Π Α Ν Ε Π Ι Σ Τ Η Μ Ι Ο Π Α Τ Ρ Ω Ν
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής

Δ Ι Δ Α Κ Τ Ο Ρ Ι Κ Η Δ Ι Α Τ Ρ Ι Β Η

«Πρωτοκολλα Πραγματικου Χρονου για τη Μεταδοση Πληροφοριας Πολυμεσων με Δυνατοτητα Προσαρμογης σε Δικτυα μη Εγγυημενης Ποιοτητας»

Γεωργιος Α. Κιουμουρτζης
Α.Μ.: 535

Πατρα 2010

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΠΟΛΥΜΕΣΩΝ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΜΗ ΕΓΓΥΗΜΕΝΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ»

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Γεώργιος Αλεξίου, Καθηγητής

Κων/νος Μπερμπερίδης, Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Γεώργιος Αλεξίου, Καθηγητής

Εμμανουήλ Βαρβαρίγος, Καθηγητής

Κυριάκος Βλάχος, Επίκουρος Καθηγητής

Ιωάννης Γαροφαλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Κων/νος Μπερμπερίδης, Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

Παύλος Σπυράκης, Καθηγητής

Στην Οικογένειά μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι εφαρμογές πολυμέσων έχουν αποκτήσει τα τελευταία χρόνια μία αυξανόμενη ζήτηση από τους χρήστες γενικά του Διαδικτύου καθώς προσφέρουν νέες και ποικιλόμορφες δυνατότητες ανταλλαγής πληροφοριών εικόνας και ήχου. Όμως οι εφαρμογές αυτές υπόκεινται σε περιορισμούς που έχουν να κάνουν κυρίως με τη φύση τους και χαρακτηρίζονται από τις υψηλές απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (bandwidth-consuming applications) και την ευαισθησία τους στις καθυστερήσεις που παρουσιάζονται κατά τη μετάδοση των πακέτων από τον αποστολέα στο παραλήπτη (delay-sensitive applications). Από την άλλη μεριά οι εφαρμογές αυτές φέρεται ότι είναι λιγότερο ευαίσθητες στις απώλειες των πακέτων (packet-loss tolerant applications). Το ζητούμενο όμως με τις εφαρμογές πολυμέσων, πέρα από το εύρος των υπηρεσιών τις οποίες προσφέρουν, είναι και η παρεχόμενη ποιότητα των υπηρεσιών (Quality of Service, QOS) στο τελικό χρήστη. Η ποιότητα αυτή των υπηρεσιών συνδέεται άμεσα με τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά των εφαρμογών πολυμέσων.

Η μέχρι τώρα προσέγγιση από την ερευνητική κοινότητα αλλά και τις εταιρείες παροχής υπηρεσιών Διαδικτύου (Internet Service Providers), σε ότι αφορά την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσιών, έχει εστιασθεί είτε στην επιμέρους βελτιστοποίηση της απόδοσης των πρωτοκόλλων μετάδοσης, είτε στην εγκατάσταση επιπλέον εξοπλισμού για τη δημιουργία δικτύων διανομής πολυμέσων (Content Distribution Networks, CDNs) που τοποθετούνται συνήθως κοντά στον τελικό χρήστη. Επιπρόσθετα η αυξανόμενη προσπάθεια της ερευνητικής κοινότητας με σκοπό την αύξηση της ποιότητας υπηρεσιών προσέφερε νέες καινοτόμες λύσεις με την μορφή των υπηρεσιών-αρχιτεκτονικών όπως οι Ολοκληρωμένες Υπηρεσίες (Integrated services, Intserv) και οι Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες (Differentiated Services, Diffserv) οι οποίες φιλοδοξούν να προσφέρουν εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσιών σε συγκεκριμένες ομάδες χρηστών. Όμως και οι δύο αυτές αρχιτεκτονικές δεν κατάφεραν μέχρι τώρα να αποτελέσουν μια ολοκληρωμένη λύση για τη παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσιών στο χρήστη λόγω των μεγάλων δυσκολιών στην εφαρμογή τους που έχουν να κάνουν τόσο με χρηματοοικονομικά κριτήρια όσο και με τη ίδια τη δομή του Διαδικτύου.

Έτσι βλέπουμε ότι παρόλη τη πρόοδο που έχει γίνει μέχρι σήμερα στη τεχνολογία των δικτύων η παροχή ποιότητας υπηρεσίας στο Διαδίκτυο από άκρο σε άκρο δεν είναι ακόμη στις μέρες μας εφικτή με αποτέλεσμα οι υπηρεσίες μετάδοσης πολυμέσων στο Διαδίκτυο – π.χ "youtube" – να επηρεάζονται σημαντικά από τις όποιες μεταβολές στη κατάσταση του δικτύου.

Προς το σκοπό αυτό η ερευνητική κοινότητα έχει στραφεί στη μελέτη μηχανισμών οι οποίοι θα είναι να θέση να προσαρμόζουν το ρυθμό μετάδοσης της πολυμεσικής πληροφορίας, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες του δικτύου, έτσι ώστε να προσφέρουν τη μέγιστη δυνατή ποιότητα υπηρεσίας στο τελικό χρήστη. Η προσπάθεια αυτή μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το τρόπο δρομολόγησης της πολυμεσικής πληροφορίας, όπως παρακάτω:

- Μηχανισμοί προσαρμογής για unicast μετάδοση: Σε αυτή τη περίπτωση οι μηχανισμοί προσαρμογής προσαρμόζουν το ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας από ένα σημείο (αποστολέας) προς ένα σημείο (παραλήπτης).

- Μηχανισμοί προσαρμογής εκπομπής πολλαπλής διανομής (multicast): Στη περίπτωση αυτή οι μηχανισμοί προσαρμογής προσαρμόζουν το ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας που λαμβάνει χώρα από ένα σημείο (αποστολέας) προς πολλά σημεία (παραλήπτες).

Σε ότι αφορά τη unicast μετάδοση την επικρατέστερη πρόταση αποτελεί ο μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης με την ονομασία TCP Friendly Rate Control (TFRC) που έχει γίνει αποδεκτός ως διεθνές πρότυπο από τη Internet Engineering Task Force (IETF). Στη περιοχή της multicast εκπομπής ο μηχανισμός TCP-friendly Multicast Congestion Control (TFMCC) έχει γίνει επίσης αποδεκτός ως πειραματικό πρότυπο από την IETF.

Παρόλα αυτά όμως εργαστηριακές μελέτες και πειράματα έχουν δείξει ότι τόσο ο μηχανισμός TFRC όσο και ο TFMCC δεν είναι και οι πλέον κατάλληλοι μηχανισμοί προσαρμογής για τη μετάδοση πολυμέσων. Τα κυριότερα προβλήματα αφορούν στη "φιλικότητα" των μηχανισμών αυτών προς το πρωτόκολλο Transmission Control Protocol (TCP) καθώς και στις απότομες διακυμάνσεις του ρυθμού μετάδοσης. Ιδιαίτερα οι απότομες διακυμάνσεις του ρυθμού μετάδοσης είναι ένα στοιχείο μη επιθυμητό από τις εφαρμογές πολυμέσων και ιδιαίτερα από τις εφαρμογές πολυμέσων πραγματικού χρόνου.

Στη περιοχή των ασυρμάτων δικτύων τα προβλήματα τα οποία αντιμετωπίζονται κατά τη μετάδοση των πολυμέσων δεν έχουν τόσο άμεση σχέση με τη συμφόρηση του δικτύου (αυτή παρατηρείται κυρίως στα ενσύρματα δίκτυα), όσο με τις απώλειες των πακέτων που είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα του μέσου διάδοσης. Η μέχρι τώρα προσέγγιση αφορά στην επιμέρους βελτιστοποίηση των διαφόρων πρωτοκόλλων των στρωμάτων του OSI έτσι ώστε να μειωθούν τα προβλήματα διάδοσης και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες πακέτων και οι καθυστερήσεις από τον αποστολέα στο παραλήπτη.

Κατά τα τελευταία χρόνια όμως κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος μια διαφορετική προσέγγιση η οποία έχει επικρατήσει να ονομάζεται διεθνώς ως "cross-layer optimization-adaptation". Κατά τη προσέγγιση αυτή διαφαίνεται ότι θα μπορούσαμε να πετύχουμε τη βελτιστοποίηση της παρεχόμενης ποιότητας στις εφαρμογές πολυμέσων μέσω κάποιων μηχανισμών προσαρμογής, που θα εμπλέκουν περισσότερα του ενός εκ των στρωμάτων του OSI στις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου. Η μεθοδολογία, οι προκλήσεις, οι περιορισμοί καθώς και οι εφαρμογές της διαστρωματικής (cross layer) προσαρμογής αποτελούν ένα ανοικτό ερευνητικό πεδίο το οποίο βρίσκεται αυτή τη στιγμή σε εξέλιξη.

Σκοπός της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι καταρχήν η μελέτη των υπαρχόντων μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης που αφορούν τα ενσύρματα δίκτυα μη εγγυημένης ποιότητας, όπως το Διαδίκτυο.

Προς τη κατεύθυνση αυτή αξιολογούνται αρχικά οι υπάρχοντες μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης και διαπιστώνονται τα κυριότερα προβλήματα τα οποία σχετίζονται με τη ποιότητα υπηρεσιών. Η αξιολόγηση γίνεται με βάση τα κριτήρια που αφορούν τόσο στη φιλικότητα των μηχανισμών αυτών προς το TCP όσο και στα κριτήρια που αφορούν τη ποιότητα υπηρεσιών των εφαρμογών πολυμέσων. Η αξιολόγηση αυτή μας οδηγεί στο σχεδιασμό νέων πρωτοκόλλων τα οποία υπόσχονται υψηλότερη

φιλικότητα προς το TCP και καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Ένα σημαντικό στοιχείο που διαφοροποιεί τα πρωτόκολλα αυτά από τις άλλες προσεγγίσεις είναι η ομαλή (smooth) συμπεριφορά κατά την οποία ελαχιστοποιούνται οι απότομες μεταβολές του ρυθμού μετάδοσης, που είναι μη επιθυμητές από τις εφαρμογές πολυμέσων, διατηρώντας παράλληλα ένα υψηλό ρυθμό απόκρισης στις απότομες μεταβολές των συνθηκών του δικτύου.

Ένα δεύτερο σημαντικό στοιχείο της εργασίας αυτής είναι οι προσθήκες στις βιβλιοθήκες του προσομοιωτή ns-2 οι οποίες είναι ήδη αντικείμενο εκμετάλλευσης από άλλους ερευνητές. Για το σκοπό αυτό τα νέα πρωτόκολλα καθορίζονται πλήρως και ενσωματώνονται στις βιβλιοθήκες του προσομοιωτή ns-2 έτσι ώστε να είναι διαθέσιμα στην ερευνητική κοινότητα ως μέρος του προσομοιωτή, για περαιτέρω μελέτη και αξιολόγηση. Επεκτείνονται παράλληλα υπάρχοντα ερευνητικά εργαλεία προσομοιώσεων τα οποία επιτρέπουν την ανάλυση και την αξιολόγηση υπαρχόντων και μελλοντικών μηχανισμών προσαρμογής με βάση κριτήρια ποιότητας που αφορούν ειδικά τις εφαρμογές πολυμέσων, πλέον των "κλασσικών" κριτηρίων που σχετίζονται με μετρικά δικτύων.

