Σχεδιασμός και Μελέτη ενός Αλγορίθμου Χρονοπρογραμματισμού για την παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας σε IEEE 802.16 Ασύρματα Δίκτυα

Διπλωματική εργασία

Δημήτριος Κεραμιδάς

Α.Μ. 2000030014

προς

το **Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών**

Πολυτεχνείο Κρήτης

προς εκπλήρωση των προϋποθέσεων

για την απονομή του τίτλου

Διπλωματούχου

Ηλεκτρονικού Μηχανικού και Μηχανικού Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

Εξεταστική Επιτροπή :

Καθ. Μ. Πατεράκης (επιβλέπων)	Πολυτεχνείο Κρήτης
Επικ. Καθ. Π. Κουτσάκης	Χανιά
Διδ. 407/80 Σ. Τσακιρίδου	Ιούνιος 2011

Περίληψη

Η ομάδα εργασίας 802.16 του ινστιτούτου IEEE σχεδίασε ένα πρότυπο για την παροχή ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης ως το «τελευταίο-μίλι», το IEEE 802.16 Wireless MAN [**1**], με στόχο τις δυνατότητες της εύκολης εγκατάστασης υποδομής, της παροχής συνδέσεων ευρείας ταχύτητας, της κάλυψης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών, της εκμετάλλευσης μεγάλου μέρους του φάσματος καθώς και της παροχής εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας σε όλων των ειδών τις εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων και των εφαρμογών πραγματικού χρόνου.

Το πρότυπο IEEE 802.16 ορίζει το πλαίσιο για την παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας, αφήνει όμως τον ακριβή τρόπο κατανομής των δικτυακών πόρων, δηλαδή τους αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού, ανοικτούς προς υλοποίηση στους σχεδιαστές, οι οποίοι οφείλουν να λάβουν υπόψη τους παραμέτρους όπως απόδοση και πολυπλοκότητα.

Για τον σχεδιασμό ενός αποδοτικού αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού για την κατανομή δικτυακών πόρων στους σταθμούς συνδρομητών ενός IEEE 802.16 ασυρμάτου δικτύου έχουν προταθεί διαφορετικές προσεγγίσεις, με στόχο να ικανοποιηθούν οι διαφορετικές απαιτήσεις των ποικίλων εφαρμογών. Τα κύρια σημεία που πρέπει να καλύπτει ένας αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού για το πρότυπο IEEE 802.16 είναι να εξασφαλίζει απρόσκοπτα την περιοδική μετάδοση των ροών UGS, να ικανοποιεί τα όρια χρονοκαθυστέρησης των ροών rtPS, να εγγυάται το ελάχιστο δεσμευμένο εύρος ζώνης για τις ροές nrtPS και να είναι δίκαιος προς τις ροές BE. Η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι μια ακόμη σημαντική παράμετρος στο σχεδιασμό καθώς ο αλγόριθμος εκτελείται σε κάθε πλαίσιο και ο ρυθμός μετάδοσης των πλαισίων μπορεί να ανέρχεται σε αρκετές εκατοντάδες πλαίσια ανά δευτερόλεπτο.

Χρονοπρογραμματισμός των μεταδόσεων είναι απαραίτητος προς δύο κατευθύνσεις: από το σταθμό βάσης προς τους σταθμούς συνδρομητών και αντίστροφα. Η παρούσα εργασία εστιάζει στο χρονοπρογραμματισμό της κίνησης από τους σταθμούς συνδρομητών προς το σταθμό βάσης. Οι προτεινόμενες στη

βιβλιογραφία λύσεις στο πρόβλημα αυτό κυμαίνονται από απλούς αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού, όπως Round Robin, μέχρι πολύπλοκα σχήματα από ιεραρχίες ιδιαίτερα πολύπλοκων αλγορίθμων (π.χ. Earliest Deadline First και Distributed Fair Priority Queuing).

Στην πλειοψηφία των προτεινόμενων αλγορίθμων, η κίνηση rtPS, που παρουσιάζει ευαισθησία στην καθυστέρηση, έχει απόλυτη προτεραιότητα έναντι της, ανεκτικότερης στην καθυστέρηση, κίνησης nrtPS. Ο αλγόριθμος των J. Freitag και N. Fonseca [**2**] που εξετάζουμε διαφέρει στο ότι δίνει προτεραιότητα μόνο σε εκείνες τις ροές rtPS, οι οποίες αν δεν εξυπηρετηθούν άμεσα θα υπερβούν το όριο χρονοκαθυστέρησης, όπως αυτό έχει οριστεί. Οι υπόλοιπες ροές rtPS και nrtPS εξυπηρετούνται κατά σειρά προτεραιότητας, η οποία εξαρτάται από το εύρος ζώνης που έχει λάβει ήδη η κάθε σύνδεση σε σχέση με το συμφωνημένο ελάχιστο εύρος ζώνης καθώς και από το backlog πακέτων της σύνδεσης.

Στην εργασία αυτή, επεκτείνουμε τον αλγόριθμο των J. Freitag και N. Fonseca, υλοποιώντας ένα δυναμικό «παράθυρο ελέγχου», μέσα στο οποίο πραγματοποιείται ο έλεγχος για τη λήξη του ορίου χρονοκαθυστέρησης των ροών rtPS, έτσι ώστε αν παρατηρηθεί αδυναμία μίας ροής rtPS να τηρήσει το όριο χρονοκαθυστέρησης, να λάβει προτεραιότητα έναντι των υπολοίπων ροών rtPS και nrtPS με διεύρυνση του παραθύρου ελέγχου. Το «παράθυρο ελέγχου» δεν είναι καθολικό, αλλά διαφοροποιείται από ροή σε ροή, και το μέγεθός του μεταβάλλεται δυναμικά ανάλογα με την συμπεριφορά που επιδεικνύει κάθε ροή rtPS, ως προς την τήρηση των ορίων χρονοκαθυστέρησης που έχουν οριστεί για αυτήν.

Για την υλοποίηση του προτεινόμενου αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ns-2 και το WiMAX module των Freitag/Fonseca. Για την αξιολόγηση του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για διαφορετικά σενάρια κίνησης στο δίκτυο. Τα συγκριτικά αποτελέσματα απόδοσης των δύο αλγορίθμων που παρατίθενται δείχνουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιτυγχάνει μικρότερες καθυστερήσεις για την κίνηση rtPS και αποδοτικότερη εκμετάλλευση του καναλιού uplink, επιτρέποντας την εξυπηρέτηση μεγαλύτερου όγκου κίνησης nrtPS και BE, όταν το δίκτυο λειτουργεί σε συνθήκες υψηλού φόρτου.

Πίνακας Περιεχομένων

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, πάνω από όλα, τους γονείς μου που είναι συνεχώς δίπλα μου και με στηρίζουν σε κάθε βήμα, σε όλες τις επιτυχίες μου και προπαντός σε κάθε αποτυχία μου. Ύστερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου, τα μέλη της επιτροπής αξιολόγησης της διπλωματικής μου εργασίας, κ.κ. Μιχάλη Πατεράκη και Πολυχρόνη Κουτσάκη, και, ιδιαίτερα, την κα. Σοφία Τσακιρίδου, χάρη στην πολύτιμη καθοδήγηση και τις συμβουλές της οποίας κατάφερα να ολοκληρώσω επιτυχώς αυτή τη διπλωματική εργασία. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που με στήριξαν, με συμβούλευσαν και με βοήθησαν με τη φιλία τους, ο καθένας με διαφορετικό τρόπο, όλα αυτά τα χρόνια.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Ασύρματη Ευρυζωνική Πρόσβαση

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη παροχής ολοένα υψηλότερων ταχυτήτων πρόσβασης στο Διαδίκτυο, είτε σε επαγγελματικούς είτε σε οικιακούς χρήστες, παρουσίασε διαρκή αύξηση και η τεχνολογία των δικτύων επικοινωνίας γνώρισε αλματώδη εξέλιξη. Η παροχή όμως διαδικτυακής πρόσβασης μέσω οπτικών ινών ή/και ομοαξονικών καλωδίων μέχρι τον τελικό συνδρομητή, ή στο «τελευταίο μίλι» (“last mile”) όπως συνηθίζεται να λέγεται, είναι ιδιαίτερα ακριβή και κρίνεται συχνά οικονομικά ασύμφορη, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση, ως εναλλακτική λύση στα καλωδιακά δίκτυα (cable networks) και στα δίκτυα ψηφιακών συνδρομητικών γραμμών (Digital Subscriber Line – DSL), έχει καταστεί ο ευκολότερος και φθηνότερος τρόπος για την εγκαθίδρυση ασύρματης επικοινωνίας καθώς και η προσφορότερη λύση για τις περιπτώσεις εκείνες όπου υπάρχει άμεση ανάγκη για μετάδοση δεδομένων, φωνής και πολυμέσων, όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών[1]. Με την ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση καθίσταται δυνατό να παρέχουμε ταχεία πρόσβαση στο Διαδίκτυο καλύπτοντας μία ευρεία γεωγραφική περιοχή με ιδιαίτερα ευέλικτο τρόπο και με χαμηλό κόστος.

Η ομάδα εργασίας 802.16 του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) για την ανάπτυξη προτύπων ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης σχεδίασε την οικογένεια προτύπων IEEE 802.16 Wireless MAN για ασύρματα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής [**1**]. Το πρωταρχικό πρότυπο ορίζει μία αρχιτεκτονική δικτύου σημείου προς πολλαπλά σημεία (Point-to-Multipoint – PMP) όπου ένας κεντρικός κόμβος που είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο κορμού, ο σταθμός βάσης (Base Station – BS),

---

[1] Η ασύρματη ευρυζωνική τεχνολογία WiMAX χρησιμοποιήθηκε για την αποκατάσταση τηλεπικοινωνιών τόσο μετά το τσουνάμι στην Ινδονησία το 2004 όσο και μετά τον τυφώνα Κατρίνα στις Ηνωμένες Πολιτείες.

παρέχει ασύρματη σύνδεση σε πολλαπλούς σταθμούς συνδρομητών (Subscriber Stations – SSs). Το πρότυπο IEEE 802.16 σχεδιάστηκε με στόχους την εύκολη εγκατάσταση υποδομής, την παροχή συνδέσεων ευρείας ταχύτητας, την κάλυψη μεγάλων γεωγραφικών περιοχών καθώς και την εκμετάλλευση μεγάλου μέρους του φάσματος. Επίσης, χαρακτηρίζεται από υψηλή επεκτασιμότητα και μικρά κόστη συντήρησης και αναβάθμισης. Τέλος, το IEEE 802.16 σχεδιάστηκε για να παρέχει εγγυήσεις ως προς την ποιότητα των παρεχομένων υπηρεσιών σε διαφορετικά είδη εφαρμογών με διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης.

1.2 Ποιότητα των παρεχομένων υπηρεσιών

Η τεχνολογία των δικτύων επικοινωνίας γνώρισε αλματώδη εξέλιξη τα τελευταία χρόνια. Την ανάπτυξη δικτύων κορμού υψηλών ταχυτήτων ακολούθησε, σχεδόν αμέσως, η ταχεία διάδοση των τεχνολογιών ενσύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης, όπως μισθωμένες γραμμές βασισμένες σε δίκτυα οπτικών ινών, ομοαξονικά δίκτυα και ψηφιακές συνδρομητικές γραμμές. Η ανάπτυξη των δικτυακών υποδομών και η διαθεσιμότητα υψηλών ρυθμών μετάδοσης είχαν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη και διάδοση ενός ευρέως φάσματος νέων πολυμεσικών δικτυακών εφαρμογών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι οι τηλεδιασκέψεις, η μετάδοση αποθηκευμένου βίντεο, η τηλεφωνία μέσω Διαδικτύου (voice over IP – VoIP), τα διαδικτυακά παιχνίδια και οι εφαρμογές χρήστη-προς-χρήστη (peer-to-peer). Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές TCP/IP εφαρμογές που είναι ελαστικές ως προς τις καθυστερήσεις και το απαιτούμενο εύρος ζώνης, οι περισσότερες εφαρμογές πολυμέσων απαιτούν εγγυήσεις ως προς την ποιότητα των υπηρεσιών που τους παρέχει το δίκτυο, όπως οριοθετημένες καθυστερήσεις και αποκλειστικά δεσμευμένο ελάχιστο εύρος ζώνης

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη υποστήριξης των νέων εφαρμογών πάνω από ασύρματα δίκτυα, το πρότυπο IEEE 802.16 σχεδιάστηκε για να παρέχει στους χρήστες ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση με εγγυήσεις ως προς την ποιότητα των παρεχομένων υπηρεσιών (Quality of Service – QoS). Τα πακέτα που διέρχονται από το επίπεδο MAC, είτε στην κατεύθυνση uplink είτε στην κατεύθυνση downlink, σχετίζονται με μία ροή υπηρεσίας (service flow). Για την εξυπηρέτηση διαφορετικών ειδών κίνησης με διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις, το πρότυπο ορίζει διαφορετικά είδη ροών καθένα με το δικό του σετ παραμέτρων QoS, όπως μέγιστη καθυστέρηση, μεταβλητότητα καθυστέρησης (delay jitter), ελάχιστο εγγυημένο εύρος ζώνης. Έτσι το εύρος ζώνης αποδίδεται σε κάθε ροή ανάλογα με το είδος της και τις τιμές των παραμέτρων QoS. Παρότι όμως το πρότυπο IEEE 802.16 ορίζει αυτές τις ροές υπηρεσίας, δεν ορίζει τον ακριβή τρόπο κατανομής των πόρων, αφήνει, δηλαδή, τους αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού και κατανομής πόρων ανοικτούς προς υλοποίηση.

Η μετάδοση κίνησης γίνεται προς δύο κατευθύνσεις. Στην κατεύθυνση από το σταθμό βάσης προς τους σταθμούς συνδρομητών (downlink) μεταδίδει αποκλειστικά ο σταθμός βάσης. Στην αντίθετη κατεύθυνση (uplink) οι σταθμοί συνδρομητών μοιράζονται το κανάλι. Την ευθύνη χρονοπρογραμματισμού της κίνησης στο κανάλι μετάδοσης έχει ο σταθμός βάσης. Στην κατεύθυνση downlink το έργο του χρονοπρογραμματισμού είναι σχετικά απλό, δεδομένου ότι μεταδίδει μόνο ο σταθμός βάσης που έχει άμεση πρόσβαση στις ουρές της προς μετάδοση κίνησης. Η κύρια σχεδιαστική πρόκληση είναι στην κατεύθυνση uplink. Στην κατεύθυνση αυτή, ο χρονοπρογραμματισμός από το σταθμό βάσης γίνεται με βάση τις αιτήσεις εύρους ζώνης που λαμβάνει από τους σταθμούς των συνδρομητών. Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός βάσης έχει ετεροχρονισμένη αντίληψη της κατάστασης των ουρών κίνησης των σταθμών συνδρομητών.

Για τη σχεδίαση ενός αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού uplink, συμβατού με το πρότυπο, θα πρέπει:

- Ο σταθμός βάσης να διαμοιράζει το εύρος ζώνης στην κατεύθυνση uplink με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζονται οι εγγυήσεις ποιότητας παρεχομένων υπηρεσιών για όλες τις ροές.
- Πέραν της μετάδοσης δεδομένων των συνδέσεων, ο σταθμός βάσης θα πρέπει να διαμοιράζει τους διαθέσιμους πόρους έτσι ώστε να δίνεται η δυνατότητα στους σταθμούς συνδρομητών να αιτηθούν εύρος ζώνης, ανάλογα με τις ανάγκες τους, όπως αυτό ορίζεται στο μηχανισμό αιτήσεων.

1.3 Αντικείμενο εργασίας

Το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, σχεδίαση, υλοποίηση και αξιολόγηση ενός νέου αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού uplink για το πρότυπο IEEE 802.16.

Αρχικά μελετήθηκαν οι υπάρχουσες προσεγγίσεις στο πρόβλημα της σχεδίασης ενός αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού uplink για το πρότυπο IEEE 802.16 και αναλύθηκαν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Από τις υπάρχουσες προτάσεις επιλέχθηκε η εργασία των Freitag/Fonseca, που ήταν και η μόνη που παρείχε ένα υλοποιημένο module του επιπέδου MAC για το λογισμικό δικτυακής προσομοίωσης ns-2, απαραίτητο για την διενέργεια προσομοιώσεων και την αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου.

Στη συνέχεια, αναγνωρίζοντας τις αδυναμίες του αλγορίθμου, προτείναμε τροποποιήσεις που είχαν ως στόχο την καλύτερη διαχείριση των ροών rtPS ως προς την καθυστέρηση.

Επεμβαίνοντας στο WiMAX module των Freitag/Fonseca, υλοποιήσαμε το νέο αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού και διενεργήσαμε προσομοιώσεις για την ανάδειξη και αξιολόγηση των διαφορών του με τον αρχικό αλγόριθμο ως προς την απόδοση.

Τέλος, παραθέσαμε γραφήματα που απεικονίζουν διάφορες μετρικές απόδοσης όπως εκμετάλλευση του καναλιού uplink, ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, ποσοστό εξυπηρετούμενων πακέτων και μέση καθυστέρηση πακέτων που καταδεικνύουν τη βελτίωση που επιτυγχάνεται με το νέο αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού.

1.4 Οργάνωση της Διπλωματικής

Αρχικά παρουσιάζεται το πρότυπο IEEE 802.16 στο κεφάλαιο 2. Στο κεφάλαιο 3 αναλύονται διαφορετικές σχεδιάσεις αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού uplink που προτείνονται στη βιβλιογραφία. Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού. Στο κεφάλαιο 5 αναλύονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και παρουσιάζονται συγκρίσεις με τον αρχικό αλγόριθμο. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματά μας καθώς και ιδέες για μελλοντική επέκταση της εργασίας.

Κεφάλαιο 2: Το Πρότυπο IEEE 802.16 Wireless MAN

Το πρότυπο IEEE 802.16 συντάχθηκε από την ομώνυμη ομάδα εργασίας, του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, που συστάθηκε το 1999 με σκοπό να σχεδιάσει πρότυπα για την παγκόσμια ανάπτυξη ασύρματων ευρυζωνικών μητροπολιτικών δικτύων. Το πρότυπο, που έχει εμπορευματοποιηθεί κάτω από το όνομα "WiMAX" (Worldwide Interoperability for Microwave Access) από τη βιομηχανική συμμαχία WiMAX Forum[2], ορίζει τις προδιαγραφές του φυσικού επιπέδου (Physical Layer – PHY) και του επιπέδου ελέγχου πρόσβασης μέσου (Media Access Control – MAC) του μοντέλου αναφοράς OSI και παρέχει τη δυνατότητα για ταχεία, παγκόσμια ανάπτυξη καινοτόμων, οικονομικά αποδοτικών και διαλειτουργικών προϊόντων, διαφορετικών κατασκευαστών, προωθεί τον ανταγωνισμό στην παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης παρέχοντας εναλλακτικές λύσεις στην ενσύρματη διαδικτυακή πρόσβαση και επιταχύνει την εμπορευματοποίηση των ασύρματων ευρυζωνικών συστημάτων δικτυακής πρόσβασης. Το WiMAX Forum έχει ως κύριους στόχους την προώθηση των προτύπων 802.16 στην παγκόσμια αγορά, την παροχή πιστοποίησης για την επίτευξη διαλειτουργικότητας συσκευών και δικτύων σε παγκόσμιο επίπεδο και την ανάπτυξη τεχνικών προδιαγραφών που βασίζονται σε ανοικτά πρότυπα για την επίτευξη ενός εμπορικά βιώσιμου παγκόσμιου "οικοσυστήματος" για το WiMAX.

2.1 Η εξέλιξη του προτύπου IEEE 802.16

Η πρώτη έκδοση του προτύπου IEEE 802.16 που δημοσιεύτηκε το 2001 (802.16-1) αφορά τη λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων 10 – 66 GHz όπου απαιτείται οπτική επαφή (Line-Of-Sight – LOS) μεταξύ των σταθμών. Στο φυσικό επίπεδο χρησιμοποιείται διαμόρφωση απλού φορέα (Single Carrier – SC).

[2] Η συμμαχία WiMAX Forum αριθμεί πάνω από 522 μέλη και σε αυτήν μετέχουν σχεδόν όλες οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών του πλανήτη.

Το πρότυπο IEEE 802.16a αποτελεί επέκταση του 802.16-1 με λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων 2 – 11 GHz, που καθιστά δυνατή τη χρήση του προτύπου σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή (Non-Line-Of-Sight – NLOS) μεταξύ των σταθμών. Οι προδιαγραφές του φυσικού επιπέδου επεκτάθηκαν ώστε να συμπεριλάβουν ένα φυσικό επίπεδο βασισμένο σε Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) και ένα βασισμένο σε Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) για να αντιμετωπισθεί η διάδοση χωρίς οπτική επαφή. Σε αυτή τη φάση εξέλιξης, το πρότυπο 802.16 στόχευε στην παροχή ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης σε σταθμούς σταθερής θέσης (fixed broadband access).

Το 2004 το IEEE ξεκίνησε ένα σχέδιο εναρμονισμού του προτύπου με τμήματα του προτύπου HIPERMAN του ευρωπαϊκού ETSI, το οποίο κατέληξε, ενοποιώντας όλα τα προηγούμενα πρότυπα (802-16, a, c), στο πρότυπο 802.16-2004, γνωστό και ως Fixed WiMAX. Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίστηκε στη σχεδίαση και μελέτη ενός αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού για το πρότυπο IEEE 802.16-2004, το επίπεδο MAC του οποίου έχει υλοποιηθεί στο λογισμικό δικτυακής προσομοίωσης ns-2.

Το πρότυπο 802.16e-2005 [3] βασίστηκε στο 802.16-2004 και επικεντρώθηκε στο θέμα της υποστήριξης της κινητικότητας των σταθμών συνδρομητών, γι' αυτό και είναι γνωστό ως Mobile WiMAX. Εισήγαγε την τεχνική Scalable OFDMA στο φυσικό επίπεδο και χρησιμοποιεί προηγμένα συστήματα κεραιών (τεχνολογία Multiple-in Multiple-out – MIMO) για την καλύτερη υποστήριξη συνδέσεων χωρίς οπτική επαφή. Στο πρότυπο προδιαγράφονται διαδικασίες μεταπομπών μεταξύ σταθμών βάσης και διαδικασίες εξοικονόμησης ενέργειας στο φορητό εξοπλισμό με στόχο την εξυπηρέτηση της κινητικότητας των χρηστών.

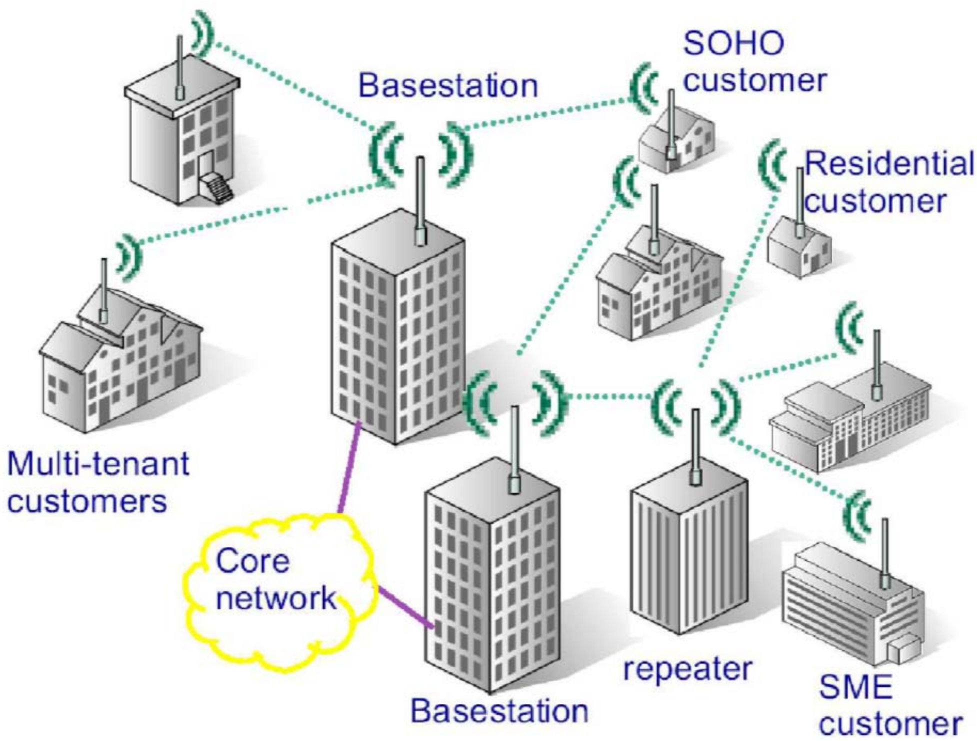
Το πρότυπο αυτό μαζί με διάφορες βελτιώσεις και προσθήκες αναβαθμίστηκε στο 802.16-2009 [**3**]. Το Μάρτιο του 2011 εγκρίθηκε από το IEEE η έκδοση 802.16m, η οποία στοχεύει στην ικανοποίηση των απαιτήσεων IMT-Advanced του ITU-R για τα ασύρματα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G). Οι απαιτήσεις αυτές προβλέπουν μέγιστους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων στη ραδιοκυματική επαφή άνω των 100 Mbps σε κινητούς σταθμούς και άνω του

1 Gbps σε σταθερούς. Η έκδοση 802.16m παρέχει τις βελτιώσεις στην απόδοση που είναι απαραίτητες για την υποστήριξη των μελλοντικών προηγμένων υπηρεσιών και εφαρμογών για τα ευρυζωνικά δίκτυα κινητών επικοινωνιών της επόμενης γενιάς.

2.2 Αρχιτεκτονική δικτύου του IEEE 802.16-2004

Το πρότυπο IEEE 802.16 υποστηρίζει την αρχιτεκτονική σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία (Point-to-Multipoint - PMP) και, προαιρετικά, την τοπολογία πλέγματος (mesh). Στη βασική τοπολογία PMP ένας κεντρικός Σταθμός Βάσης (Base Station - BS) συντονίζει τις μεταδόσεις από και προς πολλαπλούς Σταθμούς Συνδρομητών (Subscriber Stations - SSs). Αντίστοιχα με τα κυψελωτά δίκτυα, στην τοπολογία PMP η επικοινωνία είναι δυνατή μόνο μεταξύ σταθμού βάσης και σταθμού συνδρομητή ενώ στην τοπολογία πλέγματος οι σταθμοί συνδρομητών μπορούν να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην αρχιτεκτονική PMP.

Στην εικόνα 1 απεικονίζεται σχηματικά μία τοπολογία PMP, αποτελούμενη από δύο σταθμούς βάσης, καθένας εκ των οποίων συνδέεται ενσύρματα με το δίκτυο κορμού και ασύρματα με διάφορους σταθερούς σταθμούς συνδρομητών.

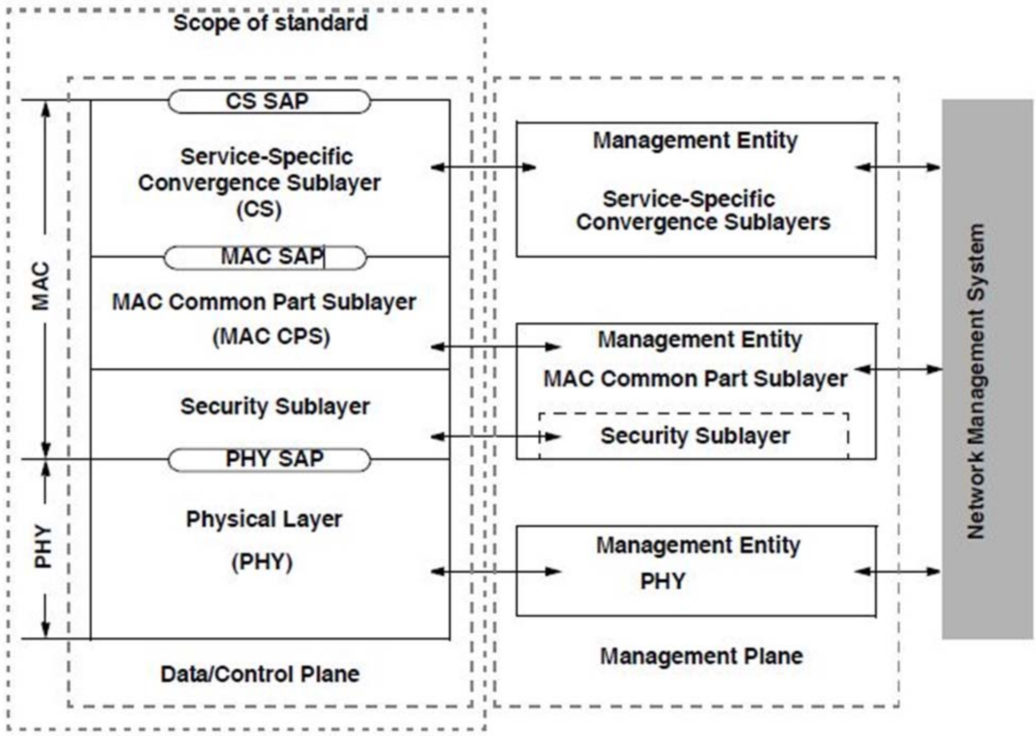


Εικόνα 1: Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο PMP

2.3 Μοντέλο αναφοράς του IEEE 802.16-2004

Το πρότυπο αναφοράς IEEE 802.16, όπως όλα τα πρότυπα της οικογένειας 802, καθορίζει τις προδιαγραφές των επιπέδων Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (Medium Access Control – MAC) και Φυσικού (Physical – PHY).

Το μοντέλο αναφοράς του προτύπου IEEE 802.16-2004 απεικονίζεται στην εικόνα 2.



Εικόνα 2: Το μοντέλο αναφοράς του προτύπου IEEE 802.16-2004 [1]

Το επίπεδο MAC αποτελείται από 3 υποεπίπεδα: Service-Specific Convergence Sublayer (CS), MAC Common Part Sublayer (CPS) και Security Sublayer.

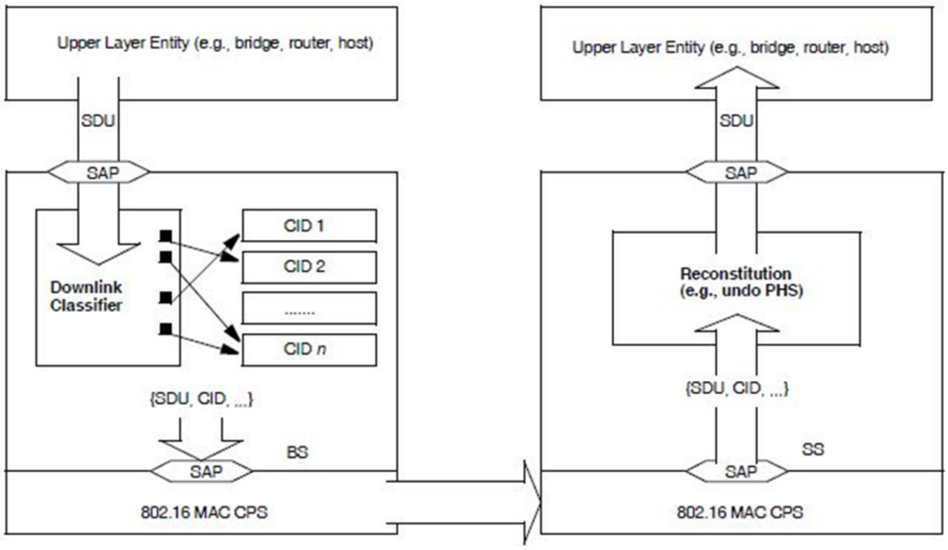
- ***Service-specific Convergence Sublayer***. Το CS παρέχει οποιονδήποτε μετασχηματισμό ή αντιστοιχία των δεδομένων που λαμβάνονται από το εξωτερικό δίκτυο μέσω του CS Service Access Point (CS SAP) σε MAC SDUs, που με τη σειρά τους λαμβάνονται από το MAC CPS μέσω του MAC SAP. Το CS λαμβάνει PDUs από το ανώτερο επίπεδο που μπορεί να έχουν διαφορετικές μορφές ανάλογα με το εξωτερικό δίκτυο, π.χ. πακέτα TCP/IP, Ethernet ή ATM. Κάθε PDU καταρχάς κατηγοριοποιείται, δηλαδή αντιστοιχίζεται σε μια συγκεκριμένη σύνδεση[3] (Connection) και την αντίστοιχη ροή υπηρεσίας[3] (Service Flow), της οποίας τα χαρακτηριστικά καθορίζουν την ποιότητα υπηρεσιών για το

[3] Το επίπεδο MAC του IEEE 802.16 είναι συνδεσιστρεφές (connection-oriented). Σε κάθε σύνδεση αντιστοιχεί μία ροή υπηρεσίας η οποία χαρακτηρίζεται από ένα σετ παραμέτρων QoS που προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις εξυπηρέτησης της κίνησης που μεταφέρει η σύνδεση. Οι έννοιες της σύνδεσης και της ροής υπηρεσίας παρουσιάζονται αναλυτικά σε επόμενες ενότητες.

PDU. Στη συνέχεια, το PDU υπόκειται σε συμπίεση επικεφαλίδας, εάν είναι ενεργοποιημένη η συμπίεση επικεφαλίδας ωφέλιμου φορτίου (Payload Header Suppression – PHS). Κατόπιν ενθυλακώνεται σε ένα MAC SDU και παραδίδεται στο MAC SAP για μεταφορά στο ομότιμο (peer) MAC SAP του παραλήπτη (σταθμός βάσης ή σταθμός συνδρομητή). Τα κατώτερα επίπεδα αγνοούν το είδος του πακέτου που μεταφέρεται στο ωφέλιμο φορτίο ενός MAC SDU. Το ομότιμο CS στον παραλήπτη αναλαμβάνει την αναδόμηση του αρχικού PDU από το λαμβανόμενο MAC SDU. Η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 3 στην κατεύθυνση μετάδοσης από το σταθμό βάσης στο σταθμό του συνδρομητή. Εντελώς αντίστοιχα εκτελείται και στην αντίθετη κατεύθυνση.

