Es/No (dB)	27	12.5	5.15	25.1	15.5	6.7	20.9	18.8	1.1	20.8	-
Μέση Ρυθμαπόδοση	46 Kbps	42 Kbps	41 Kbps	46 Kbps	43 Kbps	41 Kbps	45 Kbps	44 Kbps	41 Kbps	45 Kbps	873 Kbps
Μέσο Tx Rate	9.16 Mbps	1.62 Mbps	333 Kbps	8.67 Mbps	3.33 Mbps	493 Kbps	6.67 Mbps	5.08 Mbps	148 Kbps	6 Mbps	968 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	0.524 %	3 %	14.5 %	0.554 %	1.46 %	9.64 %	0.754 %	0.954 %	32.6 %	0.82 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	0.5 %	2.63 %	12.6 %	0.526 %	1.3 %	8.5 %	0.68 %	0.868 %	28.6 %	0.74 %	87.7 %
Στατιστικά	Χρήστης #11	Χρήστης #12	Χρήστης #13	Χρήστης #14	Χρήστης #15	Χρήστης #16	Χρήστης #17	Χρήστης #18	Χρήστης #19	Χρήστης #20	
Μέσο Es/No (dB)	13.32	16.5	19.1	12.4	5.5	24.8	13	23.7	25	29.74	
Μέση Ρυθμαπόδοση	43 Kbps	44 Kbps	44 Kbps	42 Kbps	41 Kbps	46 Kbps	42 Kbps	46 Kbps	46 Kbps	46 Kbps	
Μέσο Tx Rate	1.33 Mbps	3.1 Mbps	4.56 Mbps	897 Kbps	296 Kbps	7.51 Mbps	1.05 Mbps	6.88 Mbps	7.77 Mbps	9.5 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	3.7 %	1.53 %	1.08 %	5.37 %	16.4 %	0.644 %	4.64 %	0.692 %	0.61 %	0.506 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	3.2 %	1.38 %	0.98 %	4.72 %	14 %	0.604 %	4.1 %	0.65 %	0.58 %	0.482 %	

Πίνακας Ε.9 : Ενότητα 4.4.1 – FairThroughput – 20 χρήστες

Διάρκεια κύκλου πρόσβασης (msec)	Αριθμός TTI που αντιστοιχούν σε κάθε χρήστη για ένα κύκλο	Ρυθμαπόδοση κυψέλης	Ρυθμαπόδοση Χρήστη #9	Mean Tx Rate (across all users)	Worst-Case Access Delay (msec)
60	3	4.45 Mbps	27 Kbps	4.9 Mbps	54
100	5	4.7 Mbps	30 Kbps	5.17 Mbps	90
160	8	5 Mbps	35 Kbps	5.4 Mbps	144
300	15	5.35 Mbps	45 Kbps	5.8 Mbps	270
400	20	5.5 Mbps	48 Kbps	5.94 Mbps	360
500	25	5.65 Mbps	52 Kbps	6.09 Mbps	450

Πίνακας E.10 : Ενότητα 4.4.2 – PropCARR

Διάρκεια κύκλου πρόσβασης (msec)	Αριθμός TTI που αντιστοιχούν σε κάθε χρήστη για ένα κύκλο	Ρυθμαπόδοση κυψέλης	Ρυθμαπόδοση Χρήστη #9	Mean Tx Rate (across all users)	Worst-Case Access Delay (msec)
60	3	4.3 Mbps	24 Kbps	4.74 Mbps	54
100	5	4.45 Mbps	25 Kbps	4.89 Mbps	90
160	8	4.65 Mbps	27 Kbps	5.1 Mbps	144
300	15	4.96 Mbps	28 Kbps	5.39 Mbps	270
400	20	5.08 Mbps	33 Kbps	5.52 Mbps	360
500	25	5.2 Mbps	34 Kbps	5.63 Mbps	450

Πίνακας E.11 : Ενότητα 4.4.2 – CARR

	Number of Users								
Στατιστικά	5	10	20	30	45	60	75	90	
Offered Load	146.7 Kbps	311.2 Kbps	613.7 Kbps	821 Kbps	1.42 Mbps	1.78 Mbps	2.19 Mbps	2.72 Mbps	
Μέση Ρυθμαπόδοση	146.7 Kbps	311.2 Kbps	612.7 Kbps	821 Kbps	1.42 Mbps	1.78 Mbps	2.18 Mbps	2.7 Mbps	
Μέσο Tx Rate	3.34 Mbps	2.23 Mbps	2.35 Mbps	2.62 Mbps	2.8 Mbps	3.33 Mbps	3.64 Mbps	4.2 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	7.5 %	26.2 %	40.1 %	56 %	80 %	84 %	95.7 %	99.3 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	6.13 %	21.3 %	33 %	45.3 %	64 %	68 %	78 %	80 %	
Mean Delay	36 msec	138 msec	105 msec	110 msec	143 msec	147 msec	273 msec	530 msec	
Max Delay	420 msec	2.7 sec	2.8 sec	3.5 sec	5.4 sec	5.25 sec	44 sec	63 sec	
Rejections (Timeouts / Overflows)	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	
	7	7	6	9	6 (4)	8 (6)	4	1	