Σε ότι αφορά στα ασύρματα δίκτυα μελετάται η διαστρωματική προσαρμογή και εάν και κατά πόσο είναι δυνατό να επιτευχθεί η αύξηση της ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας μέσα από την εφαρμογή μια τέτοιας σχεδίασης. Μελετώνται οι διάφοροι τρόποι και μεθοδολογίες σχεδίασης μιας διαστρωματικής προσαρμογής και προτείνεται ένα νέο πλαίσιο με το οποίο είναι δυνατό να αυξήσουμε τη ποιότητα υπηρεσίας σε υβριδικά δίκτυα, που αποτελούνται τόσο από ενσύρματους όσο και από ασύρματους χρήστες.

EXECUTIVE SUMMARY

Multimedia applications have gained in recent years an increasing demand from Internet users as they offer new opportunities and diverse multimedia services. These applications, however, are subject to restrictions which mainly have to do with its nature and are characterized by high requirements of the transmission rates (bandwidth-consuming applications) and their sensitivity to delays in the transmission of packets by the consignor to consignee (delay-sensitive applications). On the other hand, allegedly these applications are less sensitive to packet losses (packet-loss tolerant applications). The issue, however, with multimedia applications, except for the scope of the services which offer, is the Quality of Services (QoS) that is offered to the end user. This quality of services is directly linked to the above characteristics of multimedia applications.

The approach so far by the research community and also the Internet Service Providers (ISPs), as regards ensuring the quality of service, has focused either to individually optimizing the efficiency of transmission protocols, or in the installation of additional equipment (servers) for the establishment of distribution networks (Content Distribution Networks, CDNS) which are normally positioned close to the final user. In addition, the growing effort of the research community with a view to increasing the quality of service offered new innovative solutions in the form of services-architectures like the Integrated Services (Intserv) and Differentiated Services (Diffserv) which aspire to offer guarantees of quality of services in specific user groups. But these two architectures failed until now to become the solution for the provision of guarantees of quality of services to the end user due to difficulties in applying them which have to do with financial criteria and the structure of the Internet itself.

Therefore, we can see that despite the progress made so far in networks technology the provision of QoS across the Internet is not still feasible with the result that multimedia services via the Internet (for example “YouTube”) are significantly affected by the changes of the network conditions. To this course, the research community has directed to the study of mechanisms which will be able to adjust the transmission rate of multimedia data, according to the conditions of the network, so as to offer the best possible quality of service to the end user. This effort could be classified into two broad categories, according to the way the multimedia information is routed, as follows:

- Adaptation mechanisms for unicast transmission: In this case the adaptation mechanisms regulate the transmission rate between the sender and the receiver in a unicast connection.
- Adaptation mechanisms for multicast transmission: In this case the adaptation mechanisms regulate the transmission rate between the sender and a group of receivers.

Regarding the unicast transmission the predominant proposal is the congestion control mechanism that is termed as the “TCP-friendly Rate Control (TFRC) and has been

accepted as an international standard by the Internet Engineering Task Force (IETF). In the area of multicast transmission the TCP-friendly Multicast Congestion Control (TFMCC) has also become acceptable as an experimental standard from IETF.

Nevertheless, laboratory studies and experiments have shown that both TFRC and TFMCC are not the most suitable adaptation mechanisms for multimedia transmission. The main problems have to do with its friendliness towards the Transmission Connection Protocol (TCP) and the sudden fluctuations in the transmission. rate. These sharp variations of the transmission rates are an attribute non desirable by multimedia applications and particularly by real-time applications.

In the area of wireless networks the problems with the transmission of multimedia data are not directly linked to the congestion of the network (this mainly occurs in wired networks) as the packet losses are a direct result of the free space propagation. The approach so far has aimed at the individual optimization of the various protocols of the OSI model so as to reduce the transmission problems and minimize packet losses and the delays from the sender to the end user.

In recent years, however, a different approach which has prevailed to be termed internationally as “cross-layer optimization-adaptation” has earned more and more space. Under this approach we could be able to succeed the optimization of the service, regarding the quality of multimedia applications, by means of some adaptation mechanisms which will involve more than one of the OSI layers to current network conditions. The methodology, the challenges, the restrictions and the applications of cross layer adaptation constitute an open research area which is currently in progress.

The aim of this dissertation is firs the study of the existing congestion control mechanisms which mainly concern best-effort wired networks, such as the Internet. In this direction we evaluate the existing congestion/flow control mechanisms and record the main problems related to the quality of service. The performance evaluation is based on criteria relating both to TCP-friendliness and the quality of service of multimedia applications. This performance evaluation leads us to the design of new protocols which promise greater TCP-friendliness and better quality of service. An important element that distinguishes these protocols of the other approaches is the “smooth” behavior by which we minimize the high oscillations of the transmission rate, which are not desirable by multimedia applications, while maintaining a high response to sudden changes of network conditions.

A second important element of this dissertation is the additions we have made to the libraries of the ns-2 simulator which are already exploited by other researchers. For this purpose the new protocols are fully defined and incorporated into the ns-2 libraries so as to be available to the research community as part of the simulator, for further studies and evaluation. At the same time we expand existing research tools in order to enable the analysis and evaluation of existing and future mechanisms based on quality criteria specific to multimedia applications, along with network-centric criteria.

Regarding the wireless networks we study the cross layer adaptation and how it is possible to achieve the increase in the quality of service by implementing such a design. We study the various ways and design methodologies of a cross layer adaptation and propose a new framework with which it is possible to increase the quality of service in hybrid networks consisting of both by wired and wireless users.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αυτή η διδακτορική διατριβή αποτελεί και το τελευταίο σταθμό σε ένα υπέροχο αλλά και δύσκολο ταξίδι που ξεκίνησε εδώ και αρκετά χρόνια. Όλα αυτά τα χρόνια απαιτήθηκαν κόποι και θυσίες τόσο σε προσωπικό όσο και σε οικογενειακό επίπεδο.

Θα ήθελα λοιπόν πρώτα από όλους να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διδακτορικής διατριβής, κ. Χρήστο Μπούρα, Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ (Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, Πολυτεχνική Σχολή Παν/μίου Πατρών), για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, δίνοντας μου την ευκαιρία να μελετήσω σε βάθος την περιοχή των δικτύων υπολογιστών, για την καθοδήγηση στην επιλογή του θέματος και την επιτυχή ολοκλήρωση της διατριβής. Χωρίς την επιμονή, τις συμβουλές και την αμέριστη στήριξή του δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί το παρόν πόνημα. Αποτελεί ιδιαίτερη τιμή για μένα το γεγονός ότι υπήρξε ο επιβλέπον της διδακτορικής αυτής διατριβής.

Εξίσου βαθιές είναι οι ευχαριστίες μου προς τα άλλα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τους Καθηγητές του ΤΜΗΥΠ Γεώργιο Αλεξίου και Κων/νο Μπερμπερίδη για την υποστήριξη και τη συμβολή τους στην διατριβή μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα μέλη της επταμελούς επιτροπής: Εμμανουήλ Βαρβαρίγο, Καθηγητή ΤΜΗΥΠ, Κυριάκο Βλάχο, Επίκουρο Καθηγητή ΤΜΗΥΠ, Ιωάννη Γαροφαλάκη, Καθηγητή ΤΜΗΥΠ και Παύλο Σπυράκη Καθηγητή ΤΜΗΥΠ για την υποστήριξή τους στην εκπόνηση αυτής της διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να απευθύνω στο καλό μου φίλο Δρ. Απόστολο Γκάμα για τη συνεργασία του, τη βοήθειά του και την συνδρομή του σε όλα τα στάδια της έρευνας καθώς και στην εκπόνηση αυτής της διατριβής.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στη σύζυγό μου Ουρανία Πέσα για την υπομονή και την υποστήριξή της σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου αλλά και στις δύο κόρες μου Μαρία και Κλειώ για τη κατανόηση που μου έδειξαν όλα αυτά χρόνια.

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2010

Γεώργιος Α. Κιουμουρτζής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ V

EXECUTIVE SUMMARY IX

ΠΡΟΛΟΓΟΣ XI

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ XIII

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ XVIII

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ XX

ΛΙΣΤΑ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ XXI

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ 23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΩΝ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ 33

2.1 ΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ RTP/RTCP 35
2.1.1 ΠΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΟΥΝ ΤΑ RTP/RTCP 37
2.1.2 ΜΕΤΑΦΡΑΣΤΕΣ ΚΑΙ ΜΕΙΚΤΕΣ 40
2.1.3 ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΕΛΕΓΧΟΥ RTCP 41
2.1.4 ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΩΝ RTCP ΠΑΚΕΤΩΝ 42
2.1.5 ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ RTP/RTCP 44
2.1.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ RTP/RTCP 45
2.2 ΔΕΣΜΕΥΣΗ ΠΟΡΩΝ – ΠΑΡΟΧΗ ΕΓΓΥΗΣΕΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ 45
2.2.1 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ INTEGRATED SERVICE (INTSERV) 46
2.2.2 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ DIFFERENTIATED SERVICE (INTSERV) 47
2.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 49
2.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ΦΙΛΙΚΟΙ ΠΡΟΣ ΤΟ TCP 51

3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΟΣ ΔΙΚΤΥΑΚΟΥ ΜΟΝΟΠΑΤΙΟΥ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ 53

3.1.1 ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ (BANDWIDTH) 54
3.1.2 ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΠΑΚΕΤΩΝ (PACKET LOSS RATIO) 54
3.1.3 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ (JITTER DELAY) 55
3.1.4 ΧΡΟΝΟΣ ΔΙΠΛΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ (ROUND TRIP TIME - RTT) 56
3.2 TCP-FRIENDLY RATE CONTROL (TFRC) 57
3.2.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ 57
3.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 58
3.2.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ ΑΠΟΣΤΟΛΕΑ 58
3.2.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΛΗΠΤΗ 59
3.3 TCP-FRIENDLY MULTICAST CONGESTION CONTROL (TFMCC) 59
3.3.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ 59
3.3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 60
3.3.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ ΑΠΟΣΤΟΛΕΑ 60
3.3.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΛΗΠΤΗ 61
3.4 PRAGMATIC GENERAL MULTICAST CONGESTION CONTROL (PGMCC) 61
3.4.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ 61
3.4.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ACKER 62
3.4.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 62
3.5 SMOOTH MULTICAST CONGESTION CONTROL (SMCC) 63
3.5.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ 63
3.5.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΡΟΩΝ – CURRENT LIMITED RECEIVER (CLR) 64
3.5.3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 65
3.5.4 ΑΠΟΦΥΓΗ ΑΥΞΟΜΕΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ (CROSS LAYER) ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΓΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 67

4.1 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ 69
4.1.1 ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΜΕΡΟΣ ΣΤΗ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ 69
4.1.2 ΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΗΣ ΣΤΟΙΒΑΣ ΤΟΥ OSI ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΜΕΡΟΣ ΣΤΗ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ 70
4.1.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΜΕΡΟΣ ΣΤΗ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ 70
4.1.2 ΣΗΜΑΤΟΔΟΣΙΑ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΤΟΙΒΑΣ ΤΟΥ OSI 71
4.1.3 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ 72
4.1.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ 72
4.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ 73
4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ 75