- ***MAC Common Part Sublayer***. Το MAC CPS παρέχει τη βασική λειτουργικότητα του MAC αναφορικά με τον έλεγχο πρόσβασης μέσου, την απόδοση εύρους ζώνης, και την εγκαθίδρυση, έλεγχο και διατήρηση συνδέσεων για τη μεταφορά των δεδομένων. Στο επίπεδο αυτό γίνεται ο έλεγχος παροχής εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας (QoS control). Οι υπηρεσίες ελέγχου πρόσβασης μέσου και απόδοσης εύρους ζώνης περιγράφονται σε επόμενες ενότητες.
- ***Security Sublayer***. Το υποεπίπεδο ασφαλείας παρέχει λειτουργίες πιστοποίησης, ανταλλαγής κλειδιών ασφαλείας και κρυπτογράφησης.

Στο φυσικό επίπεδο, το πρότυπο περιλαμβάνει πολλαπλές προδιαγραφές σχεδιασμένες για την αποδοτική λειτουργία σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και κάτω από διαφορετικές συνθήκες διάδοσης.



Εικόνα 3: Κατηγοριοποίηση και αντιστοίχηση CID (BS προς SS)

2.4 Φυσικό επίπεδο (PHY)

Το πρότυπο IEEE 802.16-2004 ορίζει τέσσερις διαφορετικές προδιαγραφές φυσικού επιπέδου οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου και να παρέχουν μια αξιόπιστη σύνδεση. Από τις προδιαγραφές αυτές, η WirelessMAN-SC™ που ορίστηκε στο αρχικό πρότυπο, είναι σχεδιασμένη για λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων 10 - 66 GHz και σε συνθήκες όπου υπάρχει οπτική επαφή. Οι υπόλοιπες αφορούν τη ζώνη λειτουργίας 2 - 11 GHz και περιβάλλον διάδοσης NLOS.

Οι προδιαγραφές της ασύρματης διεπαφής (air interface) είναι:

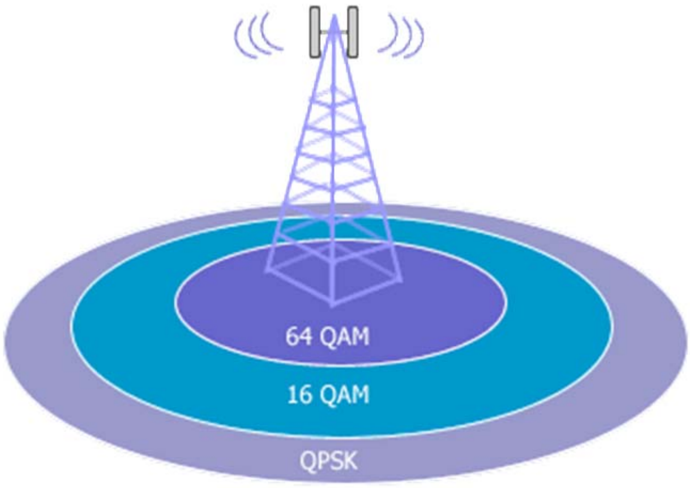
- ***WirelessMAN-SC™***. Χρησιμοποιεί διαμόρφωση μονού φέροντος (single-carrier). Λόγω του μικρού μήκους κύματος, η οπτική επαφή μεταξύ των σταθμών είναι απαραίτητη και το φαινόμενο multipath είναι αμελητέο. Σε αυτό το εύρος φάσματος τυπικά χρησιμοποιούνται κανάλια των 25 MHz ή των 28 MHz. Η πρόσβαση πολλαπλών σταθμών συνδρομητών γίνεται με πολλαπλή πρόσβαση χρονικής κατάτμησης (Time Division Multiple Access – TDMA).

- ***WirelessMAN-SCa™***. Χρησιμοποιεί διαμόρφωση μονού φέροντος όπως και το WirelessMAN-SC™. Χρησιμοποιεί TDMA για την πρόσβαση των σταθμών στο ανερχόμενο (uplink) κανάλι.
- ***WirelessMAN-OFDM™***. Χρησιμοποιεί διαμόρφωση OFDM με 256 φέροντα (carriers). Χρησιμοποιεί TDMA για την πρόσβαση στο κανάλι uplink.
- ***WirelessMAN-OFDMA™***. Χρησιμοποιεί διαμόρφωση OFDM με 2048 φέροντα. Η πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται με την απόδοση ενός υποσυνόλου των φερόντων στον αποδέκτη, για αυτό και αναφέρεται ως OFD Multiple Access (OFDMA).

Δεν θα επεκταθούμε σε λεπτομέρειες σχετικά με τις προδιαγραφές φυσικού επιπέδου. Θα παραθέσουμε μόνο μερικά στοιχεία για την προδιαγραφή WirelessMAN-SC™ και θα σταθούμε στα σημεία εκείνα όπου οι επιλογές του φυσικού επιπέδου αφορούν και το επίπεδο MAC: την τεχνική αμφιδρόμησης (duplexing) για την επίτευξη αμφίδρομης επικοινωνίας και την οργάνωση σε πλαίσια της πληροφορίας που μεταδίδεται στο φυσικό επίπεδο.

2.4.1 WirelessMAN-SC™

Το εύρος ζώνης των καναλιών κυμαίνεται από 20 - 25 MHz (Ηνωμένες Πολιτείες) έως 28 MHz (Ευρώπη). Για τη διόρθωση λαθών (Forward Error Correction – FEC) χρησιμοποιείται κώδικας Reed-Solomon με μεταβλητό μέγεθος block. Για τη διαμόρφωση υποστηρίζονται τα σχήματα QPSK, 16-QAM, 64-QAM και στις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης. Το πρότυπο εφαρμόζει προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (Adaptive Modulation and Coding – AMC) για να προσαρμόσει το ρυθμό μετάδοσης σε κάθε πλαίσιο ανάλογα με την ποιότητα του ασύρματου καναλιού.



Εικόνα 4: Διαφορετικές διαμορφώσεις ανάλογα με την απόσταση από το σταθμό

Οι ρυθμοί μετάδοσης για τα διαφορετικά σχήματα μετάδοσης και για διαφορετικά μεγέθη καναλιού απεικονίζονται στην εικόνα 5.

Μέγεθος καναλιού (MHz)	Ρυθμός Συμβόλων (MBd)	Bit rate (Mbps) QPSK	Bit rate (Mbps) 16-QAM	Bit rate (Mbps) 64-QAM
20	16	32	64	96
25	20	40	80	120
28	22.4	44.8	89.6	134.4

Εικόνα 5: Μέγεθος καναλιών και ρυθμοί μετάδοσης

2.4.2 Τεχνικές αμφιδρόμησης

Στο πρότυπο IEEE 802.16 προβλέπεται η χρήση και των δύο τεχνικών αμφιδρόμησης, επιμερισμού χρόνου (Time Division Duplex – TDD) και επιμερισμού συχνότητας (Frequency Division Duplex – FDD), για όλες τις προδιαγραφές φυσικού επιπέδου με κάποιους περιορισμούς όταν η λειτουργία είναι σε μη αδειοδοτημένες ζώνες:

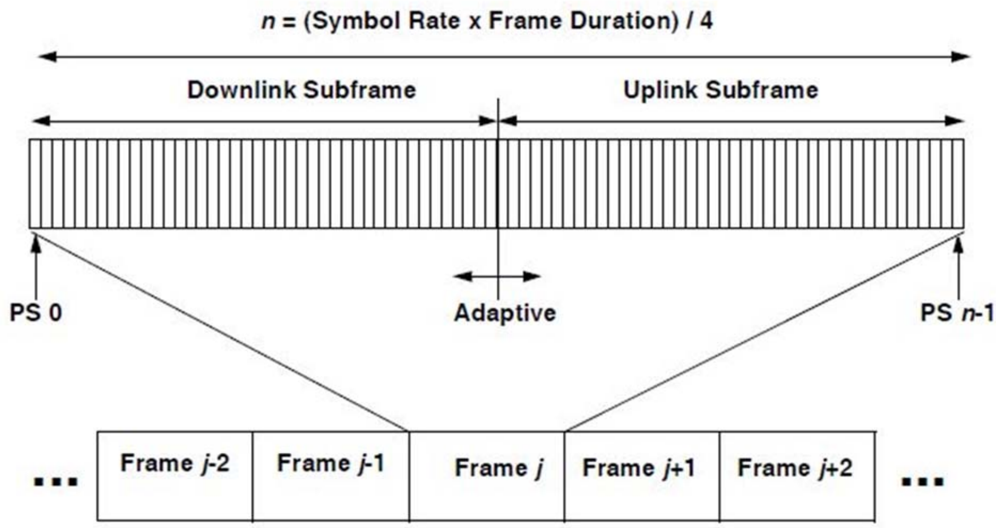
- Στην τεχνική αμφιδρόμησης TDD, τα κανάλια uplink και downlink μεταδίδουν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, οπότε δεν μεταδίδουν ταυτόχρονα αλλά σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα.
- Στην τεχνική αμφιδρόμησης FDD, τα κανάλια uplink και downlink μεταδίδουν σε διακεκριμένες ζώνες συχνοτήτων οπότε μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα.

2.4.3 Πλαισίωση (Framing)

Στο πρότυπο IEEE 802.16, η μετάδοση πληροφορίας στο φυσικό επίπεδο είναι οργανωμένη σε πλαίσια σταθερής διάρκειας. Ένα πλαίσιο μπορεί να μεταφέρει πολλαπλά MAC PDUs που προορίζονται για πολλαπλές συνδέσεις και πολλαπλούς προορισμούς. Κάθε πλαίσιο διαιρείται σε φυσικές χρονοθυρίδες (physical slots – PSs). Το physical slot είναι η βασική μονάδα κατανομής εύρους ζώνης. Στο WirelessMAN-SC™ ο αριθμός των physical slots σε ένα πλαίσιο, n, είναι συνάρτηση του ρυθμού συμβόλων και της διάρκειας του πλαισίου, n = (ρυθμός συμβόλων × διάρκεια πλαισίου)/4.

Όταν εφαρμόζεται η τεχνική αμφιδρόμησης TDD, κάθε πλαίσιο χωρίζεται σε δύο υποπλαίσια, downlink και uplink, για την μετάδοση της πληροφορίας από το σταθμό βάσης στους σταθμούς συνδρομητών και αντίστροφα. Η διάρκεια των υποπλαισίων downlink και uplink μπορεί να ρυθμίζεται από πλαίσιο σε πλαίσιο.

Η δομή ενός πλαισίου TDD και ο διαχωρισμός του σε υποπλαίσια downlink και uplink απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 6: Δομή πλαισίου TDD

Με τη διαίρεση του πλαισίου σε υποπλαίσια δημιουργούνται δύο λογικά κανάλια μετάδοσης, το κατερχόμενο (downlink), από το σταθμό βάσης προς τους σταθμούς συνδρομητών, και το ανερχόμενο (uplink), στην αντίστροφη κατεύθυνση, τα οποία εξετάζουμε στη συνέχεια για το WirelessMAN-SC™.

2.4.4 Κανάλι downlink

Το λογικό κανάλι downlink χρησιμοποιείται από το σταθμό βάσης για να μεταδώσει δεδομένα και πληροφορία ελέγχου προς όλους τους σταθμούς συνδρομητών. Είναι ένα κανάλι broadcast, που σημαίνει ότι όλοι οι σταθμοί συνδρομητών λαμβάνουν την πληροφορία που μεταδίδεται. Παρόλα αυτά, ένας σταθμός συνδρομητή είναι υποχρεωμένος να επεξεργαστεί μόνο τα πακέτα που αναφέρονται συγκεκριμένα σε αυτόν ή πακέτα που είναι προορισμένα ρητά για όλους τους σταθμούς συνδρομητών. Η μετάδοση στο κανάλι γίνεται με την τεχνική της πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing – TDM) όπου η πληροφορία που προορίζεται για τους σταθμούς συνδρομητών πολυπλέκεται σε μία ροή δεδομένων που λαμβάνεται από όλους τους σταθμούς.

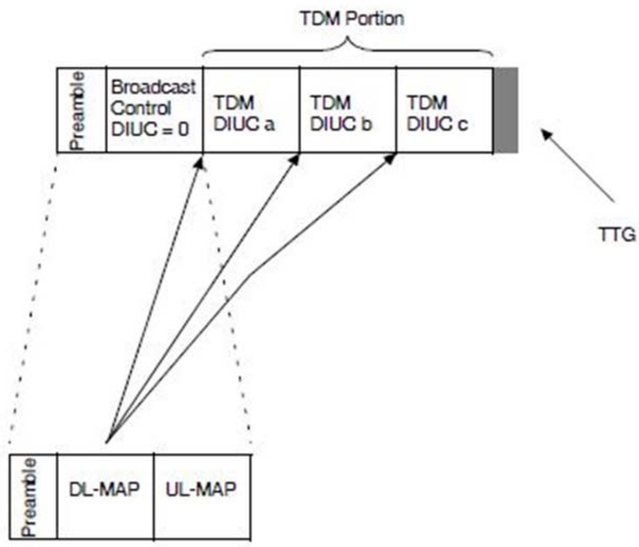
Το υποπλαίσιο ξεκινά με ένα frame start preamble, το οποίο ακολουθείται από το τμήμα ελέγχου πλαισίου, που περιέχει το DL-MAP, που αναφέρεται στο τρέχον υποπλαίσιο downlink, και το UL-MAP, που αναφέρεται σε κάποια μελλοντική στιγμή. Το DL-MAP αναφέρει διάρκεια πλαισίου, αριθμό πλαισίου, ταυτότητα καναλιού downlink (channel ID) και τον χρόνο στον οποίο γίνονται οι αλλαγές στο φυσικό επίπεδο (διαμόρφωση και FEC) μέσα στο υποπλαίσιο downlink. Το μήνυμα UL-MAP αναφέρει ταυτότητα καναλιού uplink, το χρόνο έναρξης του υποπλαισίου uplink σχετικά με την αρχή του πλαισίου και τις κατανομές εύρους ζώνης σε συγκεκριμένους σταθμούς συνδρομητών.

Εν συνεχεία υπάρχουν τα τμήματα TDM που μεταφέρουν τα δεδομένα, οργανωμένα σε bursts[4] και ταξινομημένα κατά μειούμενο βαθμό ανθεκτικότητας (robustness), έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι θα δοθεί η δυνατότητα στους σταθμών συνδρομητών να λάβουν τα δεδομένα τους πριν τους παρουσιαστεί ένα burst profile που πιθανώς να προκαλέσει τον αποσυγχρονισμό τους από το δίκτυο. Για παράδειγμα, εάν οι παράμετροι FEC δεν αλλάζουν, η μετάδοση δεδομένων ξεκινά με διαμόρφωση QPSK, ακολουθούμενη από την 16-QAM και, τέλος, από την 64-QAM. Μετά το υποπλαίσιο downlink ακολουθεί ένα χρονικό διάστημα TTG (Transmit/Receive Transition Gap) που απαιτείται ώστε ο σταθμός βάσης να μεταβεί από κατάσταση εκπομπής σε κατάσταση λήψης και ο σταθμός συνδρομητή που μεταδίδει πρώτος στο uplink να κάνει την απαραίτητη μετάβαση από κατάσταση λήψης σε κατάσταση εκπομπής.

Σημειώνεται ότι το εύρος ζώνης αποδίδεται στους διάφορους σταθμούς συνδρομητών, στην κατεύθυνση uplink, σε αριθμό mini-slots και όχι σε physical slots. Κάθε mini slot αντιστοιχεί σε 2^m physical slots ($0 \leq m \leq 7$).

Η δομή του υποπλαισίου downlink απεικονίζεται στην εικόνα 7.

[4] Με τον όρο burst αναφερόμαστε σε ένα συνεχές τμήμα της ροής δεδομένων TDM που χρησιμοποιεί παραμέτρους διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του burst. Οι τιμές των παραμέτρων μετάδοσης (burst profile) καθορίζονται από το Downlink Interval Usage Code (DIUC).



Εικόνα 7: Δομή υποπλαισίου TDD downlink

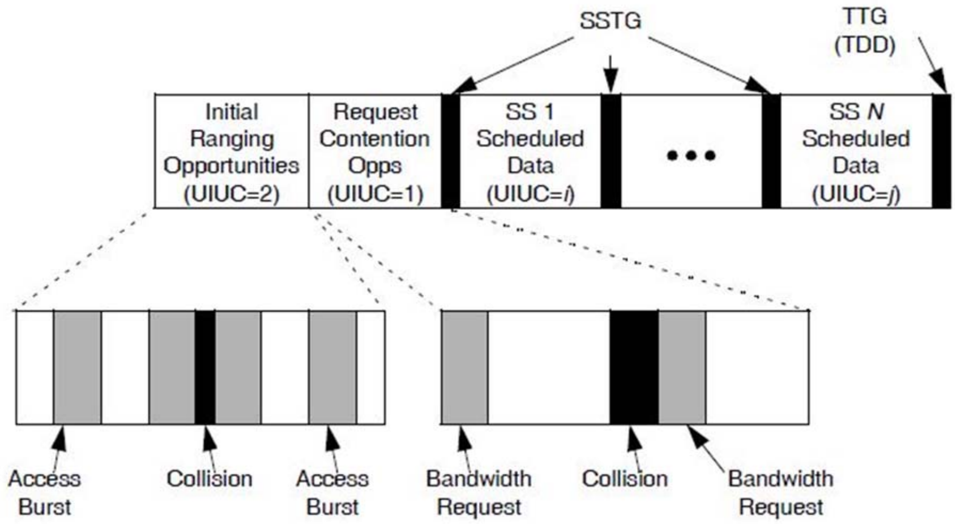
2.4.4 Κανάλι uplink

Το λογικό κανάλι uplink διαμοιράζεται ανάμεσα στους σταθμούς συνδρομητών βάσει χρόνου. Ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για το διαμοιρασμό των διαθέσιμων πόρων στους σταθμούς συνδρομητών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός πολλαπλής πρόσβασης χρονικής κατάτμησης (Time Division Multiple Access – TDMA) και πολλαπλής πρόσβασης αιτητής εκχώρησης (Demand Assigned Multiple Access – DAMA). Δηλαδή, το κανάλι διαιρείται σε έναν αριθμό από physical slots τα οποία εκχωρούνται για διάφορους σκοπούς (εγγραφή, μετάδοση αιτήσεων εύρους ζώνης, μετάδοση κίνησης χρηστών) ανά πλαίσιο, ανάλογα με τη ζήτηση. Το UL-MAP, που μεταδόθηκε στο υποπλαίσιο downlink, καθορίζει τον αριθμό των slots που αποδίδονται σε συγκεκριμένους σταθμούς συνδρομητών. Οι σταθμοί μεταδίδουν στη χρονική στιγμή που τους ανατέθηκε, χρησιμοποιώντας το burst profile που ορίζεται από το Uplink Interval Usage Code (UIUC).

Μία τυπική δομή υποπλαισίου uplink για το WirelessMAN-SC™ απεικονίζεται στην εικόνα 8. Στο υποπλαίσιο διακρίνονται τρεις τάξεις ριπών (bursts).

Αυτές είναι:

- Bursts για αρχικοποίηση που μεταδίδονται με ανταγωνισμό (contention – based).
- Bursts για αιτήσεις απόδοσης εύρους ζώνης που μεταδίδονται με ανταγωνισμό (contention – based).
- Bursts δεδομένων από συγκεκριμένους σταθμούς συνδρομητών στους οποίους έχει εκχωρηθεί εύρος ζώνης με τον μηχανισμό των bandwidth grants.



Εικόνα 8: Δομή υποπλαισίου TDD uplink

2.5 Επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC)

Το πρωτόκολλο MAC του IEEE 802.16 είναι συνδεσιστρεφές (connection-oriented). Δηλαδή, εγκαθιδρύεται λογική σύνδεση μεταξύ των MAC peers πριν από την ανταλλαγή πληροφορίας (MAC PDUs). Όλη η κίνηση δεδομένων χαρτογραφείται σε συνδέσεις που εξατομικεύονται από μία ταυτότητα σύνδεσης (Connection Identifier – CID) των 16 bits. Αυτή η χαρτογράφηση προσφέρει έναν μηχανισμό για αιτήσεις εύρους ζώνης, σύνδεσης παραμέτρων παροχής εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και δρομολόγησης δεδομένων στο κατάλληλο υπόστρωμα σύγκλισης.

Κάθε σταθμός συνδρομητή αναγνωρίζεται από μία διεύθυνση MAC των 48 bits, που τον προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο. Η διεύθυνση αυτή όμως χρησιμοποιείται μόνο κατά τις διαδικασίες εγγραφής του σταθμού στο δίκτυο και εξακρίβωσης ταυτότητας (authentication). Σε αντίθεση με άλλα ασύρματα πρωτόκολλα, όπως το IEEE 802.11, όπου κάθε MAC PDU περιλαμβάνει τις διευθύνσεις MAC πηγής και προορισμού των 48 bits η καθεμία, το συνδεσιστρεφές MAC του προτύπου IEEE 802.16 χρησιμοποιεί το CID των 16 bits για να προσδιορίσει με μοναδικό τρόπο την πληροφορία που ανταλλάσσεται μεταξύ σταθμού βάσης και σταθμού συνδρομητή, τόσο τα δεδομένα του χρήστη όσο και τα δεδομένα διαχείρισης.

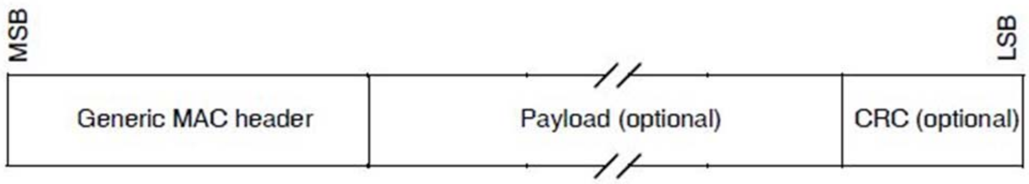
Όσον αφορά τα δεδομένα διαχείρισης, κατά την αρχική εγγραφή ενός σταθμού συνδρομητή στο δίκτυο εγκαθιδρύονται δύο ζευγάρια από συνδέσεις διαχείρισης (management connections) και, προαιρετικά, ένα τρίτο ζευγάρι.

- Το πρώτο ζευγάρι, ονομαζόμενο Βασική Σύνδεση (Basic Connection), χρησιμοποιείται για τη μετάδοση μικρών, επειγόντων μηνυμάτων MAC μεταξύ σταθμού βάσης και σταθμού συνδρομητή.
- Η Πρωτεύουσα Σύνδεση (Primary Connection) μεταφέρει μεγαλύτερα μηνύματα διαχείρισης MAC που είναι ανεκτικότερα σε καθυστερήσεις.
- Τέλος, η Δευτερεύουσα Σύνδεση (Secondary Connection) χρησιμοποιείται για να μεταφέρει μηνύματα διαχείρισης από ανώτερα επίπεδα όπως, για παράδειγμα, αυτά που υποστηρίζουν πρωτόκολλα όπως το DHCP, TFTP, SNMP κ.α.

Για τη μεταφορά δεδομένων του χρήστη εγκαθιδρύονται συνδέσεις μεταφοράς (transport connections).

2.5.1 MAC Protocol Data Unit

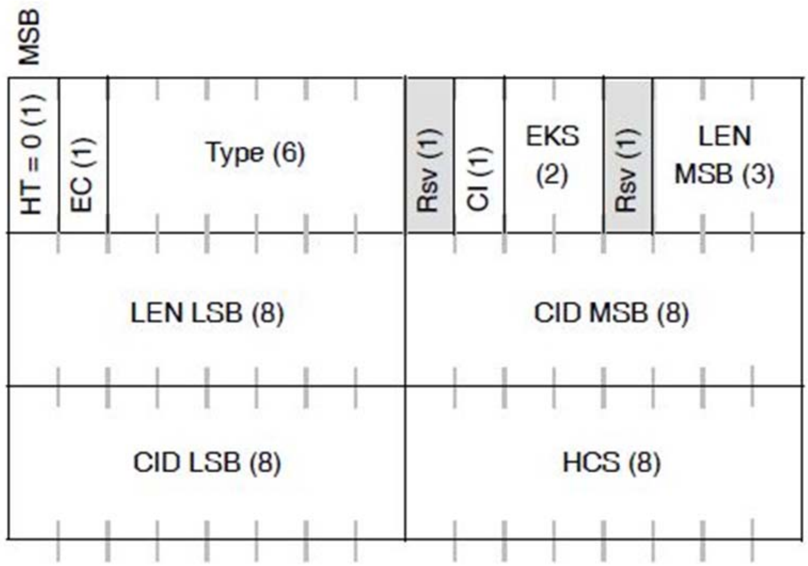
Η μονάδα πληροφορίας (data unit) που ανταλλάσσεται μεταξύ των επιπέδων ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) του σταθμού βάσης και των σταθμών συνδρομητών ονομάζεται MAC Protocol Data Unit (MAC PDU). Κάθε MAC PDU αναφέρεται σε συγκεκριμένη σύνδεση με ταυτότητα CID και την αντίστοιχη ροή υπηρεσίας με ταυτότητα SFID. Η μορφή του MAC PDU φαίνεται στην εικόνα 9. Κάθε MAC PDU αποτελείται από μια επικεφαλίδα (generic MAC header) των 6 bytes, ένα ωφέλιμο φορτίο (payload) μεταβλητού μεγέθους και ένα προαιρετικό πεδίο CRC για τον έλεγχο σφαλμάτων σε επικεφαλίδα και ωφέλιμο φορτίο. Το μέγιστο μήκος ενός MAC PDU είναι 2048 bytes.



Εικόνα 9: Μορφή MAC PDU

Ορίζονται δύο μορφές επικεφαλίδας MAC. Η πρώτη είναι η generic MAC header που βρίσκεται στην αρχή κάθε MAC PDU που μεταφέρει μηνύματα διαχείρισης MAC ή δεδομένα του υποστρώματος σύγκλισης. Η δεύτερη είναι η επικεφαλίδα αίτησης εύρους ζώνης (bandwidth request header) που χρησιμοποιείται στις αιτήσεις εύρους ζώνης που αποστέλλει ένας σταθμός συνδρομητή στο σταθμό βάσης. Η διάκριση μεταξύ των δύο γίνεται από το πεδίο Header Type (HT) του ενός bit.

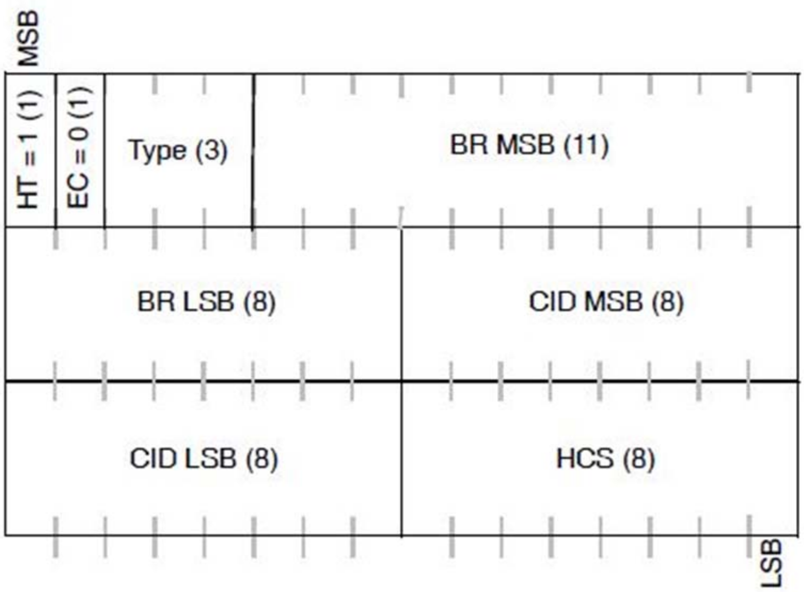
Οι μορφές των δύο επικεφαλίδων φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 10: Generic MAC header

Στην παραπάνω επικεφαλίδα:

- Το Encryption Control (EC) bit υποδεικνύει εάν χρησιμοποιείται κρυπτογράφηση (EC = 1),
- το πεδίο Type υποδεικνύει εάν μετά την επικεφαλίδα MAC ακολουθούν υπο-επικεφαλίδες MAC που εισάγονται στο ωφέλιμο φορτίο καθώς και το είδος των υπο-επικεφαλίδων,
- το CRC Indicator (CI) bit υποδεικνύει εάν χρησιμοποιείται CRC (CI = 1),
- το πεδίο Encryption Key Sequence (EKS) περιέχει πληροφορία σχετικά με το κλειδί κρυπτογράφησης που χρησιμοποιήθηκε για την κρυπτογράφηση του ωφέλιμου φορτίου,
- το πεδίο Length προσδιορίζει το μήκος του MAC PDU σε bytes, συμπεριλαμβανομένης επικεφαλίδας και πεδίου CRC (≤ 2048 bytes),
- το πεδίο Connection Identifier (CID) αναφέρεται στη σύνδεση στην οποία ανήκει το ωφέλιμο φορτίο, και τέλος,
- το πεδίο Header Check Sequence (HCS) χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σφαλμάτων στην επικεφαλίδα.



Εικόνα 11: Bandwidth request header

Στην επικεφαλίδα αίτησης εύρους ζώνης:

- το Encryption Control (EC) bit έχει την τιμή 0 αφού δε χρησιμοποιείται κρυπτογράφηση (EC = 0),
- το πεδίο Type υποδεικνύει είδος της αίτησης εύρους ζώνης (Incremental = 000, Aggregate = 001),
- το πεδίο Bandwidth Request (BR) προσδιορίζει τον αιτούμενο αριθμό bytes, και,
- το πεδίο Connection Identifier (CID) αναφέρεται στην σύνδεση για την οποία γίνεται η συγκεκριμένη αίτηση εύρους ζώνης.

2.5.2 Υπηρεσίες χρονοπρογραμματισμού

Για την εξυπηρέτηση διαφορετικών ειδών κίνησης, με διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις, στο πρότυπο IEEE 802.16-2004 ορίζονται τέσσερα διαφορετικά είδη υπηρεσιών χρονοπρογραμματισμού (scheduling services). Οι υπηρεσίες χρονοπρογραμματισμού αντιπροσωπεύουν τους μηχανισμούς χειρισμού των δεδομένων που υποστηρίζονται από το MAC για τη μετάδοση δεδομένων πάνω από μία σύνδεση. Κάθε σύνδεση σχετίζεται με μια υπηρεσία χρονοπρογραμματισμού. Κάθε υπηρεσία χρονοπρογραμματισμού καθορίζεται από ένα σετ παραμέτρων QoS που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά της.

Οι υπηρεσίες χρονοπρογραμματισμού του IEEE 802.16-2004 είναι:

- ***Unsolicited Grant Service – UGS***. Η υπηρεσία UGS σχεδιάστηκε για την εξυπηρέτηση εφαρμογών πραγματικού χρόνου, που παράγουν πακέτα σταθερού μεγέθους σε τακτά χρονικά διαστήματα, όπως η μετάδοση φωνής μέσω Διαδικτύου χωρίς καταστολή περιόδων σιωπής (VoIP χωρίς silence suppression). Οι εφαρμογές αυτές απαιτούν σταθερό ρυθμό μετάδοσης (constant bit rate – CBR). Στις συνδέσεις UGS αποδίδεται σταθερό εύρος ζώνης (bandwidth grant) ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Οι υποχρεωτικές παράμετροι QoS για την υπηρεσία UGS είναι Maximum Sustained Traffic Rate (MSTR), Maximum Latency, Tolerated Jitter και Request/Transmission Policy.
- ***Real-time Polling Service – rtPS***. Η υπηρεσία rtPS σχεδιάστηκε για να εξυπηρετήσει εφαρμογές με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου, που παράγουν πακέτα μεταβλητού μεγέθους περιοδικά, όπως βίντεο MPEG. Οι υποχρεωτικές παράμετροι QoS για την υπηρεσία rtPS είναι Minimum Reserved Traffic Rate, Maximum Sustained Traffic Rate, Maximum Latency και Request/ Transmission Policy.
- ***Non-real-time Polling Service – nrtPS***. Η υπηρεσία nrtPS σχεδιάστηκε για την υποστήριξη ροών δεδομένων, με ανοχή στην καθυστέρηση, που μεταφέρουν πακέτα μεταβλητού μεγέθους και απαιτούν έναν ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης, όπως το πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων (FTP). Οι υποχρεωτικές παράμετροι QoS για την υπηρεσία nrtPS είναι Minimum Reserved Traffic Rate, Maximum Sustained Traffic Rate, Traffic Priority και Request/ Transmission Policy.

- ***Best Effort – BE***. Η υπηρεσία BE σχεδιάστηκε για την υποστήριξη ροών δεδομένων για τις οποίες δεν απαιτείται κανένα ελάχιστο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών και οι οποίες μπορούν να εξυπηρετηθούν ανάλογα με τη διαθεσιμότητα πόρων, όπως για παράδειγμα κίνηση HTTP. Έχει την ελάχιστη προτεραιότητα από τα τέσσερα είδη υπηρεσιών. Οι υποχρεωτικές παράμετροι QoS είναι οι Maximum Sustained Traffic Rate, Traffic Priority και Request/Transmission Policy.

Στο πρότυπο 802-16e-2005 προστέθηκε και ο τύπος extended real-time polling service (ertPS), για την υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου που παράγουν πακέτα μεταβλητού μεγέθους περιοδικά, όπως η μετάδοση φωνής μέσω Διαδικτύου με καταστολή περιόδων σιωπής (VoIP με silence suppression).

Στο IEEE 802.16 κάθε σύνδεση σχετίζεται με μία ροή υπηρεσίας (service flow). Η ροή υπηρεσίας είναι μία μονόδρομη (unidirectional) ροή από MAC SDUs στην οποία παρέχεται συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσιών (QoS) η οποία καθορίζεται από το σετ παραμέτρων QoS της ροής. Ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας χρονοπρογραμματισμού μίας σύνδεσης καθορίζεται και το σετ των υποχρεωτικών παραμέτρων QoS της αντίστοιχης ροής υπηρεσίας.

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται οι υποχρεωτικές παράμετροι QoS για τις τέσσερις υπηρεσίες.