Πίνακας Ε.12 : Ενότητα 4.4.2 – Max C/I – Περίπτωση 20 χρηστών

Max C/I								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	12	28.7	7.2	31.5	14.9	20.3	10.4	-
Προσφερόμενο Φορτίο	42 Kbps	26.4 Kbps	23.4 Kbps	24 Kbps	34.4 Kbps	40.2 Kbps	24 Kbps	∞
Μέση Ρυθμαπόδοση	0	26.4 Kbps	0	24 Kbps	5.18 Kbps	39.8 Kbps	0	10.5 Mbps
Μέσο Tx Rate	10.8 Mbps	10.8 Mbps	0	10.8 Mbps	10.8 Mbps	10.8 Mbps	0	10.8 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	0.002 %	0.34 %	0 %	0.304 %	0.07 %	0.44 %	0 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	0 %	0.33 %	0 %	0.3 %	0.05 %	0.39 %	0%	97.9 %
Timeouts / Overflows	0-0 %	0-0 %	83.5-0 %	0-0 %	85.4-0 %	0-0 %	92.2-0 %	
Στατιστικά	Χρήστης #8	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Χρήστης #11	Χρήστης #12	Χρήστης #13	Χρήστης #14	
Μέσο Es/No (dB)	24	47.6	7.06	14.9	13.6	38	25.6	
Προσφερόμενο Φορτίο	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Μέση Ρυθμαπόδοση	1.55 Mbps	3.86 Mbps	0	41.5 Kbps	13.2 Kbps	3.51 Mbps	1.49 Mbps	
Μέσο Tx Rate	10.8 Mbps	10.8 Mbps	0	10.8 Mbps	10.8 Mbps	10.8 Mbps	10.8 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	14.9 %	36.2 %	0 %	0.46 %	0.16 %	32.9 %	14.2 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	14.3 %	35.7 %	0 %	0.38 %	0.12 %	32.5 %	13.8 %	
Timeouts / Rejections	-	-	-	-	-	-	-	

Πίνακας Ε.13 : Ενότητα 4.4.2 – Max C/I – 5/90 χρήστες

PropFair								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	5	14.9	29	14.9	11.6	18	15.9	-
Προσφερόμενο Φορτίο	41.5 Kbps	21.3 Kbps	41 Kbps	33 Kbps	30 Kbps	26 Kbps	29 Kbps	∞
Μέση Ρυθμαπόδοση	41.4 Kbps	21.3 Kbps	41 Kbps	33 Kbps	30 Kbps	26 Kbps	29 Kbps	4.5 Mbps
Μέσο Tx Rate	1.52 Mbps	5.9 Mbps	10.8 Mbps	5.47 Mbps	3.86 Mbps	8.79 Mbps	6.17 Mbps	5.3 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	4.1 %	0.53 %	0.41 %	0.87 %	1 %	0.42 %	0.66 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	2.8 %	0.39 %	0.4 %	0.66 %	0.82 %	0.33 %	0.5 %	81 %
Timeouts / Overflows	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	-
Στατιστικά	Χρήστης #8	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Χρήστης #11	Χρήστης #12	Χρήστης #13	Χρήστης #14	
Μέσο Es/No (dB)	32	25	8.9	33.2	16.8	12.8	2.2	
Προσφερόμενο Φορτίο	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Μέση Ρυθμαπόδοση	87 Kbps	1 Mbps	448 Kbps	646 Kbps	1.1 Mbps	812 Kbps	138 Kbps	
Μέσο Tx Rate	10.76 Mbps	10.7 Mbps	3.1 Mbps	10.8 Mbps	7.84 Mbps	4.86 Mbps	2.15 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	0.83 %	10.2 %	19 %	6.1 %	17 %	21.4 %	17.5 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	0.81 %	9.73 %	14.5 %	6 %	14 %	17 %	12.9 %	
Timeouts / Rejections	-	-	-	-	-	-	-	

Πίνακας Ε.14 : Ενότητα 4.4.3 – PropCIFair – WWW κίνηση

Round Robin								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	11.7	14.3	10.8	30	6.6	14.8	17	-
Προσφερόμενο Φορτίο	24 Kbps	52 Kbps	35 Kbps	40.9 Kbps	31.7 Kbps	34.5 Kbps	31 Kbps	∞
Μέση Ρυθμαπόδοση	24 Kbps	52 Kbps	35 Kbps	40.5 Kbps	29.3 Kbps	32 Kbps	32 Kbps	2.6 Mbps
Μέσο Tx Rate	2.13 Mbps	3.16 Mbps	1.89 Mbps	9.73 Mbps	907 Kbps	3.3 Mbps	4.33 Mbps	3.18 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	1.43 %	2.1 %	2.35 %	0.47 %	4.3 %	1.24 %	0.9 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	1.15 %	1.7 %	1.9 %	0.44 %	3.4 %	1 %	0.75 %	82 %
Timeouts / Overflows	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	-
Στατιστικά	Χρήστης #8	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Χρήστης #11	Χρήστης #12	Χρήστης #13	Χρήστης #14	
Μέσο Es/No (dB)	12.1	13.8	21.5	2.5	16.5	12.5	19.7	
Προσφερόμενο Φορτίο	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Μέση Ρυθμαπόδοση	228 Kbps	260 Kbps	716 Kbps	35 Kbps	375 Kbps	216 Kbps	537 Kbps	
Μέσο Tx Rate	2.34 Mbps	2.65 Mbps	2.73 Mbps	2.05 Mbps	2.4 Mbps	2.23 Mbps	5.06 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	12.5 %	12.5 %	12.5 %	12.5 %	12.5 %	12.5 %	12.5 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	10 %	10 %	10.6 %	10.08 %	10.16 %	10.2 %	10.35 %	
Timeouts / Rejections	-	-	-	-	-	-	-	

Πίνακας Ε.15 : Ενότητα 4.4.3 – Round Robin – WWW κίνηση

Fair Throughput								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	20.1	11.2	33.7	10.4	33.4	18	9.25	-
Προσφερόμενο Φορτίο	48 Kbps	35 Kbps	16.5 Kbps	28 Kbps	43 Kbps	19.1 Kbps	22 Kbps	∞
Μέση Ρυθμαπόδοση	48 Kbps	35 Kbps	16.5 Kbps	28 Kbps	37 Kbps	17.3 Kbps	22 Kbps	955 Kbps
Μέσο Tx Rate	5.2 Mbps	1.3 Mbps	9.74 Mbps	1.05 Mbps	9.85 Mbps	4.1 Mbps	964 Kbps	1.2 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	1.3 %	3.6 %	0.28 %	3.5 %	0.51 %	0.63 %	3.1 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	1.07 %	2.85 %	0.27 %	2.8 %	0.48 %	0.52 %	2.45 %	78 %
Timeouts / Overflows	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	-
Στατιστικά	Χρήστης #8	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Χρήστης #11	Χρήστης #12	Χρήστης #13	Χρήστης #14	
Μέσο Es/No (dB)	14.9	5.7	27	12.2	36	11.5	18.2	
Προσφερόμενο Φορτίο	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Μέση Ρυθμαπόδοση	106 Kbps	103 Kbps	112 Kbps	105 Kbps	112 Kbps	105 Kbps	108 Kbps	
Μέσο Tx Rate	2.47 Mbps	352 Kbps	8.64 Mbps	8.7 Mbps	10.5 Mbps	8.16 Mbps	1.95 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	5.4 %	40.2 %	1.38 %	15.6 %	1.1 %	16.7 %	6.7 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	4.4 %	30 %	1.26 %	12.3 %	1.07 %	13.2 %	5.2 %	
Timeouts / Rejections	-	-	-	-	-	-	-	