5.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ (MULTICAST) 77
5.1.1 ΣΧΕΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 78
5.1.1.1 Σχήματα Μονής Ροής (Single-Rate Schemes) 79
5.1.1.2 Σχήματα Πολλαπλών Ροών (Multi-Rate Schemes) 79
5.1.2 ADAPTIVE SMOOTH MULTICAST PROTOCOL (ASMP) 81
5.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ SIMULCAST ... 82
5.2.1 ΣΧΕΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 83
5.2.2 ADAPTIVE SMOOTH SIMULCAST PROTOCOL (ASSP) 83
5.3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ (CROSS LAYER) ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 85
5.3.1 ΣΧΕΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 85
5.3.2 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ 86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ (MULTICAST) 87

6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ADAPTIVE SMOOTH MULTICAST PROTOCOL (ASMP) 89
6.1.1 ASMP ΑΠΟΣΤΟΛΕΑΣ 91
6.1.2 ASMP ΠΑΡΑΛΗΠΤΗΣ 92
6.1.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΠΑΚΕΤΩΝ 92
6.1.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ (JITTER DELAY) 93
6.1.5 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ RTT 93
6.1.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΙΛΙΚΟΥ ΠΡΟΣ ΤΟ TCP ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 95
6.1.7 ΔΕΙΚΤΕΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ 96
6.1.8 ΚΛΙΜΑΚΩΣΗ (SCALABILITY) 98
6.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ASMP 99
6.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ 99
6.2.2 ΦΙΛΙΚΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣ ΤΟ TCP 100
6.2.3 ΟΜΑΛΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ 102
6.2.4 ΜΕΤΑΓΕΝΕΣΤΕΡΗ ΕΙΣΟΔΟΣ ΠΑΡΑΛΗΠΤΗ ΣΤΗΝ ΟΜΑΔΑ ΜΕ ΧΑΜΗΛΟ ΡΥΘΜΟ ΛΗΨΗΣ 103
6.2.5 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΤΙΣ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΠΟ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ 105
6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ASMP ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ - ΔΙΕΘΝΗ ΠΡΟΤΥΠΑ 106
6.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ TFMCC 106
6.3.1.1 Φιλικότητα προς το TCP 106
6.3.1.2 Μεταγενέστερη Ακολουθία Παραλήπτη στη Σύσκεψη 109
6.3.1.3 Απόκριση στις Μεταβολές του Ρυθμού Απωλειών Πακέτων 110
6.3.1.4 Απόκριση στις δυναμικές μεταβολές του δικτύου υπό τη παρουσία άλλων ανταγωνιστικών πηγών 112

6.3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ PGMCC 114
6.3.2.1 Φιλικότητα προς το TCP 114
6.3.2.2 Απόκριση στις Απώλειες του Δικτύου 115
6.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΒΙΝΤΕΟ 117
6.4.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ Β΄ΙΝΤΕΟ 118
6.4.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ 120
6.4.3 ΦΙΛΙΚΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣ ΤΟ TCP - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΚΤΗ JAIN 122
6.4.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΑ ΜΕΤΡΙΚΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ Β΄ΙΝΤΕΟ 124
6.4.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ ΣΤΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΒΙΝΤΕΟ 125
6.4.6 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΩΡΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ 126
6.4.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΣΤΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ 127
6.4.8 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ RTT ΤΙΜΕΣ 130
6.4.9 ΦΙΛΙΚΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣ ΡΟΕΣ ΤΟΥ ΙΔΙΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ 133
6.4.10 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΤΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ UDP ΡΟΩΝ 134
6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 136

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ SIMULCAST 141

7.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ADAPTIVE SMOOTH SIMULCAST PROTOCOL (ASSP) 143
7.1.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΣΤΟΛΕΑ 146
7.1.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΛΗΠΤΗ 147
7.1.3 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΣΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ RTP/RTCP 150
7.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ASSP 150
7.2.1 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΡΥΘΜΟΥ 151
7.2.2 ΦΙΛΙΚΟΤΗΤΑ 154
7.2.2.1 Φιλικότητα προς το TCP 154
7.2.2.2 Φιλικότητα προς ροές του ιδίου πρωτοκόλλου 156
7.2.3 ΑΠΟΔΟΣΗ ΜΕ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΕΣ ON-OFF UDP ΡΟΕΣ 158
7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΗΣ SMOOTH MULTICAST CONGESTION CONTROL (SMCC) 160
7.3.1 ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΠΗΓΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ – ΦΙΛΙΚΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣ ΤΟ TCP 161
7.3.2 ΦΙΛΙΚΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΡΟΕΣ ΤΟΥ ΙΔΙΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ 164
7.3.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΟΥ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΠΑΚΕΤΩΝ – ΜΕΙΩΣΗ ΑΥΞΟΜΕΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 166
7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 167

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ (CROSS LAYER) ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 169

8.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ 171

8.1.1 ΑΠΟΣΤΟΛΕΑΣ 172
8.1.2 ΕΝΣΥΡΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΛΗΠΤΗΣ 174
8.1.3 PROXY ΚΑΙ ΑΣΥΡΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΛΗΠΤΗΣ 175
8.1.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ 176
8.1.5 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΑΘΩΝ 178
8.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ 179
8.2.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ BL ΚΑΙ EL ΧΩΡΙΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟ 179
8.2.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ BL ΚΑΙ EL ΜΕ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟ 181
8.2.3 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΟ ΡΥΘΜΟ ΓΙΑ ΤΟ BL 182
8.2.4 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΦΙΛΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΡΟΣ ΤΟ TCP 183
8.2.5 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕ UDP ΚΙΝΗΣΗ 184
8.2.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ TFRC 185
8.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 185

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 187

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 195

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I: ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ NETWORK SIMULATOR (NS-2) 201

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II: ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ 215

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III: ΑΝΑΦΟΡΕΣ 221

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV: ΑΚΡΩΝΥΜΑ 229

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V: ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ 235

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. RTP δεδομένα σε ένα IP πακέτο *38*
Σχήμα 2. Στρώματα του SMCC *64*
Σχήμα 3. Λειτουργίες του ASMP αποστολέα *91*
Σχήμα 4. Λειτουργίες του ASMP παραλήπτη *92*
Σχήμα 5. Τοπολογία του δικτύου προσομοίωσης *99*
Σχήμα 6. Φιλικότητα προς TCP – Ρυθμοί μετάδοσης *100*
Σχήμα 7. TCP-φιλικότητα – Απώλειες πακέτων *101*
Σχήμα 8. TCP-φιλικότητα – Διαταραχή *101*
Σχήμα 9. Ομαλή συμπεριφορά – Ρυθμοί μετάδοσης *102*
Σχήμα 10. Ομαλή συμπεριφορά – Απώλειες πακέτων *103*
Σχήμα 11. Ομαλή συμπεριφορά - Διαταραχή *103*
Σχήμα 12. Ομαλή συμπεριφορά έναντι μη ομαλής συμπεριφοράς *103*
Σχήμα 13. Τοπολογία προσομοίωσης με "αργό" παραλήπτη *104*
Σχήμα 14. Ρυθμοί μετάδοσης του ASMP (μεταγενέστερη είσοδος "αργού" παραλήπτη στη σύσκεψη) .. *104*
Σχήμα 15. Απόκριση του ASMP στις δυναμικές αλλαγές του δικτύου *105*
Σχήμα 16. Τοπολογία TCP φιλικότητας *107*
Σχήμα 17. Σύγκριση TFMCC και TCP κίνησης στη ζεύξη L1 ..... *107*
Σχήμα 18. Σύγκριση TFMCC και TCP κίνησης στη ζεύξη L2 ..... *107*
Σχήμα 19. Σύγκριση ASMP και TCP κίνησης στη ζεύξη L1 ..... *108*
Σχήμα 20. Σύγκριση ASMP και TCP κίνησης στη ζεύξη L2 ..... *108*
Σχήμα 21. Σύγκριση TFMCC και ASMP ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη L1 ..... *108*
Σχήμα 22. Σύγκριση TFMCC και ASMP ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη L2 ..... *109*
Σχήμα 23. Τοπολογία εισόδου "αργού" παραλήπτη *110*
Σχήμα 24. Ρυθμοί μετάδοσης TFMCC έναντι ASMP *110*
Σχήμα 25. Τοπολογία με μεταβαλλόμενο ρυθμό απωλειών *111*
Σχήμα 26. Απόκριση σε μεταβαλλόμενους ρυθμούς απωλειών *111*
Σχήμα 27. Ετερογενές δυναμικό δίκτυο *112*
Σχήμα 28. Απόκριση σε ανταγωνιστικές πηγές πληροφορίας: Ρυθμοαπόδοση TCP με ανταγωνιστικές UDP και TFMCC ροές *113*
Σχήμα 29. Απόκριση σε ανταγωνιστικές πηγές πληροφορίας: Ρυθμοαπόδοση TCP με ανταγωνιστικές UDP και ASMP ροές *113*
Σχήμα 30. Απόκριση σε ανταγωνιστικές πηγές πληροφορίας: TFMCC έναντι ASMP *113*
Σχήμα 31. Τοπολογία με περιοριστικό σύνδεσμο *114*
Σχήμα 32. PGMCC έναντι TCP ροής *114*
Σχήμα 33. ASMP έναντι TCP ροής *115*
Σχήμα 34. 100 δέκτες Multicast, ένας TCP *116*
Σχήμα 35. Απόκριση του PGMCC σε ήπιες απώλειες πακέτων *116*
Σχήμα 36. Απόκριση του ASMP σε ήπιες απώλειες πακέτων *117*
Σχήμα 37. Επισκόπηση του λογισμικού Multi-Evalvid-RA *121*
Σχήμα 38. Σενάριο προσομοίωσης parking lot *123*
Σχήμα 39. ASMP έναντι TCP *124*
Σχήμα 40. TFMCC έναντι TCP *124*
Σχήμα 41. PSNR τιμές (frame–by-frame TFMCC και ASMP *124*
Σχήμα 42. MOS τιμές TFMCC και ASMP *125*
Σχήμα 43. Μέση τιμή του PSNR ως συνάρτηση του ρυθμού απώλειας πακέτων *126*
Σχήμα 44. Σχεδιάγραμμα συγχρονισμού μετάδοσης πλαισίων βίντεο *127*
Σχήμα 45. Συνέπειες της απόλυτης τιμής στη διάρκεια του απομονωτή *128*
Σχήμα 46. PSNR τιμές με απομονωτή απείρου χρόνου *129*
Σχήμα 47. PSNR τιμές με απομονωτή 150 ms *129*
Σχήμα 48. Τιμές καθυστέρησης για το TFMCC και ASMP *129*
Σχήμα 49. Τιμές του δείκτη Jain *131*
Σχήμα 50. Εκμετάλλευση εύρους ζώνης *131*