Scheduling service	Maximum Sustained Traffic Rate	Minimum Reserved Traffic Rate	Request/ Transmission Policy	Max. Latency	Tolerated Jitter	Traffic Priority
UGS	✓		✓	✓	✓	
rtPS	✓	✓	✓	✓		
nrtPS	✓	✓				✓
BE	✓					✓

Πίνακας 1: Υποχρεωτικές παράμετροι QoS για τις υπηρεσίες χρονοπρογραμματισμού που ορίζονται στο IEEE 802.16-2004

2.5.3 Μηχανισμοί αιτήσεων και απόδοσης εύρους ζώνης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πρόσβαση στο κανάλι uplink πραγματοποιείται με ένα συνδυασμό TDMA – DAMA. Το επίπεδο MAC ορίζει ένα μηχανισμό σηματοδοσίας για την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ του σταθμού βάσης και των σταθμών συνδρομητών ώστε να μπορούν οι τελευταίοι να στέλνουν αιτήσεις για απόδοση εύρους ζώνης (bandwidth requests) στο σταθμό βάσης. Έτσι, όταν ένας σταθμός συνδρομητή έχει μία σύνδεση με δεδομένα προς μετάδοση στέλνει ένα αίτημα εύρους ζώνης στο σταθμό βάσης, ο οποίος, με τη σειρά του, αποδίδει χρονοθυρίδες (bandwidth grants) στο σταθμό συνδρομητή, βάσει των παραμέτρων QoS της σύνδεσης, της αίτησης εύρους ζώνης που έλαβε και του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Μια αίτηση εύρους ζώνης μπορεί να είναι incremental ή aggregate. Στην πρώτη περίπτωση, η αίτηση εκφράζει τη μεταβολή του όγκου της προς μετάδοση κίνησης της σύνδεσης από τη στιγμή που απεστάλη η προηγούμενη αίτηση. Στη δεύτερη περίπτωση, η αίτηση εκφράζει το σύνολο της προς μετάδοση κίνησης της σύνδεσης τη στιγμή που αποστέλλεται η αίτηση.

Το πρότυπο υποστηρίζει δύο τρόπους για την αποστολή μίας αίτησης εύρους ζώνης: με την αποστολή ενός ξεχωριστού MAC PDU που αποτελείται μόνο από το bandwidth request header, ή "φορτώνοντας" την αίτηση σε ένα MAC PDU που μεταφέρει δεδομένα (piggyback bandwidth request). Στην περίπτωση αποστολής μίας αυθυπόστατης (standalone) αίτησης, υπάρχουν δύο δυνατότητες ως προς τον τρόπο αποστολής: unicast polling και contention-based polling. Στην περίπτωση του unicast polling ο σταθμός βάσης εκχωρεί εύρος ζώνης αποκλειστικά στο σταθμό του συνδρομητή για την αποστολή αιτήσεων εύρους ζώνης. Στην περίπτωση του contention-based polling ο σταθμός συνδρομητή επιχειρεί να μεταδώσει την αίτηση με ανταγωνισμό στην αρχή του υποπλαισίου uplink. Ένας αλγόριθμος επίλυσης συγκρούσεων αναλαμβάνει να διαχειριστεί τις συγκρούσεις που συμβαίνουν όταν δύο ή περισσότερες αιτήσεις εύρους ζώνης από διαφορετικούς σταθμούς μεταδοθούν ταυτόχρονα.

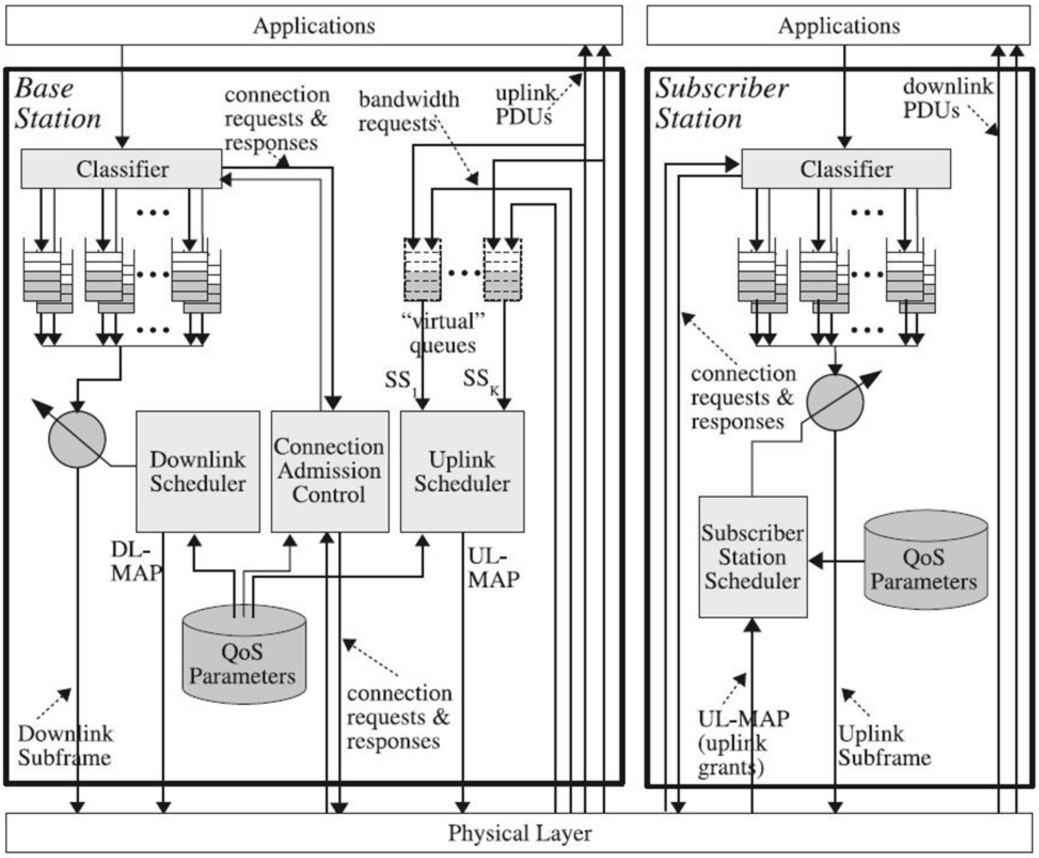
Όσον αφορά την απόδοση χρονοθυρίδων μετάδοσης (bandwidth grants), το πρότυπο υποστηρίζει τη δυνατότητα η απόδοση να γίνεται ανά σύνδεση (Grant Per Connection – GPC) ή ανά σταθμό συνολικά (Grant Per Subscriber Station –

GPSS). Με τη μέθοδο GPSS ο σταθμός συνδρομητή είναι υπεύθυνος για τον χρονοπρογραμματισμό των συνδέσεών του με βάση τον αριθμό των χρονοθυρίδων που του έχουν αποδοθεί. Η μέθοδος GPSS είναι αποδοτικότερη από τη μέθοδο GPC καθώς ο σταθμός συνδρομητή δύναται να αντιδρά καλύτερα στις απαιτήσεις των εφαρμογών πραγματικού χρόνου, οι οποίες μπορεί να έχουν μεταβληθεί από τη στιγμή που έγινε η αίτηση για εύρος ζώνης.

Οι συνδέσεις UGS δε χρειάζεται να στείλουν αιτήσεις εύρους ζώνης. Μία σύνδεση UGS λαμβάνει unsolicited bandwidth grants, δηλαδή αποκλειστικά δεσμευμένες χρονοθυρίδες, με βάση τις παραμέτρους QoS της. Οι συνδέσεις nrtPS και BE μπορούν να αποστέλλουν αιτήσεις εύρους ζώνης με οποιονδήποτε από τους τρεις δυνατούς τρόπους (piggyback, unicast polling, contention-based polling) ενώ οι συνδέσεις rtPS δε μπορούν να χρησιμοποιούν contention-based polling.

2.6 Αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού για παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας

Στο πρότυπο IEEE 802.16, όπως και σε όλα τα ασύρματα δίκτυα, η υποστήριξη παροχής εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας τοποθετείται στο επίπεδο MAC. Το πρότυπο ορίζει την αρχιτεκτονική παροχής εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας, όπως αυτή απεικονίζεται στην εικόνα 12.

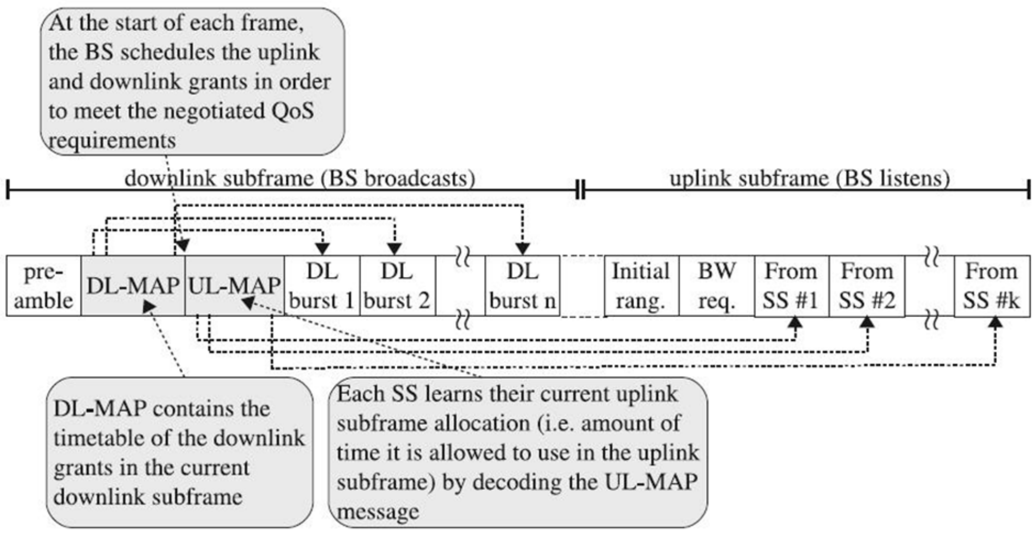


Εικόνα 12: Η δομή της αρχιτεκτονικής QoS [4]

Στο επίπεδο MAC του σταθμού βάσης, τα δεδομένα που φθάνουν προς μετάδοση στους σταθμούς συνδρομητών οδηγούνται στον κατηγοριοποιητή (classifier), ο οποίος αναλαμβάνει να τα αντιστοιχίσει στην κατάλληλη σύνδεση και ροή υπηρεσίας. Κατόπιν ο χρονοπρογραμματιστής downlink (downlink scheduler) αποφασίζει για τη διάθεση των διαθέσιμων πόρων στις συνδέσεις και ενημερώνει τους σταθμούς συνδρομητών με το μήνυμα DL-MAP. Τα downlink MAC PDUs μεταδίδονται στο υποπλαίσιο downlink.

Στο επίπεδο MAC του σταθμού συνδρομητή, η προς μετάδοση πληροφορία που προέρχεται από τα ανώτερα επίπεδα οδηγείται αρχικά στον κατηγοριοποιητή, με σκοπό την συσχέτισή της με την κατάλληλη σύνδεση και ροή υπηρεσίας. Ανάλογα με το είδος της ροής, ο σταθμός συνδρομητή αποστέλλει στο σταθμό βάσης αιτήσεις απόδοσης εύρους ζώνης. Οι αιτήσεις αυτές φθάνουν στο σταθμό βάσης και εισάγονται στις εικονικές ουρές του χρονοπρογραμματιστή uplink ο οποίος αποφασίζει, βάσει αυτών των αιτήσεων, της κατάστασης του δικτύου και των παραμέτρων QoS των εγγεγραμμένων στο δίκτυο συνδέσεων, για την απόδοση των διαθέσιμων δικτυακών πόρων ανάμεσα στις διάφορες συνδέσεις uplink των σταθμών συνδρομητών και ενημερώνει, μέσω του μηνύματος UL-MAP, τους σταθμούς συνδρομητών. Ο σταθμός βάσης έχει την ευθύνη να διαχειρίζεται την παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) για όλα τα πακέτα που μεταδίδονται. Τέλος, κάθε σταθμός συνδρομητή διαχειρίζεται, μέσω του χρονοπρογραμματιστή που διαθέτει (Subscriber Station Scheduler) τους αποδιδόμενους πόρους βάσει των αναγκών των συνδέσεών του, λαμβάνοντας υπόψη τυχόν μεταβολές που μπορεί να προέκυψαν από τη στιγμή που απέστειλε τις αιτήσεις για απόδοση εύρους ζώνης μέχρι την λήψη του UL-MAP και αποστέλλει τα uplink MAC PDUs, μέσω του φυσικού επιπέδου, στο σταθμό βάσης.

Στην εικόνα 13 απεικονίζεται μία απλουστευμένη δομή του πλαισίου με έμφαση στα μηνύματα DL-MAP και UL-MAP με τα οποία ο σταθμός βάσης αναθέτει τους διαθέσιμους πόρους στους σταθμούς συνδρομητών.

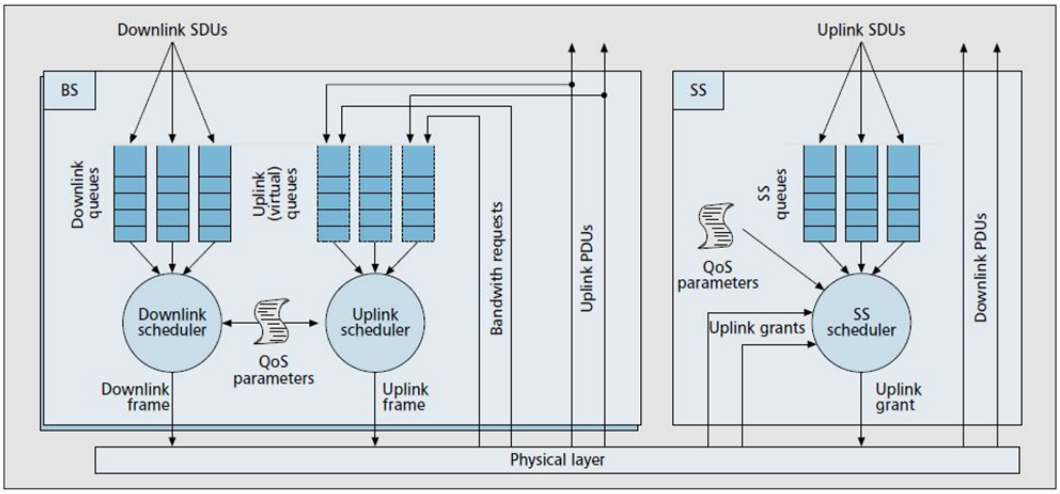


Εικόνα 13: Δομή πλαισίου και QoS [4]

Το πρότυπο IEEE 802.16 έχει σχεδιαστεί με στόχο να είναι σε θέση να παρέχει στις εφαρμογές που θα το χρησιμοποιούν εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Στο πρότυπο όμως, δεν αναφέρεται συγκεκριμένα ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού των διαφόρων υπηρεσιών. Αντίθετα, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός τέτοιου αλγορίθμου αφήνονται στους υπεύθυνους υλοποίησης ενός δικτύου IEEE 802.16.

Ένα σχεδιάγραμμα των αναγκαίων, για την υλοποίηση εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας, λειτουργικών ενοτήτων (τόσο για το σταθμό βάσης όσο και για το σταθμό συνδρομητή) φαίνεται στην εικόνα 14.

Παρατηρούμε ότι στο σταθμό βάσης υπάρχει ο χρονοπρογραμματιστής Downlink, ο οποίος καθορίζει τη μετάδοση της πληροφορίας στην κατεύθυνση downlink και ο χρονοπρογραμματιστής uplink που με βάση την πληροφορία που υπάρχει στα virtual queues πρέπει να αποφασίσει σε ποιον σταθμό συνδρομητή θα αποδώσει εύρος ζώνης. Τέλος, στο σταθμό συνδρομητή υπάρχει ο SS Scheduler που αναλαμβάνει να διαμοιράσει το εύρος ζώνης που αποδόθηκε στο σταθμό ανάμεσα στις συνδέσεις του. Είναι προφανές ότι η σχεδίαση αλγορίθμων για τον Downlink Scheduler και τον SS Scheduler δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερη δυσκολία ενώ αντίθετα η κύρια σχεδιαστική πρόκληση βρίσκεται στο σχεδιασμό ενός αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού που θα αναλάβει να ορίσει το εύρος ζώνης που θα ανατεθεί σε κάθε σταθμό συνδρομητή, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους QoS και τις αιτήσεις απόδοσης εύρους ζώνης που αποστέλλουν οι σταθμοί συνδρομητών.



Εικόνα 14: Λειτουργίες QoS στους BS και SS

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν προσπάθειες ερευνητών να σχεδιάσουν αποδοτικούς αλγόριθμους χρονοπρογραμματισμού uplink.

Κεφάλαιο 3: Αλγόριθμοι Χρονοπρογραμματισμού

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε ερευνητικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα της σχεδίασης και υλοποίησης αποδοτικών αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού uplink για το πρότυπο IEEE 802.16.

3.1 Αρχιτεκτονική αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού

Οι αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού αποτελούν τη σημαντικότερη συνιστώσα στην παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας. Ένας αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού πρέπει να ικανοποιεί κριτήρια όπως φραγμένη καθυστέρηση, εγγυημένο ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης και δικαιοσύνη. Επίσης, κατά το σχεδιασμό ενός αλγορίθμου πρέπει να ληφθούν υπόψη παράμετροι όπως απόδοση και πολυπλοκότητα.

Μερικά από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού [**5**] για ασύρματα δίκτυα αναφέρονται παρακάτω:

- ***Αποδοτική χρήση της ζεύξης.*** Ο αλγόριθμος οφείλει να χρησιμοποιεί τη ζεύξη αποδοτικά. Για παράδειγμα, ο αλγόριθμος δε θα πρέπει να αποδίδει δικτυακούς πόρους σε ένα χρήστη με κακή κατάσταση ζεύξης, καθώς, με μεγάλη πιθανότητα, η μετάδοση θα χαθεί και το εύρος ζώνης θα σπαταληθεί.
- ***Φραγμένη καθυστέρηση.*** Ο αλγόριθμος θα πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει εγγύηση φράγματος καθυστέρησης την εξυπηρέτηση εφαρμογών με μικρή ανεκτικότητα στις καθυστερήσεις.
- ***Δικαιοσύνη.*** Οι διαθέσιμοι πόροι θα πρέπει να διαμοιράζονται δίκαια ανάμεσα στις συνδέσεις.
- ***Ρυθμαπόδοση (throughput).*** Ο αλγόριθμος θα πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει εγγυημένη ρυθμαπόδοση.

- ***Πολυπλοκότητα υλοποίησης.*** Ένας αλγόριθμος μικρής πολυπλοκότητας είναι απαραίτητος σε δίκτυα υψηλής ταχύτητας όπου οι αποφάσεις χρονοπρογραμματισμού λαμβάνονται πάρα πολύ συχνά.
- ***Ευγενής υποβάθμιση υπηρεσίας.*** Θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι μία σύνδεση που έχει λάβει περισσότερους πόρους σε βάρος άλλων συνδέσεων (για παράδειγμα συνδέσεις με προσωρινά ασταθείς ή κακές ζεύξεις) θα έχει μία ευγενική υποβάθμιση της παρεχόμενης υπηρεσίας καθώς οι επιπλέον πόροι επιστρέφονται στις άλλες συνδέσεις (όταν αυτές έχουν, πλέον, λειτουργικές ζεύξεις).
- ***Απομόνωση.*** Μία σύνδεση θα πρέπει να είναι απομονωμένη από τις υπόλοιπες συνδέσεις και να μην επηρεάζεται από συνδέσεις που προσπαθούν να εκμαιεύσουν περισσότερους δικτυακούς πόρους από τους εγγυημένους και δεσμευμένους για αυτές.
- ***Κατανάλωση ενέργειας.*** Σε περίπτωση κινητών σταθμών ο αλγόριθμος θα πρέπει να λάβει υπόψη του την κατανάλωση ενέργειας με στόχο τη διατήρηση και επέκταση της αυτονομίας του κινητού σταθμού.
- ***Αποσύνδεση καθυστέρησης/εύρους ζώνης.*** Για τους περισσότερους αλγορίθμους η παροχή εγγυήσεων καθυστέρησης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης. Ο μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης παρέχει μικρότερη καθυστέρηση. Παρ’ όλα αυτά εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο ρυθμό μετάδοσης όπως, για παράδειγμα, η πλοήγηση στο Web, έχουν υψηλή ανεκτικότητα σε καθυστερήσεις.
- ***Επεκτασιμότητα.*** Ο αλγόριθμος θα πρέπει να λειτουργεί αποδοτικά ανεξάρτητα από την αύξηση του αριθμού των συνδέσεων που μοιράζονται το κανάλι.

3.1.1 Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού

Οι αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού μπορούν να κατηγοριοποιηθούν είτε ως work-conserving είτε ως non-work-conserving.

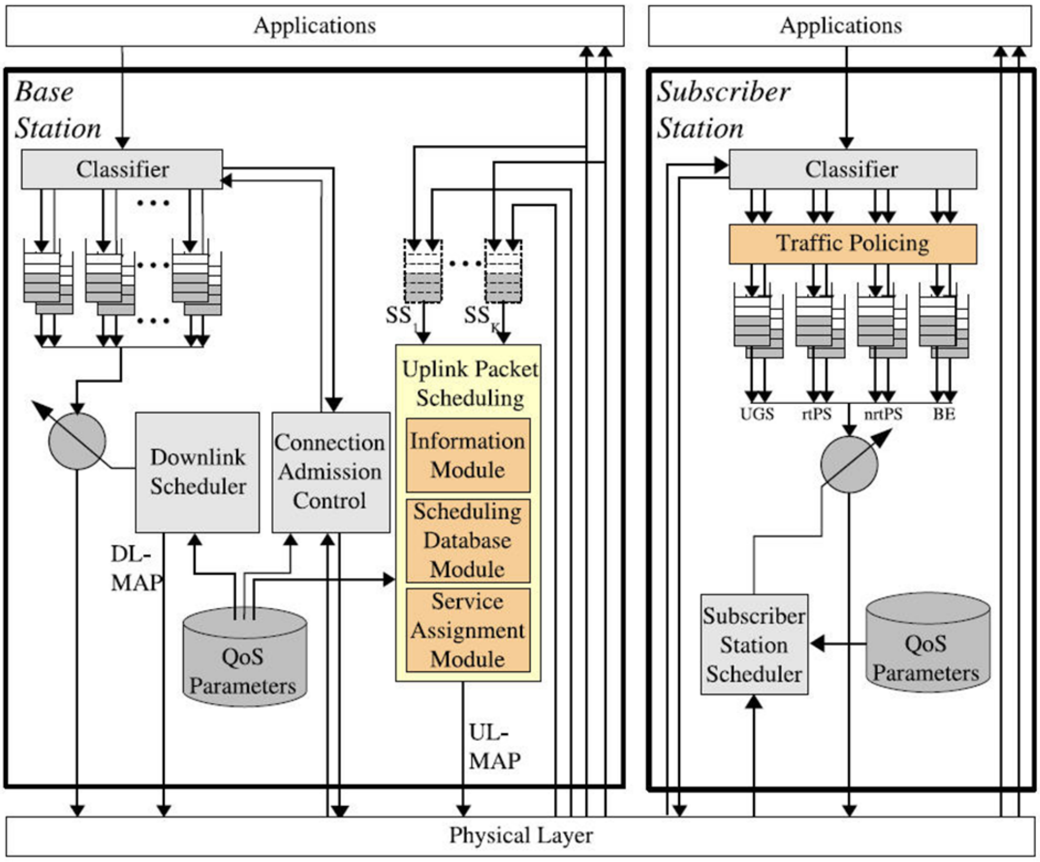
Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται οι αλγόριθμοι που δεν είναι ποτέ αδρανείς εφόσον υπάρχει κάποιο πακέτο προς μετάδοση. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι αλγόριθμοι Weighted Fair Queuing (WFQ), Virtual Clock (VC), Weighted Round-Robin (WRR), Self-Clocked Fair Queuing (SCFQ), Deficit Round Robin (DRR) και άλλοι.

Οι non-work-conserving αλγόριθμοι μπορούν να παραμείνουν αδρανείς ακόμη και αν υπάρχει κάποιο πακέτο προς μετάδοση. Αυτό μπορεί να συμβεί διότι ο αλγόριθμος περιμένει την άφιξη κάποιου πακέτου υψηλότερης προτεραιότητας. Παραδείγματα τέτοιων αλγορίθμων είναι οι Hierarchical Round-Robin (HRR), Stop-and-Go Queuing (SGQ), και Jitter-Earliest-Due-Data (Jitter-EDD). Οι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας δίνουν γενικά μεγαλύτερη μέση καθυστέρηση από ότι οι work-conserving αλλά είναι χρήσιμοι σε εφαρμογές όπου το jitter είναι πιο σημαντικό από ότι η καθυστέρηση πακέτου.

Ένας άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης αλγορίθμων είναι αν είναι timestamped ή όχι. Ένας timestamped αλγόριθμος μαρκάρει με ένα timestamp τα πακέτα όπως αυτά καταφθάνουν στον χρονοπρογραμματιστή και η μετάδοση γίνεται με βάση αυτά τα timestamps. Αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν να παρέχουν καλύτερες εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας με αντάλλαγμα την αυξημένη πολυπλοκότητα κατά την υλοποίησή τους.

3.2 IEEE 802.16-2004 και αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού

Μία από τις πρώτες προσπάθειες σχεδιασμού μιας αρχιτεκτονικής για την παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας για το πρότυπο IEEE 802.16 είναι αυτή των Wongthavarawat και Ganz [**6**]. Στην έρευνά τους πρότειναν την υλοποίηση μιας δομής Uplink Packet Scheduling στο σταθμό βάσης. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική η οποία περιλαμβάνει έλεγχο αποδοχής κλήσης (Call Admission Control - CAC) στο σταθμό βάσης και αστυνόμευση κίνησης (traffic policing) στο σταθμό συνδρομητή απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 15: Αρχιτεκτονική QoS

Για το διαμοίρασμα των διαθέσιμων πόρων μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών κίνησης (UGS, rtPS, nrtPS, BE) χρησιμοποιείται αυστηρή προτεραιότητα (strict priority). Στις συνδέσεις UGS αποδίδεται σταθερό εύρος ζώνης, μεταξύ των συνδέσεων rtPS εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Earliest Deadline First (EDF) ενώ μεταξύ των συνδέσεων nrtPS εφαρμόζεται ο Weighted Fair Queuing (WFQ). Το εύρος ζώνης που περισσεύει μοιράζεται εξίσου μεταξύ των συνδέσεων BE. Οι αδυναμίες της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής είναι κυρίως η αυξημένη πολυπλοκότητα υλοποίησης (λόγω του αλγορίθμου EDF) καθώς και το ότι οι χαμηλότερης προτεραιότητας συνδέσεις (nrtPS και BE) φθάνουν γρήγορα σε κατάσταση κορεσμού (starvation) καθώς ακολουθείται αυστηρή προτεραιότητα στο διαμοίρασμα των πόρων του δικτύου.

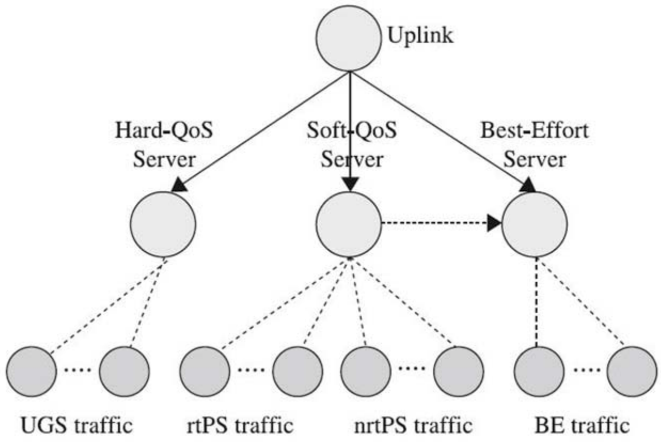
Αντίστοιχη προσέγγιση ακολούθησαν οι D. Tarchi, R. Fantacci και M. Bardazzi [**7**], οι οποίοι πρότειναν μία δομή όπου στο πρώτο επίπεδο ο διαμοιρασμός του εύρους ζώνης γίνεται με strict priority και στο δεύτερο οι ροές UGS θα εξυπηρετούνται από τον αλγόριθμο Packet Based Round Robin, οι ροές rtPS από EDF και οι ροές nrtPS και BE από τον αλγόριθμο WFQ.

Οι Cicconetti, Lenzini, Mingozzi και Eklund [**8**], παρατηρώντας ότι η κύρια παράμετρος παροχής εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας είναι το ελάχιστο εγγυημένο εύρος ζώνης, υποστηρίζουν ότι οι προσφορότεροι αλγόριθμοι για το πρότυπο IEEE 802.16 είναι αυτοί της κατηγορίας rate-latency [**9**]. Επέλεξαν τον αλγόριθμο Deficit Round Robin (DRR) για τον χρονοπρογραμματιστή downlink που υλοποιείται στο σταθμό βάσης με βάση την απλότητα υλοποίησης και το ότι είναι σε θέση να παρέχει δίκαιο διαμοίρασμα πόρων με πακέτα μεταβλητού μήκους (πολυπλοκότητα O(1) αν τηρηθούν κάποιοι περιορισμοί στην αποδοχή συνδέσεων). Ο αλγόριθμος DRR απαιτεί να δεσμευτεί κάποιο ελάχιστο εύρος ζώνης για κάθε ροή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ακόμα και οι ροές BE να λαμβάνουν κάποιο ελάχιστο εύρος ζώνης, το οποίο μπορεί να είναι χρήσιμο ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο starvation για τις συνδέσεις BE καθώς επίσης και για να επιτραπεί σε αυτές να εκμεταλλευτούν το επιπλέον εύρος ζώνης που δεν είναι δεσμευμένο για τις άλλες ροές υπηρεσίας.

Όμως ο αλγόριθμος DRR δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χρονοπρογραμματιστή uplink καθώς δεν έχει την πληροφορία για το μέγεθος των πακέτων προς μετάδοση (παρά μόνο μία εκτίμηση του φόρτου προς μετάδοση μέσω των virtual queues στο σταθμό βάσης). Έτσι, για τον χρονοπρογραμματιστή uplink, χρησιμοποιείται Weighted Round Robin (WRR) ενώ για το χρονοπρογραμματιστή στο σταθμό συνδρομητή επιλέχθηκε και πάλι DRR.

Οι Shang και Cheng [**10**] προτείνουν μία ιεραρχική δομή χρονοπρογραμματισμού, εισάγοντας τους όρους “soft-QoS” και “hard-QoS”. Στην πρώτη κατηγορία υπάγονται οι ροές υπηρεσίας rtPS και nrtPS, καθώς οι απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης μεταβάλλονται ανάμεσα στο ελάχιστο και στο μέγιστο εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο για μία σύνδεση. Αντίθετα, μία ροή

UGS κατηγοριοποιείται ως “hard-QoS” καθώς απαιτεί το μέγιστο εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο για τη σύνδεση. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το ιεραρχικό μοντέλο χρονοπρογραμματισμού. Καθένας από τους τέσσερις server χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Worst-case Fair Weighted Fair Queuing (H-WF2Q+).

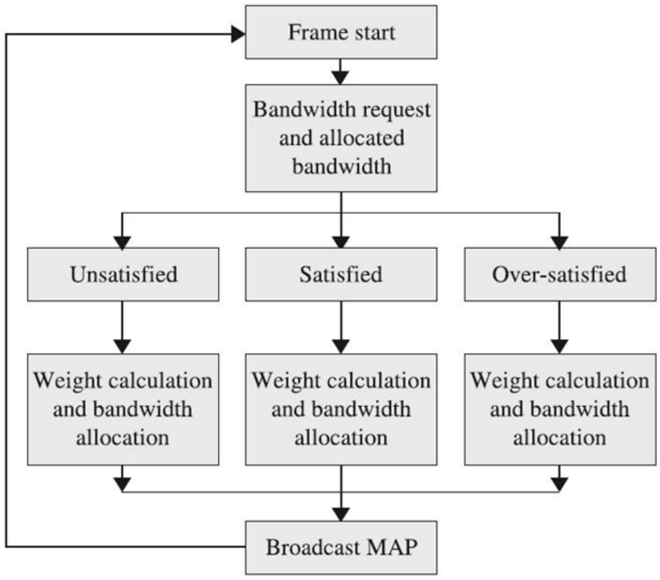


Εικόνα 16: Shang and Sheng: hard- soft-QoS

Μία ιεραρχική αρχιτεκτονική δύο επιπέδων προτάθηκε από τους L. Chan, H. Chao και Z. Chou [**11**]. Στο πρώτο επίπεδο ο διαμοιρασμός των διαθέσιμων δικτυακών πόρων γίνεται βάσει της κατηγορίας της σύνδεσης ενώ στο δεύτερο με την ανάθεση βαρών στις συνδέσεις. Οι τρεις κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται οι συνδέσεις, βάσει του εύρους ζώνης που έχουν λάβει, είναι οι εξής:

- ***Μη-ικανοποιημένη***. Μία σύνδεση η οποία έχει λάβει λιγότερο εύρος ζώνης από το ελάχιστο το οποίο απαιτείται ή έχει δεσμευτεί για αυτήν.
- ***Ικανοποιημένη***. Μία σύνδεση η οποία έχει λάβει εύρος ζώνης μεγαλύτερο από το ελάχιστο το οποίο απαιτείται αλλά λιγότερο από το εύρος ζώνης που ορίζεται στην παράμετρο Maximum Sustained Traffic Rate (MSTR).
- ***Υπέρ-ικανοποιημένη***. Μία σύνδεση η οποία έχει λάβει περισσότερο εύρος ζώνης από το μέγιστο που έχει οριστεί για αυτήν.