Πίνακας Ε.16 : Ενότητα 4.4.3 – FairThroughput – WWW κίνηση

M-LWDF								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	
Μέσο Es/No (dB)	3	7	11	15	19	23	27	
Προσφερόμενο Φορτίο	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Μέση Ρυθμαπόδοση	85 Kbps	135 Kbps	219 Kbps	351 Kbps	527 Kbps	734 Kbps	750 Kbps	
Μέσο Tx Rate	457 Kbps	1.22 Mbps	2.7 Mbps	4.85 Mbps	7.58 Mbps	9.72 Mbps	10.55 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	28.1 %	17.4 %	12 %	10.3 %	9.1 %	8.43 %	7.4 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	20.7 %	12 %	8.23 %	7.4 %	6.9 %	7.4 %	7.07 %	
Timeouts / Overflows	-	-	-	-	-	-	-	
Στατιστικά	Χρήστης #8						Κυψέλης	
Μέσο Es/No (dB)	31							
Προσφερόμενο Φορτίο	∞						-	
Μέση Ρυθμαπόδοση	780 Kbps						3.58 Mbps	
Μέσο Tx Rate	10.78 Mbps						4.24 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	7.33 %						100 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	7.23 %						77 %	
Timeouts / Rejections	-						-	

Πίνακας Ε.17 : Ενότητα 5.6.2.2 – MLWDF – FTP κίνηση – 1^η περίπτωση

Expo-drop								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	
Μέσο Es/No (dB)	3	7	11	15	19	23	27	
Προσφερόμενο Φορτίο	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Μέση Ρυθμαπόδοση	100 Kbps	227 Kbps	404 Kbps	554 Kbps	1.07 Mbps	1.39 Mbps	816 Kbps	
Μέσο Tx Rate	935 Kbps	2.19 Mbps	3.89 Mbps	6.22 Mbps	9.48 Mbps	10.77 Mbps	10.8 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	16.4 %	15 %	13.8 %	12.3 %	13.2 %	13.2 %	7.63 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	11.5 %	10.7 %	10.5 %	9.05 %	11.2 %	12.9 %	7.55 %	
Timeouts / Overflows	-	-	-	-	-	-	-	
Στατιστικά	Χρήστης #8						Κυψέλης	
Μέσο Es/No (dB)	31							
Προσφερόμενο Φορτίο	∞						-	
Μέση Ρυθμαπόδοση	910 Kbps						5.47 Mbps	
Μέσο Tx Rate	10.8 Mbps						6.2 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	8.5 %						100 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	8.43 %						82 %	
Timeouts / Rejections	-						-	

Πίνακας Ε.18 : Ενότητα 5.6.2.2 – Expo-drop – FTP κίνηση – 1^η περίπτωση

CD_EDD								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	
Μέσο Es/No (dB)	3	7	11	15	19	23	27	
Προσφερόμενο Φορτίο	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Μέση Ρυθμαπόδοση	84 Kbps	132 Kbps	215 Kbps	350 Kbps	520 Kbps	721 Kbps	745 Kbps	
Μέσο Tx Rate	450 Kbps	1.19 Mbps	2.66 Mbps	4.84 Mbps	7.52 Mbps	9.66 Mbps	10.56 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	24.5 %	17.4 %	11.8 %	10.4 %	8.93 %	8.3 %	7.35 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	21 %	12.1 %	8.2 %	7.36 %	6.86 %	7.32 %	7.03 %	
Timeouts / Overflows	-	-	-	-	-	-	-	
Στατιστικά	Χρήστης #8						Κυψέλης	
Μέσο Es/No (dB)	31							
Προσφερόμενο Φορτίο	∞						-	
Μέση Ρυθμαπόδοση	776 Kbps						3.54 Mbps	
Μέσο Tx Rate	10.77 Mbps						4.19 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	7.3 %						100 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	7.2 %						77.1 %	
Timeouts / Rejections	-						-	

Πίνακας Ε.19 : Ενότητα 5.6.2.2 – CD_EDD – FTP κίνηση – 1^η περίπτωση

Expo_Linear								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	
Μέσο Es/No (dB)	3	7	11	15	19	23	27	
Προσφερόμενο Φορτίο	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Μέση Ρυθμαπόδοση	102 Kbps	223 Kbps	392 Kbps	544 Kbps	1.02 Mbps	1.35 Mbps	785 Kbps	
Μέσο Tx Rate	888 Kbps	2.12 Mbps	3.86 Mbps	6.21 Mbps	9.5 Mbps	10.76 Mbps	10.8 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	17.8 %	15.3 %	13.6 %	12.2 %	12.6 %	12.9 %	7.35 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	12.6 %	10.8 %	10.3 %	8.92 %	10.7 %	12.6 %	7.27 %	
Timeouts / Overflows	-	-	-	-	-	-	-	
Στατιστικά	Χρήστης #8						Κυψέλης	
Μέσο Es/No (dB)	31							
Προσφερόμενο Φορτίο	∞						-	
Μέση Ρυθμαπόδοση	888 Kbps						5.31 Mbps	
Μέσο Tx Rate	10.8 Mbps						6.03 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	8.3 %						100 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	8.23 %						81.3 %	
Timeouts / Rejections	-						-	