Σχήμα 51. Μετρήσεις ρυθμού απώλειας πακέτων *131*
Σχήμα 52. CoV με διαφορετικές RTT τιμές *132*
Σχήμα 53. Ποιότητα βίντεο *132*
Σχήμα 54. Μετρήσεις κλίμακας MOS *132*
Σχήμα 55. Τοπολογία δικτύου σεναρίου προσομοίωσης *133*
Σχήμα 56. Ρυθμοαπόδοση ASMP *133*
Σχήμα 57. Ρυθμοαπόδοση TFMCC *133*
Σχήμα 58. PSNR τιμές *134*
Σχήμα 59. Βαθμολόγηση κλίμακας MOS *134*
Σχήμα 60. Ρυθμοαπόδοση TFMCC και ASMP *135*
Σχήμα 61. Καθυστέρηση TFMCC και ASMP *135*
Σχήμα 62. PSNR τιμές *136*
Σχήμα 63. Βαθμολόγηση κλίμακας MOS *136*
Σχήμα 64. Στοίβα πρωτοκόλλου ASSP *144*
Σχήμα 65. Αρχιτεκτονική του ASSP *144*
Σχήμα 66. Μηχανισμός ανάδρασης του ASSP αποστολέα *147*
Σχήμα 67. Μηχανισμός ανάδρασης του ASSP παραλήπτη *149*
Σχήμα 68. Τοπολογία δικτύου για την ανίχνευση κατάλληλου σε ρυθμού ροής *151*
Σχήμα 69. Ρυθμοαπόδοση παραληπτών πολλαπλής διανομής *152*
Σχήμα 70. CoV των τριών ροών ASSP *153*
Σχήμα 71. Διαταραχή καθυστέρησης των τριών ASSP ροών *153*
Σχήμα 72. Σωρευτική διαταραχή καθυστέρησης των ASSP ροών *153*
Σχήμα 73. PSNR τιμές MPEG-4 βίντεο στο τελικό χρήστη *154*
Σχήμα 74. Τοπολογία TCP – φιλικότητας *155*
Σχήμα 75. Γράφημα ρυθμοαπόδοσης όλων των ροών *155*
Σχήμα 76. CoV όλων των ροών (TCP και ASSP) *156*
Σχήμα 77. PSNR τιμές MPEG-4 βίντεο στο τελικό χρήστη *156*
Σχήμα 78. Ρυθμοαπόδοση πρώτης ASSP πηγής *157*
Σχήμα 79. Ρυθμοαπόδοση δεύτερης ASSP πηγής *157*
Σχήμα 80. CoV τριών αντιπροσωπευτικών παραληπτών *157*
Σχήμα 81. PSNR τιμές MPEG-4 βίντεο στο τελικό χρήστη *158*
Σχήμα 82. Ρυθμοαπόδοση των ASSP ροών *159*
Σχήμα 83. CoV των ASSP ροών *159*
Σχήμα 84. Σωρευτική διαταραχή καθυστέρησης των ASSP ροών *159*
Σχήμα 85. PSNR τιμές MPEG-4 βίντεο στο τελικό χρήστη (Μέση τιμή PSNR: Low=25.26 dB, Medium=26.06 dB, High=28.52 dB) *160*
Σχήμα 86. Τοπολογία περιοριστικών συνδέσμων *161*
Σχήμα 87. Ρυθμοαπόδοση των ASSP ροών *162*
Σχήμα 88. Ρυθμοαπόδοση των SMCC ροών *162*
Σχήμα 89. Τοπολογία δικτύου για μετρήσεις "φιλικότητας" μεταξύ ροών του ιδίου πρωτοκόλλου *165*
Σχήμα 90. Εκμετάλλευση ζεύξης προσομοίωσης φιλικότητας ροών του ιδίου πρωτοκόλλου *165*
Σχήμα 91. CoV μέσης τιμής ρυθμοαπόδοσης με διαφορετικές RTT τιμές *167*
Σχήμα 92. Σενάριο χρήσης του προτεινομένου πλαισίου διαστρωματικής προσαρμογής *172*
Σχήμα 93. Μπλοκ διάγραμμα του προτεινομένου πλαισίου διαστρωματικής προσαρμογής *172*
Σχήμα 94. Μπλοκ διάγραμμα του Αποστολέα *174*
Σχήμα 95. Μπλοκ διάγραμμα του ενσύρματου παραλήπτη και του Proxy *176*
Σχήμα 96. Αλληλουχία μετάδοσης των πλαισίων IEEE 802.11 MAC *178*
Σχήμα 97. Τοπολογία δικτύου για προσομοιώσεις διαστρωματικής προσαρμογής *180*
Σχήμα 98. Μετάδοση BL και EL χωρίς κανένα συντονισμό *181*
Σχήμα 99. Μετάδοση BL και EL με συντονισμό *182*
Σχήμα 100. Μετάδοση BL με καθορισμένο ρυθμό *182*
Σχήμα 101. Φιλικότητα προς το TCP *183*
Σχήμα 102. Απόκριση στη UDP κίνηση *184*
Σχήμα 103. Σύγκριση με το TFRC *185*
Σχήμα 104. UML διάγραμμα του RTP/RTCP κώδικα *204*
Σχήμα 105. UML διάγραμμα των RTP/RTCP πακέτων *206*
Σχήμα 106. Διάγραμμα ροής των send και receive ρουτινών *208*
Σχήμα 107. Διάγραμμα ροής της ρουτίνας build report *211*
Σχήμα 108. Διάγραμμα ροής της ρουτίνας receive control *212*

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Τα είδη πληροφορίας ενός SDES / RTCP πακέτου *43*
Πίνακας 2. Παράμετροι διαστρωματικής προσαρμογής σε ασύρματα δίκτυα *71*
Πίνακας 3. Σύγκριση ρυθμοαπόδοσης TFMCC και TCP *109*
Πίνακας 4. Σύγκριση ρυθμοαπόδοσης ASMP και TCP *109*
Πίνακας 5. ITU-R πίνακας ποιότητας-εξασθένησης και συσχετισμών τιμών PSNR-MOS *119*
Πίνακας 6. Ρυθμοί κωδικοποίησης MPEG-4 βίντεο ανά κλίμακα *121*
Πίνακας 7. Συγκριτικός πίνακας απόδοσης του ASMP *139*
Πίνακας 8. Μαθηματικοί Συμβολισμοί *146*
Πίνακας 9. Στατιστικά εκμετάλλευσης δικτύου *163*
Πίνακας 10. SMCC εκμετάλλευση ζεύξης με διαφορετική ρύθμιση του ρυθμού εκπομπής βασικού στρώματος *164*
Πίνακας 11. Στατιστικά προσομοίωσης φιλικότητας ροών του ιδίου πρωτοκόλλου *165*
Πίνακας 12. Στατιστικά προσομοίωσης φιλικότητας ροών του ιδίου πρωτοκόλλου με διαφορετικές RTT τιμές *166*

ΛΙΣΤΑ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Εξίσωση 1. Υπολογισμός διαφοράς χρόνου δύο διαδοχικών πακέτων 55
Εξίσωση 2. Υπολογισμός jitter delay 55
Εξίσωση 3. Υπολογισμός χρόνου RTT 56
Εξίσωση 4. Υπολογισμός χρόνου μονής διαδρομής 57
Εξίσωση 5. Υπολογισμός ρυθμού μετάδοσης του TFRC 58
Εξίσωση 6. Υπολογισμός ρυθμού μετάδοσης του TFMCC 60
Εξίσωση 7. Εύρεση του acker 62
Εξίσωση 8. Υπολογισμός ρυθμοαπόδοσης στο PGMCC 63
Εξίσωση 9. Υπολογισμός ρυθμού μετάδοσης στο SMCC 64
Εξίσωση 10. Καθορισμός επιπέδου εγγραφής στο SMCC 65
Εξίσωση 11. Καθορισμός ρυθμού εκπομπής στρώματος i 65
Εξίσωση 12. Όρια διακύμανσης ρυθμού εκπομπής του στρώματος i 65
Εξίσωση 13. Υπολογισμός ρυθμού μετάδοσης 91
Εξίσωση 14. Υπολογισμός ρυθμού απωλειών 93
Εξίσωση 15. Συντελεστές βαρύτητας 93
Εξίσωση 16. Μέτρηση καθυστέρησης D 93
Εξίσωση 17. Μέτρηση διαταραχής J 93
Εξίσωση 18. Υπολογισμός χρόνου απλής διαδρομής 94
Εξίσωση 19. Υπολογισμός χρόνου διπλής διαδρομής 94
Εξίσωση 20. Χρήση παραμέτρου a 94
Εξίσωση 21. Χρήση χρόνων t_{LSR} *και* t_{DLSR} 94
Εξίσωση 22. Υπολογισμός τιμής παραμέτρου a 95
Εξίσωση 23. Χρήση φίλτρου για τον υπολογισμό του χρόνου t_{RTT} 95
Εξίσωση 24. Υπολογισμός φιλικού προς το TCP ρυθμού μετάδοσης 95
Εξίσωση 25. Υπολογισμός ρυθμού μετάδοσης χωρίς απώλειες πακέτων 96
Εξίσωση 26. Χρήση φίλτρου 96
Εξίσωση 27. Πεδίο τιμών μεταβλητής γ 96
Εξίσωση 28. Υπολογισμός μέσης τιμής A 97
Εξίσωση 29. Ενημέρωση μέσης τιμής A 97
Εξίσωση 30. Εκτίμηση επιπέδου συμφόρησης 98
Εξίσωση 31. Καθορισμένες τιμές παραμέτρου γ 98
Εξίσωση 32. Αλγόριθμος κλιμάκωσης 98
Εξίσωση 33. Υπολογισμός της τιμής PSNR 119
Εξίσωση 34. Καθορισμός του δείκτη Jain 122
Εξίσωση 35. Διακύμανση καθυστέρησης διαδοχικών πλαισίων 126
Εξίσωση 36. Σωρευτική διακύμανση 126
Εξίσωση 37. Ενέργειες ASSP αποστολέα κατά τη λήψη RTCP πακέτου 146
Εξίσωση 38. Υπολογισμός μέσης τιμής ρυθμού μετάδοσης 147
Εξίσωση 39. Διαδικασίες λήψης RTCP πακέτου από τον ASSP παραλήπτη 148
Εξίσωση 40. Αλγόριθμος λήψης απόφασης από τον ASSP παραλήπτη 148
Εξίσωση 41. Καθορισμός μέσης τιμής λήψης από τον ASSP παραλήπτη 148
Εξίσωση 42. Τιμές παραμέτρου β 149
Εξίσωση 43. Τιμές παραμέτρου λ 149
Εξίσωση 44. Ρυθμός μετάδοσης ροών 163
Εξίσωση 45. Προσδιορισμός ρυθμού μετάδοσης BL και EL στρωμάτων 173
Εξίσωση 46. Εναλλακτική λύση για το προσδιορισμό ρυθμού μετάδοσης BL και EL στρωμάτων 174
Εξίσωση 47. Υπολογισμός φιλικού προς το TCP ρυθμού μετάδοσης 175
Εξίσωση 48. Υπολογισμός φιλικού προς το TCP ρυθμού μετάδοσης χωρίς απώλειες πακέτων 175
Εξίσωση 49. Αλγόριθμος απόφασης για μετάδοση των στρωμάτων BL και EL 176