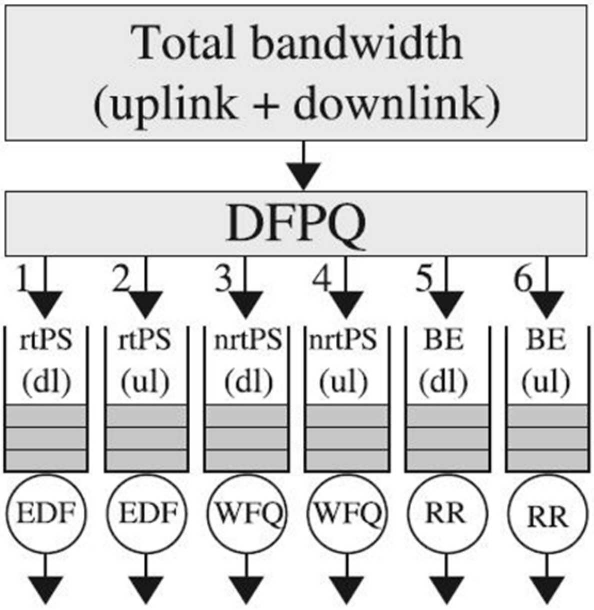
Μετά την κατάταξη των συνδέσεων στις τρεις αυτές κατηγορίες ο σταθμός βάσης, σε αντίθεση με την φιλοσοφία αυστηρής προτεραιότητας (strict priority), πρώτα αποδίδει εύρος ζώνης στην κατηγορία “μη-ικανοποιημένη”. Αν υπάρχει επιπλέον διαθέσιμο εύρος ζώνης, τότε το αποδίδει στην κατηγορία “ικανοποιημένη”, και τέλος στην κατηγορία “υπέρ-ικανοποιημένη”. Στο δεύτερο επίπεδο του αλγορίθμου, το εύρος ζώνης που έχει αποδοθεί σε κάθε κατηγορία διανέμεται στις επιμέρους συνδέσεις ανάλογα με το “βάρος” που έχει ανατεθεί στην κάθε σύνδεση. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 17: Διάγραμμα ροής Chan

Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης –έναντι της προσέγγισης strict priority first– είναι ότι δεν παρατηρείται το φαινόμενο starvation στις συνδέσεις nrtPS και BE, καθώς οι συνδέσεις αυτές παίρνουν τουλάχιστον το ελάχιστο εύρος ζώνης ως “μη-ικανοποιημένες”.

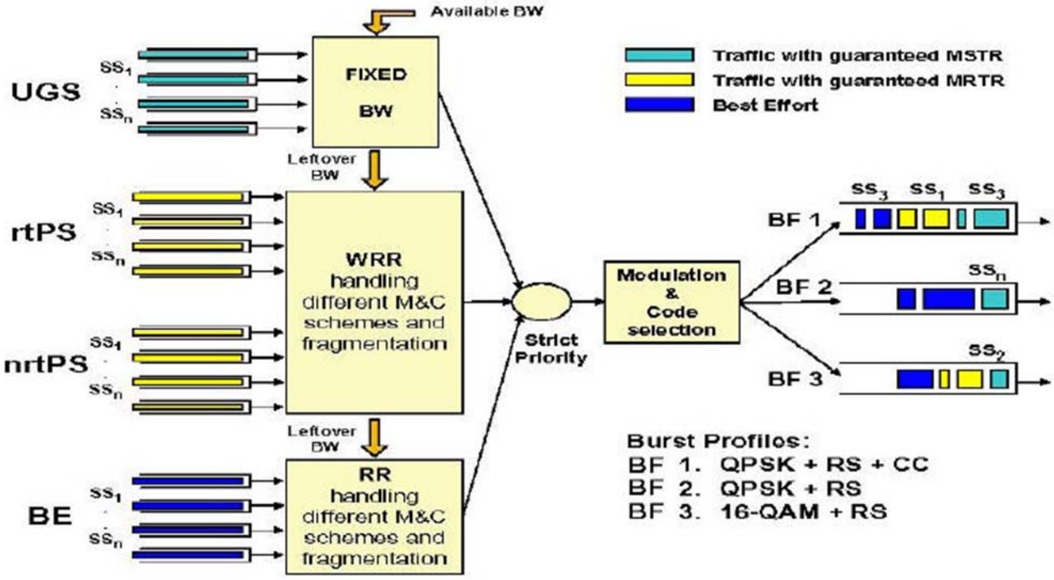
Οι H. Safa, H. Artail, M. Karam, R. Soudah και S. Khayat [**12**] επέκτειναν την έρευνα των J. Chen, W. Jiao και H. Wang [**13**] έχοντας ως στόχο να βελτιώσουν την καθυστέρηση και την απόδοση των rtPS συνδέσεων. Προτάθηκε μία ιεραρχική δομή δύο επιπέδων, η οποία απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 18: Chen, Jiao, Wang

Στο πρώτο επίπεδο χρησιμοποιήθηκε Direct Fair Priority Queue (DFPQ) για να διαμοιραστεί το εύρος ζώνης στις έξι διαφορετικές ουρές (ανάλογα με τη ροή υπηρεσίας και την κατεύθυνση). Στο δεύτερο επίπεδο χρησιμοποιείται διαφορετικός αλγόριθμος ανάλογα με την ροή υπηρεσίας (Earliest Deadline First για τις ροές rtPS, Weight Fair Queuing για τις ροές nrtPS και Round Robin για τις ροές BE). Είναι σαφές ότι μία τέτοια προσέγγιση παρέχει την ελάχιστη δυνατή απόδοση για τη ροή BE.

Οι M. Settembre, M. Puleri και S. Garritano [**14**] πρότειναν ότι οι ροές rtPS και nrtPS θα εξυπηρετούνται από έναν αλγόριθμο Weighted Round Robin ενώ οι ροές BE από Round Robin. Η καινοτομία που εισήγαγαν είναι ότι στο πρώτο βήμα του αλγορίθμου διαμοιράζεται το εύρος ζώνης από τα σχήματα WRR και RR υποθέτοντας ότι όλες οι συνδέσεις χρησιμοποιούν το πιο αξιόπιστο burst profile και στο δεύτερο βήμα, λαμβάνοντας υπόψη το πραγματικό burst profile που μπορεί να εκμεταλλευτεί η κάθε σύνδεση, της αποδίδεται επιπλέον εύρος ζώνης.



Εικόνα 19: Settembre, Puleri, Garritano

Όπως περιγράψαμε ήδη, στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού της κίνησης στην κατεύθυνση uplink με στόχο να ικανοποιηθούν οι διαφορετικές απαιτήσεις των διαφορετικών ροών. Στην πλειοψηφία των προτεινόμενων αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού η κίνηση rtPS, λόγω της ευαισθησίας που παρουσιάζει ως προς την καθυστέρηση, λαμβάνει σαφή προτεραιότητα έναντι των ροών χαμηλότερης προτεραιότητας. Στην προσπάθειά τους να εξασφαλίσουν την τήρηση των οριοθετημένων καθυστερήσεων για τις ροές rtPS οι ερευνητές πρότειναν σχήματα όπως Earliest Deadline First, Deficit Round Robin, Weighted Fair Queuing, Worst-Case Weighted Fair Queuing.

Όμως η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι μία ακόμη πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό καθώς ο αλγόριθμος εκτελείται σε κάθε πλαίσιο και ο ρυθμός μετάδοσης των πλαισίων μπορεί να ανέρχεται σε 400 - 500 πλαίσια ανά δευτερόλεπτο.

Έτσι έγιναν προσπάθειες να προταθούν απλούστερες λύσεις όπως η έρευνα των A. Sayenko, O. Alanen, T. Hamalainen [**15**] όπου πρότειναν έναν αλγόριθμο πολύ κοντά στην προσέγγιση Round Robin και των J. Freitag, N. Fonseca [**2**], η δουλειά των οποίων επεκτείνεται στην παρούσα εργασία.

Κεφάλαιο 4: Προτεινόμενος Αλγόριθμος Χρονοπρογραμματισμού

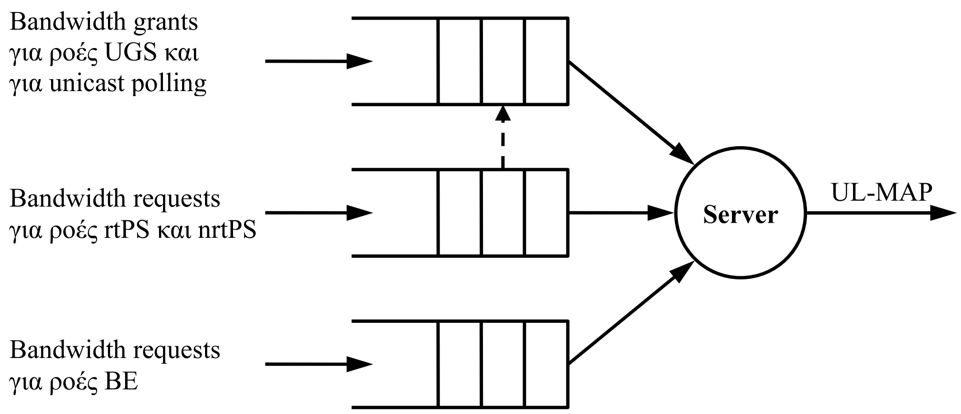
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού, βασισμένος στο [**2**].

4.1 Δομή αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού

Ο χρονοπρογραμματιστής uplink χρησιμοποιεί τρεις ουρές με διαφορετικό επίπεδο προτεραιότητας, τις ουρές υψηλής, μέσης, και χαμηλής προτεραιότητας, στις οποίες εισάγονται οι αποδόσεις εύρους ζώνης (bandwidth grants) που προβλέπονται για ένα πλαίσιο και οι αιτήσεις εύρους ζώνης (bandwidth requests) που λαμβάνει ο σταθμός βάσης. Ο αλγόριθμος τρέχει στην αρχή κάθε πλαισίου και εξυπηρετεί τις ουρές με σειρά αυστηρής προτεραιότητας ξεκινώντας από την ουρά υψηλής προτεραιότητας και καταλήγοντας στην ουρά χαμηλής προτεραιότητας.

Στην ουρά υψηλής προτεραιότητας εισάγονται τα bandwidth grant για τις ροές Unsolicited Grant Service (UGS) που πρέπει να αποσταλούν στο τρέχον πλαίσιο, αφού στις ροές αυτού του τύπου αποδίδεται σταθερό εύρος ζώνης ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η περίοδος με την οποία εισάγονται τα grant στην ουρά υψηλής προτεραιότητας καθορίζεται από τις παραμέτρους QoS κάθε ροής, και συγκεκριμένα, από το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης (MSTR). Στην ουρά αυτή εισάγονται, επίσης περιοδικά, τα bandwidth grant για unicast polling των ροών rtPS και nrtPS που εξασφαλίζουν ευκαιρίες για τη μετάδοση αιτήσεων εύρους ζώνης για τις ροές αυτές στο τρέχον πλαίσιο. Στην ουρά μέσης προτεραιότητας εισάγονται οι αιτήσεις εύρους ζώνης που ελήφθησαν για ροές τύπου real-time Polling Service (rtPS) και non-real-time Polling Service (nrtPS). Τέλος, στην ουρά χαμηλής προτεραιότητας εισάγονται οι αιτήσεις εύρους ζώνης για ροές τύπου Best Effort (BE).

Η αρχιτεκτονική του χρονοπρογραμματιστή φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 20: Αρχιτεκτονική του χρονοπρογραμματιστή

Ο εξυπηρετητής (server) εξυπηρετεί πρώτα τα bandwidth grants, για να εγγυηθεί σταθερό ρυθμό μετάδοσης και φραγμένη καθυστέρηση στις ροές UGS, αφενός, και για να εξασφαλίσει τις απαραίτητες ευκαιρίες μετάδοσης αιτήσεων εύρους ζώνης στις ροές rtPS και nrtPS, αφετέρου.

Στη συνέχεια ο server εξυπηρετεί τις αιτήσεις των ροών rtPS εκείνων, οι οποίες, αν δεν εξυπηρετηθούν άμεσα, θα παραβιάσουν το όριο προθεσμίας τους. Για να εγγυηθεί τα όρια καθυστέρησης για τις ροές rtPS, ο χρονοπρογραμματιστής αποδίδει σε κάθε αίτηση εύρους ζώνης από ροή rtPS που εισάγεται στην ουρά μέσης προτεραιότητας μία τιμή προθεσμίας. Για τον υπολογισμό αυτής της τιμής προθεσμίας, είναι απαραίτητο ο χρονοπρογραμματιστής να γνωρίζει τον χρόνο άφιξης των πακέτων στις εξερχόμενες ουρές των σταθμών συνδρομητών. Καθώς όμως ο χρονοπρογραμματιστής δεν έχει αυτή την πληροφορία, θεωρεί τη χειρότερη δυνατή περίπτωση, η οποία αντιστοιχεί στο ότι το πακέτο έφτασε στην ουρά αμέσως αφού εστάλη η τελευταία αίτηση εύρους ζώνης. Άρα η προθεσμία της αίτησης θα ισούται με το άθροισμα του χρόνου άφιξης της τελευταίας αίτησης εύρους ζώνης από τη συγκεκριμένη σύνδεση και της μέγιστης καθυστέρησης, όπως αυτή ορίζεται από τις παραμέτρους QoS της ροής. Για να εξυπηρετηθεί η ροή πριν από τη λήξη της προθεσμίας, πρέπει η αίτηση εύρους ζώνης να εξυπηρετηθεί τουλάχιστον δύο πλαίσια πριν από τη λήξη της προθεσμίας αφού, αν το bandwidth grant σταλεί στο σταθμό συνδρομητή στο πλαίσιο n, η ροή θα μεταδώσει στο πλαίσιο $n + 1$, προλαβαίνοντας έτσι την προθεσμία που λήγει στο πλαίσιο $n + 2$. Για το λόγο αυτό, οι αιτήσεις για εύρους ζώνης ροών rtPS των οποίων η προθεσμία λήγει στο μεθεπόμενο πλαίσιο «αναβαθμίζονται» σε υψηλής προτεραιότητας και μετακινούνται στο τέλος της ουράς υψηλής προτεραιότητας.

Αφού ο αλγόριθμος αναβαθμίσει στην ουρά υψηλής προτεραιότητας τις αιτήσεις ροών rtPS των οποίων η προθεσμία λήγει στο μεθεπόμενο πλαίσιο, ταξινομεί τις ροές rtPS και nrtPS που παραμένουν στην ουρά μέσης προτεραιότητας με βάση μια τιμή προτεραιότητας.

Ο αλγόριθμος επιδιώκει να εγγυηθεί τον ελάχιστο δεσμευμένο ρυθμό κίνησης των ροών rtPS και nrtPS (όπως καθορίζεται από τις παραμέτρους QoS των ροών). Για το σκοπό αυτό, προσδιορίζεται το ελάχιστο εγγυημένο εύρος ζώνης των ροών μέσα σε ένα επιλεγμένο χρονικό παράθυρο T το οποίο λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της τιμής προτεραιότητας.

Οι ροές που έχουν λάβει το ελάχιστο εγγυημένο εύρος ζώνης στο τρέχον παράθυρο λαμβάνουν τη χαμηλότερη προτεραιότητα (0). Μία ροή i που δεν έχει υπερβεί τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης λαμβάνει τιμή προτεραιότητας (priority[i]) που υπολογίζεται με βάση το backlog δεδομένων της ροής (backlog[i]), το ελάχιστο εγγυημένο εύρος ζώνης της (bw_min[i]) και το εύρος ζώνης που έχει αποδοθεί στη ροή στο τρέχον παράθυρο T (granted_bw[i]) ως εξής:

$$\text{priority}[i] = \text{backlog}[i] + (\text{bw\_min}[i] - \text{granted\_bw}[i])\ .$$

Η διαφορά bw_min[i] - granted_bw[i] στην παραπάνω σχέση εκφράζει το “υπόλοιπο” εύρους ζώνης που δεν έχει χρησιμοποιήσει η ροή, σε σχέση με το ελάχιστο εγγυημένο, στο τρέχον παράθυρο. Έτσι, όσο μεγαλύτερο το backlog της ροής, τόσο μεγαλύτερη η τιμή προτεραιότητας, και, όσο μεγαλύτερο το “υπόλοιπο” εύρους ζώνης, τόσο μεγαλύτερη η τιμή προτεραιότητας.

Μετά την ταξινόμηση των ροών rtPS και nrtPS, και εφόσον υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης, οι αιτήσεις ροών rtPS και nrtPS μετακινούνται στο τέλος της ουράς υψηλής προτεραιότητας. Τέλος, εάν μετά την εξυπηρέτηση της ουράς υψηλής προτεραιότητας (στην οποία έχουν μετακινηθεί οι αιτήσεις ροών rtPS και nrtPS κατάλληλα ταξινομημένες) υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης, ο server εξυπηρετεί την ουρά χαμηλής προτεραιότητας και τις αιτήσεις των ροών BE.

Συνοπτικά τα βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής:

1. Εισαγωγή στην ουρά υψηλής προτεραιότητας των περιοδικών grants για τις ροές UGS και για unicast polling των ροών rtPS και nrtPS.

2. Έλεγχος ορίου καθυστέρησης.

    1) Υπολογισμός των τιμών προθεσμίας για τις αιτήσεις των ροών rtPS.

    2) Εάν η τιμή προθεσμίας λήγει μέσα στα δύο επόμενα πλαίσια από το τρέχον και υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης, μετακίνηση της αίτησης στην ουρά υψηλής προτεραιότητας.

3. Έλεγχος ελάχιστου εγγυημένου εύρους ζώνης.

    1) Αρχικοποίηση μεταβλητών.

    2) Υπολογισμός των τιμών προτεραιότητας για τις αιτήσεις των ροών rtPS και nrtPS που απέμειναν στην ουρά μέσης προτεραιότητας.

    3) Ταξινόμηση της ουράς μέσης προτεραιότητας κατά σειρά φθίνουσας προτεραιότητας.

    4) Μετακίνηση των αιτήσεων που βρίσκονται στην ουρά μέσης προτεραιότητας στην ουρά υψηλής προτεραιότητας, όσο υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι.

4. Απόδοση εύρους ζώνης στις αιτήσεις που βρίσκονται στην ουρά υψηλής προτεραιότητας, ξεκινώντας από την αρχή της ουράς.

5. Αν η ουρά μέσης προτεραιότητας είναι άδεια και υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι, τότε απόδοση εύρους ζώνης στις αιτήσεις που βρίσκονται στην ουρά χαμηλής προτεραιότητας, ξεκινώντας από την αρχή της ουράς.

Αναλυτικά ο ψευδοκώδικας του αλγορίθμου παρατίθεται στο Παράρτημα Π.1.

4.2 Πολυπλοκότητα αλγορίθμου

Για να αποδώσουμε την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου, ορίζουμε τα εξής:

- k, ο αριθμός των slots στο υποπλαίσιο uplink,
- n, ο αριθμός των συνδέσεων,
- r, ο αριθμός των αιτήσεων εύρους ζώνης στην ουρά μέσης προτεραιότητας

Στο βήμα 1. η εισαγωγή ενός περιοδικού data grant παίρνει 0(1) χρόνο. Λαμβάνοντας υπόψη τη χειρότερη περίπτωση, το μέγεθος κάθε grant είναι ένα slot και στην ουρά θα εισαχθούν k grants. Άρα αυτό το βήμα θα χρειαστεί συνολικά O(k) χρόνο.

Στο βήμα 2. το κάθε υπο-βήμα χρειάζεται O(1) χρόνο και όλα εκτελούνται για όλες τις αιτήσεις στην ουρά μέσης προτεραιότητας, άρα συνολικά θα απαιτηθεί O(r) χρόνος.

Στο βήμα 3.1, λαμβάνοντας υπόψη τη χειρότερη δυνατή περίπτωση, υπάρχουν n rtPS και nrtPS συνδέσεις στην ουρά μέσης προτεραιότητας, άρα θα χρειαστεί O(n) χρόνος. Στο βήμα 3.2 θα απαιτηθεί O(r) χρόνος καθώς υπάρχουν r αιτήσεις εύρους ζώνης στην ουρά μέσης προτεραιότητας. Τέλος, στο βήμα 3.3 η ταξινόμηση της ουράς μέσης προτεραιότητας μπορεί να υλοποιηθεί με έναν O(rlogr) αλγόριθμο.

Άρα, συνολικά, η χρονική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι O(k + n + rlogr).

4.3 Παρατηρήσεις πάνω στον αλγόριθμο

Όπως αναφέραμε ήδη παραπάνω, ο αλγόριθμος σχεδιάστηκε με σκοπό να παρέχει στις ροές υπηρεσίας rtPS εγγυήσεις ως προς την χρονοκαθυστέρηση (μέσω των τιμών προθεσμίας) ενώ ταυτόχρονα να παρουσιάζει μικρή πολυπλοκότητα (λόγω της ανάγκης να εκτελείται σε κάθε πλαίσιο, πολλές φορές ανά δευτερόλεπτο).

Παρατηρούμε όμως ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, σε αντίθεση με πολλές έρευνες που αναλώθηκαν στην σχεδίαση υπερβολικά πολύπλοκων σχημάτων με σκοπό να παρέχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερες εξασφαλίσεις ότι οι ροές τύπου rtPS θα καταφέρουν να μεταδώσουν την κίνηση μέσα στα όρια χρονοκαθυστέρησης που προβλέπονται, αντιμετωπίζει τις ροές τύπου rtPS και nrtPS τοποθετώντας τις στην ίδια ουρά, την ουρά «μέσης προτεραιότητας», και, ουσιαστικά, η μόνη διαφοροποίηση στην αντιμετώπιση των δύο αυτών ροών είναι ο έλεγχος που πραγματοποιεί κατά πόσο στις ροές rtPS έχει οριστεί όριο χρονοκαθυστέρησης που λήγει στο μεθεπόμενο από το τρέχον πλαίσιο. Ο έλεγχος όμως αυτός, πολλές φορές μπορεί να φανεί ανεπαρκής, όπως για παράδειγμα σε συνθήκες όπου στο δίκτυο επικρατεί συμφόρηση.

Για την παροχή μεγαλύτερων εξασφαλίσεων ότι τα όρια χρονοκαθυστέρησης των ροών υπηρεσίας rtPS θα τηρούνται, όπως προβλέπεται, ο αλγόριθμος οφείλει να προσαρμόζεται στην κατάσταση του δικτύου και να αντιδρά εξατομικευμένα, ανά ροή, σε περιπτώσεις όπου έχουμε μεταδόσεις πακέτων από ροές rtPS που υπερβαίνουν τα όρια χρονικών καθυστερήσεων. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγουμε την αυστηρή και καθολική προτεραιοποίηση της κίνησης rtPS έναντι των ροών nrtPS, επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον μας μόνο στις ροές rtPS που παρουσιάζουν προβλήματα στο να τηρήσουν τα όρια χρονοκαθυστέρησης κατά τη μετάδοση των δεδομένων τους.

4.4 Δυναμική συμπεριφορά του βελτιωμένου αλγορίθμου

Με σκοπό να προσδώσουμε στον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού τη δυνατότητα να προσαρμόζεται στις ροές rtPS, για τις οποίες παρατηρείται ότι, λόγω της κατάστασης του δικτύου, αποτυγχάνουν να τηρήσουν τα όρια χρονοκαθυστέρησης που έχουν οριστεί, υλοποιήσαμε ένα «παράθυρο ελέγχου» από μελλοντικά πλαίσια, μέσα στο οποίο, πλέον, θα γίνεται ο έλεγχος για το εάν λήγει το όριο καθυστέρησης που έχει οριστεί αντί να ελέγχει μόνο αν λήγει στο μεθεπόμενο πλαίσιο.

Το παράθυρο αυτό δεν είναι καθολικό, αλλά η τιμή του διαφοροποιείται για κάθε ροή rtPS. Η αρχική τιμή του παραθύρου είναι δύο πλαίσια. Στην περίπτωση αυτή ο αλγόριθμος λειτουργεί όπως ακριβώς και στην αρχική του μορφή, εξετάζει δηλαδή αν η προθεσμία των πακέτων rtPS λήγει στο μεθεπόμενο πλαίσιο.

Κάθε φορά που μία ροή rtPS όφειλε να «αναβαθμιστεί» στην ουρά υψηλής προτεραιότητας αλλά αυτό δεν κατέστη εφικτό, λόγω έλλειψης διαθέσιμων πόρων, κάθε φορά δηλαδή που μία ροή rtPS θα μεταδώσει πληροφορία που εν τέλει θα φθάσει στον προορισμό της έχοντας ξεπεράσει το όριο καθυστέρησης, το παράθυρο ελέγχου μεγαλώνει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επόμενη φορά που θα εκτελεστεί ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού να προχωρά στην «αναβάθμιση» της συγκεκριμένης ροής rtPS στην ουρά υψηλής προτεραιότητας αν το όριο καθυστέρησης της ροής λήγει στα επόμενα τρία πλαίσια, κ.ο.κ. Με τον τρόπο αυτό, αν μία ροή rtPS βρεθεί σε κατάσταση όπου τα πακέτα της θα φθάσουν στον προορισμό τους έχοντας ξεπεράσει το όριο καθυστέρησης που έχει οριστεί για αυτήν, τότε, στο μέλλον, θα έχει πλεονέκτημα έναντι των υπολοίπων ροών που βρίσκονται στην ουρά μέσης προτεραιότητας, καθότι θα μετακινείται στην ουρά υψηλής προτεραιότητας αν το όριο καθυστέρησης λήγει μέσα σε μεγαλύτερο αριθμό επόμενων πλαισίων από ότι οι υπόλοιπες ροές rtPS.

Αντίστοιχα αν παρατηρηθεί ότι μία ροή, η οποία στο παρελθόν αντιμετώπισε δυσκολία να μεταδώσει την πληροφορία εντός των ορίων χρονοκαθυστέρησης και για την οποία το παράθυρο ελέγχου έχει μεγαλώσει από την αρχική τιμή των δύο επόμενων πλαισίων, πλέον δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα και καταφέρνει να τηρήσει τα όρια καθυστέρησης για τα πακέτα της, τότε το παράθυρο ελέγχου μειώνεται σταδιακά, μέχρι να επανέλθει στην αρχική τιμή των δύο πλαισίων.

Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο να φθάσουμε στην οριακή κατάσταση όπου η τιμή του παραθύρου ελέγχου θα αυξάνεται και θα μειώνεται συνεχώς, και για να εξασφαλίσουμε ότι μία ροή όντως έχει έρθει σε κατάσταση που δεν αντιμετωπίζει πλέον πρόβλημα να τηρεί το όριο καθυστέρησης η τιμή του παραθύρου ελέγχου δεν μειώνεται την πρώτη φορά που παρατηρείται ότι η ροή καταφέρνει να τηρήσει το όριο καθυστέρησης, αλλά πρέπει το όριο καθυστέρησης των πακέτων να τηρηθεί για κάποιο χρονικό διάστημα, πριν αποφασίσει ο αλγόριθμος να μειώσει το παράθυρο ελέγχου.

Με το μηχανισμό αυτό επιτυγχάνουμε να δίνουμε μεγαλύτερη προτεραιότητα στις ροές rtPS που παρουσίασαν πρόβλημα στο να τηρήσουν τα όρια χρονοκαθυστέρησης έναντι των υπολοίπων ροών rtPS και nrtPS που βρίσκονται στην ουρά μέσης προτεραιότητας, χωρίς να καταφύγουμε σε ιδιαίτερα πολύπλοκους αλγορίθμους.

Επιπροσθέτως, το βήμα με το οποίο αυξάνεται το παράθυρο ελέγχου, δεν είναι στατικό αλλά εξαρτάται από τις συνθήκες κάτω από τις οποίες η συγκεκριμένη ροή δεν κατάφερε να μετακινηθεί στην ουρά υψηλής προτεραιότητας. Έτσι, αν η ροή απέτυχε να μετακινηθεί στην ουρά μεγαλύτερης προτεραιότητας, αν και όφειλε, λόγω παντελούς έλλειψης πόρων (κακή κατάσταση δικτύου) το παράθυρο ελέγχου θα μεγαλώσει κατά μεγαλύτερο αριθμό πλαισίων από ότι εάν η ροή απέτυχε να «αναβαθμιστεί» λόγω ύπαρξης ανεπαρκούς εύρους ζώνης (λιγότερο κακή κατάσταση δικτύου). Το βήμα μείωσης είναι πάντα σταθερό και ίσο με ένα (1) πλαίσιο.

Κεφάλαιο 5: Αξιολόγηση του Αλγορίθμου

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού.

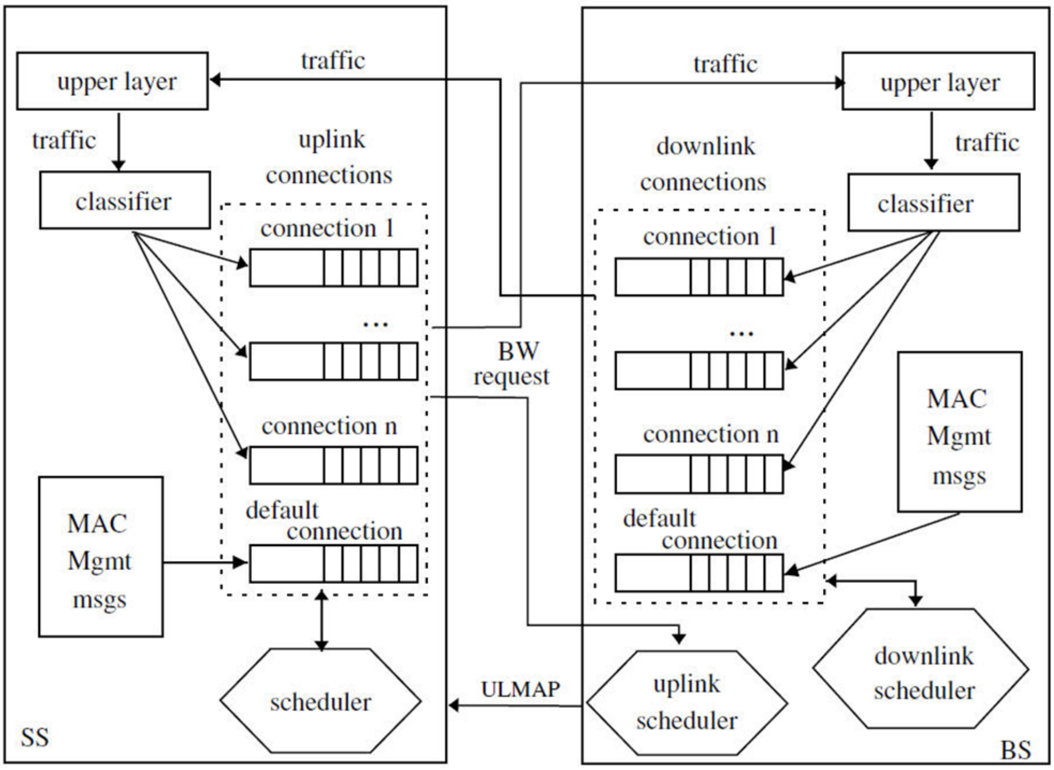
5.1 WiMAX Module

Για τη διενέργεια προσομοιώσεων της συμπεριφοράς του προτεινόμενου αλγορίθμου χρησιμοποιήσαμε το WiMAX Module για το λογισμικό δικτυακής προσομοίωσης ns-2 που αναπτύχθηκε από τους N. Fonseca και J. Freitag [**16**]. Το συγκεκριμένο λογισμικό ήταν το μόνο ελεύθερο λογισμικό για την προσομοίωση δικτύων WiMAX, διαθέσιμο στην ακαδημαϊκή κοινότητα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής, το οποίο παρείχε τις δύο βασικές δομές για την παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας: το μηχανισμό αίτησης και απόδοσης εύρους ζώνης και την υλοποίηση των ροών υπηρεσίας, όπως αυτές ορίζονται στο πρότυπο IEEE 802.16 μαζί με τις παραμέτρους παροχής εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας (QoS).

Το WiMAX module υλοποιεί τους πέντε τύπους ροών υπηρεσίας, όπως ορίζονται στο πρότυπο IEEE 802.16, και δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να παραμετροποιήσει τις απαιτήσεις QoS των εφαρμογών. Οι ροές υπηρεσίας μοντελοποιούνται με μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων (Finite State Machines – FSMs), οι οποίες υποδεικνύουν πως αντιδρά η κάθε ροή υπηρεσίας σε διαφορετικά γεγονότα.

Το module υποστηρίζει την τοπολογία Point-to-Multipoint (PMP) και την τεχνική αμφιδρόμησης Time Division Duplex (TDD) και υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού C++.

Η δομή του module απεικονίζεται στην εικόνα 21.



Εικόνα 21: Δομή WiMAX Module [17]

Κατά την έναρξη της προσομοίωσης, εκτελείται η διαδικασία εγγραφής των σταθμών συνδρομητών στο σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης ενημερώνεται για τον επιθυμητό αριθμό συνδέσεων μεταφοράς δεδομένων προς κάθε κατεύθυνση (downlink/uplink), την κατηγορία ροής υπηρεσίας για κάθε σύνδεση και τις παραμέτρους QoS για την αντίστοιχη ροή υπηρεσίας, οι οποίες καθορίζονται από το χρήστη. Ο σταθμός βάσης αποδίδει σε κάθε σύνδεση μία ταυτότητα σύνδεσης (Connection Identifier - CID) και μία ταυτότητα υπηρεσίας ροής (Service Flow Identifier - SFID) και η διαχείριση κάθε πακέτου από τον προσομοιωτή γίνεται με βάση τις συγκεκριμένες ταυτότητες. Επιπλέον, ο σταθμός βάσης εγκαθιδρύει ένα ζεύγος συνδέσεων διαχείρισης για κάθε σταθμό συνδρομητή (μία στην κατεύθυνση uplink και μία στην κατεύθυνση downlink) για τη μετάδοση μηνυμάτων διαχείρισης MAC και όσων μηνυμάτων δεν μπορούν να μεταφερθούν μέσω των συνδέσεων μεταφοράς δεδομένων.

Όταν ένα πακέτο φθάσει στο επίπεδο MAC του σταθμού βάσης από ανώτερο επίπεδο, κατηγοριοποιείται σε μια σύνδεση και την αντίστοιχη ροή υπηρεσίας. Στη συνέχεια προσομοιώνονται οι λειτουργίες χρονοπρογραμματισμού από τον downlink scheduler, ο οποίος αποφασίζει ποιες συνδέσεις θα μεταδώσουν στο επόμενο υποπλαίσιο downlink, σε ποιες και πόσες χρονοθυρίδες, με βάση τις παραμέτρους QoS των συνδέσεων, το backlog της κίνησης που περιμένει για μετάδοση στον σταθμό και την διαθεσιμότητα πόρων. Οι σταθμοί συνδρομητών ενημερώνονται σχετικά μέσω του μηνύματος DL-MAP που αποστέλλεται στην αρχή ενός πλαισίου.