Πίνακας Ε.20 : Ενότητα 5.6.2.2 – Expo-Linear – FTP κίνηση – 1^η περίπτωση

M-LWDF								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	
Μέσο Es/No (dB)	3	7	11	15	19	23	27	
Προσφερόμενο Φορτίο	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Μέση Ρυθμαπόδοση	179.3 Kbps	99 Kbps	420 Kbps	148 Kbps	178 Kbps	173 Kbps	1.001 Mbps	
Μέσο Tx Rate	591 Kbps	1.27 Mbps	2.79 Mbps	5 Mbps	7.54 Mbps	10.12 Mbps	10.65 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	43.3 %	12.7 %	20.8 %	4.45 %	3.24 %	1.93 %	9.67 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	33.4 %	8.64 %	15.4 %	3.07 %	2.36 %	1.7 %	9.37 %	
Timeouts / Overflows	-	-	-	-	-	-	-	
Στατιστικά	Χρήστης #8						Κυψέλης	
Μέσο Es/No (dB)	31							
Προσφερόμενο Φορτίο	∞						-	
Μέση Ρυθμαπόδοση	416 Kbps						2.61 Mbps	
Μέσο Tx Rate	10.8 Mbps						3.11 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	3.88 %						100 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	3.85 %						77.8 %	
Timeouts / Rejections	-						-	

Πίνακας E.21 : Ενότητα 5.6.2.2 – MLWDF – FTP κίνηση – 2^η περίπτωση

CD_EDD								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	
Μέσο Es/No (dB)	3	7	11	15	19	23	27	
Προσφερόμενο Φορτίο	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Μέση Ρυθμαπόδοση	179 Kbps	96.8 Kbps	419 Kbps	138 Kbps	155 Kbps	135 Kbps	998.6 Kbps	
Μέσο Tx Rate	575 Kbps	1.27 Mbps	2.74 Mbps	5.05 Mbps	7.4 Mbps	10.13 Mbps	10.64 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	44.4 %	12.45 %	21.1 %	4.17 %	2.9 %	1.5 %	9.65 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	34.4 %	8.44 %	15.6 %	2.85 %	2.1 %	1.32 %	9.35 %	
Timeouts / Overflows	-	-	-	-	-	-	-	
Στατιστικά	Χρήστης #8						Κυψέλης	
Μέσο Es/No (dB)	31							
Προσφερόμενο Φορτίο	∞						-	
Μέση Ρυθμαπόδοση	407 Kbps						2.53 Mbps	
Μέσο Tx Rate	10.8 Mbps						3.01 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	3.81 %						100 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	3.77 %						77.8 %	
Timeouts / Rejections	-						-	

Πίνακας Ε.22 : Ενότητα 5.6.2.2 – CD_EDD – FTP κίνηση – 2^η περίπτωση

Expo_Linear								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	
Μέσο Es/No (dB)	3	7	11	15	19	23	27	
Προσφερόμενο Φορτίο	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Μέση Ρυθμαπόδοση	179.1 Kbps	149 Kbps	465 Kbps	300 Kbps	587 Kbps	690 Kbps	1.03 Mbps	
Μέσο Tx Rate	710 Kbps	1.95 Mbps	3.51 Mbps	6.25 Mbps	9.52 Mbps	10.76 Mbps	10.8 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	36 %	11.4 %	17.6 %	6.83 %	7.28 %	6.53 %	9.66 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	28 %	7.93 %	13.5 %	4.87 %	6.1 %	6.4 %	9.55 %	
Timeouts / Overflows	-	-	-	-	-	-	-	
Στατιστικά	Χρήστης #8						Κυψέλης	
Μέσο Es/No (dB)	31							
Προσφερόμενο Φορτίο	∞						-	
Μέση Ρυθμαπόδοση	508 Kbps						3.91 Mbps	
Μέσο Tx Rate	10.8 Mbps						4.47 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	4.74 %						100 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	4.7 %						80.6 %	
Timeouts / Rejections	-						-	

Πίνακας Ε.23 : Ενότητα 5.6.2.2 – Expo-Linear – FTP κίνηση – 2^η περίπτωση

Expo_drop								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	
Μέσο Es/No (dB)	3	7	11	15	19	23	27	
Προσφερόμενο Φορτίο	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Μέση Ρυθμαπόδοση	178 Kbps	164 Kbps	460 Kbps	340 Kbps	726 Kbps	864 Kbps	1.015 Mbps	
Μέσο Tx Rate	756 Kbps	2.16 Mbps	3.7 Mbps	6.31 Mbps	9.65 Mbps	10.78 Mbps	10.8 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	33.7 %	11 %	16.3 %	7.54 %	8.73 %	8.15 %	9.5 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	25.6 %	7.8 %	12.7 %	5.47 %	7.47 %	8 %	9.4 %	
Timeouts / Overflows	-	-	-	-	-	-	-	
Στατιστικά	Χρήστης #8						Κυψέλης	
Μέσο Es/No (dB)	31							
Προσφερόμενο Φορτίο	∞						-	
Μέση Ρυθμαπόδοση	543 Kbps						4.3 Mbps	
Μέσο Tx Rate	10.8 Mbps						4.86 Mbps	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	5.07 %						100 %	
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	5.03 %						81.5 %	
Timeouts / Rejections	-						-	