Εξίσωση 50. Αλγόριθμος εύρεσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης στο ασύρματο δίκτυο *177*
Εξίσωση 51. Εξίσωση εύρεσης διαθέσιμου εύρου ζώνης *178*
Εξίσωση 52. Προσαρμοστικός αλγόριθμος ARQ *179*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μετάδοση δεδομένων στο Διαδίκτυο από ένα χρήστη δεν ακολουθεί κάποιους κανόνες σε ότι αφορά των αριθμό των πακέτων δεδομένων που εισάγει ο χρήστης αυτός στο δίκτυο. Ο μόνος περιορισμός ο οποίος υφίσταται έχει να κάνει με τη ταχύτητα πρόσβασής του. Έτσι λοιπόν μπορούμε εύκολα να αντιληφθούμε γιατί παρατηρείται συμφόρηση στο Διαδίκτυο με άμεσα αποτελέσματα την απόρριψη των πακέτων στους δρομολογητές του δικτύου και τις καθυστερήσεις στη μετάδοση των πακέτων από άκρο-σε-άκρο, καταστάσεις που μειώνουν τη Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service, QoS) που προσφέρεται τελικά στο χρήστη. Μια πρώτη προσέγγιση για την βελτίωση του επιπέδου υπηρεσιών στο χρήστη είναι η αύξηση της ταχύτητας πρόσβασης στο δίκτυο που ήδη πραγματοποιείται σήμερα σε μεγάλο βαθμό από τους παρόχους υπηρεσιών διαδικτύου. Μια δεύτερη λύση θα μπορούσε να αποτελέσει η παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσιών όπως οι Ολοκληρωμένες Υπηρεσίες (Integrated services, Intserv) και οι Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες (Differentiated Services, Diffserv), εξυπηρετώντας έτσι κάποιους χρήστες με διαφορετικό τρόπο δίνοντάς τους μεγαλύτερη προτεραιότητα στη κίνησή τους στο δίκτυο σε σχέση με τους υπόλοιπους χρήστες. Το πρόβλημα όμως και με τις δύο αυτές προσεγγίσεις είναι καταρχήν η αύξηση του κόστους για τη μετάπτωση από την υπάρχουσα τεχνολογία σε μια καινούργια σε συνδυασμό με τη δυσκολία εφαρμογής μιας τέτοιας τεχνολογίας ώστε να επιτύχουμε τελικά εγγυήσεις παροχής ποιότητας υπηρεσιών από άκρο σε άκρο. Αλλά ακόμη και να αυξήσουμε το εύρος ζώνης ή να παρέχουμε εγγυημένες υπηρεσίες σε κάποιες ομάδες χρηστών που είναι πρόθυμες να πληρώσουν το όποιο κόστος δεν θα μπορέσουμε τελικά να εξαλείψουμε τη συμφόρηση στο δίκτυο. Αυτό θα γίνει διότι ποτέ τελικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης δεν θα είναι τόσο αρκετό ώστε να καλύψει τις αναδυόμενες εφαρμογές - υπηρεσίες.

Έτσι στη περίπτωση των εγγυημένων υπηρεσιών θα παρουσιασθούν εκ νέου προβλήματα καθόσον όσο θα αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών που θα υπάγονται στη κατηγορία αυτή τόσο θα μειώνεται το επίπεδο της παρεχόμενης υπηρεσίας. Βλέπουμε λοιπόν ότι το θέμα της συμφόρησης του διαδικτύου μας οδηγεί σε μια ατέρμονη διαδικασία. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα πρόσβασης για τους χρήστες τόσο δημιουργούνται και νέες εφαρμογές – υπηρεσίες που απαιτούν όλο και υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Η κατάσταση αυτή θυμίζει πολύ έντονα την εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων όπου δημιουργούνται συνεχώς νέες ανάγκες για επεξεργαστές με υψηλότερη υπολογιστική δύναμη και τερματικά με μεγαλύτερο μέγεθος μνήμης. Έτσι παρόλο που οι ταχύτητες πρόσβασης έχουν αυξηθεί εκθετικά τα τελευταία χρόνια, από την εποχή των modems με ρυθμούς της τάξης μερικών δεκάδων Kb/s στη σημερινή τεχνολογία του Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) με ρυθμούς των Mb/s (και με την χρήση οπτικών ινών σε ρυθμούς Gb/s στο μέλλον) το πρόβλημα της παροχής εγγυήσεων υπηρεσιών στο χρήστη περιμένει ακόμα τη λύση του καθώς όπως συζητήσαμε και παραπάνω αυξάνονται συνεχώς οι ανάγκες για υψηλότερους ρυθμούς πρόσβασης αλλά και για καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών.

Σε ότι αφορά ειδικά τις εφαρμογές πολυμέσων στις οποίες επικεντρώνεται και το ενδιαφέρον μας, το θέμα της παροχής εγγυήσεων υπηρεσιών γίνεται ακόμη ποιο σύνθετο λόγω της φύσης των εφαρμογών αυτών, που διακρίνονται κυρίως από τις παρακάτω ιδιότητες που τις καθιστούν διαφορετικές από κάθε άλλη μέχρι τώρα

γνωστή εφαρμογή:

- Την απαίτησή τους για μετάδοση δεδομένων με πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (bandwidth-consuming applications).
- Την ευαισθησία τους στις καθυστερήσεις και τη διακύμανση της καθυστέρηση (latency και jitter).
- Την ανοχή τους στις απώλειες πακέτων (packet-loss tolerant applications).

Έτσι λοιπόν βλέπουμε ότι η μετάδοση πολυμέσων επηρεάζεται άμεσα από το δικτυακό περιβάλλον όπου τα φαινόμενα συμφόρησης επιδρούν αρνητικά στη παρεχομένη ποιότητα υπηρεσιών. Μπορούμε να σκεφτούμε για παράδειγμα και πολλοί από εμάς έχουν ήδη βιώσει τη κακή ποιότητα υπηρεσιών σε εφαρμογές τηλεφωνίας στο Διαδίκτυο (Voice over IP, VoIP), εξαιτίας της συμφόρησης όταν αυξάνεται ο χρόνος μετάδοσης των πακέτων από το αποστολέα στο παραλήπτη και αντίστροφα. Παρόμοια ενόχληση νοιώθει και ο χρήστης με τη καθυστέρηση που παρατηρείται στην αναπαραγωγή ενός αρχείου βίντεο είτε λόγω της χαμηλής ταχύτητας πρόσβασης είτε λόγω της συμφόρησης του δικτύου. Αυτές οι καταστάσεις βέβαια είναι μόνο ενδεικτικές των προβλημάτων που σχετίζονται με τη μετάδοση πολυμέσων σε δίκτυα μη εγγυημένης ποιότητας, όπως το Διαδίκτυο. Υπάρχει και μια σειρά άλλων θεμάτων που σχετίζονται με τη ποιότητα ενός λαμβανομένου αρχείου βίντεο ή μιας εφαρμογής πολυμέσων πραγματικού χρόνου (π.χ. τηλεδιάσκεψη).

Το αποτέλεσμα όλων αυτών των προβλημάτων οδήγησε την ερευνητική κοινότητα στη μελέτη πιθανών τρόπων που θα βοηθήσουν στην αναβάθμιση της ποιότητας υπηρεσιών που προσφέρονται στο τελικό χρήστη. Η προσπάθεια πολλών ερευνητών εστιάσθηκε σε μηχανισμούς ελέγχου της συμφόρησης του δικτύου (congestion control mechanisms) και σε μηχανισμούς προσαρμογής (adaptation mechanisms) έτσι ώστε ο ρυθμός μετάδοσης της πολυμεσικής πληροφορίας να προσαρμόζεται στη τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, μειώνοντας έτσι τα αρνητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από το δίκτυο όταν είναι σε κατάσταση συμφόρησης όπως η αυξημένη καθυστέρηση από άκρο-σε-άκρο, οι υψηλές τιμές της διαταραχής και οι απώλειες των πακέτων. Ο έλεγχος της ροής στη μετάδοση της πληροφορίας πολυμέσων δεν αφορά όμως μόνο τις εφαρμογές αυτές αλλά είναι άμεσα συνυφασμένος και με τις εφαρμογές που είναι βασισμένες στο πρωτόκολλο μεταφοράς Transmission Control Protocol (TCP). Το πρωτόκολλο TCP παρέχει ένα ικανοποιητικό μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης για την μετάδοση δεδομένων μη πραγματικού χρόνου (time insensitive data) (όπως για παράδειγμα τα δεδομένα τα οποία παράγονται από το WWW (πρωτόκολλο HTTP) και την μεταφορά αρχείων (πρωτόκολλο FTP)) τα οποία αποτελούν και την πλειονότητα των δεδομένων τα οποία μεταφέρονται στις μέρες μας στο Διαδίκτυο. Έτσι λοιπόν οι μηχανισμοί μετάδοσης πολυμέσων δεν θα πρέπει να στοχεύουν μόνο στην αποφυγή συμφόρησης του δικτύου αλλά θα πρέπει ταυτόχρονα να μεταδίδουν "φιλική" προς το TCP κίνηση. Μια ροή δεδομένων μπορεί να χαρακτηριστεί φιλική ως προς την TCP κίνηση, όταν δεν κυριαρχεί της TCP κίνησης αλλά επιτρέπει και την μετάδοση TCP κίνησης με ένα ικανοποιητικό ρυθμό μετάδοσης ταυτόχρονα με την μετάδοση των δεδομένων της. Με την αυστηρή έννοια του όρου "ροή δεδομένων φιλική προς την TCP κίνηση" θεωρούμε μια ροή δεδομένων που δεν καταναλώνει περισσότερο εύρος ζώνης από μια TCP ροή δεδομένων η οποία μεταδίδεται πάνω στο ίδιο δικτυακό μονοπάτι με την αυτή τη ροή δεδομένων.

Το αποτέλεσμα των ερευνών έφερε στην επιφάνεια νέους μηχανισμούς ελέγχου

συμφόρησης, που επικεντρώνονται κυρίως στη μετάδοση δεδομένων με δρομολόγηση πολλαπλής διανομής (multicast). Αυτό δικαιολογείται βέβαια διότι η multicast μετάδοση δεδομένων πραγματικού χρόνου είναι ένα σημαντικό συστατικό πολλών εφαρμογών πολυμέσων, όπως για παράδειγμα η τηλεδιάσκεψη και η τηλεκπαίδευση. Το ετερογενές όμως περιβάλλον του Διαδικτύου έχει ως αποτέλεσμα η multicast μετάδοση δεδομένων πραγματικού χρόνου να είναι από μόνη της μια πρόκληση. Οι διαφορετικοί παραλήπτες της ίδιας multicast ροής δεδομένων μπορεί να έχουν διαφορετικές δυνατότητες επεξεργασίας και διαφορετικό διαθέσιμο εύρος ζώνης στο δικτυακό μονοπάτι που τους συνδέει με τον αποστολέα της multicast ροής δεδομένων.

Έτσι κατά την multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από το Διαδίκτυο διάφορα θέματα πρέπει να ληφθούν υπόψη όπως:

- Προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (adaptation) : Ο αποστολέας πρέπει να προσαρμόζει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στις τρέχουσες δικτυακές συνθήκες.
- Φιλικότητα προς το TCP (TCP-friendliness): Κατά την multicast μετάδοση πάνω από το Διαδίκτυο, οι multicast ροές δεδομένων πρέπει να είναι φιλικές προς το TCP.
- Δυνατότητες κλιμάκωσης (scalability): Η απόδοση του μηχανισμού προσαρμογής δεν θα πρέπει να μειώνεται όσο αυξάνει ο αριθμός των παραληπτών.
- Αντιμετώπιση ανομοιογένειας (heterogeneity): Ο μηχανισμός προσαρμογής θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την ανομοιογένεια του Διαδικτύου και θα πρέπει να στοχεύει στο να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του μεγαλύτερου μέρους των παραληπτών.