Αντίστοιχα, όταν ένα πακέτο φθάσει στο επίπεδο MAC ενός σταθμού συνδρομητή από ανώτερο επίπεδο, κατηγοριοποιείται, και ανάλογα με το είδος ροής στην οποία ανήκει, αποστέλλεται αίτηση απόδοσης εύρους ζώνης (bandwidth request) στο σταθμό βάσης είτε με unicast είτε με contention polling.

Όταν ο σταθμός βάσης λάβει μία αίτηση απόδοσης εύρους ζώνης, την προωθεί στον uplink scheduler ο οποίος προσδιορίζει τις συνδέσεις που θα μεταδώσουν στο επόμενο υποπλαίσιο uplink και τις χρονοθυρίδες στις οποίες θα μεταδώσει κάθε σύνδεση. Η απόφαση αυτή λαμβάνει υπόψη τις αιτήσεις απόδοσης εύρους ζώνης που έχει λάβει ο uplink scheduler από τις διάφορες συνδέσεις, τις απαιτήσεις QoS των συνδέσεων αυτών και τη διαθεσιμότητα πόρων. Ο σταθμός βάσης ενημερώνει τους σταθμούς των συνδρομητών μέσω ενός μηνύματος UL-MAP το οποίο αποστέλλει στην αρχή κάθε πλαισίου, μετά από το DL-MAP.

5.2 Προσομοίωση και αξιολόγηση

Για τις προσομοιώσεις θεωρούμε μία τοπολογία PMP όπου ο σταθμός βάσης εξυπηρετεί έναν αριθμό από σταθμούς συνδρομητών. Η διάρκεια του πλαισίου είναι 5 ms και η χωρητικότητα του καναλιού είναι 40 Mbps. Κάθε πλαίσιο διαιρείται σε ισομεγέθη υποπλαίσια uplink και downlink με αποτέλεσμα η χωρητικότητα των καναλιών uplink και downlink να είναι 20 Mbps.

Επειδή το ενδιαφέρον εστιάζεται στον χρονοπρογραμματισμό στην κατεύθυνση uplink, ο σταθμός βάσης εξυπηρετεί συνδέσεις των σταθμών συνδρομητών μόνο στην κατεύθυνση uplink. Κάθε σταθμός συνδρομητή έχει, μία μόνο σύνδεση, και επομένως, μία μόνο ροή υπηρεσίας, η οποία ανήκει σε έναν από τους τέσσερις τύπους UGS, rtPS, nrtPS ή BE.

Οι ροές UGS μεταφέρουν φωνή χωρίς καταστολή περιόδων σιωπής (silence suppression). Το μοντέλο κίνησης που χρησιμοποιείται για τη φωνή είναι το γνωστό "on/off" μοντέλο του Brady [**18**]. Η διάρκεια των περιόδων ακολουθεί εκθετική κατανομή με μέση τιμή 1.2 s και 1.8 s για τις καταστάσεις "on" και "off" αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια των περιόδων "on", πακέτα μεγέθους 66 bytes γεννιούνται κάθε 20 ms.

Οι ροές rtPS μεταφέρουν κίνηση βίντεο που γεννιέται από MPEG traces [**19**].

Οι ροές nrtPS μεταφέρουν κίνηση FTP. Το μέγεθος κάθε αρχείου FTP ακολουθεί εκθετική κατανομή με μέση τιμή 512 Kbytes. Η γεννήτρια κίνησης παράγει αρχεία FTP σε χρονικά διαστήματα τέτοια ώστε, μακροπρόθεσμα, η κίνηση FTP να παράγεται με ρυθμό ίσο με ποσοστό $\rho = 0.0075$ της χωρητικότητας του ασύρματου καναλιού.

Οι ροές BE μεταφέρουν κίνηση WEB. Το μέγεθος των αντικειμένων HTTP μοντελοποιείται από μία υβριδική κατανομή Lognormal/Pareto. Το σώμα της κατανομής μοντελοποιείται με κατανομή Lognormal με μέση τιμή 27600 bytes και τυπική απόκλιση 59714 ενώ η ουρά μοντελοποιείται με κατανομή Pareto με μέση τιμή 1463000 bytes και παράγοντα μορφής (shape factor) 1.1. Το 93% των αντικειμένων ακολουθούν το σώμα της κατανομής. Η γεννήτρια κίνησης παράγει αντικείμενα HTTP με τρόπο ώστε, μακροπρόθεσμα, η κίνηση WEB να παράγεται με ρυθμό ίσο με ποσοστό $\rho = 0.005$ της χωρητικότητας του καναλιού.

Ο σταθμός βάσης παρέχει στις ροές υπηρεσίας rtPS χρονοθυρίδες για την αποστολή αιτήσεων εύρους ζώνης (bandwidth requests) κάθε 20 ms. Το αντίστοιχο διάστημα για τις ροές nrtPS είναι 50 ms.

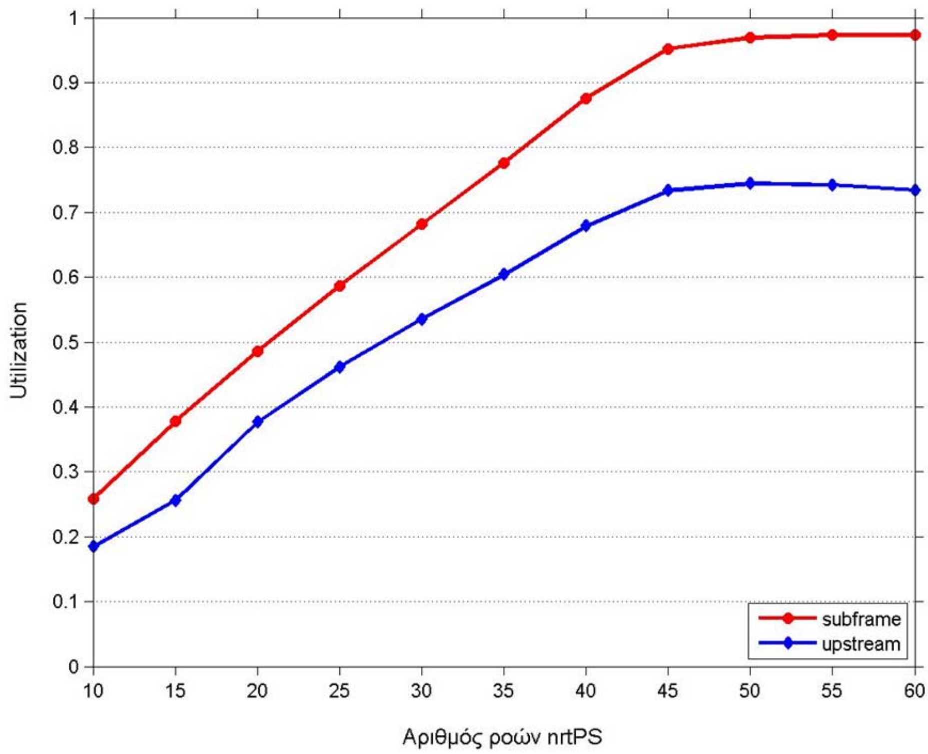
Το όριο καθυστέρησης (deadline) που ορίζεται για κάθε ροή rtPS είναι 100 ms. Κάθε ροή rtPS έχει ελάχιστο εύρος ζώνης που εξαρτάται από το μέσο ρυθμό του μεταδιδόμενου βίντεο. Κάθε ροή nrtPS έχει ελάχιστο εύρος ζώνης 200 kbps ενώ μία ροή BE δεν έχει καμία εγγύηση QoS, όπως προβλέπεται στο πρότυπο.

Για την αξιολόγηση του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού και τη σύγκρισή του με τον αλγόριθμο των Freitag/Fonseca πραγματοποιήσαμε τέσσερις οικογένειες πειραμάτων με σκοπό την μελέτη της δυνατότητας των δύο αλγορίθμων να παρέχουν εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας κάτω από σενάρια διαφορετικού φόρτου δικτύου καθώς και την δυνατότητα να παρέχουν δίκαια το εύρος ζώνης ανάμεσα σε ανταγωνιστικές συνδέσεις που ανήκουν στον ίδιο τύπο ροής υπηρεσίας.

5.2.1 Πείραμα 1^{o}

Με το πρώτο πείραμα ελέγχουμε αν ο σταθμός βάσης είναι σε θέση να αποδώσει το διαθέσιμο εύρος ζώνης δίκαια ανάμεσα στους σταθμούς συνδρομητών με συνδέσεις που ανήκουν στον ίδιο τύπο ροής υπηρεσίας, ανεξαρτήτως του αριθμού αυτών των συνδέσεων. Ο σταθμός βάσης εξυπηρετεί μόνο ροές υπηρεσίας nrtPS στην κατεύθυνση uplink. Ο αριθμός των ροών στο σύστημα ποικίλει από δέκα (10) έως εξήντα (60).

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας στο κανάλι uplink ως ποσοστό της χωρητικότητας του καναλιού αυτού (upstream utilization). Η πληροφορία αυτή περιλαμβάνει τόσο τα δεδομένα που μεταφέρουν οι συνδέσεις όσο και τα μηνύματα ελέγχου. Επίσης απεικονίζεται ο βαθμός χρησιμοποίησης του υποπλαισίου uplink (subframe utilization) ο οποίος εκφράζει το ποσοστό χωρητικότητας του καναλιού uplink που καταλαμβάνεται για τη μεταφορά αυτής της πληροφορίας. Η πρόσθετη επιβάρυνση οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν χρονοθυρίδες που δεν είναι πλήρως γεμάτες, συνεπώς κάποιο κομμάτι τους μένει ανεκμετάλλευτο, υπάρχουν χρονοθυρίδες που αποδίδονται για unicast polling και δε χρησιμοποιούνται και, επίσης, υπάρχουν χρονοθυρίδες που δεσμεύονται από τον προσομοιωτή για να προσομοιώσει τη συμπεριφορά μηχανισμών διαχείρισης του προτύπου.

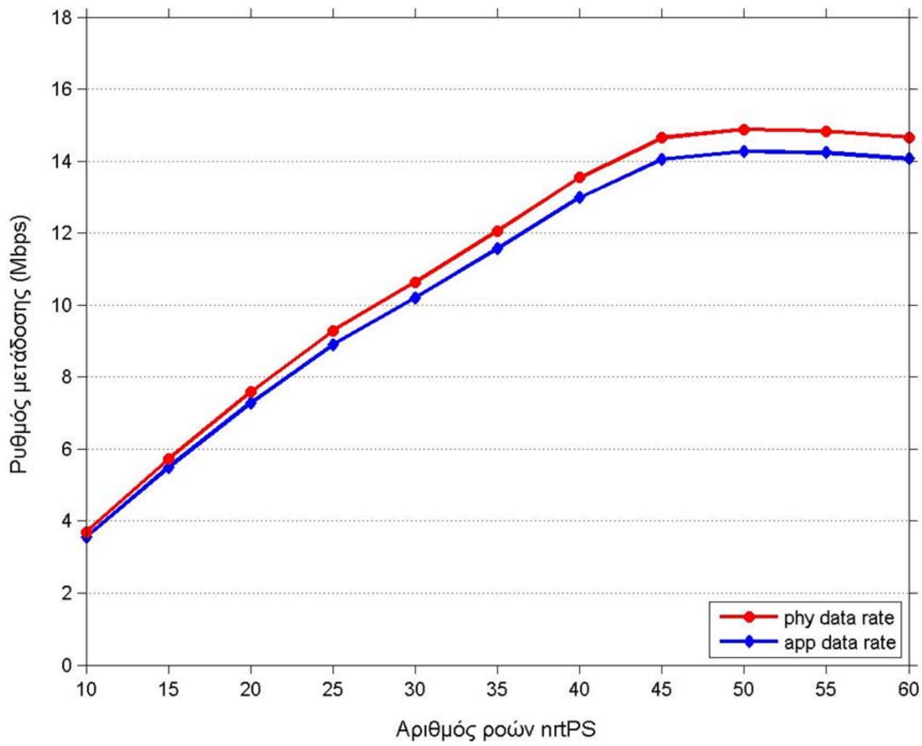


Εικόνα 22: Πείραμα 1 - Utilization

Στο πείραμα αυτό, η συμπεριφορά των δύο αλγορίθμων ταυτίζεται καθώς στο δίκτυο υπάρχουν μόνο nrtPS συνδέσεις και οι δύο αλγόριθμοι αντιμετωπίζουν τις συνδέσεις αυτές πανομοιότυπα. Το ποσοστό εκμετάλλευσης του καναλιού uplink αυξάνεται, όπως είναι λογικό, γραμμικά, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ροών, ξεκινώντας λίγο κάτω από 20% και σταθεροποιείται περίπου στο 75%. Η περαιτέρω αύξηση του αριθμού των ροών, άνω των πενήντα (50), δεν οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση του upstream utilization, λόγω του υψηλού φόρτου του συστήματος.

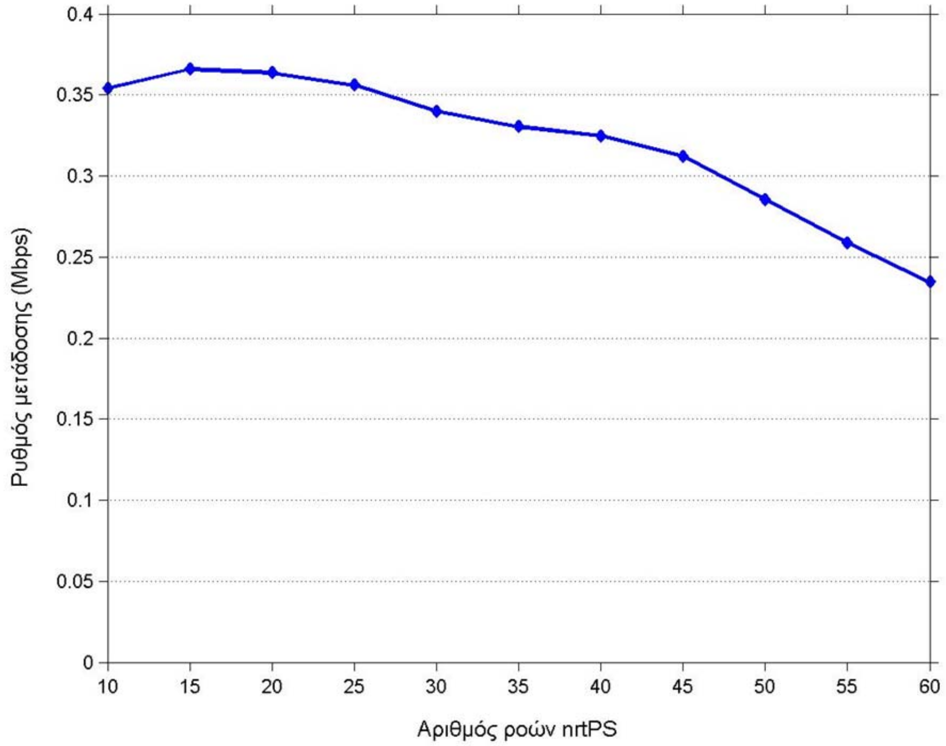
Για την ακρίβεια, εισάγοντας ακόμη περισσότερες συνδέσεις στο δίκτυο παρατηρούμε μία μικρή πτώση στο upstream utilization, κάτι που οφείλεται στις ολοένα και περισσότερες συγκρούσεις κατά τις περιόδους contention όπου οι ροές nrtPS προσπαθούν να αποστείλουν τις αιτήσεις τους για απόδοση εύρους ζώνης, με αποτέλεσμα πολλές από αυτές τις αιτήσεις να συγκρούονται μεταξύ τους και, κατά συνέπεια, να αποτυγχάνουν. Το γεγονός ότι, μετά την εισαγωγή σαράντα πέντε (45) και πλέον ροών nrtPS στο σύστημα, αυτό οδηγείται σε υπερφόρτωση, απεικονίζεται στο ποσοστό του subframe utilization, το οποίο προσεγγίζει το 98% για τις τρεις τελευταίες περιπτώσεις που εξετάσαμε (πενήντα (50), πενήντα πέντε (55) και εξήντα (60) ροές nrtPS).

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων που παράγονται από την εφαρμογή (app data rate) χωρίς την επιβάρυνση των επικεφαλίδων που προστίθενται από τα κατώτερα επίπεδα. Επίσης απεικονίζεται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στο φυσικό επίπεδο (phy data rate). Όπως είναι φυσικό, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αυξάνεται γραμμικά μέχρι την εισαγωγή σαράντα πέντε (45) ροών nrtPS και μετά παραμένει, σχετικά, σταθερός καθώς το σύστημα λειτουργεί κοντά στη χωρητικότητά του, παρουσιάζοντας μία ελαφρά πτώση στην τελευταία περίπτωση των εξήντα (60) ροών nrtPS.



Εικόνα 23: Πείραμα 1 - Ρυθμος μετάδοσης δεδομένων

Είναι αναμενόμενο ότι, για μεγάλο αριθμό ροών nrtPS στο σύστημα, όσο αυξάνεται ο αριθμός των ροών, τόσο θα μειώνεται ο μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά ροή. Στο επόμενο γράφημα απεικονίζεται αυτός ο μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά ροή nrtPS. Μέχρι την εισαγωγή είκοσι πέντε (25) ροών nrtPS στο σύστημα ο μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά ροή παραμένει περίπου σταθερός (περί τα 350 Kbps) ενώ με την εισαγωγή περισσοτέρων ροών ο μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά ροή μειώνεται σταδιακά, καθώς οι διαθέσιμοι πόροι δικτύου διαμοιράζονται σε ολοένα και περισσότερους σταθμούς συνδρομητών.

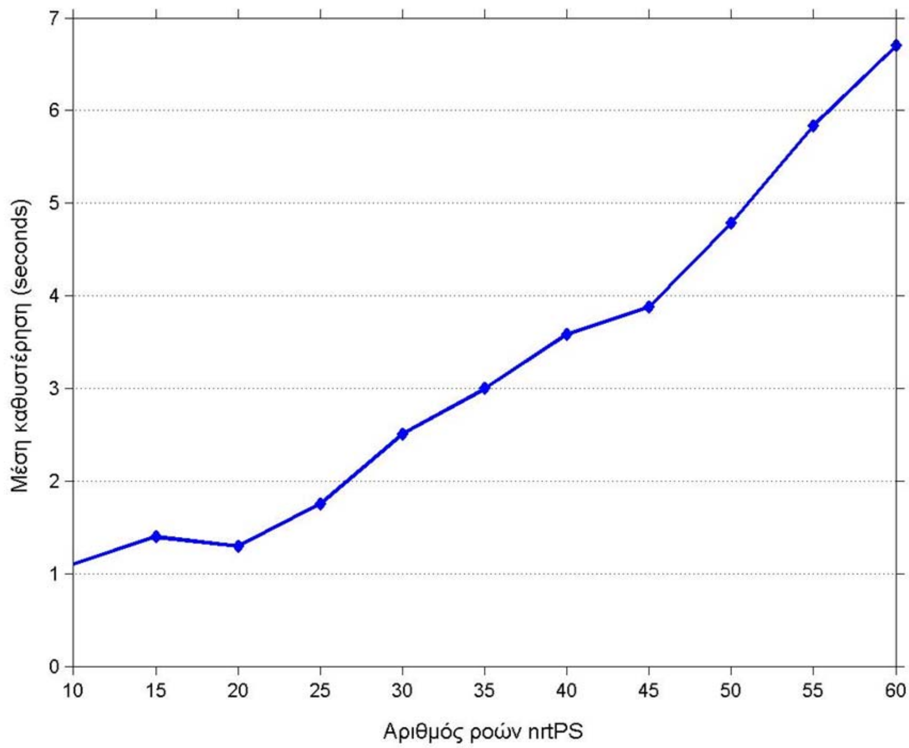


Εικόνα 24: Πείραμα 1 - Μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά ροή nrtPS

Αντίστοιχα, για μεγάλο αριθμό ροών nrtPS, όσο αυξάνεται ο αριθμός των ροών, τόσο αυξάνεται η μέση καθυστέρηση των πακέτων. Το γεγονός αυτό απεικονίζεται στο επόμενο γράφημα. Η καθυστέρηση μετριέται από τη χρονική στιγμή που γεννιέται ένα πακέτο στον agent[5] του σταθμού συνδρομητή μέχρι τη χρονική στιγμή που το αντίστοιχο MAC PDU φθάνει στο επίπεδο MAC του σταθμού βάσης. Στην προκειμένη περίπτωση, με τον όρο πακέτο αναφερόμαστε, για ευκολία, σε ένα MAC PDU, που είναι και η μονάδα πληροφορίας που

[5] Ο agent αυτός του ns2 παρεμβάλλεται μεταξύ επιπέδου εφαρμογής και επιπέδου μεταφοράς, μιμούμενος ουσιαστικά τα sockets που χρησιμοποιούν οι πραγματικές εφαρμογές για να χρησιμοποιήσουν δικτυακές υπηρεσίες

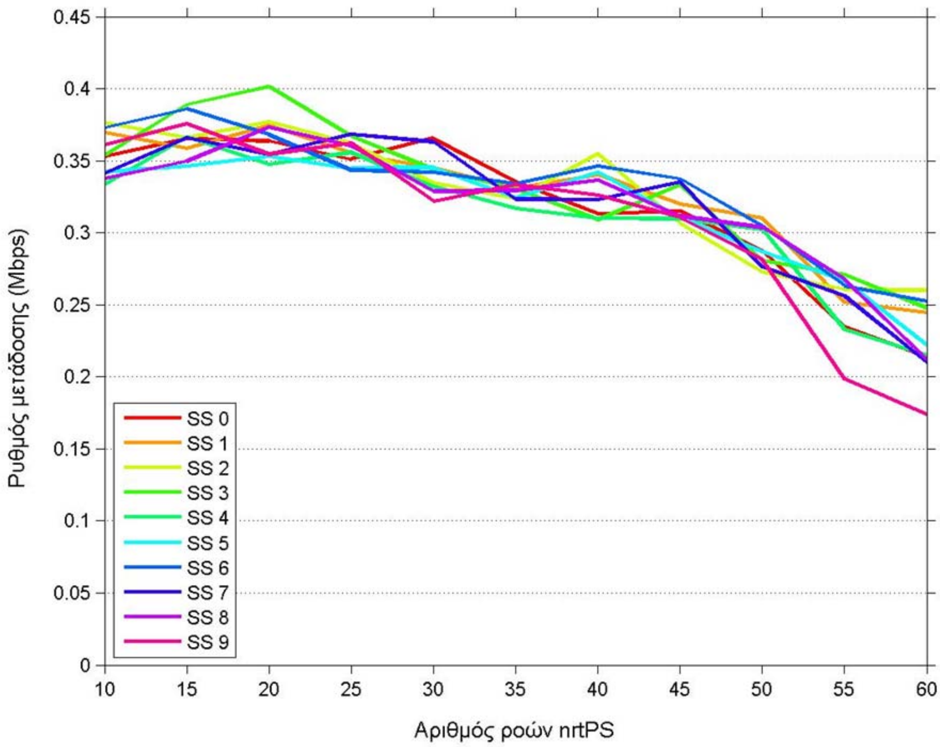
ανταλλάσσεται μεταξύ των επιπέδων ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) του σταθμού βάσης και των σταθμών συνδρομητών.



Εικόνα 25: Πείραμα 1 - Μέση καθυστέρηση πακέτων

Στο παραπάνω γράφημα, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η μέση καθυστέρηση πακέτων nrtPS παραμένει, σχεδόν, σταθερή, λίγο πάνω από το 1 δευτερόλεπτο, για τις πρώτες τρεις περιπτώσεις, μέχρι την εισαγωγή είκοσι (20) σταθμών συνδρομητών με κίνηση nrtPS στο δίκτυο. Η εισαγωγή επιπλέον ροών nrtPS οδηγεί σε μία γραμμική αύξηση της μέσης καθυστέρησης πακέτων μέχρι την περίπτωση που εισάγονται σαράντα πέντε (45) ροές nrtPS στο σύστημα και σε ακόμη εντονότερη αύξηση για τις μετέπειτα περιπτώσεις, όπου η μέση καθυστέρηση πακέτων προσεγγίζει τα 5, 6 και 7 seconds για τις περιπτώσεις των πενήντα (50), πενήντα πέντε (55), εξήντα (60) σταθμών συνδρομητών αντίστοιχα.

Για να απαντηθεί το ερώτημα εάν ο αλγόριθμος αποδίδει το διαθέσιμο εύρος ζώνης δίκαια μεταξύ των ροών παραθέτουμε το παρακάτω γράφημα το οποίο απεικονίζει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για τις ροές των πρώτων δέκα σταθμών συνδρομητών, αριθμημένων από SS0 έως SS9, όπως αυτό διαφοροποιείται, καθώς ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται από μόνο δέκα (10), στην αρχή, έως εξήντα (60).



Εικόνα 26: Πείραμα 1 - Ρυθμός μετάδοσης ροών των σταθμών συνδρομητών (SS)

Παρατηρούμε ότι το εύρος ζώνης που αποδίδεται σε κάθε σταθμό συνδρομητή (και κατά συνέπεια σε κάθε σύνδεση) είναι παραπλήσιο για κάθε έναν από τους δέκα (10) σταθμούς. Όσο υπάρχουν μέχρι σαράντα (40) σταθμοί στο δίκτυο, το εύρος ζώνης που αποδίδεται στον καθένα παραμένει σχεδόν σταθερό, ενώ η περαιτέρω αύξηση του αριθμού των σταθμών οδηγεί στην υπερφόρτωση του δικτύου και κατά συνέπεια στην απόδοση λιγότερων χρονοθυρίδων στον κάθε σταθμό. Σε συνθήκες υπερφόρτωσης του δικτύου (για παράδειγμα στην περίπτωση που έχουμε εισάγει στο δίκτυο εξήντα (60) σταθμούς), λόγω του μεγάλου αριθμού των συνδέσεων, παρατηρείται μεγαλύτερος αριθμός συγκρούσεων κατά την αποστολή αιτήσεων για απόδοση εύρους ζώνης. Επαναλαμβανόμενες συγκρούσεις οδηγούν σε μεγαλύτερες καθυστερήσεις κατά τη μετάδοση των αιτήσεων απόδοσης εύρους ζώνης και, τελικά, οδηγούν σε μείωση του αποδιδόμενου εύρους ζώνης για συγκεκριμένους σταθμούς.

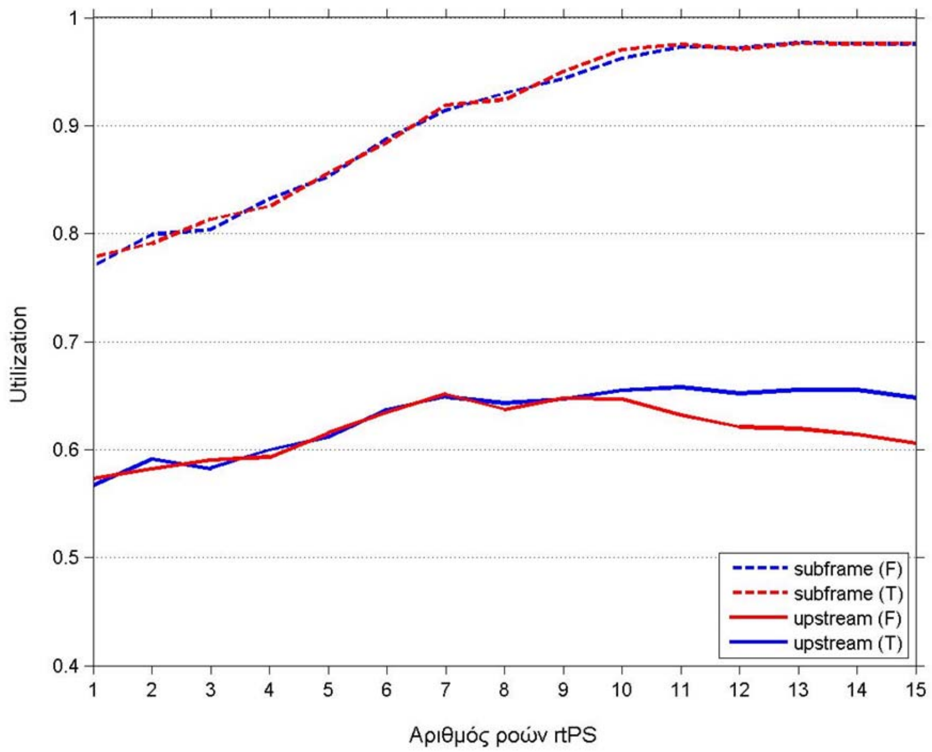
Μπορούμε πάντως να παρατηρήσουμε ότι το εύρος ζώνης αποδίδεται δίκαια ανάμεσα σε όλους τους σταθμούς συνδρομητών, χωρίς κάποιος να ωφελείται διαρκώς έναντι των υπολοίπων. Το αντίστοιχο γράφημα για τον αλγόριθμο των Freitag/Fonseca απεικονίζει παρόμοια συμπεριφορά.

5.2.2 Πείραμα 2^{ο}

Ο σκοπός του δεύτερου πειράματος είναι η μελέτη της επίδρασης της κίνησης rtPS στη συμπεριφορά του συστήματος για τους δύο διαφορετικούς αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού. Κάθε ροή υπηρεσίας rtPS μεταφέρει κίνηση βίντεο, η οποία χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα σποραδική (bursty), γεγονός το οποίο θα μπορούσε να οδηγήσει σε υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας των υπολοίπων ροών.

Στο πείραμα αυτό, ο σταθμός βάσης εξυπηρετεί δεκαπέντε (15) συνδέσεις UGS, είκοσι (20) συνδέσεις nrtPS, είκοσι (20) συνδέσεις BE ενώ ο αριθμός των συνδέσεων rtPS ποικίλει από μία (1) έως δεκαπέντε (15).

Όπως και στο προηγούμενο πείραμα, αναμένουμε αρχικά μία σταδιακή αύξηση του upstream utilization καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ροών rtPS, και κατόπιν μία σταθεροποίησή του όταν, πια, έχει εισαχθεί στο σύστημα ικανός αριθμός ροών. Το γράφημα που απεικονίζει τη μεταβολή του upstream utilization σε σχέση με τον αριθμό των συνδέσεων rtPS παρατίθεται παρακάτω. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου των Freitag/Fonseca σημειώνονται με (F), ενώ τα αποτελέσματα του προτεινόμενου, τροποποιημένου, αλγορίθμου σημειώνονται με (T).

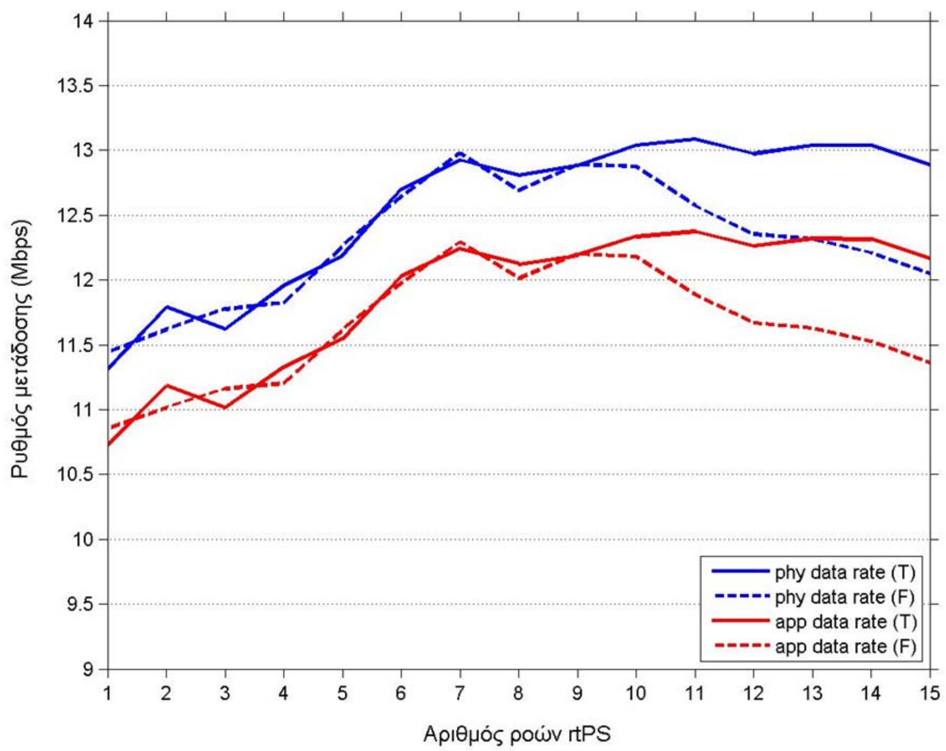


Εικόνα 27: Πείραμα 2 - Utilization

Παρατηρούμε ότι, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των συνδέσεων rtPS, η τιμή του upstream utilization αρχικά αυξάνεται γραμμικά, στη συνέχεια σταθεροποιείται σε μία τιμή γύρω στο 65% και τέλος αρχίζει να μειώνεται και για τους δύο αλγορίθμους. Η τιμή του subframe utilization ξεκινά από περίπου 77%, αυξάνεται, επίσης, γραμμικά μέχρι την εισαγωγή δέκα (10) σταθμών συνδρομητών με κίνηση rtPS στο δίκτυο και μετά σταθεροποιείται περίπου στο 97%, γεγονός το οποίο καταδεικνύει ότι το δίκτυο λειτουργεί πια πολύ κοντά στη χωρητικότητά του.