Πίνακας Ε.24 : Ενότητα 5.6.2.2 – Expo-drop – FTP κίνηση – 2^η περίπτωση

M-LWDF								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Χρήστης #8
Μέσο Es/No (dB)	3	7	11	15	19	23	27	31
Προσφερόμενο Φορτίο	26.7 Kbps	18.7 Kbps	43.7 Kbps	36 Kbps	35.6 Kbps	17.7 Kbps	28.7 Kbps	28.5 Kbps
Μέση Ρυθμαπόδοση	26.7 Kbps	18.7 Kbps	43.7 Kbps	36 Kbps	35.6 Kbps	17.7 Kbps	28.7 Kbps	28 Kbps
Μέσο Tx Rate	475 Kbps	1.46 Mbps	2.55 Mbps	4.2 Mbps	6.67 Mbps	9.42 Mbps	10.3 Mbps	10.71 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	7.8 %	1.82 %	2.3 %	1.14 %	0.77 %	0.242 %	0.33 %	0.32 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	6.06 %	1.35 %	1.8 %	0.9 %	0.58 %	0.214 %	0.316 %	0.31 %
Mean Delay	0.708	0.163	0.166	0.068	0.08	0.12	0.078	0.05
Peak Delay	2.42	0.424	0.444	0.252	0.3	0.54	0.342	0.354
Timeouts / Overflows	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %
Στατιστικά	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Χρήστης #11	Χρήστης #12	Χρήστης #13	Χρήστης #14	Χρήστης #15	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	35	5	10	15	20	25	30	-
Προσφερόμενο Φορτίο	30.4 Kbps	∞	∞	∞	∞	∞	∞	-
Μέση Ρυθμαπόδοση	30.4 Kbps	127 Kbps	320 Kbps	421 Kbps	781 Kbps	1.03 Mbps	865 Kbps	3.81 Mbps
Μέσο Tx Rate	10.8 Mbps	784 Kbps	2.38 Mbps	4.77 Mbps	8.2 Mbps	9.9 Mbps	10.65 Mbps	4.45 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	0.35 %	24 %	18.4 %	12.1 %	11.1 %	11 %	8.33 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	0.35 %	17.7 %	13.7 %	8.7 %	9.2 %	10.2 %	8.1 %	80 %
Mean Delay	0.027	-	-	-	-	-	-	-
Peak Delay	0.18	-	-	-	-	-	-	-
Timeouts / Rejections	0-0 %	-	-	-	-	-	-	-

Πίνακας E.25 : Ενότητα 5.6.2.2 – MLWDF – FTP + WWW κίνηση

CD-EDD								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Χρήστης #8
Μέσο Es/No (dB)	3	7	11	15	19	23	27	31
Προσφερόμενο Φορτίο	26.7 Kbps	18.7 Kbps	43.7 Kbps	36 Kbps	35.6 Kbps	17.7 Kbps	28.7 Kbps	28.5 Kbps
Μέση Ρυθμαπόδοση	16.8 Kbps	18.7 Kbps	43.7 Kbps	36 Kbps	35.6 Kbps	17.7 Kbps	28.7 Kbps	28.5 Kbps
Μέσο Tx Rate	478 Kbps	1.44 Mbps	2.46 Mbps	4.08 Mbps	6.63 Mbps	9.16 Mbps	10.35 Mbps	10.69 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	5 %	1.8 %	2.37 %	1.2 %	0.77 %	0.26 %	0.34 %	0.322 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	3.8 %	1.37 %	1.85 %	0.9 %	0.58 %	0.22 %	0.32 %	0.316 %
Mean Delay	0.443	0.164	0.162	0.072	0.074	0.054	0.047	0.042
Peak Delay	0.868	0.368	0.418	0.25	0.29	0.4	0.24	0.354
Timeouts / Overflows	37.5 – 0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %
Στατιστικά	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Χρήστης #11	Χρήστης #12	Χρήστης #13	Χρήστης #14	Χρήστης #15	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	35	5	10	15	20	25	30	-
Προσφερόμενο Φορτίο	30.4 Kbps	∞	∞	∞	∞	∞	-	-
Μέση Ρυθμαπόδοση	30.4 Kbps	130 Kbps	333 Kbps	427 Kbps	796 Kbps	1.04 Mbps	898 Kbps	3.88 Mbps
Μέσο Tx Rate	10.8 Mbps	771 Kbps	2.37 Mbps	4.73 Mbps	2.81 Mbps	9.85 Mbps	10.64 Mbps	4.53 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	0.35 %	24.8 %	19.1 %	12.4 %	11.4 %	11.2 %	8.67 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	0.35 %	18.2 %	14.3 %	9.06 %	9.5 %	10.4 %	8.4 %	79.6 %
Mean Delay	0.027	-	-	-	-	-	-	-
Peak Delay	0.19	-	-	-	-	-	-	-
Timeouts / Rejections	0-0 %	-	-	-	-	-	-	-

Πίνακας E.26 : Ενότητα 5.6.2.2 – CD_EDD – FTP + WWW κίνηση

Expo-Linear								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Χρήστης #8
Μέσο Es/No (dB)	3	7	11	15	19	23	27	31
Προσφερόμενο Φορτίο	26.7 Kbps	18.7 Kbps	44 Kbps	36 Kbps	35.6 Kbps	17.7 Kbps	28.7 Kbps	28.5 Kbps
Μέση Ρυθμαπόδοση	26.7 Kbps	18.7 Kbps	43 Kbps	36 Kbps	35.6 Kbps	17.7 Kbps	28.7 Kbps	28.5 Kbps
Μέσο Tx Rate	622 Kbps	1.81 Mbps	3.93 Mbps	5.23 Mbps	8.55 Mbps	10 Mbps	10.8 Mbps	10.8 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	6 %	1.5 %	1.45 %	0.98 %	0.57 %	0.22 %	0.286 %	0.298 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	4.67 %	1.1 %	1.14 %	0.74 %	0.45 %	0.2 %	0.284 %	0.294 %
Mean Delay	1.015	0.44	0.36	0.32	0.2	0.36	0.25	0.186
Peak Delay	2.6	1.11	0.72	0.8	0.574	0.9	0.66	0.646
Timeouts / Overflows	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %
Στατιστικά	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Χρήστης #11	Χρήστης #12	Χρήστης #13	Χρήστης #14	Χρήστης #15	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	35	5	10	15	20	25	30	-
Προσφερόμενο Φορτίο	30.4 Kbps	∞	∞	∞	∞	∞	∞	-
Μέση Ρυθμαπόδοση	30.4 Kbps	145 Kbps	539 Kbps	747 Kbps	1.4 Mbps	1.75 Mbps	781 Kbps	5.63 Mbps
Μέσο Tx Rate	10.8 Mbps	1.43 Mbps	3.55 Mbps	6.48 Mbps	9.9 Mbps	10.72 Mbps	10.8 Mbps	6.32 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	0.32 %	14.4 %	19.7 %	14.8 %	15.5 %	16.7 %	7.3 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	0.32 %	10.6 %	15.4 %	11.6 %	14 %	16.3 %	7.24 %	84.4 %
Mean Delay	0.157	-	-	-	-	-	-	-
Peak Delay	0.574	-	-	-	-	-	-	-
Timeouts / Rejections	0-0 %	-	-	-	-	-	-	-