Οι μέθοδοι οι οποίες προτείνονται στην βιβλιογραφία για την multicast μετάδοση δεδομένων πραγματικού χρόνου στο Διαδίκτυο μπορούν να διαχωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες, λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των multicast ροών δεδομένων που χρησιμοποιούνται:

- Ο αποστολέας των δεδομένων πραγματικού χρόνου χρησιμοποιεί μια μόνο multicast ροή δεδομένων για να εξυπηρετήσει όλους τους παραλήπτες. Η μέθοδος αυτή έχει ως αποτέλεσμα την βέλτιστη χρήση των δικτυακών πόρων όμως έχει το μειονέκτημα της μη δίκαιης μεταχείρισης των παραληπτών των δεδομένων πραγματικού χρόνου, ιδιαίτερα στην περίπτωση που οι παραλήπτες έχουν σημαντικά διαφορετικές δυνατότητες.
- Ο αποστολέας των δεδομένων πραγματικού χρόνου μεταδίδει τα ίδια δεδομένα πραγματικού χρόνου κωδικοποιημένα σε διαφορετικά επίπεδα ποιότητας σε διαφορετικές multicast ροές δεδομένων. Η μέθοδος αυτή έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός μικρού αριθμού multicast ροών δεδομένων με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης (η μέθοδός αυτή είναι γνωστή στην βιβλιογραφία με τον αγγλικό όρο simulcast). Ο κάθε παραλήπτης λαμβάνει την multicast ροή δεδομένων που μεταφέρει το επίπεδο ποιότητας (βάσει του ρυθμού μετάδοσης κάθε multicast ροής δεδομένων) που μπορεί να λαμβάνει σε συνάρτηση με τις δυνατότητές του.
- Ο αποστολέας χρησιμοποιεί τεχνικές κωδικοποίησης των δεδομένων σε στρώματα (layered encoding) σύμφωνα με τις οποίες τα δεδομένα

πραγματικού χρόνου μπορούν να ανακατασκευαστούν από έναν αριθμό διαφορετικών στρωμάτων δεδομένων, ένα βασικό και περισσότερα επιπλέον στρώματα δεδομένων. Το βασικό στρώμα παρέχει το βασικό επίπεδο ποιότητας, ενώ η ποιότητα αυξάνεται με κάθε ένα από τα επιπλέον στρώματα. Ο αποστολέας μεταδίδει κάθε στρώμα σε διαφορετικές multicast ροές δεδομένων και οι παραλήπτες λαμβάνουν μία ή περισσότερες multicast ροές δεδομένων ανάλογα με το διαθέσιμο εύρος ζώνης στο δικτυακό μονοπάτι που τους συνδέει με τον αποστολέα. Η υλοποίηση αυτής της τεχνικής απαιτεί πολύπλοκους κωδικοποιητές / αποκωδικοποιητές (encoders / decoders) και επιπλέον οι παραλήπτες πρέπει να συγχρονίζουν τα διαφορετικά στρώματα προκειμένου να παρουσιάσουν την πολυμεσική πληροφορία στον τελικό χρήστη.

Κυριότερος εκπρόσωπος της multicast μετάδοσης μιας ροής δεδομένων αποτελεί ο μηχανισμός TCP-Friendly Multicast Congestion Control (TFMCC) [1] που έχει γίνει αποδεκτός ως πειραματικό πρότυπο από την IETF. Ο μηχανισμός TFMCC έχει τη βάση του στο μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης με την ονομασία TCP Friendly Rate Control (TFRC) [2] που έχει γίνει πλέον αποδεκτός ως διεθνές πρότυπο από τη Internet Engineering Task Force (IETF). Ο μηχανισμός TFRC ρυθμίζει το ρυθμό μετάδοσης ανάμεσα σε έναν αποστολέα και στον παραλήπτη της πληροφορίας και η επέκτασή του στη περιοχή της μετάδοσης με δρομολόγηση πολλαπλής διανομής (multicast) απέδωσε το μηχανισμό TFMCC. Μια ακόμη πρόταση στη ίδια περιοχή έρευνας αποτελεί ο μηχανισμός με την ονομασία Pragmatic General Multicast Congestion Control (PGMCC) [3] που έχει κερδίσει το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας και βρίσκεται σε κατάσταση ανασκόπησης ως προσχέδιο του Διαδικτύου (Internet draft). Στη simulcast μετάδοση χαρακτηριστικότερη πρόταση αποτελεί ο μηχανισμός Destination Set Grouping (DSG) [4], ενώ στη περιοχή της τεχνικής κωδικοποίησης των δεδομένων σε στρώματα (layered encoding) μια ενδιαφέρουσα πρόταση αποτελεί ο μηχανισμός Smooth Multicast Congestion Control (SMCC) [5].

Στη περιοχή των ασυρμάτων δικτύων τα προβλήματα τα οποία αντιμετωπίζουμε κατά τη μετάδοση των πολυμέσων δεν έχουν τόσο άμεση σχέση με τη συμφόρηση του δικτύου (αυτή παρατηρείται κυρίως στα ενσύρματα δίκτυα), όσο με τις απώλειες των πακέτων ως αποτέλεσμα του μέσου διάδοσης. Η μέχρι τώρα προσέγγιση αφορά στην επιμέρους βελτιστοποίηση των διαφόρων πρωτοκόλλων των στρωμάτων του OSI έτσι ώστε να μειωθούν τα προβλήματα διάδοσης και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες πακέτων και οι καθυστερήσεις από τον αποστολέα στο παραλήπτη.

Κατά τα τελευταία χρόνια όμως κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος μια διαφορετική προσέγγιση η οποία έχει επικρατήσει να ονομάζεται διεθνώς ως “cross-layer optimization-adaptation”. Κατά τη προσέγγιση αυτή διαφαίνεται ότι θα μπορούσαμε να πετύχουμε τη βελτιστοποίηση της παρεχόμενης ποιότητας στις εφαρμογές πολυμέσων μέσω κάποιων μηχανισμών προσαρμογής, που θα εμπλέκουν περισσότερα του ενός εκ των στρωμάτων του OSI στις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου. Η μεθοδολογία, οι προκλήσεις, οι περιορισμοί καθώς και οι εφαρμογές της διαστρωματικής (cross layer) προσαρμογής αποτελούν ένα ανοικτό ερευνητικό πεδίο το οποίο βρίσκεται αυτή τη στιγμή σε εξέλιξη.

Σε αυτή τη Διδακτορική Διατριβή μελετώνται καταρχήν τόσο οι υπάρχοντες μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης όσο και οι κυριότερες προσπάθειες της ερευνητικής κοινότητας και αφορούν τη μετάδοση της πληροφορίας πολυμέσων σε ενσύρματα δίκτυα μη εγγυημένης ποιότητας, όπως το Διαδίκτυο. Προς τη κατεύθυνση αυτή

αξιολογούνται αρχικά οι υπάρχοντες μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης και διαπιστώνονται τα κυριότερα προβλήματα τα οποία σχετίζονται με τη παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσιών. Η αξιολόγηση γίνεται με βάση τα κριτήρια που αφορούν τόσο στη φιλικότητα των μηχανισμών αυτών προς το TCP όσο και στα κριτήρια που αφορούν τη ποιότητα υπηρεσιών των εφαρμογών πολυμέσων. Η αξιολόγηση αυτή μας οδηγεί στο σχεδιασμό νέων πρωτοκόλλων τα οποία υπόσχονται μεγαλύτερη φιλικότητα προς το TCP και καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Ένα σημαντικό στοιχείο που διαφοροποιεί τη δική μας πρόταση από άλλες γνωστές μέχρι τώρα προσεγγίσεις είναι η ομαλή (smooth) συμπεριφορά των πρωτοκόλλων όπου ελαχιστοποιούν τις απότομες μεταβολές του ρυθμού μετάδοσης, που είναι μια κατάσταση μη επιθυμητή από τις εφαρμογές πολυμέσων, διατηρώντας παράλληλα ένα υψηλό ρυθμό απόκρισης στις απότομες μεταβολές των συνθηκών του δικτύου.

Ένα δεύτερο σημαντικό στοιχείο της διατριβής αυτής είναι οι προσθήκες στις βιβλιοθήκες του προσομοιωτή ns-2 οι οποίες είναι ήδη αντικείμενο εκμετάλλευσης από άλλους ερευνητές. Για το σκοπό αυτό τα νέα πρωτόκολλα καθορίζονται πλήρως και ενσωματώνονται στις βιβλιοθήκες του προσομοιωτή ns-2 έτσι ώστε να είναι διαθέσιμα στην ερευνητική κοινότητα ως μέρος του προσομοιωτή, για περαιτέρω μελέτη και αξιολόγηση. Επεκτείνονται παράλληλα υπάρχοντα ερευνητικά εργαλεία προσομοιώσεων τα οποία επιτρέπουν την ανάλυση και την αξιολόγηση υπαρχόντων και μελλοντικών μηχανισμών προσαρμογής με βάση κριτήρια ποιότητας που αφορούν τις εφαρμογές πολυμέσων και ειδικότερα κριτήρια ποιότητας μετάδοσης αρχείων βίντεο, πλέον των "κλασσικών" κριτηρίων που σχετίζονται με μετρικά δικτύων.

Σε ότι αφορά τα ασύρματα δίκτυα μελετώνται η διαστρωματική προσαρμογή και εάν και κατά πόσο είναι δυνατό να επιτευχθεί η αύξηση της ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας μέσα από την εφαρμογή μια τέτοιας σχεδίασης. Προτείνεται παράλληλα ένα νέο πλαίσιο με το οποίο είναι δυνατό να αυξήσουμε τη ποιότητα υπηρεσίας σε υβριδικά δίκτυα, που αποτελούνται τόσο από ενσύρματους όσο και από ασύρματους χρήστες.

Αναλυτικότερα η διδακτορική διατριβή δομείται στα παρακάτω κεφάλαια:

Στο Κεφάλαιο 2 εξετάζουμε το τρόπο μετάδοσης της πληροφορίας των εφαρμογών πολυμέσων και εστιάζουμε ιδιαίτερα στο πρωτόκολλο μεταφοράς Real Time Protocol (RTP) και στο πρωτόκολλο ελέγχου Real Time Control Protocol (RTCP). Τα RTP / RTCP [6] αποτελούν τα de - facto πρωτόκολλα για την μετάδοση πολυμέσων πάνω από το Διαδίκτυο και υποστηρίζονται τόσο από τα πρότυπα της ITU - T (πρότυπο H.323) [7] όσο και από την IETF. Παρουσιάζουμε επίσης περιληπτικά τις δύο υπηρεσίες παροχής εγγυήσεων ποιότητας πάνω σε δίκτυα μη εγγυημένης ποιότητας, Integrated services (Intserv) [8] και Differentiated Services (Diffserv) [9] και συγκρίνουμε τη λογική της προσαρμογής της μετάδοσης με τις υπηρεσίες αυτές.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζουμε περιληπτικά τους κυριότερους μηχανισμούς ελέγχου συμφόρησης που στοχεύουν στη μετάδοση της πληροφορίας πολυμέσων. Η μελέτη των μηχανισμών αυτών μας οδηγεί στη σχεδίαση των δικών μας μηχανισμών σε μια προσπάθεια να αντιμετωπίσουμε γνωστές αλλά και άγνωστες πτυχές που έχουν σχέση με τη ποιότητα υπηρεσιών των εφαρμογών πολυμέσων.