Η διαφορά των δύο αλγορίθμων είναι ότι, στην περίπτωση του αλγορίθμου των Freitag/Fonseca η τιμή του upstream utilization αρχίζει να μειώνεται όταν ο αριθμός των συνδέσεων rtPS ξεπεράσει τις δέκα (10) ενώ στην περίπτωση του προτεινόμενου αλγορίθμου η μείωση της τιμής του upstream utilization εμφανίζεται όταν ο αριθμός των συνδέσεων rtPS ξεπεράσει τις δεκατέσσερις (14). Δηλαδή, ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιτυγχάνει υψηλότερο upstream utilization σε συνθήκες υψηλού φόρτου, ή αλλιώς, σε συνθήκες όπου το subframe utilization είναι ήδη πάνω από 96%. Ο έγκαιρος χρονοπρογραμματισμός των ροών rtPS επιτρέπει τον υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας στο κανάλι uplink ως ποσοστό της χωρητικότητας του καναλιού καθώς, όπως θα δούμε και παρακάτω, οι ροές χαμηλότερης προτεραιότητας (nrtPS και BE) καταφέρνουν να διατηρήσουν υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης στις περιπτώσεις όπου το σύστημα λειτουργεί σε συνθήκες κοντά στην χωρητικότητά του. Όσο το σύστημα δε βρίσκεται ακόμα σε συνθήκες υψηλού φόρτου οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν αντίστοιχη συμπεριφορά αφού οι συνδέσεις rtPS δεν έχουν περιέλθει ακόμη σε κατάσταση όπου αδυνατούν να τηρήσουν το όριο καθυστέρησης ώστε να αποδώσουν οι αλλαγές που υλοποιήθηκαν στον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού.

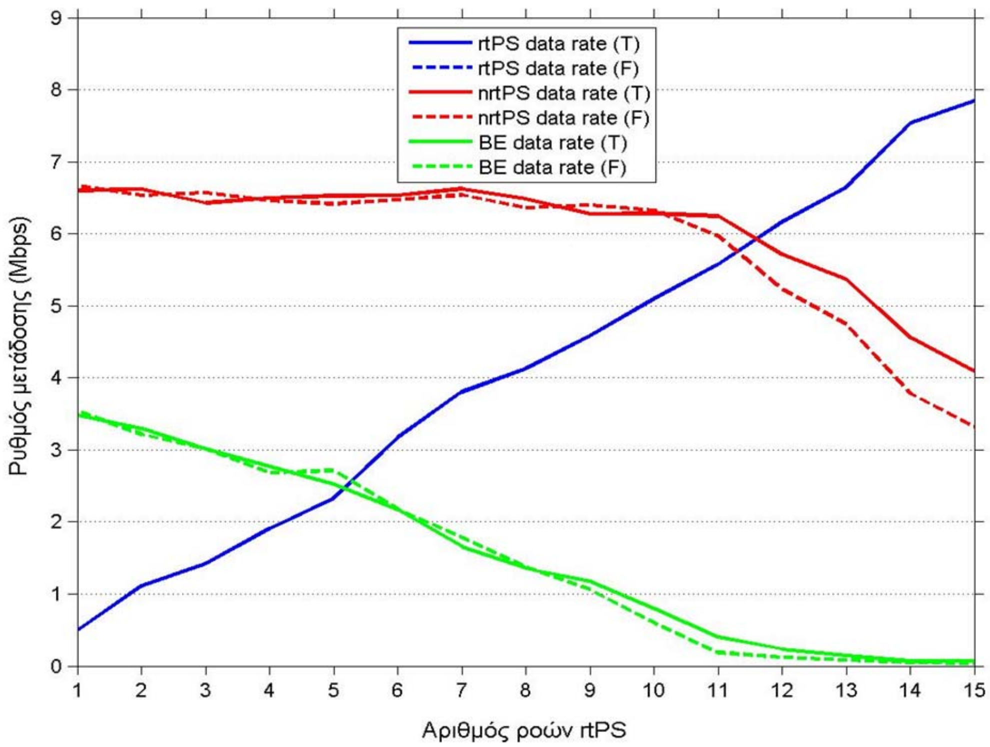
Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζονται ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων στο επίπεδο εφαρμογής (app data rate) και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στο φυσικό επίπεδο (phy data rate) για το σύνολο της κίνησης.



Εικόνα 28: Πείραμα 2 - Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων

Όπως είναι αναμενόμενο με βάση τα αποτελέσματα του προηγούμενου γραφήματος, όταν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος των Freitag/Fonseca ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αρχίζει να μειώνεται για αριθμό ροών rtPS μεγαλύτερο από εννέα (9), ενώ όταν εφαρμόζεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων διατηρείται σταθερός με την εισαγωγή ακόμη πέντε (5) ροών και αρχίζει να μειώνεται για αριθμό ροών rtPS μεγαλύτερο από δεκατέσσερις (14).

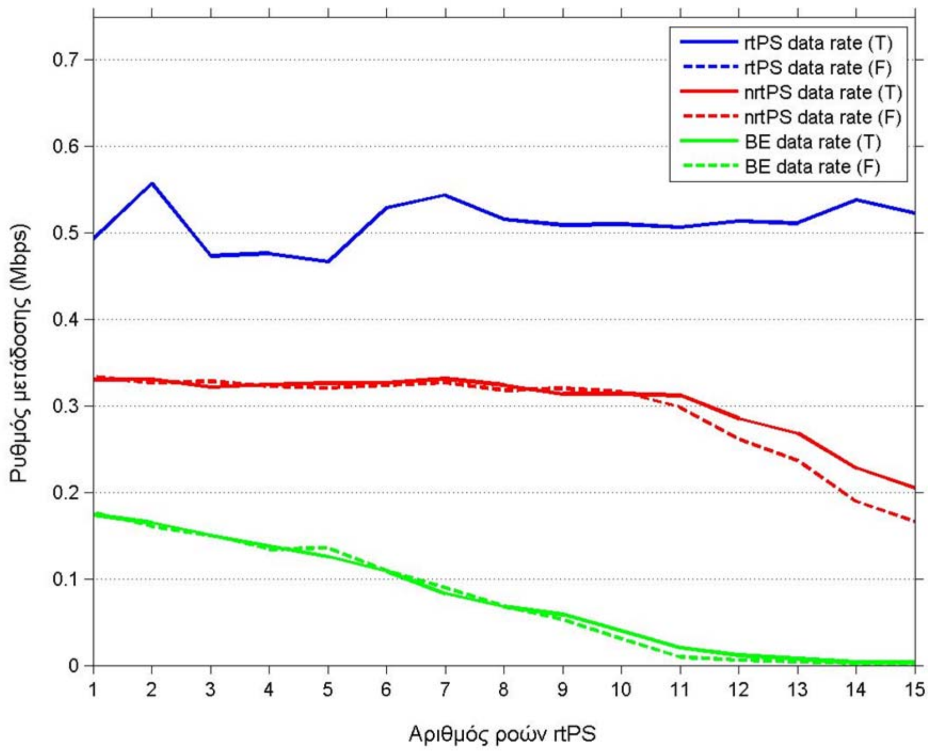
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η απεικόνιση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων στο επίπεδο εφαρμογής ανά κατηγορία ροών υπηρεσίας, όπως αυτή παρατίθεται παρακάτω. Στο γράφημα δεν απεικονίζεται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για τις ροές UGS. Οι δύο αλγόριθμοι διαχειρίζονται πανομοιότυπα τις ροές αυτές στις οποίες δίνουν απόλυτη προτεραιότητα, αποδίδοντας σταθερό εύρος ζώνης ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων UGS να είναι σταθερός, ανεξάρτητος του αριθμού των υπολοίπων ροών όσο υπάρχει διαθέσιμη χωρητικότητα στο σύστημα. Στο επίπεδο εφαρμογής ο ρυθμός αυτός είναι ίσος με $N \times 0.4 \times 66 \times 8 / 20$ kbps $= N \times 10.56$ kbps, όπου N ο αριθμός των ροών UGS, 0.4 ο παράγοντας δραστηριότητας της φωνής (voice activity factor), 66 το μέγεθος των πακέτων, σε bytes, που παράγει η πηγή σε διαστήματα των 20 ms.



Εικόνα 29: Πείραμα 2 - Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ανά κατηγορία κίνησης

Παρατηρούμε ότι ο μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που επιτυγχάνει ο προτεινόμενος αλγόριθμος σε σχέση με τον αλγόριθμο των Freitag/Fonseca σε συνθήκες υψηλού φόρτου οφείλεται σε μεγαλύτερο, διατηρήσιμο, ρυθμό μετάδοσης της κίνησης nrtPS, κυρίως, και της κίνησης BE, σε μικρότερο βαθμό. Ο ρυθμός μετάδοσης της κίνησης rtPS είναι ίδιος και για τους δύο αλγορίθμους. Στην περίπτωση του νέου αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού, ο έγκαιρος χρονοπρογραμματισμός και εξυπηρέτηση των ροών rtPS (που θα αντιμετώπιζαν πρόβλημα να τηρήσουν τα όρια καθυστέρησης αφού το σύστημα είναι υπερφορτωμένο) επιτρέπει να υπάρξουν περισσότερες άδειες χρονοθυρίδες για την αποστολή αιτήσεων εύρους ζώνης από τις ροές υπηρεσίας χαμηλότερου επιπέδου, κάτι που, με τη σειρά του οδηγεί σε λιγότερες συγκρούσεις και, άρα, σε μεγαλύτερο, διατηρήσιμο, ρυθμό μετάδοσης.

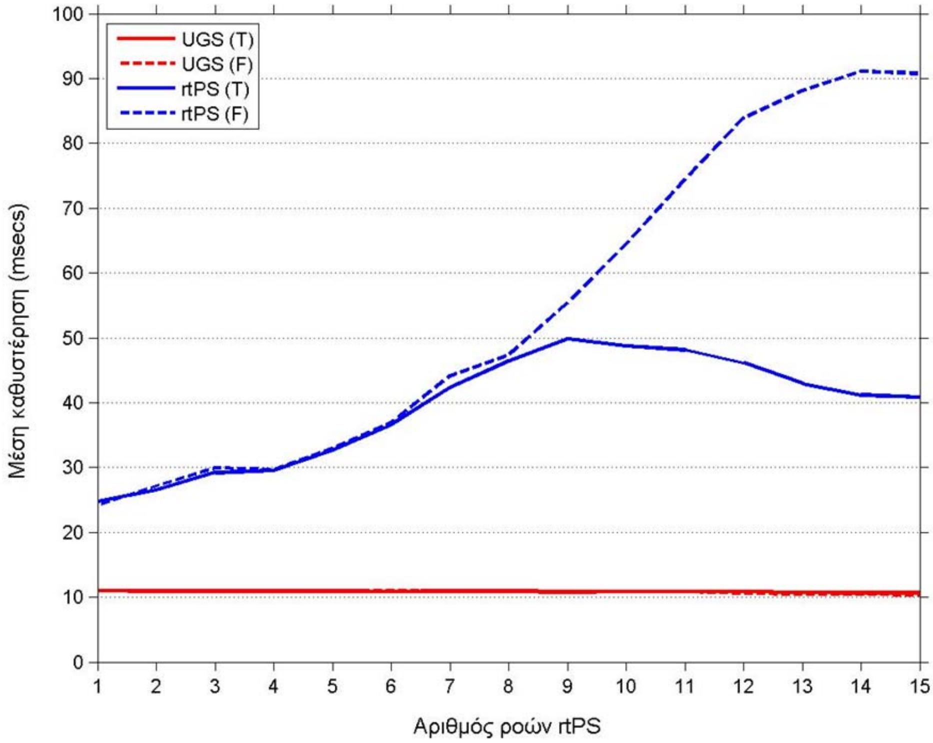
Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται ο μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στο επίπεδο εφαρμογής ανά ροή υπηρεσίας για κάθε είδος κίνησης rtPS, nrtPS και BE.



Εικόνα 30: Πείραμα 2 - Μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ανά ροή υπηρεσίας ανά κατηγορία κίνησης

Παρατηρούμε ότι ο μέσος ρυθμός μετάδοσης των ροών rtPS παραμένει σταθερός (είδαμε ήδη ότι αυξάνεται γραμμικά στο πιο πάνω γράφημα ανάλογα με την αύξηση του αριθμού των ροών rtPS) ενώ οι ρυθμοί μετάδοσης των ροών nrtPS και BE εμφανίζουν πτώση καθώς εισάγεται στο δίκτυο κίνηση μεγαλύτερης προτεραιότητας, με τον προτεινόμενο, τροποποιημένο, αλγόριθμο να διατηρεί μεγαλύτερο μέσο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ανά ροή υπηρεσίας για τις ροές nrtPS και, λιγότερο, για τις ροές BE, όταν το σύστημα είναι υπερφορτωμένο.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γράφημα που απεικονίζει την μέση καθυστέρηση πακέτων για τις ροές rtPS (και δευτερευόντως για τις ροές UGS) καθώς αυξάνεται ο φόρτος στο δίκτυο. Υπενθυμίζεται ότι η καθυστέρηση μετριέται από τη χρονική στιγμή που γεννιέται ένα πακέτο στον agent ενός σταθμού συνδρομητή μέχρι τη χρονική στιγμή που το πακέτο αυτό φθάνει στο επίπεδο MAC του σταθμού βάσης.



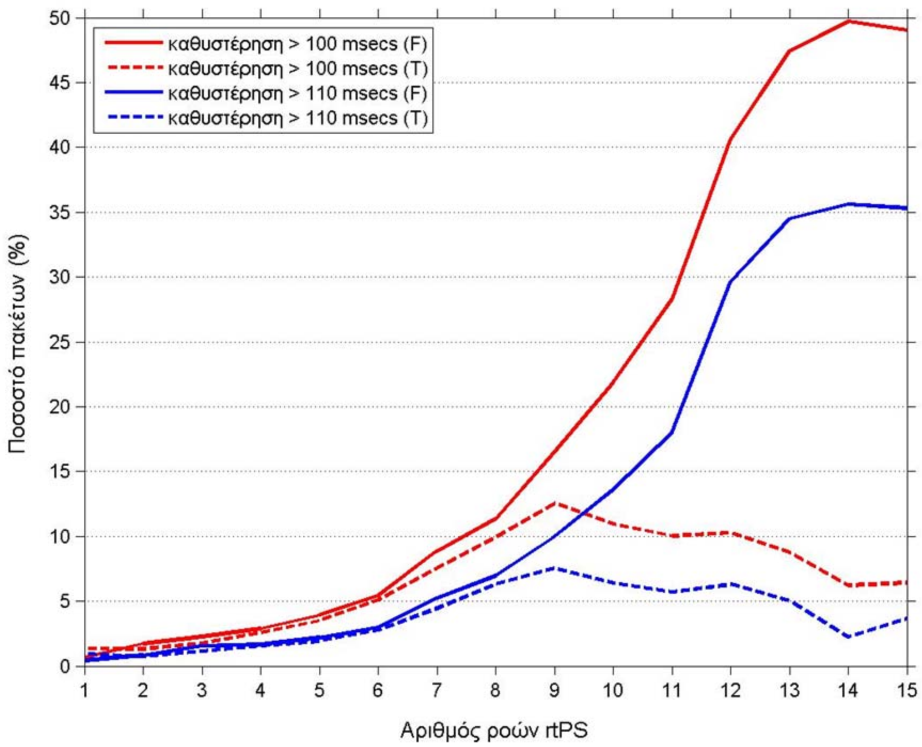
Εικόνα 31: Πείραμα 2 - Μέση καθυστέρηση πακέτων κίνησης UGS και rtPS

Στο παραπάνω γράφημα αρχικά παρατηρούμε ότι και οι δύο αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού διατηρούν σταθερή μέση καθυστέρηση πακέτων για την υπηρεσία UGS, ανεξαρτήτως του αριθμού συνδέσεων rtPS και του φόρτου δικτύου, κάτι το οποίο συμφωνεί απολύτως με την προϋπόθεση ότι η υπηρεσία UGS λαμβάνει σταθερό εύρος ζώνης ανά τακτά χρονικά διαστήματα και δεν πρέπει να επηρεάζεται από τις ροές υπηρεσίας χαμηλότερης προτεραιότητας. Η καθυστέρηση πακέτων για την υπηρεσία UGS παραμένει σταθερή και πάντα ίση με 10 ms.

Όσον αφορά τη μέση καθυστέρηση πακέτων για την υπηρεσία rtPS, παρατηρούμε ότι οι δύο αλγόριθμοι εμφανίζουν ίδια αποτελέσματα όσο ο αριθμός των συνδέσεων rtPS στο δίκτυο παραμένει μικρότερος από εννέα (9), όπου η μέση καθυστέρηση των πακέτων rtPS είναι περίπου 50 ms. Στην περίπτωση του αλγορίθμου των Freitag/Fonseca, η περαιτέρω αύξηση του αριθμού των συνδέσεων rtPS έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη αύξηση της μέσης καθυστέρησης πακέτων rtPS η οποία φθάνει στα 90 ms για δεκαπέντε (15) συνδέσεις rtPS.

Αντιθέτως, στην περίπτωση του προτεινόμενου αλγορίθμου, η μέση καθυστέρηση δεν ξεπερνάει ποτέ την τιμή των 50 ms. Αυτό οφείλεται στο «παράθυρο ελέγχου» που υλοποιήθηκε και το οποίο, όταν μία σύνδεση δεν καταφέρει να τηρήσει το όριο καθυστέρησης, μεγαλώνει, με συνέπεια από το επόμενο πλαίσιο, η συγκεκριμένη ροή rtPS να έχει αποκτήσει πλεονέκτημα έναντι των υπολοίπων που δεν εμφανίζουν πρόβλημα, με τελικό αποτέλεσμα να καταφέρνει να διατηρήσει μικρότερη μέση καθυστέρηση, σε περιπτώσεις όπου το δίκτυο είναι υπερφορτωμένο. Καθώς, μάλιστα, μετά την εισαγωγή έντεκα (11), και πλέον, ροών rtPS στο δίκτυο ο ρυθμός μετάδοσης των ροών nrtPS αρχίζει και μειώνεται (από τα περίπου 340 Kbps στην περίπτωση που έχουμε εισάγει έντεκα (11) ροές rtPS στα περίπου 200 Kbps στην περίπτωση των δεκαπέντε (15) ροών) η μέση καθυστέρηση πακέτων rtPS εμφανίζει μία μικρή πτώση.

Επιπρόσθετα, στο επόμενο γράφημα απεικονίζεται το ποσοστό των πακέτων rtPS των οποίων η καθυστέρηση υπερβαίνει το όριο καθυστέρησης των 100 ms, καθώς πέρα από τη μέση καθυστέρηση πακέτων ενδιαφέρει και το ποσοστό των πακέτων που υπερβαίνουν το θεσμοθετημένο όριο. Η διαφορά μεταξύ των δύο αλγορίθμων είναι πολύ μεγάλη για τη συγκεκριμένη μετρική. Η τάση μεταβολής με την αύξηση του αριθμού των συνδέσεων rtPS είναι αντίστοιχη με αυτήν της μέσης καθυστέρησης. Μέχρι την εισαγωγή εννέα (9) συνδέσεων rtPS στο δίκτυο, ο αλγόριθμος των Freitag/Fonseca φέρει το 15% των πακέτων να υπερβαίνουν το όριο των 100 ms, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τον τροποποιημένο αλγόριθμο είναι ελαφρώς χαμηλότερο, στο 12,5%. Σε συνθήκες υψηλού φόρτου, ο αλγόριθμος των Freitag/Fonseca εκτοξεύει το ποσοστό των πακέτων που υπερβαίνουν το όριο καθυστέρησης ως το 50%, ενώ ο αλγόριθμος που σχεδιάσαμε δεν υπερβαίνει το 12%, λιγότερο από το ένα τέταρτο σε σύγκριση με τον άλλο αλγόριθμο. Εντελώς αντίστοιχα, το ποσοστό των πακέτων rtPS των οποίων η καθυστέρηση υπερβαίνει το 110% του ορίου καθυστέρησης φθάνει ως 35% για τον αλγόριθμο των Freitag/Fonseca, ενώ για τον αλγόριθμο που προτείνουμε δεν υπερβαίνει το 7%.

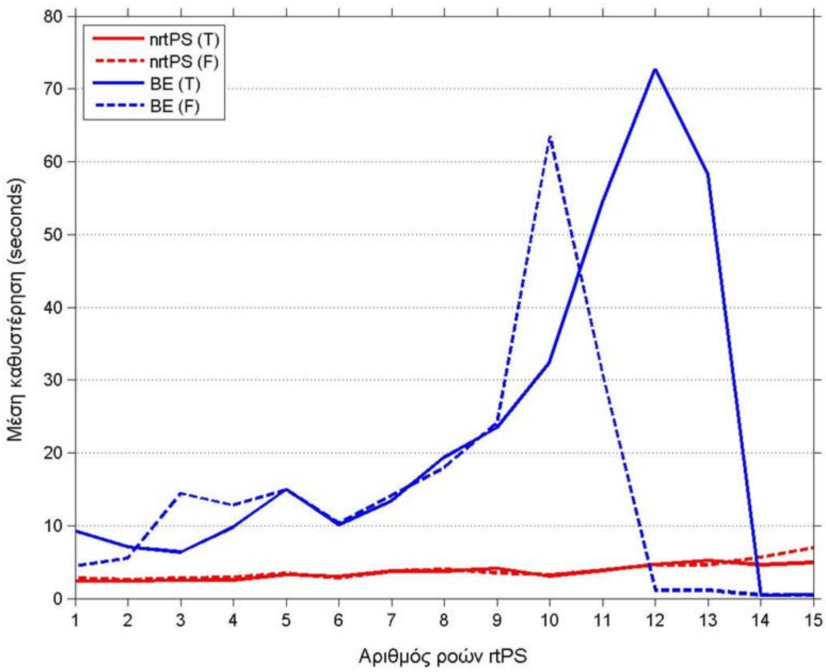


Εικόνα 32: Πείραμα 2 - Ποσοστό πακέτων rtPS που υπερβαίνουν το όριο καθυστέρησης

Στο επόμενο γράφημα απεικονίζεται η μέση καθυστέρηση πακέτων για τις ροές nrtPS και BE. Παρατηρούμε ότι μέχρι την εισαγωγή εννέα (9) ροών rtPS στο σύστημα, οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, όπως είδαμε και προηγουμένως. Η εισαγωγή δέκα (10) σταθμών με κίνηση rtPS στο σύστημα οδηγεί αυτόματα σε τριπλασιασμό (από περίπου 20 seconds σε 62 seconds) τη μέση καθυστέρηση πακέτων για τη ροή υπηρεσίας BE, κατά τον αλγόριθμο των Freitag/Fonseca, σε αντίθεση με την τιμή των περίπου τριάντα (30) seconds για τον τροποποιημένο αλγόριθμο που προτείνουμε.

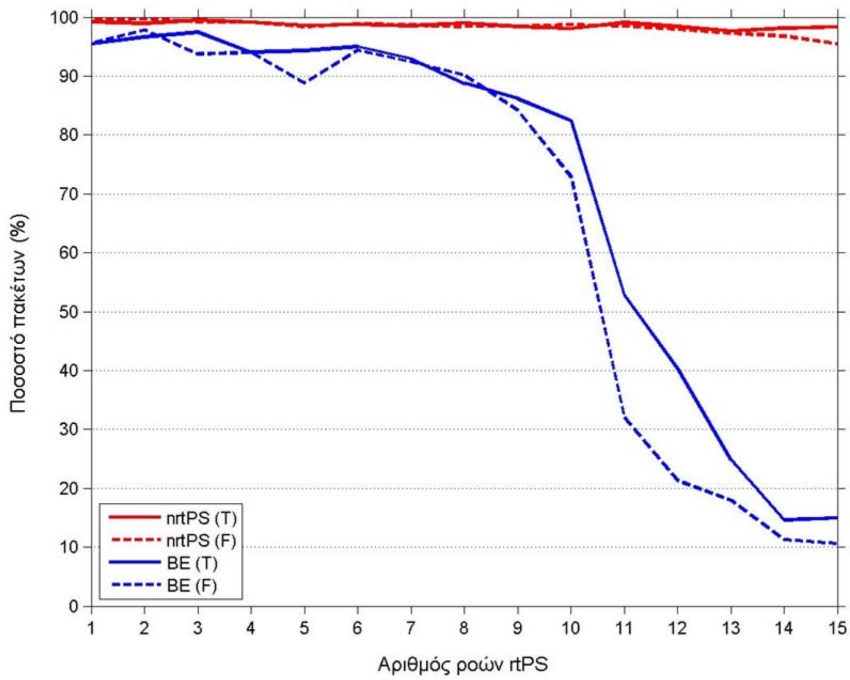
Η μεγάλη μείωση στη μέση καθυστέρηση πακέτων για τη ροή υπηρεσίας BE, με την εισαγωγή έντεκα (11) και πλέον ροών rtPS στο σύστημα, οφείλεται στη δραματική μείωση του ποσοστού των εξυπηρετούμενων πακέτων της ροής υπηρεσίας BE (καθώς οι αλγόριθμοι αποδίδουν τους δικτυακούς πόρους στις ροές rtPS που εισάγονται στο σύστημα), ποσοστό το οποίο απεικονίζεται στην εικόνα 34. Καθώς ο προτεινόμενος αλγόριθμος καταφέρνει να διατηρήσει υψηλότερο ποσοστό εξυπηρετούμενων πακέτων BE παρά την εισαγωγή δώδεκα (12) ροών rtPS, αυτά καταλήγουν να εξυπηρετούνται μεν αλλά με πολύ μεγάλη μέση καθυστέρηση.

Με την εισαγωγή δεκατεσσάρων (14) και πλέον ροών rtPS στο δίκτυο αυτό πλέον λειτουργεί πολύ κοντά στη χωρητικότητά του. Έτσι παρατηρείται ραγδαία μείωση της μέσης καθυστέρησης πακέτων BE καθώς το ποσοστό των εξυπηρετούμενων πακέτων πέφτει πολύ γρήγορα μέχρι και το 15%.



Εικόνα 33: Πείραμα 2 - Μέση καθυστέρηση πακέτων nrtPS και BE

Ακολούθως παραθέτουμε το γράφημα με το ποσοστό των πακέτων των ροών nrtPS και BE που εξυπηρετούνται.



Εικόνα 34: Πείραμα 2 - Ποσοστό εξυπηρετούμενων πακέτων nrtPS και BE

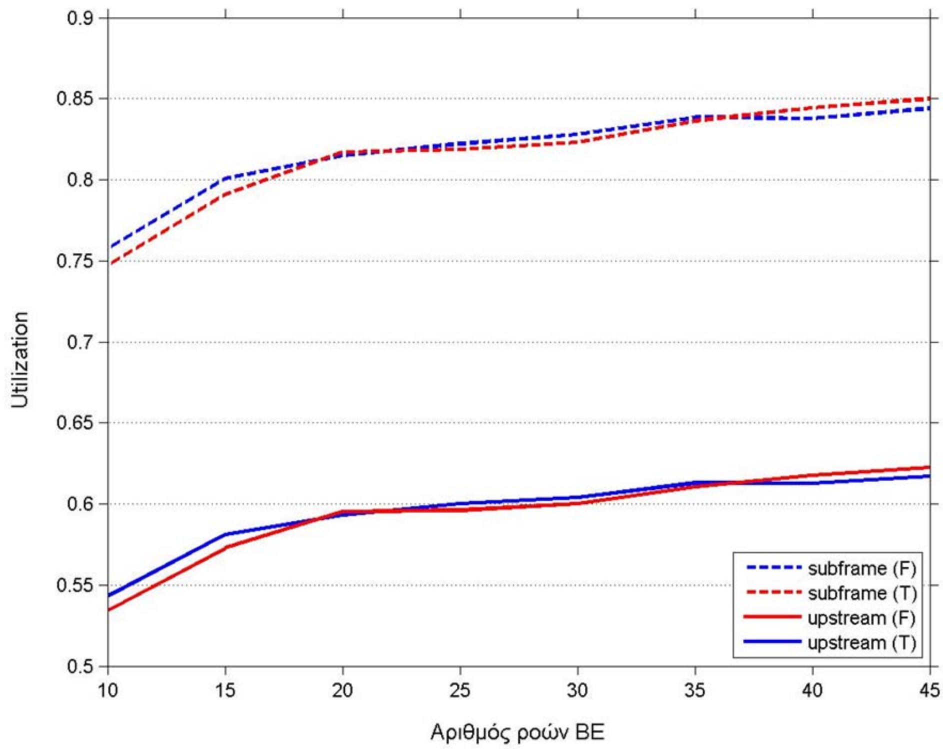
Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι μετά την εισαγωγή δέκα (10) και πλέον σταθμών συνδρομητών με κίνηση rtPS στο δίκτυο το ποσοστό των πακέτων BE που εξυπηρετούνται πέφτει δραματικά, κάτι αναμενόμενο αφού το δίκτυο, όντας σε κατάσταση υψηλού φόρτου, εξυπηρετεί ροές υπηρεσίας μεγαλύτερης προτεραιότητας. Όπως δείξαμε προηγουμένως, ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού που υλοποιήσαμε πετυχαίνει καλύτερη συμπεριφορά από τον αλγόριθμο των Freitag/Fonseca σε συνθήκες κορεσμού του δικτύου, καθώς επιτρέπει την ύπαρξη λιγότερων συγκρούσεων και άρα μεγαλύτερης πιθανότητας να ικανοποιηθούν οι αιτήσεις των ροών BE για απόδοση εύρους ζώνης.

Συμπερασματικά, μπορούμε να καταλήξουμε ότι η εισαγωγή κίνησης rtPS στο δίκτυο αρχίζει να επηρεάζει τις ροές χαμηλότερης προτεραιότητας, από ένα κρίσιμο σημείο, όπου ο φόρτος του δικτύου πλησιάζει την χωρητικότητα αυτού, και μετά. Σε κάθε περίπτωση, όπως δείξαμε, ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού που υλοποιήσαμε αποτελεί σαφή βελτίωση σε σχέση με τη συμπεριφορά του αλγορίθμου των Freitag/Fonseca, τόσο ως προς την αντιμετώπιση των ροών rtPS (ποσοστό πακέτων που ξεπερνούν το όριο χρονοκαθυστέρησης, μέση καθυστέρηση πακέτου), όσο και στην αντιμετώπιση των ροών χαμηλότερης προτεραιότητας, οι οποίες επωφελούνται από τις λιγότερες συγκρούσεις κατά την αποστολή των αιτήσεων απόδοσης εύρους ζώνης στις περιόδους contention και καταφέρνουν να διατηρήσουν το ποσοστό των εξυπηρετούμενων πακέτων καθώς και το μέσο ρυθμό μετάδοσης παρά την εισαγωγή επιπλέον κίνησης στο δίκτυο. Φυσικά όταν το σύστημα υπερφορτωθεί τόσο το ποσοστό των εξυπηρετούμενων πακέτων των ροών χαμηλότερης προτεραιότητας όσο και ο μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων των ροών αυτών μειώνεται δραματικά ώστε να εξυπηρετηθούν οι ροές rtPS.

5.2.3 Πείραμα 3^{o}

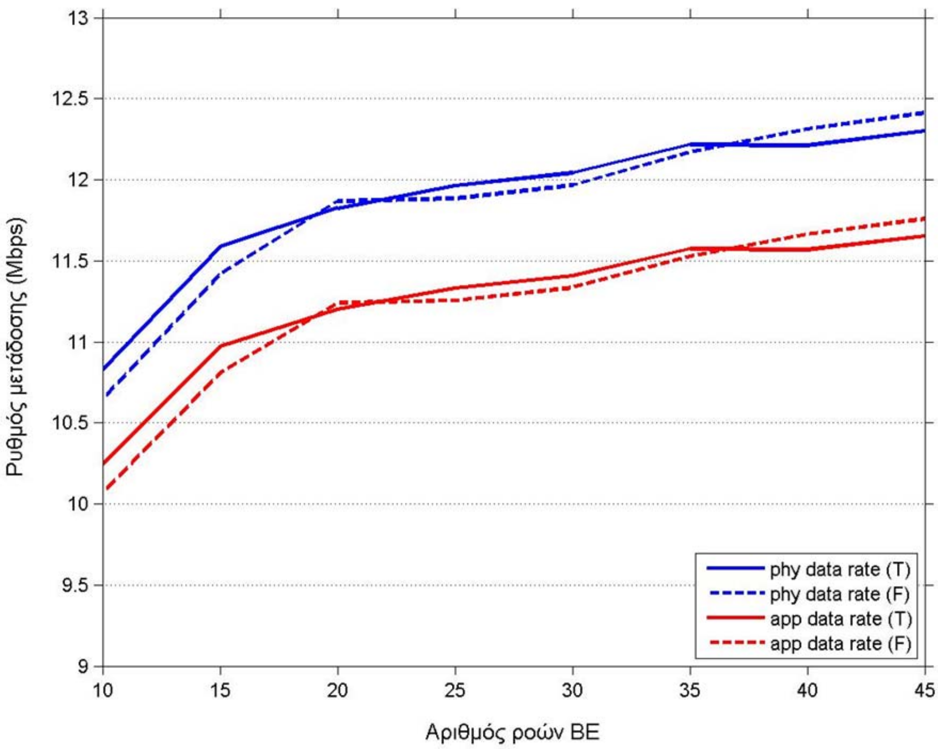
Στο τρίτο πείραμα εξετάζουμε αν η εισαγωγή κίνησης BE στο σύστημα επηρεάζει το επίπεδο παροχής εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας των ροών υψηλότερης προτεραιότητας, κάτι το οποίο δεν θα έπρεπε να συμβαίνει, καθώς στις ροές υπηρεσίας BE δεν παρέχονται εγγυήσεις QoS. Στο σενάριο αυτής της προσομοίωσης, ο σταθμός βάσης εξυπηρετεί δεκαπέντε (15) συνδέσεις UGS, πέντε (5) συνδέσεις rtPS και είκοσι πέντε (25) συνδέσεις nrtPS, ενώ ο αριθμός των συνδέσεων BE ποικίλει από δέκα (10) έως σαράντα πέντε (45).

Όσον αφορά τα upstream και subframe utilization οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν αντίστοιχη συμπεριφορά, η οποία απεικονίζεται στο γράφημα παρακάτω, κάτι αναμενόμενο αφού δεν υπάρχει διαφοροποίηση στον αριθμό των σταθμών συνδρομητών με κίνηση rtPS ώστε να αναμένουμε διαφοροποίηση ανάμεσα στους δύο αλγορίθμους. Όσον αφορά το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας στο κανάλι uplink ως ποσοστό της χωρητικότητας του καναλιού αυτού (upstream utilization) η εισαγωγή δέκα (10) συνδέσεων στο δίκτυο αντιστοιχεί σε ποσοστό περίπου 55% ενώ, στο τέλος, με την εισαγωγή σαράντα πέντε (45) συνδέσεων BE στο σύστημα το ποσοστό φθάνει περίπου στο 62%, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τον βαθμό χρησιμοποίησης του υποπλαισίου uplink (subframe utilization) είναι περίπου 75% και 85%, ποσοστά που αποδεικνύουν ότι το δίκτυο δεν φτάνει σε κατάσταση υπερφόρτωσης ακόμη και με την εισαγωγή σαράντα πέντε (45) ροών BE σε αυτό.