Πίνακας Ε.27 : Ενότητα 5.6.2.2 – Expo-Linear – FTP + WWW κίνηση

Expo-drop								
Στατιστικά	Χρήστης #1	Χρήστης #2	Χρήστης #3	Χρήστης #4	Χρήστης #5	Χρήστης #6	Χρήστης #7	Χρήστης #8
Μέσο Es/No (dB)	3	7	11	15	19	23	27	31
Προσφερόμενο Φορτίο	26.7 Kbps	18.7 Kbps	44 Kbps	36 Kbps	35.6 Kbps	17.7 Kbps	28.7 Kbps	28.5 Kbps
Μέση Ρυθμαπόδοση	26.7 Kbps	18.7 Kbps	43 Kbps	36 Kbps	35.6 Kbps	17.7 Kbps	28.7 Kbps	28.5 Kbps
Μέσο Tx Rate	651 Kbps	2.03 Mbps	4 Mbps	5.37 Mbps	8.73 Mbps	10.44 Mbps	10.8 Mbps	10.8 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	5.9 %	1.35 %	1.4 %	0.96 %	0.55 %	0.2 %	0.286 %	0.294 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	4.5 %	0.96 %	1.1 %	0.73 %	0.44 %	0.19 %	0.282 %	0.294 %
Mean Delay	1.29	0.54	0.42	0.395	0.225	0.382	0.23	0.208
Peak Delay	3.49	1.28	1.21	1.06	0.662	1.28	0.616	0.672
Timeouts / Overflows	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %	0-0 %
Στατιστικά	Χρήστης #9	Χρήστης #10	Χρήστης #11	Χρήστης #12	Χρήστης #13	Χρήστης #14	Χρήστης #15	Κυψέλης
Μέσο Es/No (dB)	35	5	10	15	20	25	30	-
Προσφερόμενο Φορτίο	30.4 Kbps	∞	∞	∞	∞	∞	∞	-
Μέση Ρυθμαπόδοση	30.4 Kbps	145 Kbps	554 Kbps	770 Kbps	1.47 Mbps	1.78 Mbps	774 Kbps	5.76 Mbps
Μέσο Tx Rate	10.8 Mbps	1.53 Mbps	3.59 Mbps	6.53 Mbps	9.94 Mbps	10.73 Mbps	10.8 Mbps	6.45 Mbps
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε	0.32 %	13.4 %	20 %	15 %	16.1 %	17 %	7.25 %	100 %
Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μετέδωσε επιτυχώς	0.32 %	9.85 %	15.7 %	12 %	14.6 %	16.6 %	7.17 %	84.7 %
Mean Delay	0.131	-	-	-	-	-	-	-
Peak Delay	0.488	-	-	-	-	-	-	-
Timeouts / Rejections	0-0 %	-	-	-	-	-	-	-

Πίνακας E.28 : Ενότητα 5.6.2.2 – Expo-drop – FTP + WWW κίνηση

	Expo-drop		MLWDF		CD_EDD		Expo_predict		
	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	
User1	5	139	0.96	110	0.72	108	2	129	
User2	3.64	104	0.84	95	1.04	96	1.44	104	
User3	2.48	96	0.48	86	0.56	88	1.12	94	
User4	0.96	83	0	76	0	79	0.08	82	
User5	0.76	81	0	68	0	72	0.16	78	
User6	0.44	72	0.16	67	0.04	72	0.12	72	
User7	0.76	72	0.08	64	0	69	0.04	71	
User8	0	61	0	57	0	61	0	60	
	Throughput		Throughput		Throughput		Throughput		
User9	155 Kbps		83 Kbps		70 Kbps		135 Kbps		
User10	353 Kbps		130 Kbps		92 Kbps		262 Kbps		
User11	1.34 Mbps		300 Kbps		174 Kbps		1.09 Mbps		
User12	950 Kbps		300 Kbps		173 Kbps		774 Kbps		
Mean Packet Dropping	1.75 %		0.31 %		0.29 %		0.62 %		
Max Packet Dropping	5 %		0.96		1.04 %		2 %		
Total Packets dropped	351 / 20.000		63 / 20.000		59 / 20.000		124 / 20.000		
Cell Throughput	3.77 Mbps		1.83 Mbps		1.53 Mbps		3.27 Mbps		

Πίνακας Ε.29 : Ενότητα 5.6.3.3 – VIDEO + FTP κίνηση

	Expo_Rule		CD_EDD_balanced		Expo_weight		Expo_pred_wei		
	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	
User1	2	130	0.72	99	1.12	104	0.92	94	
User2	1.6	103	0.96	80	1.28	86	1.08	78	
User3	1.2	94	0.56	87	1.08	83	0.88	79	
User4	0.12	82	0.4	80	0.8	95	0.6	91	
User5	0.16	78	0.2	97	0.68	114	0.44	106	
User6	0.16	72	0.2	89	0.6	96	0.36	104	
User7	0.2	70	0.2	82	0.8	78	0.36	132	
User8	0	60	0.2	78	0.52	94	0.16	146	
	Throughout		Throughout		Throughout		Throughout		
User9	135 Kbps		68 Kbps		129 Kbps		123 Kbps		
User10	262 Kbps		88 Kbps		250 Kbps		242 Kbps		
User11	1.09 Mbps		157 Kbps		1.01 Mbps		0.96 Mbps		
User12	775 Kbps		153 Kbps		715 Kbps		684 Kbps		
Mean Packet Dropping	0.68 %		0.43 %		0.86 %		0.6 %		
Max Packet Dropping	2 %		0.96 %		1.28 %		1.08 %		
Total Packets dropped	136 / 20.000		86 / 20.000		172 / 20.000		120 / 20.000		
Cell Throughput	3.29 Mbps		1.49 Mbps		3.19 Mbps		3.03 Mbps		