Στο Κεφάλαιο 4 εκθέτουμε αρχικά τα σημαντικότερα αποτελέσματα της προσπάθειας της ερευνητικής κοινότητας στη περιοχή της διαστρωματικής προσαρμογής. Στη συνέχεια συζητάμε τις προκλήσεις και τους παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται

υπόψη κατά τη σχεδίαση μηχανισμών προσαρμογής που βασίζονται στη διαστρωματική προσαρμογή (cross layer adaptation).

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση της ερευνητικής περιοχής σε ότι αφορά τη μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας με δρομολόγηση multicast και simulcast καθώς και το προτεινόμενο πλαίσιο διαστρωματικής (cross layer) προσαρμογής για τη μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας σε υβριδικά δίκτυα. Επίσης αναφέρονται οι εργασίες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής και παρουσιάζονται τα σημεία εκείνα τα οποία διαφοροποιούν τις προσεγγίσεις που ακολουθήθηκαν στις εν λόγω εργασίες με την προσέγγιση που προτείνονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζουμε το πρωτόκολλο Adaptive Smooth Multicast Protocol (ASMP) που αποτελεί τη πρότασή μας για τη multicast μετάδοση μιας ροής δεδομένων. Το ASMP είναι δομημένο πάνω στα πρωτόκολλα RTP/RTCP και διαθέτει ένα μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης που κρατά την ισορροπία μεταξύ απόκρισης στις απότομες μεταβολές της κατάστασης του δικτύου και ομαλών ρυθμών μετάδοσης, αποφεύγοντας έτσι τις απότομες αυξομειώσεις που δεν είναι επιθυμητές από τις εφαρμογές πολυμέσων. Ο έλεγχος της απόδοσης του ASMP πραγματοποιείται με μια σειρά προσομοιώσεων με το λογισμικό ns-2 [10], αφού το έχουμε πρώτα ενσωματώσει στις βιβλιοθήκες του ns-2. Η απόδοση και η σύγκριση του ASMP με τις περισσότερο αποδεκτές προτάσεις για multicast μετάδοση (μηχανισμοί TFMCC και PGMCC) εξετάζεται αρχικά με μετρικά δικτύων. Εν συνεχεία προχωρούμε ένα βήμα παραπάνω σε ότι αφορά στην εκτίμηση της απόδοσης του ASMP. Αυτή τη φορά στις προσομοιώσεις μας λαμβάνουμε υπόψη τα κριτήρια ελέγχου ποιότητας που έχουν θεσπισθεί από την ITU-T και αφορούν τη μετάδοση αρχείων βίντεο. Για να γίνει αυτό εφικτό χρησιμοποιούμε νέα εργαλεία προσομοίωσης τα οποία μας δίνουν τη δυνατότητα να εκτιμήσουμε τη ποιότητα αρχείων βίντεο στο τελικό παραλήπτη μετά από τις παραμορφώσεις που υπόκεινται στο δίκτυο λόγω απωλειών κατά τη μετάδοση. Εδώ περιγράφουμε αναλυτικά τη μεθοδολογία και τα κριτήρια ποιότητας στη μετάδοση αρχείων βίντεο και παρέχουμε τη δυνατότητα ελεύθερης πρόσβασης στο πηγαίο κώδικα για περαιτέρω μελέτες στο τομέα αυτό.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζουμε το πρωτόκολλο Adaptive Smooth Simulcast Protocol (ASSP) που αποτελεί τη πρότασή μας για τη simulcast μετάδοση πολλαπλής ροής δεδομένων. Το ASSP είναι δομημένο πάνω στο πρωτόκολλο ASMP και διαχειρίζεται περισσότερες της μιας ροής δεδομένων. Ο έλεγχος της απόδοσης του ASSP πραγματοποιείται με μια σειρά από προσομοιώσεις που συνδυάζουν "κλασσικά" μετρικά δικτύων με μετρικά ποιότητας βίντεο. Παρουσιάζουμε επίσης τη σύγκριση του ASSP με το μηχανισμό SMCC, ο οποίος αποτελεί μια αντιπροσωπευτική πρόταση για τη μετάδοση δεδομένων με τη τεχνική κωδικοποίησης σε στρώματα (layered encoding). Από τα αποτελέσματα της σύγκρισης αναδύουν οι αδυναμίες και τα ισχυρά στοιχεία μεταξύ της τεχνικής simulcast και layered encoding.

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζουμε το προτεινόμενο πλαίσιο μέσα από το οποίο μπορούμε να πετύχουμε διαστρωματική προσαρμογή σε υβριδικά δίκτυα με ενσύρματους και ασύρματους ανταποκριτές. Αφού γίνεται πρώτα μια αναλυτική περιγραφή των στοιχείων του πλαισίου προχωρούμε σε μια σειρά προσομοιώσεων όπου εξετάζουμε την απόδοσή του.

Στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζουμε τα συμπεράσματα τα οποία έχουν εξαχθεί κατά την διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής.

Στο Κεφάλαιο 10 παρουσιάζονται τα ανοιχτά θέματα που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας στο συγκεκριμένο τομέα.

Στο Παράρτημα Ι παρουσιάζουμε τις επεκτάσεις στις βιβλιοθήκες του λογισμικού προσομοίωσης ns-2 με παραδείγματα λειτουργίας του λογισμικού για ευκολότερη κατανόηση από το χρήστη.

Στο Παράρτημα ΙΙ παρουσιάζονται οι εργασίες που δημοσιεύτηκαν, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής σε διεθνή περιοδικά, βιβλία και διεθνή συνέδρια καθώς και οι αναφορές στην εργασία μας από άλλους ερευνητές.

Στο Παράρτημα ΙΙΙ παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, ταξινομημένη κατά σειρά που εμφανίζονται στο κείμενο. Παράλληλα, αναφέρουμε πως οι αναφορές στη βιβλιογραφία έχουν ενσωματωθεί στο κείμενο μέσα σε αγκύλες ([]).

Στο Παράρτημα IV παρουσιάζονται τα ακρωνύμια τα οποία χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διδακτορική διατριβή για τη διευκόλυνση του αναγνώστη.

Στο Παράρτημα V παρουσιάζεται το γλωσσάριο ξενικών όρων που χρησιμοποιούνται στη διδακτορική αυτή διατριβή για τη διευκόλυνση του αναγνώστη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΩΝ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΩΝ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφουμε με συντομία τα βασικότερα στοιχεία και τις λειτουργίες των πρωτοκόλλων RTP/RTCP τα οποία αποτελούν ήδη τα de facto πρωτόκολλα μεταφοράς για τη μετάδοση πληροφορίας πολυμέσων. Αρχικά ξεκινάμε με τη παρουσίαση των πρωτοκόλλων RTP/RTCP διότι η εργασία μας είναι δομημένη στα χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων αυτών και ιδιαίτερα στους μηχανισμούς επέκτασης και ανάδρασης, που προσφέρουν ένα εύκολο και αποτελεσματικό τρόπο για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη της πληροφορίας πολυμέσων σχετικά με τη τρέχουσα κατάσταση του δικτύου.

Στη συνεχεία παρουσιάζουμε τις δύο διαφορετικές λογικές σε ότι αφορά τον έλεγχο της συμφόρησης που οδηγεί στην απώλεια των πακέτων και κατά συνέπεια στη μείωση της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσίας στο τελικό χρήστη. Μια πιθανή λύση λοιπόν είναι το δίκτυο από μόνο του να παρέχει μηχανισμούς που εγγυώνται τη ποιότητα υπηρεσίας με ανάλογη βέβαια χρέωση (IntServ/DiffServ). Αυτό βέβαια απαιτεί και το ανάλογο κόστος τόσο από πλευράς εξοπλισμού από τις εταιρείες παροχής υπηρεσιών Διαδικτύου όσο και από τη πλευρά των χρηστών. Μια δεύτερη λύση είναι η δημιουργία μηχανισμών-πρωτοκόλλων μεταφοράς με δυνατότητες ελέγχου της συμφόρησης από άκρο-σε-άκρο, έτσι ώστε να ελαττώσουμε τις αρνητικές επιπτώσεις από την ανεξέλεγκτη μετάδοση των πολυμεσικών πληροφοριών με τα όποια αρνητικά αποτελέσματα.

2.1 ΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ RTP/RTCP

Τα πρωτόκολλα RTP / RTCP (Real - time Transport Protocol / Real - time Transport Control Protocol) [6] δημιουργήθηκαν για τη μεταφορά δεδομένων πραγματικού χρόνου όπως τα πολυμεσικά δεδομένα βίντεο και ήχου. Αρχικά σχεδιάστηκαν για επικοινωνία πολλαπλής διανομής (multicast) αλλά στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν και για επικοινωνία απλής διανομής (unicast). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μονόδρομη επικοινωνία όπως εφαρμογές βίντεο κατά απαίτηση (βίντεο on demand), αλλά και για αμφίδρομη επικοινωνία όπως για την Διαδικτυακή τηλεφωνία και την τηλεδιάσκεψη (βίντεοconference). Παρέχουν μια κοινή πλατφόρμα για την μεταφορά δεδομένων και την έκφραση πληροφοριών συγχρονισμού που απαιτούνται από εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως οι εφαρμογές μετάδοσης πολυμέσων στο Διαδίκτυο. Το πρωτόκολλο RTCP αποτελεί το πρωτόκολλο ελέγχου του RTP. Το RTP είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε συνεργασία με το πρωτόκολλο ελέγχου RTCP το οποίο παρέχει πληροφορίες για την ποιότητα της μετάδοσης και για τους ανταποκριτές που συμμετέχουν στην σύνοδο.

Το RTP, είναι ένα πρωτόκολλο που προσφέρει υπηρεσίες μεταφοράς για δεδομένα από άκρο σε άκρο (end - to - end) με χαρακτηριστικά πραγματικού χρόνου (real - time characteristics), όπως πολυμεσικά δεδομένα (πχ ήχος ή βίντεο) και άλλες εφαρμογές σε δίκτυα μεταγωγής πακέτου, όπως τα IP δίκτυα και το Διαδίκτυο. Τέτοιες υπηρεσίες είναι ο καθορισμός και η αναγνώριση του τύπου των δεδομένων που μεταδίδονται (payload type), σειριακή αρίθμηση των πακέτων (sequence numbering), χρονοσήμανση πακέτων (time-stamping) και έλεγχος των διαδικασιών μεταφοράς. Μια εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιεί το RTP πάνω από την οικογένεια πρωτοκόλλων TCP / IP ώστε να χρησιμοποιεί τις ευκολίες που αυτό παρέχει, ωστόσο

μπορεί να χρησιμοποιηθεί πάνω από κάποιο άλλο κατάλληλο πρωτόκολλο δικτύου ή μεταφοράς. Όπως ήδη αναφέραμε, το RTP υποστηρίζει μεταφορά δεδομένων με χρήση multicast αν βέβαια αυτό υποστηρίζεται από το δίκτυο.