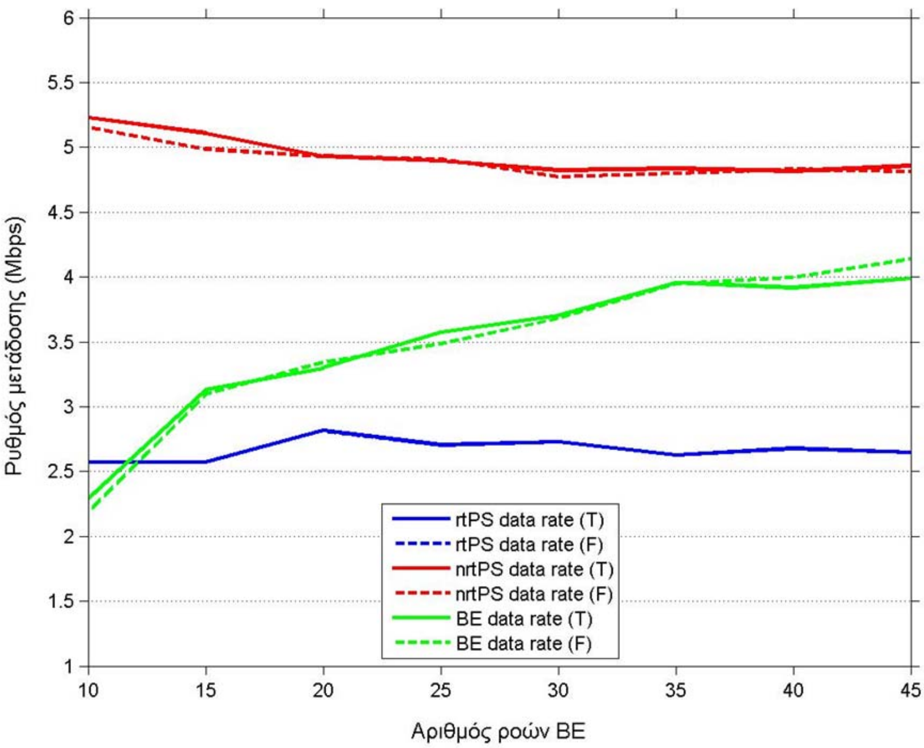
Εικόνα 35: Πείραμα 3 - Utilization

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων που παράγονται από την εφαρμογή (app data rate) και ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων στο φυσικό επίπεδο (phy data rate). Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία συνεχής αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων καθώς το σύστημα δεν έρχεται ποτέ σε κατάσταση υπερφόρτωσης (όπως δείξαμε παραπάνω το subframe utilization φθάνει μέχρι την τιμή 85%), όπου θα αναμέναμε σταθεροποίηση αυτού. Μπορούμε, όμως, να παρατηρήσουμε τη σταδιακή μείωση του ρυθμού με τον οποίο αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων καθώς εισάγονται περισσότερες ροές BE και αυξάνεται ο φόρτος στο σύστημα.



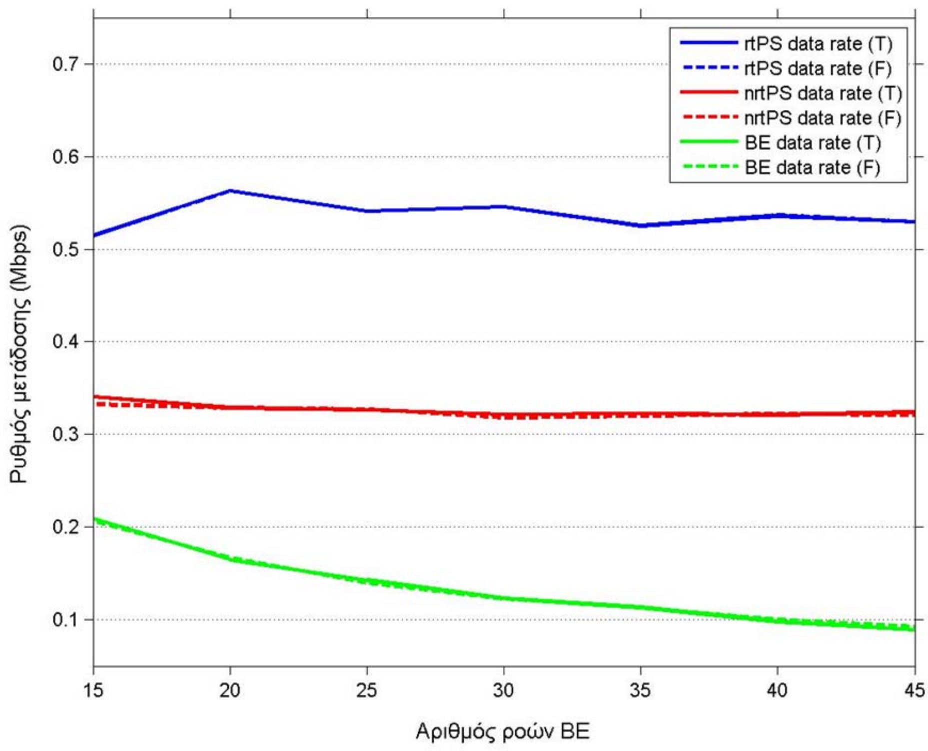
Εικόνα 36: Πείραμα 3 - Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων

Παρακάτω απεικονίζονται οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων στο επίπεδο εφαρμογής (app data rate) ανά κατηγορία κίνησης (rtPS, nrtPS και BE). Ο ρυθμός μετάδοσης της κίνησης rtPS παραμένει σταθερός (περίπου 2.6 Mbps), όπως αναμενόταν, καθώς η εισαγωγή κίνησης χαμηλότερης προτεραιότητας (όπως οι ροές υπηρεσίας BE) δεν επηρεάζει τις ροές υψηλότερης προτεραιότητας. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζει και η κίνηση nrtPS, η οποία διατηρεί σχεδόν σταθερό ρυθμό μετάδοσης, με μια μικρή μείωση, η οποία οφείλεται στις περισσότερες συγκρούσεις που πραγματοποιούνται καθώς οι αιτήσεις των συνδέσεων nrtPS για απόδοση εύρους ζώνης διαγωνίζονται με τις ολοένα και περισσότερες αιτήσεις των συνδέσεων BE. Ο ρυθμός μετάδοσης της κίνησης BE αυξάνεται καθώς εισάγονται περισσότεροι σταθμοί συνδρομητών στο δίκτυο, και είναι αυτή η αύξηση, η οποία οδηγεί και σε αντίστοιχη αύξηση και το συνολικό ρυθμό μετάδοσης όπως παρατηρήθηκε στην Εικόνα 36. Όπως αναμενόταν, οι δύο αλγόριθμοι δίνουν πάλι παρόμοια αποτελέσματα.



Εικόνα 37: Πείραμα 3 - Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ανά κατηγορία κίνησης

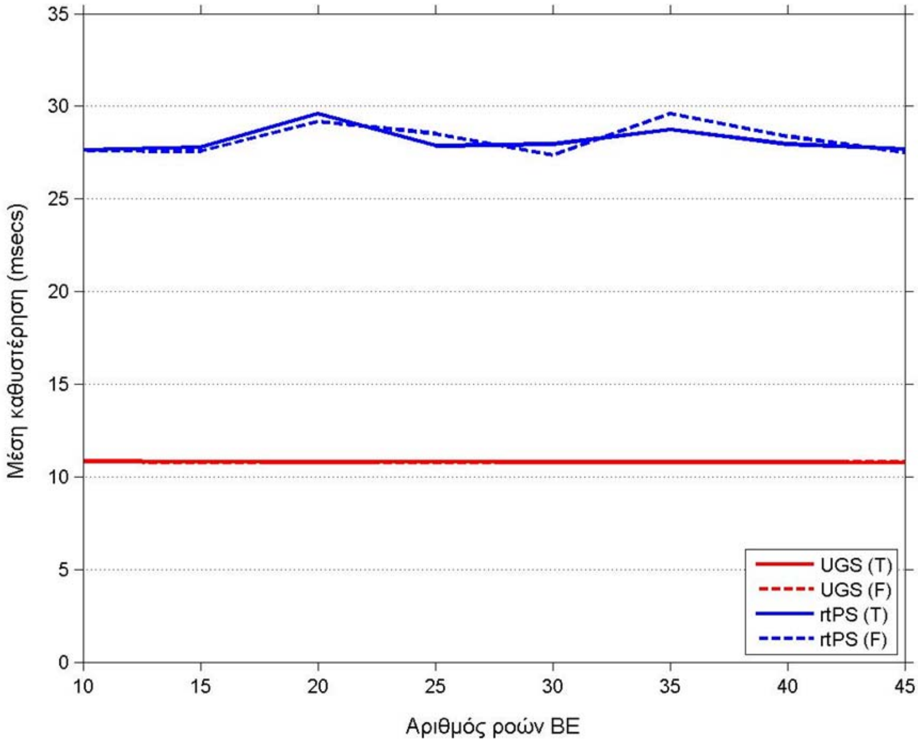
Παραθέτοντας το γράφημα του μέσου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων στο επίπεδο εφαρμογής ανά ροή υπηρεσίας για κάθε είδος κίνησης (rtPS, nrtPS, BE), παρατηρούμε ότι ο μέσος ρυθμός μετάδοσης των ροών nrtPS παραμένει σταθερός (περίπου 350 Kbps), κάτι που σημαίνει ότι οι ροές nrtPS λαμβάνουν πάντα τουλάχιστον το ελάχιστο εγγυημένο εύρος ζώνης, όπως αυτό ορίζεται από τις παραμέτρους QoS, ανεξαρτήτως της εισαγωγής περισσοτέρων ροών BE στο σύστημα. Ο μέσος ρυθμός μετάδοσης των ροών BE μειώνεται καθώς αυξάνονται οι συνδέσεις BE στο δίκτυο, καθώς το σύστημα διαμοιράζει τους υπολειπόμενους δικτυακούς πόρους, μετά την εξυπηρέτηση των ροών υψηλότερης προτεραιότητας, σε ολοένα και περισσότερες συνδέσεις BE. Στην περίπτωση των δέκα (10) συνδέσεων BE η κάθε σύνδεση BE λαμβάνει περίπου 200 Kbps ενώ η τιμή αυτή έχει πέσει στο μισό, περίπου στα 100 Kbps με την εισαγωγή σαράντα πέντε (45) συνδέσεων BE στο σύστημα.



Εικόνα 38: Πείραμα 3 - Μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ανά ροή υπηρεσίας ανά κατηγορία κίνησης

Όπως παρατηρήσαμε η εισαγωγή κίνησης BE στο δίκτυο δεν επηρεάζει τις ροές υπηρεσίας υψηλότερης προτεραιότητας όσον αφορά το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Αντίστοιχη συμπεριφορά αναμένεται και όσον αφορά τη μέση καθυστέρηση πακέτων για τις ροές υψηλότερης προτεραιότητας (UGS, rtPS και nrtPS).

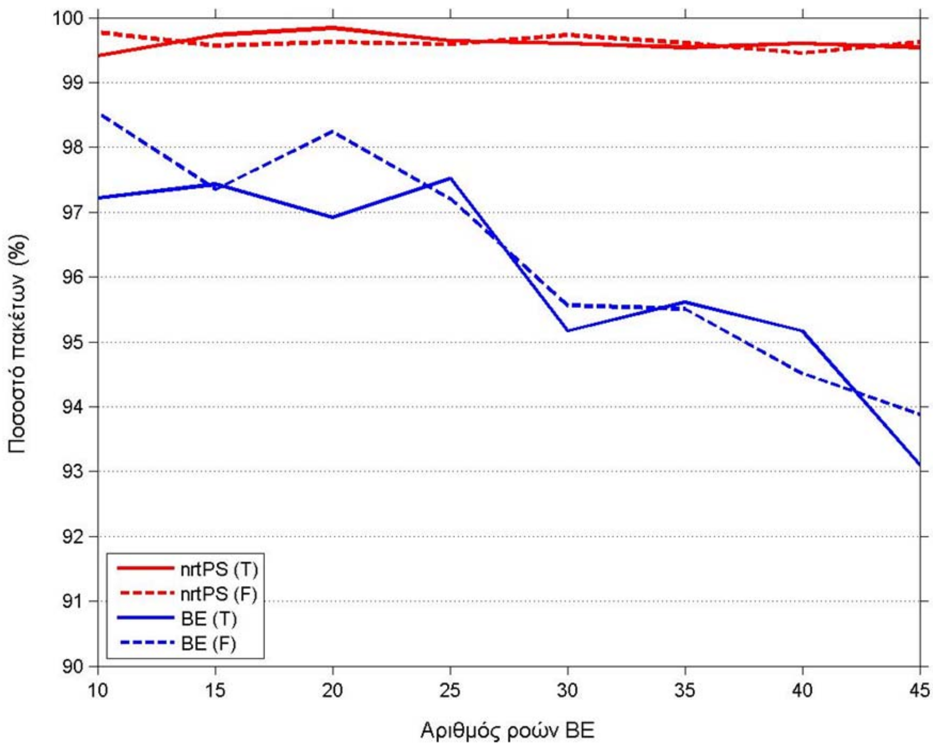
Στο γράφημα που ακολουθεί μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η μέση καθυστέρηση πακέτων των ροών rtPS παραμένει σταθερή (και οι δύο αλγόριθμοι δίνουν αντίστοιχες τιμές) περίπου στα 27 ms, πολύ κάτω από το όριο καθυστέρησης των 100 ms που έχει οριστεί.



Εικόνα 39: Πείραμα 3 - Μέση καθυστέρηση πακέτων κίνησης UGS και rtPS

Το ποσοστό των πακέτων που χάνουν το όριο καθυστέρησης δεν ξεπερνάει ποτέ το 2% και για τους δύο αλγορίθμους, ενώ η μέση καθυστέρηση των πακέτων nrtPS παραμένει πάντα σταθερή περίπου 2 ms.

Ακολούθως παραθέτουμε το γράφημα με το ποσοστό των πακέτων των ροών nrtPS και BE που εξυπηρετούνται. Το ποσοστό των πακέτων nrtPS που εξυπηρετούνται δεν επηρεάζεται από την εισαγωγή κίνησης BE στο σύστημα και παραμένει οριακά κάτω από το 100%, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό των πακέτων BE που εξυπηρετούνται μειώνεται όσο αυξάνονται οι συνδέσεις BE στο σύστημα, αλλά δεν πέφτει ποτέ κάτω από το 93%, καθώς η εισαγωγή ακόμη και σαράντα πέντε (45) σταθμών συνδρομητών με κίνηση BE στο σύστημα δεν το οδηγεί σε υπερφόρτωση.

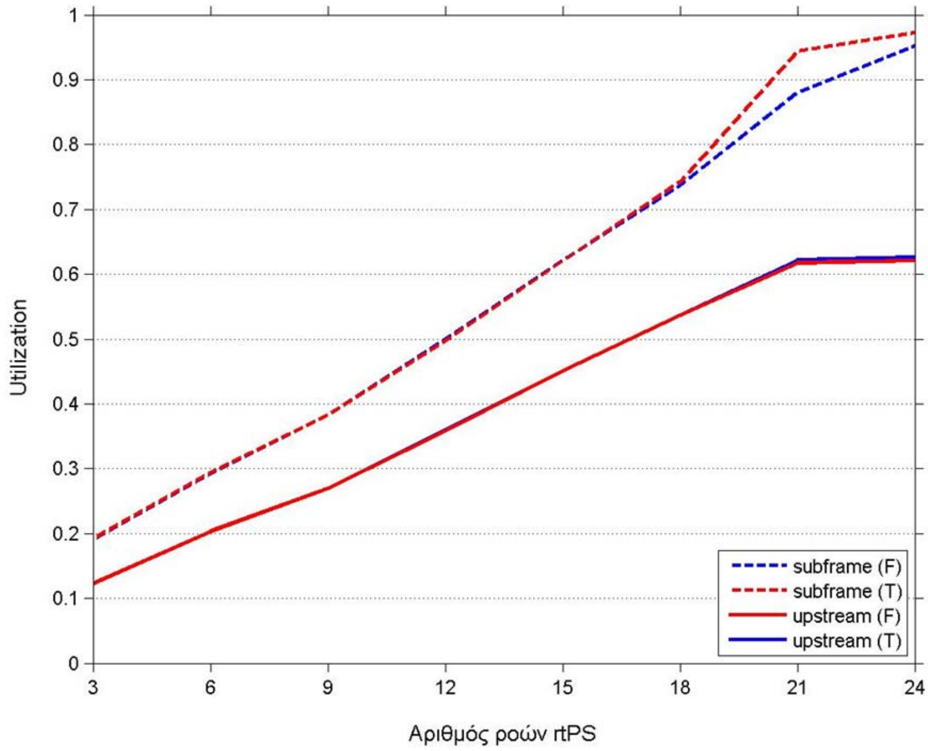


Εικόνα 40: Πείραμα 3 - Ποσοστό πακέτων nrtPS και BE που εξυπηρετούνται

5.2.4 Πείραμα 4^{ο}

Για την καλύτερη απεικόνιση και αξιολόγηση των διαφορών στην απόδοση των δύο αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού προσομοιώσαμε ένα σενάριο όπου ο σταθμός βάσης εξυπηρετεί στην κατεύθυνση uplink μία σύνδεση UGS, μία σύνδεση nrtPS και μία σύνδεση BE, ενώ ο αριθμός των συνδέσεων rtPS ποικίλει από τρεις (3) έως είκοσι τέσσερις (24). Καθώς ο αλγόριθμος σχεδιάστηκε με σκοπό την αποδοτικότερη αντιμετώπιση των ροών rtPS όταν αυτές, λόγω φόρτου του δικτύου, φτάνουν σε σημείο να μη μπορούν να τηρήσουν τα όρια καθυστέρησης, το συγκεκριμένο πείραμα, όπου η κίνηση που έχει εισαχθεί στο δίκτυο είναι (σχεδόν) μόνο κίνηση rtPS θα είναι σε θέση να καταδείξει εμφανώς την διαφορά, ως προς την απόδοση, των δύο αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού.

Κατά την σχεδίαση του αλγορίθμου, εστιάσαμε στην βελτίωση της μέσης καθυστέρησης των πακέτων και στην εξασφάλιση ότι οι ροές rtPS θα προλαβαίνουν να εξυπηρετηθούν εντός των ορίων χρονοκαθυστέρησης, συνεπώς όσον αφορά το upstream utilization δεν περιμένουμε να δούμε διαφορές ανάμεσα στην απόδοση των δύο αλγορίθμων. Το γράφημα παρατίθεται παρακάτω.

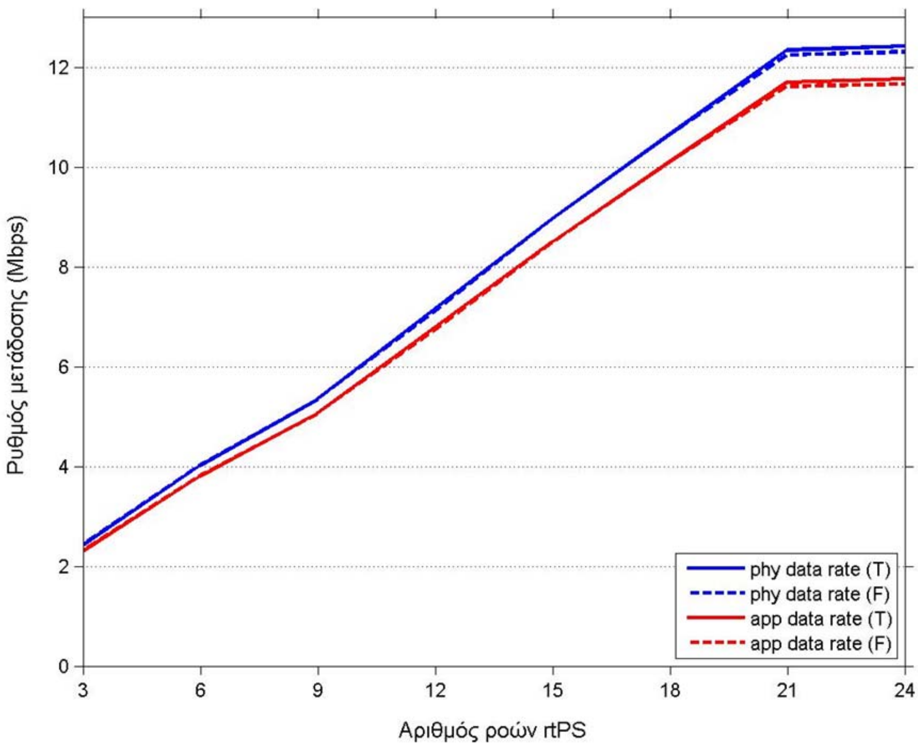


Εικόνα 41: Πείραμα 4 - Utilization

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι δύο αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού εμφανίζουν ταυτόσημο upstream utilization, όσο εισάγεται περισσότερη κίνηση rtPS στο δίκτυο. Στην περίπτωση που στο σύστημα έχουν εισαχθεί τρεις (3) συνδέσεις rtPS το ποσοστό upstream utilization είναι 12% και αυξάνεται γραμμικά όσο εισάγονται περισσότερες ροές rtPS στο σύστημα μέχρι τις είκοσι μία (21) συνδέσεις rtPS, όπου το upstream utilization έχει φθάσει στο 62% και για τους δύο αλγορίθμους. Η εισαγωγή είκοσι τεσσάρων (24) ροών rtPS στο δίκτυο δεν οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση του upstream utilization, το οποίο παραμένει στο 62.5%, καθώς το σύστημα λειτουργεί πολύ κοντά στη χωρητικότητά του, όπως φαίνεται από το ποσοστό subframe utilization που προσεγγίζει το 98%. Αντίστοιχα το ποσοστό χωρητικότητας του καναλιού uplink που καταλαμβάνεται για την μετάδοση της πληροφορίας είναι 20% με την ύπαρξη τριών (3) συνδέσεων rtPS στο δίκτυο, ανεβαίνει γραμμικά με την εισαγωγή περισσοτέρων ροών στο σύστημα μέχρι το ποσοστό περίπου 90% για την περίπτωση των είκοσι μία (21) συνδέσεων rtPS. Η εισαγωγή επιπλέον τριών συνδέσεων στο δίκτυο, από τις είκοσι μία (21) στις είκοσι τέσσερις (24) οδηγεί το σύστημα σε υπερφόρτωση, όπως φαίνεται από το subframe utilization που φθάνει στο 98%.

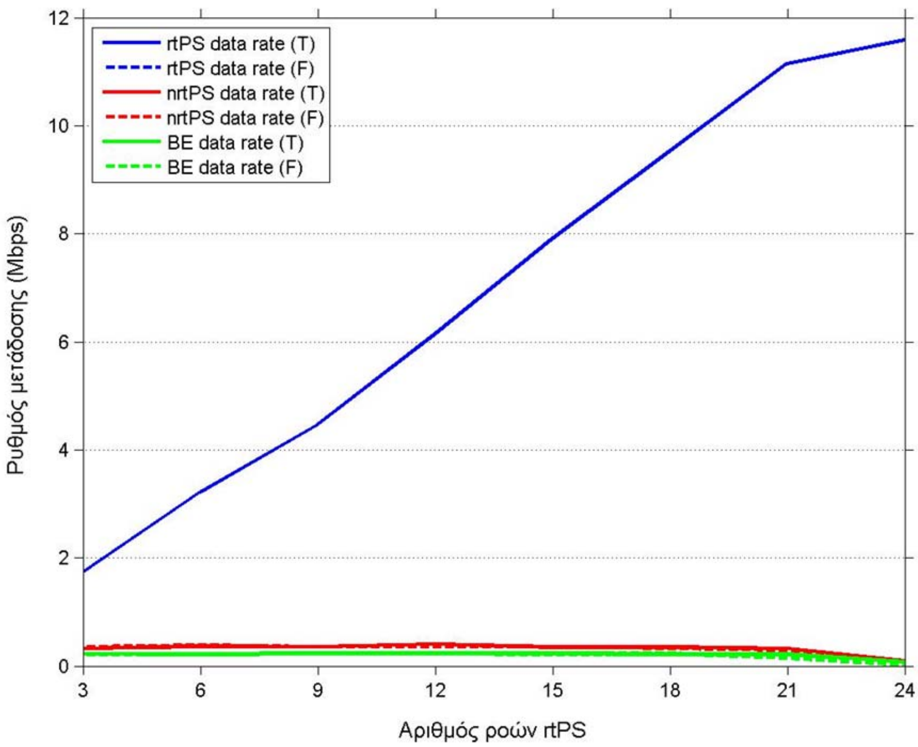
Στην περίπτωση των είκοσι μία (21) συνδέσεων rtPS παρατηρούμε ότι το ποσοστό subframe utilization είναι 94% για τον αλγόριθμο των Freitag/Fonseca και 88% για τον τροποποιημένο αλγόριθμο. Στην περίπτωση αυτή το δίκτυο λειτουργεί λίγο πριν την κατάσταση υψηλού φόρτου και η έγκαιρη τακτοποίηση των ροών rtPS που πρέπει να χρονοπρογραμματιστούν επιτρέπει την ύπαρξη λίγο περισσοτέρων άδειων χρονοθυρίδων, στην περίπτωση του τροποποιημένου αλγορίθμου, οι οποίες παραμένουν διαθέσιμες προς εκμετάλλευση. Με την εισαγωγή όμως είκοσι τεσσάρων (24) ροών rtPS στο σύστημα, αυτό οδηγείται σε κατάσταση υπερφόρτωσης, κάτι το οποίο φαίνεται από την τιμή 97-98% για το subframe utilization και για τους δύο αλγορίθμους.

Αντίστοιχη συμπεριφορά αναμένουμε και όσον αφορά τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων στο επίπεδο εφαρμογής και στο φυσικό επίπεδο που απεικονίζονται στο παρακάτω γράφημα. Οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων αυξάνονται γραμμικά με την εισαγωγή περισσοτέρων συνδέσεων rtPS στο δίκτυο μέχρι τις είκοσι μία (21) και μετά παραμένουν σταθεροί καθώς, όπως είδαμε παραπάνω, το σύστημα λειτουργεί πλέον σε κατάσταση υψηλού φόρτου. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στο επίπεδο εφαρμογής ξεκινά από περίπου 2.5 Mbps, προσεγγίζει τα 12 Mbps με την εισαγωγή είκοσι ενός (21) σταθμών στο δίκτυο και, παραμένει σταθερός, παρά την εισαγωγή επιπλέον τριών (3) ροών rtPS.



Εικόνα 42: Πείραμα 4 – Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων

Παρακάτω παρατίθενται και οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων στο επίπεδο εφαρμογής για τις κατηγορίες κίνησης rtPS, nrtPS και BE. Όπως είναι λογικό, οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, όπως αναφέραμε παραπάνω.

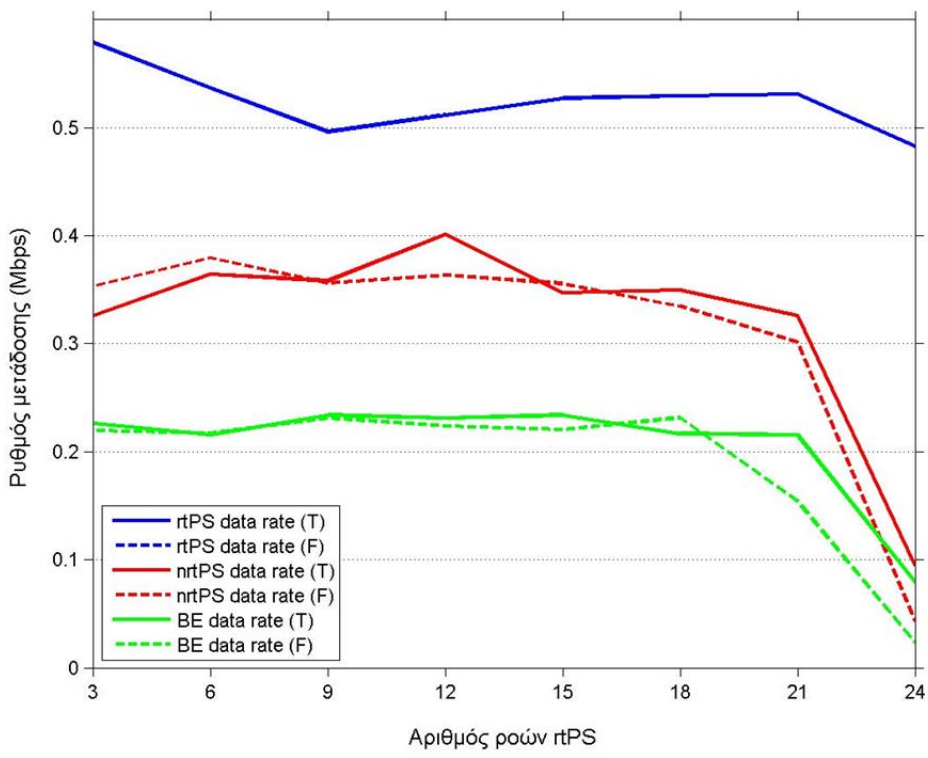


Εικόνα 43: Πείραμα 4 - Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ανά κατηγορία κίνησης

Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων των ροών rtPS αυξάνεται γραμμικά όσο εισάγεται κίνηση rtPS στο δίκτυο, με πτώση του ρυθμού αύξησης από τις είκοσι μία (21) ροές και μετά, καθώς το σύστημα φτάνει σε κατάσταση κοντά στη χωρητικότητά του.

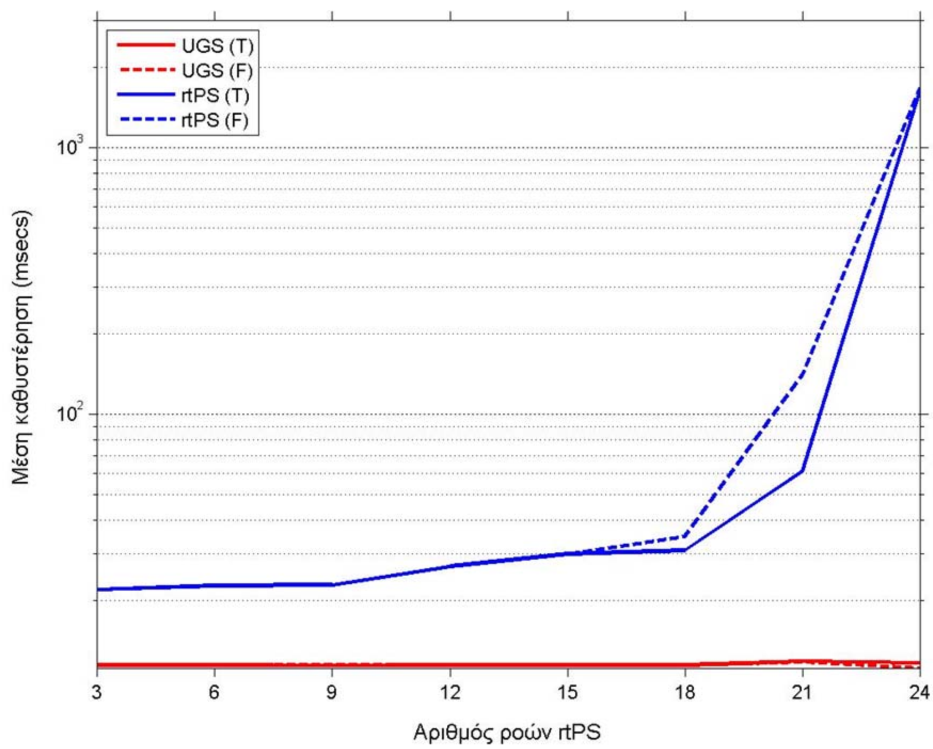
Για να παρατηρηθούν καλύτερα οι μέσοι ρυθμοί μετάδοσης ανά ροή υπηρεσίας, ανά κατηγορία κίνησης, παρατίθεται το επόμενο γράφημα στο οποίο φαίνεται ότι ο μέσος ρυθμός μετάδοσης των ροών rtPS παραμένει περίπου σταθερός όσο αυξάνεται ο αριθμός των ροών rtPS μέχρι τις είκοσι μία (21) και μετά αρχίζει να μειώνεται. Ο μέσος ρυθμός μετάδοσης των ροών nrtPS και BE παραμένει περίπου σταθερός μέχρι την εισαγωγή στο δίκτυο δεκαοκτώ (18) και πλέον σταθμών συνδρομητών με κίνηση rtPS, ενώ μετά, με περισσότερους σταθμούς συνδρομητών, αρχίζει να παρουσιάζει πτώση, η οποία γίνεται αισθητή στην περίπτωση εισαγωγής είκοσι τεσσάρων (24) ροών rtPS, κάτι που οφείλεται στη λειτουργία του δικτύου, πλέον, σε κατάσταση κοντά στη χωρητικότητά του.

Παρουσιάζει ενδιαφέρον ότι ακόμα και με είκοσι ένα (21) σταθμούς συνδρομητών με κίνηση rtPS ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού που υλοποιήθηκε καταφέρνει να διατηρεί σταθερό το μέσο ρυθμό μετάδοσης των ροών χαμηλότερης προτεραιότητας, παρά τον αυξανόμενο φόρτο στο δίκτυο, ενώ ο αλγόριθμος των Freitag/Fonseca παρουσιάζει σαφή πτώση του μέσου ρυθμού μετάδοσης για τις ροές χαμηλότερης προτεραιότητας (nrtPS και BE) μετά την εισαγωγή δεκαοκτώ (18) συνδέσεων rtPS στο σύστημα. Ο λόγος για το φαινόμενο αυτό είναι ότι ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού, πλέον, σε συνθήκες υψηλού φόρτου δικτύου, φροντίζει για την μετάδοση των ροών rtPS πριν δημιουργηθεί πρόβλημα, οπότε απελευθερώνονται χρονοθυρίδες και οι ροές χαμηλότερης προτεραιότητας δύνανται να στείλουν τις αιτήσεις τους για απόδοση εύρους ζώνης, χωρίς αυτές να υπόκεινται σε μεγάλο αριθμό συγκρούσεων.