Πίνακας Ε.30 : Ενότητα 5.6.3.3 – VIDEO + FTP κίνηση

	Expo_balanced		CD_EDD_mybalance		Expo_pred_balanced		Expo_RTplus		
	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	
User1	0.84	103	0.8	95	0.72	101	0.16	54	
User2	0.96	73	1	90	0.84	73	0.56	55	
User3	0.84	67	0.56	89	0.68	68	0.28	51	
User4	0.6	73	0.44	84	0.52	71	0.16	48	
User5	0.52	80	0.24	94	0.36	85	0	50	
User6	0.52	75	0.28	84	0.32	86	0.16	58	
User7	0.6	66	0.24	82	0.36	81	0.68	65	
User8	0.4	78	0.24	78	0.24	92	0	64	
	Throughput		Throughput		Throughput		Throughput		
User9	108 Kbps		70 Kbps		109 Kbps		76 Kbps		
User10	212 Kbps		90 Kbps		210 Kbps		87 Kbps		
User11	734 Kbps		166 Kbps		744 Kbps		131 Kbps		
User12	546 Kbps		166 Kbps		560 Kbps		95 Kbps		
Mean Packet Dropping	0.66 %		0.47 %		0.5 %		0.25 %		
Max Packet Dropping	0.96 %		1 %		0.84 %		0.68 %		
Total Packets dropped	132 / 20.000		95 / 20.000		101 / 20.000		50 / 20.000		
Cell Throughput	2.62 Mbps		1.51 Mbps		2.64 Mbps		1.41 Mbps		

Πίνακας Ε.31 : Ενότητα 5.6.3.3 – VIDEO + FTP κίνηση

	Expo-drop		MLWDF		CD_EDD		CD_EDD_balanced		
	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	
User1	3.32	102	2.4	120	2.92	140	2.16	117	
User2	0.68	79	0.52	105	1.4	130	1.4	120	
User3	0.32	65	0.32	92	0.6	120	1	129	
User4	0.16	62	0.04	89	0.44	117	0.96	126	
User5	0.24	60	0.2	85	0.72	110	1.08	113	
User6	0	45	0.04	75	0.12	102	0.56	151	
User7	0	43	0	71	0.16	97	0.56	118	
User8	0.16	46	0.08	75	0.44	101	0.88	108	
User9	0.16	48	0.48	73	0.24	97	0.84	112	
User10	0.08	42	0.04	67	0.4	90	0.68	111	
Mean Value	0.51		0.41		0.74		1.01		
std value	1		0.72		0.85		0.48		

Πίνακας Ε.32 : Ενότητα 5.6.3.4 – VIDEO κίνηση

	CD_EDD_mybalance		Expo_Rule		Expo_predict		Expo_weight		
	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	
User1	2.16	117	2.52	106	2.48	107	1.16	79	
User2	1.52	115	0.52	86	0.52	86	0.68	91	
User3	1	128	0.24	73	0.24	73	0.56	94	
User4	1	124	0.04	71	0.04	71	0.6	79	
User5	1.04	113	0.36	65	0.32	66	0.84	66	
User6	0.56	144	0	54	0	55	0.36	88	
User7	0.56	123	0	52	0	53	0.32	89	
User8	1	108	0.12	58	0.04	58	0.64	67	
User9	0.72	116	0.52	55	0.28	56	0.68	56	
User10	0.56	115	0.08	49	0	50	0.52	69	
Mean Value	1.01		0.44		0.39		0.64		
std value	0.5		0.76		0.75		0.24		

Πίνακας E.33 : Ενότητα 5.6.3.4 – VIDEO κίνηση

	Expo_balanced		Expo_pred_wei		Expo_pred_balanced				
	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	
User1	1.08	81	0.96	77	0.92	79			
User2	0.64	89	0.72	82	0.72	78			
User3	0.52	92	0.44	87	0.52	78			
User4	0.56	80	0.52	77	0.52	77			
User5	0.84	65	0.64	65	0.64	73			
User6	0.44	97	0.36	97	0.64	73			
User7	0.48	99	0.32	102	0.32	102			
User8	0.68	69	0.52	69	0.36	108			
User9	0.72	54	0.52	74	0.44	87			
User10	0.52	64	0.32	90	0.52	73			
Mean Value	0.65		0.53		0.56				
std value	0.19		0.2		0.18				

Πίνακας Ε.34 : Ενότητα 5.6.3.4 – VIDEO κίνηση

	Expo-drop		MLWDF		CD-EDD		CD-EDD-balanced		
	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	
User1	2.96	45	2.28	60	1.76	69	1.28	59	
User2	1.8	41	1.8	57	1.44	65	1.16	59	
User3	1.72	36	1.08	54	1	64	0.92	64	
User4	1.92	32	1.12	52	1.08	60	0.96	55	
User5	1.6	32	1.32	52	1	61	0.84	58	
User6	1.24	28	1.08	48	0.8	57	0.76	59	
User7	1.04	31	0.72	49	0.4	59	0.64	58	
User8	1.2	30	1.32	47	0.52	57	0.72	55	
User9	0.8	31	0.36	49	0.2	56	0.6	67	
User10	1.96	30	1.72	46	1.16	53	1.04	49	
User11	0.32	29	0.32	44	0.4	51	0.72	56	
User12	0.6	28	0.48	46	0.32	51	0.52	60	
User13	0.4	27	0.28	44	0.2	51	0.52	59	
User14	0.6	25	0.84	41	0.84	48	0.8	48	
User15	0.84	29	0.68	44	0.04	50	0.4	58	
Mean Value									
std value									