Εικόνα 44: Πείραμα 4 - Μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ανά ροή υπηρεσίας ανά κατηγορία κίνησης

Το γράφημα που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην προσπάθειά μας να καταδείξουμε τη διαφορά στην απόδοση και συμπεριφορά των δύο αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού παρατίθεται παρακάτω και δείχνει τη δραματική άνοδο στη μέση καθυστέρηση πακέτων, σε συνθήκες υψηλού φόρτου δικτύου, που παρουσιάζει ο αλγόριθμος των Freitag/Fonseca, καθώς και την, πολύ σημαντική, επίπτωση που έχει στην απόδοση και τη συμπεριφορά των ροών rtPS η δυνατότητα του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού που υλοποιήθηκε να προσδίδει μεγαλύτερη προτεραιότητα στις ροές rtPS που έχουν παρουσιάσει αδυναμία να τηρήσουν τα όρια χρονοκαθυστέρησης που τους έχουν τεθεί. Εν τέλει, αυτό οδηγεί σε πολύ μικρότερο αριθμό πακέτων που ξεπερνούν τα όρια χρονοκαθυστέρησης που έχουν οριστεί, κάτι που, φυσικά, είναι πολύ σημαντικό δεδομένου ότι αναφερόμαστε σε κίνηση βίντεο με μικρές ανοχές στις καθυστερήσεις. Στο γράφημα παρατηρούμε επίσης ότι η καθυστέρηση πακέτων στις ροές UGS δεν επηρεάζεται από την εισαγωγή κίνησης rtPS στο δίκτυο, όπως αναμενόταν.



Εικόνα 45: Πείραμα 4 - Μέση καθυστέρηση πακέτων κίνησης UGS και rtPS

Αρχικά, είναι φανερό ότι μέχρι να εισάγουμε αρκετή κίνηση στο δίκτυο ούτως ώστε να παρατηρηθούν προβλήματα στην τήρηση των ορίων χρονοκαθυστέρησης από τις ροές rtPS (δηλαδή μέχρι την εισαγωγή δεκαέξι-δεκαεπτά σταθμών συνδρομητών με κίνηση rtPS) οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν αντίστοιχη συμπεριφορά. Από τη στιγμή που το δίκτυο λειτουργεί σε συνθήκες σχετικά υψηλού φόρτου (άνω των δεκαοκτώ (18) σταθμών συνδρομητών με κίνηση rtPS) παρατηρούμε τα εξής:

- Στον αλγόριθμο των Freitag/Fonseca παρατηρείται ραγδαία αύξηση τόσο στη μέση καθυστέρηση των πακέτων των ροών rtPS όσο και, όπως συνεπάγεται, στο ποσοστό των πακέτων που ξεπερνούν το όριο χρονοκαθυστέρησης των 100 ms, που έχει οριστεί.
    - Στην περίπτωση που υπάρχουν δεκαοκτώ (18) σταθμοί συνδρομητών με κίνηση rtPS στο δίκτυο, η μέση καθυστέρηση των πακέτων rtPS ανέρχεται στα 35 ms, με την εισαγωγή είκοσι ενός (21) σταθμών συνδρομητών στο δίκτυο η μέση τιμή της καθυστέρησης ανεβαίνει στα 140 ms, τιμή που βρίσκεται 40% πάνω από το όριο χρονοκαθυστέρησης των 100 ms που οφείλουν να τηρήσουν οι ροές rtPS, ενώ στην περίπτωση που εισαχθούν είκοσι τέσσερις (24) συνδέσεις rtPS στο σύστημα η μέση καθυστέρηση των πακέτων rtPS εκτοξεύεται στα 1670 ms, τιμή που είναι δεκαέξι φορές πάνω από το όριο των 100 ms.
    - Όσον αφορά το ποσοστό των πακέτων που υπερβαίνουν το όριο χρονοκαθυστέρησης των 100 ms, αυτό διατηρείται στο επίπεδο του 2% έως την εισαγωγή δέκα οκτώ (18) σταθμών συνδρομητών με κίνηση rtPS στο δίκτυο, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 46 παρακάτω. Στη συνέχεια, όμως, ανεβαίνει στην τιμή του 14.9% με την εισαγωγή είκοσι (20) σταθμών συνδρομητών και προσεγγίζει το 50% στην περίπτωση των είκοσι ενός (21) σταθμών συνδρομητών με κίνηση rtPS, κάτι το οποίο σημαίνει ότι, χονδρικά, ένα στα δύο πακέτα rtPS ξεπερνάει το όριο χρονοκαθυστέρησης που έχει οριστεί. Τέλος, εισάγοντας είκοσι τέσσερις (24) ροές rtPS στο δίκτυο το 82% των πακέτων ξεπερνούν το όριο των 100 ms, δηλαδή μόλις ένα στα πέντε πακέτα φθάνει στο επίπεδο MAC του σταθμού βάσης σε λιγότερο από 100 ms από τη στιγμή που το πακέτο «γεννήθηκε» στο σταθμό συνδρομητή.

- Ακόμη πιο σημαντικό είναι ότι ακόμη και αν δεχθούμε ως ανεκτή μία υπέρβαση κατά 10% του ορίου καθυστέρησης των 100 ms, το 110% του ορίου αυτού ξεπερνούν το 1.9% των πακέτων για την περίπτωση όπου έχουμε εισάγει δέκα οκτώ (18) σταθμούς συνδρομητών με κίνηση rtPS στο δίκτυο, το 13% των πακέτων με την εισαγωγή (είκοσι) 20 σταθμών συνδρομητών στο δίκτυο, το 45% των πακέτων στην περίπτωση όπου υπάρχουν είκοσι μία (21) ροές rtPS στο σύστημα ενώ, στην περίπτωση εισαγωγής είκοσι τεσσάρων ροών (24) rtPS στο δίκτυο το ποσοστό των πακέτων που ξεπερνούν τα 110 ms από τη στιγμή που φεύγουν από τον agent μέχρι την παράδοσή τους στο επίπεδο MAC του σταθμού βάσης είναι 80%.

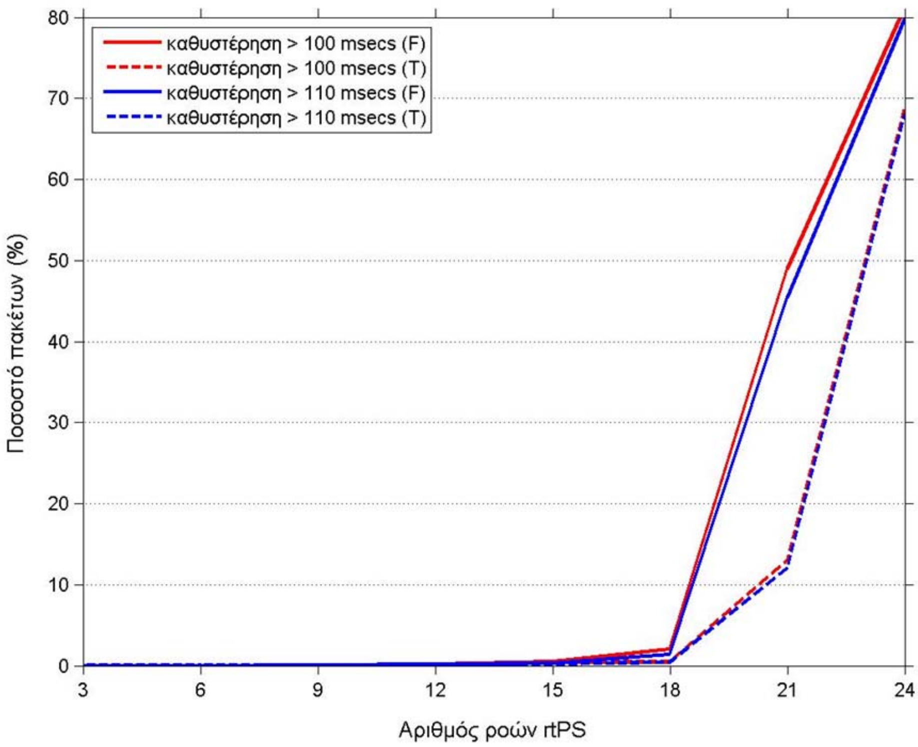
- Αντιθέτως, ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού που έχουμε υλοποιήσει καταφέρνει να διατηρήσει τις ανωτέρω μετρικές πολύ χαμηλότερα, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχει άνοδος στη μέση καθυστέρηση ή στο ποσοστό των πακέτων που ξεπερνούν το όριο χρονοκαθυστέρησης. Κάτι τέτοιο, άλλωστε, θα ήταν δυνατό είτε με την εισαγωγή υπερβολικά πολύπλοκων αλγορίθμων (και πάλι, μόνο για τις περιπτώσεις όπου τα δίκτυα δεν βρίσκονται στο όριο της χωρητικότητάς τους) είτε με την εφαρμογή ενός μηχανισμού αποδοχής ή απόρριψης νέων συνδέσεων (Call Admision Control – CAC) που θα δέχεται ή θα απορρίπτει αιτήματα για την εισαγωγή νέων ροών στο δίκτυο ανάλογα με την κατάστασή του και αν θα είναι δυνατόν ή όχι να ικανοποιήσει τις παραμέτρους παροχής εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας των ροών αυτών, προφυλάσσοντας έτσι τις ήδη υπάρχουσες, εγγεγραμμένες στο δίκτυο, συνδέσεις από την εισαγωγή νέων συνδέσεων και την υποβάθμιση της ποιότητας παρεχόμενης υπηρεσίας.
  - Όσον αφορά την τιμή της μέσης καθυστέρησης πακέτων rtPS ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού που υλοποιήθηκε καταφέρνει να διατηρήσει μία τιμή μέσης καθυστέρησης πακέτων της τάξης των 30 ms για την περίπτωση που υπάρχουν δέκα οκτώ (18) ροές rtPS στο δίκτυο, των 61 ms στην περίπτωση της ύπαρξης είκοσι μίας (21) ροών rtPS στο δίκτυο (λιγότερη από την μισή τιμή της μέσης καθυστέρησης πακέτου των 140 ms που παρουσιάζει ο

αλγόριθμος των Freitag/Fonseca και, ακόμη σημαντικότερα, πολύ κάτω του ορίου των 100 ms) και στην περίπτωση που το σύστημα φθάσει σε κατάσταση υπερφόρτωσης με την εισαγωγή είκοσι τεσσάρων (24) ροών rtPS η μέση καθυστέρηση πακέτων ανέρχεται στα 1613 ms, καθώς πλέον ο αλγόριθμος αδυνατεί να ικανοποιήσει τις υπερβολικά πολλές ροές rtPS που έχουν εισαχθεί στο δίκτυο.

- Με την εισαγωγή δεκαοκτώ (18) σταθμών συνδρομητών με κίνηση rtPS στο σύστημα ο αλγόριθμος εμφανίζει μόλις το 0.36% των πακέτων rtPS να υπερβαίνουν το όριο χρονοκαθυστέρησης των 100 ms (2% η επίδοση του άλλου αλγορίθμου). Στην περίπτωση των είκοσι ενός (21) σταθμών συνδρομητών με κίνηση rtPS στο δίκτυο το ποσοστό ανεβαίνει στο 13% (σχεδόν το ένα τέταρτο της τιμής 50% που παρουσιάζει ο αλγόριθμος των Freitag/Fonseca). Τέλος, με την εισαγωγή είκοσι τεσσάρων (24) σταθμών συνδρομητών με κίνηση rtPS στο σύστημα το ποσοστό των πακέτων rtPS που υπερβαίνουν το όριο των 100 ms είναι 68% (σε αντίθεση με την τιμή 82% που εμφανίζει ο αλγόριθμος των Freitag/Fonseca). Η σημαντικότερη διαφορά εντοπίζεται στην περίπτωση των είκοσι μία (21) ροών rtPS καθώς η μείωση είναι από το περίπου 50% στο 13%, κάτι που σημαίνει ότι ενώ στη μία περίπτωση η μετάδοση βίντεο θα ήταν μη ανεκτή για τον τελικό χρήστη, στη δεύτερη θα είναι, μέσα σε κάποια πλαίσια, ανεκτή.
- Τέλος, δεχόμενοι ως ανεκτή μία υπέρβαση κατά 10% του ορίου χρονοκαθυστέρησης, το 110% των 100 ms ξεπερνούν το 0.38%, 12% και 67% των πακέτων (για τις περιπτώσεις που έχουμε εισάγει δέκα οκτώ (18), είκοσι ένα (21) και είκοσι τέσσερις (24) σταθμούς συνδρομητών στο δίκτυο αντίστοιχα).

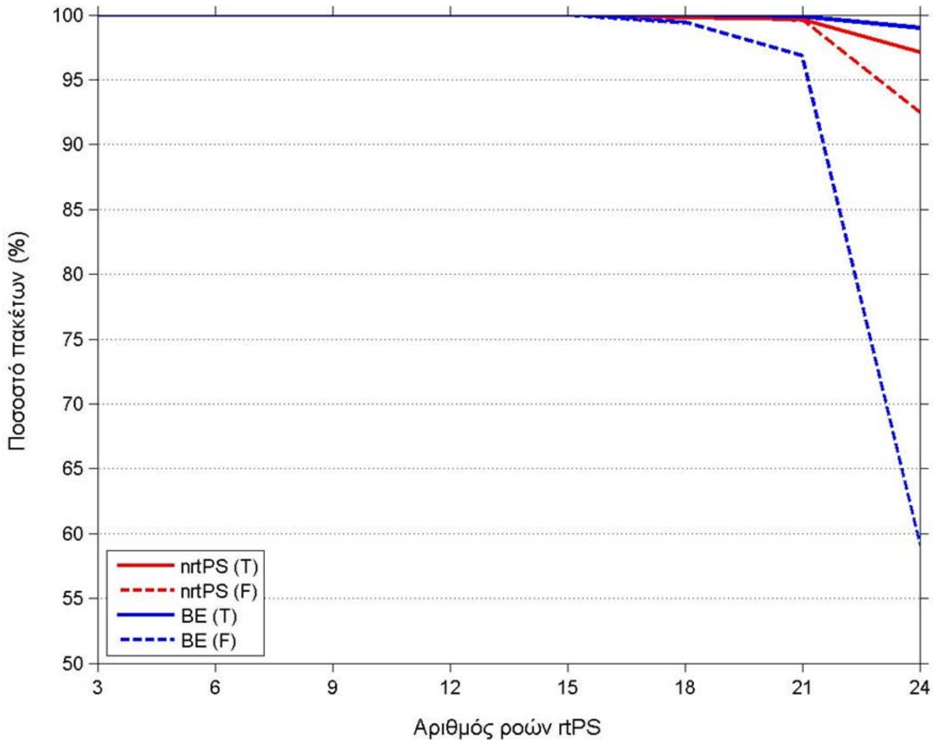
Είναι φανερό ότι στην περίπτωση που στο σύστημα εισάγονται είκοσι μία (21) συνδέσεις rtPS, και πριν αυτό έρθει σε κατάσταση υπερφόρτωσης, ο αλγόριθμος που προτείνουμε αποδίδει αισθητά χαμηλότερη μέση καθυστέρηση πακέτων rtPS καθώς και πολύ μικρότερο ποσοστό πακέτων που ξεπερνούν το όριο χρονοκαθυστέρησης, όπως αυτό έχει οριστεί στα 100 ms. Εισάγοντας ακόμη περισσότερους σταθμούς συνδρομητών με κίνηση rtPS στο σύστημα, αυτό φθάνει πολύ κοντά στην χωρητικότητά του, με συνέπεια οι ροές rtPS να μην μπορούν να τηρήσουν τα όρια που οφείλουν όσον αφορά την καθυστέρηση, κάτι που πρέπει να αντιμετωπιστεί μέσω ενός μηχανισμού αποδοχής ή απόρριψης των αιτήσεων για εισαγωγή νέων συνδέσεων, καθώς και οι δύο αλγόριθμοι αδυνατούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες των συνδέσεων που έχουμε εισάγει.

Παρακάτω παρατίθεται το γράφημα που απεικονίζει τα ποσοστά των πακέτων που υπερβαίνουν το όριο των 100 ms και το 110% του ορίου αυτού για τους δύο αλγορίθμους. Είναι φανερή η μεγάλη διαφορά στην απόδοση των δύο αλγορίθμων για την περίπτωση των είκοσι ενός (21) ροών rtPS.



Εικόνα 46: Πείραμα 4 - Ποσοστό πακέτων που υπερβαίνουν το όριο καθυστέρησης

Τέλος παραθέτουμε το γράφημα που απεικονίζει το ποσοστό των πακέτων των ροών nrtPS και BE που εξυπηρετούνται. Διακρίνουμε ότι μετά την εισαγωγή είκοσι ενός (21) και πλέον σταθμών συνδρομητών στο δίκτυο το ποσοστό των πακέτων των ροών χαμηλότερης προτεραιότητας που εξυπηρετούνται αρχίζει να παρουσιάζει πτώση (για την περίπτωση των Freitag/Fonseca το ποσοστό των πακέτων BE που εξυπηρετείται πέφτει από το 97% για την περίπτωση των είκοσι ενός (21) ροών στο 60% για την περίπτωση των είκοσι τεσσάρων (24) ροών), πτώση η οποία είναι σαφώς μικρότερη στον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού που προτείνεται.



Εικόνα 47: Πείραμα 4 - Ποσοστό εξυπηρετούμενων πακέτων BE και nrtPS

Κεφάλαιο 6: Επίλογος

6.1 Συνεισφορά της εργασίας

Στην διπλωματική αυτή εργασία, μελετήθηκαν οι προσεγγίσεις ερευνητών για τη σχεδίαση αποδοτικών αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού, συμβατών με το πρότυπο IEEE 802.16, και κατόπιν, βάσει της έρευνας των J. Freitag και N. Fonseca [**2**], σχεδιάστηκε ένας αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού που, αναλόγως με την κατάσταση του δικτύου και τη συμπεριφορά των ροών rtPS, δίνει μεγαλύτερη προτεραιότητα σε εκείνες τις ροές rtPS για τις οποίες παρατηρείται ότι παρουσιάζουν πρόβλημα στο να τηρούν το όριο χρονοκαθυστέρησης. Ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε στο λογισμικό ns-2 χρησιμοποιώντας το WiMAX module των Freitag/Fonseca. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για την εξαγωγή αποτελεσμάτων για διαφορετικά σενάρια κίνησης για τους δύο αλγορίθμους, τον προτεινόμενο και τον αρχικό. Εξήχθησαν αποτελέσματα για τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων στο δίκτυο (συνολικός ρυθμός μετάδοσης, ρυθμός ανά κατηγορία κίνησης, μέσος ρυθμός ανά ροή κίνησης), για την καθυστέρηση (μέση καθυστέρηση πακέτων ανά κατηγορία κίνησης, ποσοστό rtPS πακέτων που ξεπερνούν το όριο καθυστέρησής τους) και για το throughput της κίνησης χαμηλής προτεραιότητας. Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις παραπάνω μετρικές έγινε η αξιολόγηση του αλγορίθμου και η σύγκριση της απόδοσής του με τον αρχικό.

6.2 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο 5 παραθέσαμε τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που δείχνουν τη βελτίωση που επιτυγχάνει ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού, ο οποίος εισάγει ένα νέο «παράθυρο ελέγχου» μέσα στο οποίο γίνεται ο έλεγχος, σε κάθε πλαίσιο, εάν λήγει το όριο καθυστέρησης μιας ροής rtPS, που έχει προηγουμένως διαπιστωθεί ότι δυσκολεύεται να τηρήσει το όριο καθυστέρησης.

Εφόσον συμβαίνει αυτό, τότε στη συγκεκριμένη ροή rtPS δίνεται προτεραιότητα έναντι των υπολοίπων, επιδιώκοντας την μετάβασή της άμεσα στην ουρά υψηλής προτεραιότητας και απόδοσης σε αυτή του απαιτούμενου εύρους ζώνης.

Το παράθυρο ελέγχου είναι εξατομικευμένο για κάθε ροή rtPS και έχει τη δυνατότητα να «ανοιγοκλείνει» δυναμικά ανάλογα με τη συμπεριφορά της ροής. Όσο αυτή παρουσιάζει πρόβλημα να τηρεί τα όρια χρονοκαθυστέρησης που έχουν οριστεί, τόσο το παράθυρο ανοίγει, συμπεριλαμβάνοντας περισσότερα μελλοντικά πλαίσια, ενώ, αντίστοιχα, όταν η ροή επιστρέψει σε κανονική κατάσταση, και αυτό διατηρηθεί για κάποιο χρονικό διάστημα, τότε το παράθυρο «κλείνει» σταδιακά.

Μέσω των προσομοιώσεων και των γραφημάτων αποδεικνύεται ότι ο αλγόριθμος παρουσιάζει σαφή βελτίωση σε σχέση με τον αλγόριθμο στο [**2**], ιδιαίτερα στις μετρικές της μέσης καθυστέρησης πακέτων για τις ροές rtPS, όταν το δίκτυο λειτουργεί κάτω από υψηλό φόρτο, όσο και στο ποσοστό των πακέτων που ξεπερνούν τα όρια χρονοκαθυστέρησης. Ταυτόχρονα, μέσω του έγκαιρου χρονοπρογραμματισμού των ροών rtPS απελευθερώνονται χρονοθυρίδες, τις οποίες εκμεταλλεύονται οι ροές χαμηλότερης προτεραιότητας (nrtPS και BE) για να αποστείλουν τις αιτήσεις απόδοσης εύρους ζώνης, οι οποίες μπορούν να ικανοποιηθούν συχνότερα, λόγω ύπαρξης λιγότερων συγκρούσεων. Έτσι παρατηρείται και μία διατήρηση υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης για τις ροές χαμηλότερης προτεραιότητας, καθώς εισάγεται όλο και περισσότερη κίνηση στο δίκτυο.

6.3 Μελλοντικές Προεκτάσεις

Κατά την προσομοίωση του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού έγιναν διάφορες παραδοχές και απλοποιήσεις, μία κύρια εκ των οποίων είναι η ύπαρξη ιδανικού φυσικού επιπέδου. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση που το φυσικό επίπεδο δεν ήταν ιδανικό, θα παρατηρούσαμε σαφώς μικρότερο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης όσο και μεγαλύτερες καθυστερήσεις. Λαμβάνοντας υπόψη ένα μη-ιδανικό φυσικό επίπεδο ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού θα έπρεπε να σχεδιαστεί ενσωματώνοντας τεχνικές όπως αυτή της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης με σκοπό την αποδοτικότερη χρήση του καναλιού. Για παράδειγμα, η τιμή προτεραιότητας της κάθε σύνδεσης θα μπορούσε να είναι συνάρτηση της ποιότητας της υπηρεσίας καθώς και της κατάστασης του καναλιού.

Επίσης, θα είχε ενδιαφέρον η υλοποίηση ενός module Call Admission Control, το οποίο θα λάμβανε αιτήσεις για εγγραφή στο δίκτυο νέων συνδέσεων, και το οποίο θα εξέταζε, μέσω των παραμέτρων QoS των συνδέσεων αυτών τη δυνατότητα του δικτύου να τις εξυπηρετήσει και αναλόγως θα αποφάσιζε για την αποδοχή ή απόρριψη αυτών των συνδέσεων. Κάτι ανάλογο, σε αρκετά πρώιμο στάδιο έχει ήδη προταθεί στο [**6**].

Εικόνες

Παράρτημα

Π.1 Ψευδοκώδικας αλγορίθμου

Ακολουθεί η περιγραφή των πέντε (5) βημάτων του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού που περιγράφηκε στην ενότητα 4.4 με τη μορφή ψευδοκώδικα.

1. Εισαγωγή στην ουρά υψηλής προτεραιότητας, των περιοδικών grants και των grants για unicast polling που πρέπει να προγραμματιστούν στο τρέχον πλαίσιο
2. CheckDeadline()
3. Check_min_bw()
4. Χρονοπρογραμματισμός των αιτήσεων που βρίσκονται στην ουρά υψηλής προτεραιότητας, ξεκινώντας από την αρχή της ουράς
5. Σε περίπτωση που η ουρά μέσης προτεραιότητας είναι άδεια και υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης τότε προχωράμε στο χρονοπρογραμματισμό των αιτήσεων που βρίσκονται στην ουρά χαμηλής προτεραιότητας, ξεκινώντας από την αρχή της ουράς

Οι διαδικασίες Checkdeadline() και Check_min_bw() που αναφέρονται στα βήματα 2 και 3 παραπάνω περιγράφονται ακολούθως.

Διαδικασία **Checkdeadline**() // *η διαδικασία Checkdeadline ελέγχει ποιες από τις αιτήσεις rtPS που βρίσκονται στην ουρά μέσης προτεραιότητας πρέπει να μετακινηθούν στην ουρά υψηλής προτεραιότητας*

```
For (κάθε αίτηση i που βρίσκεται στην ουρά μέσης προτεραιότητας)
    If (service[i] == rtPS)    //αν η ροή είναι τύπου rtPS
        Checkframe[i] = floor((deadline[i] – curr_time) / frame_duration);
                // υπολογίζουμε πότε λήγει το deadline
```

```
        If (checkframe[i] <= 3 + δ[CID_i])  //αν λήγει μέσα στα επόμενα 2 + δ πλαίσια
            If (number_of_avail_slots > 0)  //αν υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης
                If (number_of_avail_slots < req_slots[i]) // εάν δεν επαρκεί
                    δ[CID_i] += 1;   // αύξηση δ κατά 1
                Else // εάν το διαθέσιμο εύρος ζώνης επαρκεί
                    If (counter_to_decrease_delta[CID_i] < 3)
                // εάν δεν έχει πραγματοποιήσει 3 συνεχόμενες αναβαθμίσεις
                        Counter_to_decrease_delta[CID_i] += 1;
                    Else // εάν έχει πραγματοποιήσει 3 αναβαθμίσεις στη σειρά
                        δ[CID_i] -= 1; // μείωση δ κατά 1
                        Counter_to_decrease_delta[CID_i] = 0;
                            // μηδενισμός μεταβλητής
                    InsertJob(i, high_queue) ;
                // αναβάθμιση αίτησης στην ουρά υψηλής προτεραιότητας
                    Granted_bw[CID_i] += req_slots[i];
                    Backlogged_bw[CID_i] -= req_slots[i];
                    Number_of_avail_slots -= req_slots[i];
                // ενημέρωση μεταβλητών
        Else // εάν number_of_available_slots == 0
                δ[CID_i] += 3;// αύξηση δέλτα κατά 3, χειρότερη περίπτωση από πριν
```

Διαδικασία **Check_min_bw**() *// η διαδικασία Check_min_bw ταξινομεί τις εναπομένουσες στην ουρά μέσης προτεραιότητας αιτήσεις (είτε από ροές rtPS είτε nrtPS) βάσει προτεραιότητας και μετακινεί τις ταξινομημένες αιτήσεις στην ουρά υψηλής προτεραιότητας προς εξυπηρέτηση όσο υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης*

```
For (κάθε αίτηση i που βρίσκεται στην ουρά μέσης προτεραιότητας)
        // αναφέρεται σε όλες τις αιτήσεις, είτε από ροές rtPS είτε nrtPS
    If (bw_min[CID_i] <= granted_bw[CID_i])
            // αν έχει λάβει ήδη το ελάχιστο εγγυημένο εύρος ζώνης
            Priority[i] = 0;   // παίρνει την ελάχιστη προτεραιότητα
    Else // αν έχει λάβει λιγότερο από το ελάχιστο εγγυημένο εύρος ζώνης
            Priority[i] =backlogged[CID_i]–(granted_bw[CID_i]–bw_min[CID_i]);
```

// υπολογισμός της τιμής προτεραιότητας

6. Sort(intermediate_queue);

// ταξινόμηση της ουράς μέσης προτεραιότητας βάσει των τιμών προτεραιότητας που υπολογίστηκαν παραπάνω

7. For (κάθε αίτηση i που βρίσκεται στην ουρά μέσης προτεραιότητας)

8. If (number_of_avail_slots >= req_slots[i]) // *εάν επαρκούν τα slots*

9. insertJob(i, high_queue); // *μετάβαση στην ουρά υψηλής προτερ.*

10. Granted_bw[CID_i] += req_slots[i];

11. Backlogged_bw[CID_i] -= req_slots[i];

12. Number_of_avail_slots -= req_slots[i]; // *ενημέρωση μεταβλητών*

Επεξήγηση μεταβλητών

Service[i]	Επιστρέφει τον τύπο ροής (UGS, rtPS, nrtPS, BE) που έστειλε την αίτηση i
CID_i	Η ταυτότητα της ροής που έστειλε την αίτηση i
Checkframe[i]	Σε πόσα πλαίσια λήγει το deadline για την αίτηση i
Number_of_avail_slots	Το διαθέσιμο εύρος ζώνης στο υποπλαίσιο uplink (σε slots)
Req_slots[i]	Το εύρος ζώνης που αιτείται η αίτηση i (σε slots)
δ[CID_i]	Η τιμή του δέλτα για τη ροή CID_i
Granted_bw[CID_i]	Το εύρος ζώνης που έχει αποδοθεί στη ροή CID_i στο τρέχον παράθυρο T (σε slots)
Backlogged_bw[CID_i]	Το backlog δεδομένων της ροής CID_i (σε slots)
Counter_to_decrease_delta[CID_i]	Μετρά τον αριθμό των συνεχόμενων αναβαθμίσεων των αιτήσεων της ροής CID_i ουρά υψηλής προτεραιότητας
Bw_min[CID_i]	Ελάχιστο εγγυημένο εύρος ζώνης για τη ροή CID_i στο τρέχον παράθυρο T (σε slots)
Priority[i]	Τιμή προτεραιότητας για την αίτηση i

Βιβλιογραφία

[1] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std 802.16-2004, 2004.

[2] J. Freitag and N. L. S. da Fonseca, "Uplink Scheduling with Quality of Service in IEEE 802.16 Networks," in *Proceedings of the IEEE Global Teleommunications Conference*, Washington, DC, Nov. 2007, pp. 2503 - 2508.

[3] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std 802.16-2009, 2009.

[4] Y. Y. Şekercioğlu, M. Ivanovich, and A. Yeğin, "A survey of MAC based QoS implementations for WiMAX networks," *Computer Networks*, vol. 53, no. 14, pp. 2517-2536, Sept. 2009.

[5] H. Fattah and C. Leung, "An overview of scheduling algorithms in wireless multimedia networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 9, no. 5, pp. 76-83, Oct. 2002.

[6] K. Wongthavarawat and A. Ganz, "IEEE 802.16 based last mile broadband wireless military networks with quality of service support," in *Proceedings of the IEEE Military Communications Conference*, vol. 2, Boston, USA, Oct. 2003, pp. 779-784.

[7] D. Tarchi, R. Fantacci, and M. Bardazzi, "Quality of Service Management in IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, vol. 4, Istanbul, Dec. 2006, pp. 1789 - 1794.

[8] C. Cicconetti, L. Lenzini, E. Mingozzi, and C. Eklund, "Quality of Service support in IEEE 802.16 networks," *IEEE Network*, vol. 20, no. 2, pp. 50-55,

Mar.-Apr. 2006.

[9] D. Stiliadis and A. Varma, "Latency-Rate Servers: A General Model for Analysis of Traffic Scheduling Algorithms," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, no. 5, pp. 611-624, Oct. 1998.

[10] Y. Shang and S. Cheng, "An enhanced packet scheduling algorithm for QoS support in IEEE 802.16 wireless network," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Networking and Mobile Computing*, Zhangjiajie, China, Aug. 2005, pp. 652-661.

[11] L. Chan, H. Chao, and Z. Chou, "Two-tier scheduling algorithm for uplink transmissions in IEEE 802.16 broadband wireless access systems," in *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Wuhan, China, Sept. 2006, pp. 1-4.

[12] H. Safa, H. Artail, M. Karam, R. Soudah, and S. Khayat, "New scheduling architecture for IEEE 802.16 wireless metropolitan area network," in *Proceedings of the IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications*, Amman, Jordan, May 2007, pp. 203-210.

[13] J. Chen, W. Jiao, and H. Wang, "An integrated QoS control architecture for IEEE 802.16 broadband wireless access systems," in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*, vol. 6, St. Louis, USA, Nov. 2005, pp. 3330-3335.

[14] M. Settembre et al., "Performance Analysis of an Efficient Packet-Based IEEE 802.16 MAC Supporting Adaptive Modulation and Coding," in *Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Computer Networks*, Istanbul, June 2006, pp. 11-16.

[15] A. Sayenko, O. Alanen, and T. Hämäläinen, "Scheduling Solution for the IEEE 802.16 Base Station," *Computer Networks*, vol. 52, no. 1, pp. 96-115, Jan. 2008.

[16] Computer Networks Laboratory, Institute of Computing, UNICAMP. (2011,

June) WiMAX module for the ns-2 simulator. [Online].
http://www.lrc.ic.unicamp.br/wimax_ns2/

[17] J. Freitag and N. L. S. da Fonseca, "WiMaX Module for the NS-2 Simulator," in *Proceedings of the IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Athens, Greece, Sept. 2007, pp. 1-6.

[18] P. Brady, "A model for generating On-Off speech patters in Two-Way conversations," *Bell System Technical Journal*, vol. 48, no. 7, pp. 2445-2472, Sept. 1969.

[19] P. Seeling, M. Reisslein, and B. Kulapala, "Network Performance Evaluation Using Frame Size and Quality Traces of Single-Layer and Two-Layer Video: A Tutorial," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 6, no. 3, pp. 58-78, 2004.

[20] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands, IEEE Std 802.16e-2005, 2005.

[21] B. Stroustrup, *The C++ Programming Language*, 3rd ed. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 2000.

[22] (2011, June) The Network Simulator ns-2. [Online].
http://www.isi.edu/nsnam/ns/

[23] K. V. Cardoso and J. F. de Rezende, "HTTP Traffic Modeling: Development and Application," in *Proceedings of the 2002 International Telecommunications Symposium*, Natal, Brasil, 2002.