Πίνακας Ε.35 : Ενότητα 5.6.3.4 – Strict VIDEO κίνηση

	CD_EDD_mybalance		Expo_Rule		Expo_predict		Expo_weight		
	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	
User1	1.32	61	2.24	51	2	52	1.56	46	
User2	1.2	63	1.64	47	1.48	48	1.52	45	
User3	1	60	1.4	43	1.48	44	1.24	46	
User4	0.96	56	1.36	40	1.52	40	1.2	39	
User5	0.84	59	1.48	40	1.36	41	1.4	36	
User6	1.08	52	1.08	37	0.96	37	1.16	34	
User7	0.76	57	0.72	39	0.64	39	0.96	42	
User8	0.84	56	1.64	38	1.08	39	1.32	36	
User9	0.52	66	0.36	37	0.32	37	0.96	44	
User10	1.04	50	1.92	36	1.44	38	1.48	31	
User11	0.72	57	0.4	33	0.36	34	1	42	
User12	0.64	58	0.44	34	0.36	34	0.92	42	
User13	0.56	58	0.32	34	0.08	34	1.08	38	
User14	0.72	49	0.52	30	0.48	30	1	34	
User15	0.56	57	0.92	35	0.2	36	1	36	
Mean Value									
std value									

Πίνακας Ε.36 : Ενότητα 5.6.3.4 – Strict VIDEO κίνηση

	Expo_balanced		Expo_pred_wei		Expo_pred_balanced				
	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	
User1	1.44	46	1.36	43	1.32	40			
User2	1.36	45	1.28	40	1.12	43			
User3	1.24	43	1	42	1.16	40			
User4	1.32	37	1.12	36	1.2	36			
User5	1.32	37	1.04	35	1.08	34			
User6	1.08	34	0.96	34	1.12	33			
User7	0.88	43	0.76	44	0.84	42			
User8	1.4	35	1.12	37	0.92	41			
User9	1.04	43	0.8	44	0.8	42			
User10	1.4	32	1.24	32	1.24	31			
User11	1	40	0.8	41	0.8	43			
User12	0.96	38	0.72	45	0.64	47			
User13	1	37	0.6	48	0.72	45			
User14	1.04	34	0.88	35	0.84	34			
User15	1.2	35	0.4	58	0.28	66			
Mean Value									
std value									

Πίνακας Ε.37 : Ενότητα 5.6.3.4 – Strict VIDEO κίνηση

	Expo-drop		MLWDF		CD_EDD		CD_EDD_balanced		
	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	
User1	1.36	71	0.84	86	5.44	117	3.28	95	
User2	0.56	56	0.88	79	4.44	112	2.88	91	
User3	0.32	48	0.44	71	3.84	105	2.36	93	
User4	0.28	41	0.16	65	4	100	2.12	83	
User5	0.24	36	0.28	63	3.4	98	2.16	83	
User6	0.08	37	0.12	61	3.32	96	2.12	83	
User7	0.28	37	0.48	58	2.88	91	1.92	82	
User8	0.04	35	0.36	55	2.08	90	1.64	82	
User9	0	36	0.24	56	2.2	87	1.84	80	
User10	0	32	0.28	52	2.32	82	1.48	79	
Max Value	1.36	71	0.88	86	5.44	117	3.28	95	
Mean Value									
std value									
FTP-packet droppings	0 %		0 %		0 %		0 %		
max of user max FTP-packet delay	2.21 sec		1.31 sec		1.59 sec		1.65 sec		
mean FTP-packet delay of this user	877 msec		539 msec		487 msec		618 msec		

Πίνακας Ε.38 : Ενότητα 5.6.3.3 – Strict VIDEO κίνηση

	CD_EDD_mybalance		Expo_Rule		Expo_predict		Expo_weight		
	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	
User1	5.2	106	0.44	70	0.44	70	0.32	61	
User2	5.28	96	0.48	60	0.44	60	0.24	58	
User3	4	100	0.28	49	0.28	49	0.24	56	
User4	3.96	95	0.08	46	0.04	47	0.12	62	
User5	3.6	92	0.12	41	0	41	0.16	52	
User6	3.76	91	0.2	40	0.08	41	0.24	46	
User7	3.24	90	0	40	0	41	0.2	47	
User8	2.68	95	0	37	0	37	0.12	54	
User9	2.64	91	0	38	0	38	0.16	50	
User10	2.72	93	0	34	0	34	0.2	42	
Max Value	5.28	106	0.48	70	0.44	70	0.32	62	
Mean Value									
std value									
WWW-packet droppings	0 %		0 %		0 %		0 %		
max of user max WWW - packet delay	1.79 sec		1.5 sec		1.51 sec		1.42 sec		
mean WWW - packet delay of this user	720 msec		472 msec		472 msec		502 msec		

Πίνακας Ε.39 : Ενότητα 5.6.3.3 – VIDEO + WWW κίνηση

	Expo_balanced		Expo_pred_wei		Expo_pred_balanced				
	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	Packets dropped (%)	Mean Delay (msec)	
User1	0.32	72	0.28	52	0.16	51			
User2	0.36	55	0.2	53	0.2	39			
User3	0.2	66	0.16	51	0.12	53			
User4	0.28	51	0.24	40	0.08	52			
User5	0.4	40	0.12	58	0.08	64			
User6	0.2	59	0.08	55	0.08	52			
User7	0.24	50	0.08	67	0.08	57			
User8	0.28	51	0.08	77	0.08	42			
User9	0.12	62	0.12	57	0.08	51			
User10	0.28	47	0.12	80	0.04	52			
Max Value	0.36	72	0.28	80	0.16	64			
Mean Value									
std value									
WWW-packet droppings	0 %		0 %		0 %				
max of user max WWW - packet delay	1.97 sec		1.64 sec		1.95 sec				
mean WWW - packet delay of this user	990 msec		808 msec		580 msec				

Πίνακας Ε.40 : Ενότητα 5.6.3.3 – VIDEO + WWW κίνηση