Παρόλο που το κύριο πεδίο εφαρμογής για το οποίο ήταν αρχικά σχεδιασμένο το RTP είναι η ικανοποίηση των αναγκών πολυμελούς τηλεδιάσκεψης πολυμέσων, εντούτοις δεν περιορίζεται στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Εφαρμογές αποθήκευσης συνεχών (continuous) δεδομένων, εφαρμογές ελέγχου και μετρήσεων και άλλες εφαρμογές πραγματικού χρόνου μπορούν να χρησιμοποιήσουν το RTP ικανοποιητικά.

Το RTP μπορεί να χωριστεί σε δύο στενά συνδεδεμένα κομμάτια:

- Το Real - time Transport Protocol (RTP), για μεταφορά δεδομένων με χαρακτηριστικά πραγματικού χρόνου.
- Το Real - time Transport Control Protocol (RTCP), για έλεγχο της ποιότητας της υπηρεσίας και καταγραφή πληροφοριών σχετικών με τα μέλη κάποιας ενεργού συνόδου. Το RTCP παρέχει λειτουργίες υποστήριξης για τηλεδιάσκεψη πραγματικού χρόνου για μεγάλες ομάδες στο Διαδίκτυο που περιλαμβάνουν αναγνώριση της πηγής και υποστήριξη των πυλών (gateways).

Το RTP παρουσιάζεται ως ένα νέο είδος πρωτοκόλλου, με την έννοια ότι μπορεί να παρέχει με εύκολο τρόπο την πληροφορία που απαιτεί μια δικτυακή εφαρμογή πολυμέσων και συχνά χρησιμοποιείται ως ένα τμήμα της εφαρμογής παρά σαν ένα ξεχωριστό επίπεδο δικτύου. Επιπλέον μεταβολές ή προσθήκες στη μορφή του πρωτοκόλλου μπορούν εύκολα να γίνουν αλλάζοντας τη μορφή της επικεφαλίδας (header), σε αντίθεση με άλλα πρωτόκολλα όπου επιπρόσθετες μεταβολές θα πρέπει να εισαχθούν με τρόπο που να κάνει το πρωτόκολλο πιο γενικό ή να προστεθούν μηχανισμοί συντακτικού ελέγχου των αντίστοιχων πακέτων.

Το RTP παρέχει υπηρεσίες μεταφοράς από άκρο σε άκρο, αλλά δεν παρέχει όλη την λειτουργικότητα που παρέχεται από ένα τυπικό πρωτόκολλο μεταφοράς. Για παράδειγμα, το RTP συνήθως λειτουργεί πάνω από το πρωτόκολλο User Datagram Protocol (UDP) [11] για να χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες πολυπλεξίας και αθροίσματος ελέγχου του πρωτοκόλλου αυτού. Μπορεί όμως να λειτουργεί και πάνω από IPX δίκτυα ή πάνω σε ATM δίκτυα. Το RTP δεν γνωρίζει την έννοια της σύνδεσης και γι' αυτό μπορεί να λειτουργεί είτε πάνω από προσανατολισμένα κατά σύνδεση δίκτυα είτε πάνω από πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου χωρίς την έννοια της σύνδεσης.

Πρέπει να τονιστεί ότι το RTP δεν παρέχει κανένα μηχανισμό που να εξασφαλίζει μεταφορά των δεδομένων σε συγκεκριμένα χρονικά όρια, ούτε παρέχει εγγύηση για την ποιότητα της μετάδοσης (Quality of Service - QoS). Αυτό είναι κάτι που αφορά τα πιο κάτω επίπεδα του δικτύου. Δηλαδή, το RTP δεν παρέχει μηχανισμούς για την εξασφάλιση έγκαιρης παράδοσης ούτε για την παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσιών. Επίσης το RTP δεν εγγυάται την παράδοση ούτε αποτρέπει την παράδοση με λανθασμένη σειρά ενώ επίσης δεν υποθέτει ότι το υποκείμενο δίκτυο είναι αξιόπιστο. Η αρίθμηση που παρέχεται στα πακέτα επιτρέπει στον παραλήπτη να διατάξει τα πακέτα στη σειρά που αυτά μεταδόθηκαν από τον αποστολέα. Μερικές εφαρμογές που μπορούν να προσαρμόζονται σε αλλαγές στην παράδοση των δεδομένων, δεν απαιτούν τέτοιες εγγυήσεις, αλλά για αυτές που τις απαιτούν, το RTP πρέπει να συνοδεύεται από άλλους μηχανισμούς, όπως για παράδειγμα το

πρωτόκολλο Resource ReSerVation Protocol (RSVP) [12], προκειμένου να υποστηρίζει την δέσμευση πόρων και να παρέχει αξιόπιστες υπηρεσίες.

Αν και το RTP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για unicast επικοινωνία, ο πρωταρχικός σχεδιαστικός στόχος ήταν η multicast επικοινωνία. Στην περίπτωση multicast μετάδοσης δεδομένων δεν συμβαίνει μόνο τα δεδομένα να στέλνονται από τον αποστολέα σε πολλούς παραλήπτες, αλλά και οι παραλήπτες στέλνουν τις αναφορές τους πίσω προς όλα τα μέλη της ομάδας μέσα στην οποία γίνεται η επικοινωνία. Αυτό επιτρέπει σε όλους τους συμμετέχοντες να γνωρίζουν το εύρος ζώνης που απαιτείται και τον φόρτο που προσθέτουν στον αποστολέα.

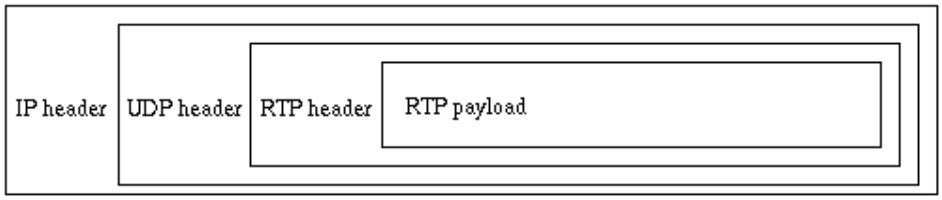
Εκτός από τους συνηθισμένους ρόλους του αποστολέα και του παραλήπτη, το RTP ορίζει δύο νέους ρόλους, του μεταφραστή και του μείκτη. Οι μεταφραστές και οι μείκτες βρίσκονται στο δίκτυο ανάμεσα στους αποστολείς και τους παραλήπτες και επεξεργάζονται τα RTP πακέτα που περνούν από αυτούς. Οι μεταφραστές απλώς μεταφράζουν μια μορφή ωφέλιμου φορτίου σε μια άλλη. Για παράδειγμα, αυτό μπορεί να απαιτείται όταν ένα αρχείο βίντεο πρέπει να κωδικοποιηθεί με ένα διαφορετικό τρόπο προκειμένου να συμβιβαστεί με τυχών περιορισμένο διαθέσιμο εύρος ζώνης σε κάποιο μέρος του δικτύου. Οι μείκτες είναι παρόμοιοι με τους μεταφραστές αλλά, αντί να μεταφράζουν ξεχωριστές ροές δεδομένων σε διαφορετικές κωδικοποιήσεις, συνδυάζουν πολλαπλές ροές δεδομένων σε μια ροή δεδομένων διατηρώντας την αρχική τους μορφή. Δεν μπορούν όλες οι εφαρμογές να υποστηρίξουν μείκτες. Για παράδειγμα η προσέγγιση αυτή λειτουργεί καλά για συνδιασκέψεις που περιλαμβάνουν μόνο ήχο, αλλά πολλαπλές πηγές βίντεο δεν μπορούν να συνδυαστούν σε μία ροή δεδομένων.

2.1.1 Πως Λειτουργούν τα RTP/RTCP

Οι πολυμεσικές εφαρμογές χαρακτηρίζονται από αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς στη μετάδοση των δεδομένων, κάτι που δε συμβαδίζει με τη λογική λειτουργίας του Διαδικτύου. Το RTP παρέχει κάποιους μηχανισμούς που λαμβάνουν υπόψη τα θέματα αυτά. Τέτοιοι μηχανισμοί είναι η χρονοσήμανση (timestamping) και η σειριακή αρίθμηση των πακέτων (sequence numbering).

Η χρονοσήμανση παρέχει σημαντικές πληροφορίες στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Ο αποστολέας βάζει σε κάθε πακέτο μια χρονοσήμανση (timestamp), την οποία χρησιμοποιεί ο παραλήπτης για να βρει τη χρονική στιγμή που πρέπει να παρουσιάσει τα δεδομένα στον χρήστη. Δηλαδή, η χρονοσήμανση παρέχει σήματα χρονισμού ώστε να είναι δυνατό στους παραλήπτες να ανακατασκευάσουν τα αρχικά δεδομένα όπως αυτά μεταδόθηκαν από τον αποστολέα. Η χρονοσήμανση χρησιμοποιείται επίσης για το συγχρονισμό διαφορετικών ροών δεδομένων, όπως ροές δεδομένων βίντεο και ήχου (όπως θα δούμε και στην συνέχεια το RTP / RTCP μεταδίδει σε διαφορετικές ροές δεδομένων βίντεο και ήχο). Το RTP όμως δεν είναι υπεύθυνο για το συγχρονισμό αυτό, τον οποίο πραγματοποιούν οι εφαρμογές.

Το UDP, το οποίο συνήθως χρησιμοποιείται για την μετάδοση των RTP / RTCP πακέτων, δεν παραδίδει τα πακέτα με τη σειρά με την οποία στάλθηκαν για αυτό τα RTP πακέτα αριθμούνται, τη στιγμή που στέλνονται, έτσι ώστε να μπορεί ο παραλήπτης να τα βάλει στη σωστή σειρά. Οι αριθμοί αυτοί χρησιμοποιούνται επίσης για να ανιχνεύονται απώλειες στη μετάδοση των πακέτων.



Σχήμα 1. RTP δεδομένα σε ένα IP πακέτο

Παρόλο που το RTP μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για unicast επικοινωνία, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για multicast επικοινωνία. Για το λόγο αυτό το RTP πακέτο δεδομένων περιέχει την ταυτότητα του αποστολέα της πληροφορίας, ώστε να είναι δυνατόν στην ομάδα της συνόδου να διαπιστώσει κανείς, ποιο μέλος αποστέλλει δεδομένα. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση του αναγνωριστικού αποστολέα (source identification), που επιτρέπει στον παραλήπτη να αναγνωρίσει από ποίον προέρχονται τα δεδομένα που λαμβάνει. Οι παραπάνω μηχανισμοί παρέχονται μέσω της επικεφαλίδας του RTP. Στο Σχήμα 1 φαίνεται ένα RTP πακέτο το οποίο έχει ενσωματωθεί σε ένα UDP / IP πακέτο.

Όπως αναφέραμε παραπάνω, συνήθως το RTP βρίσκεται πάνω από το UDP στην στοίβα των πρωτοκόλλων. Το TCP και το UDP, είναι τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται πιο πολύ στο Διαδίκτυο για την μετάδοση δεδομένων. Το TCP παρέχει υπηρεσίες προσανατολισμένες σε σύνδεση (connection - oriented) και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων ανάμεσα σε δύο τελικά συστήματα, ενώ το UDP παρέχει υπηρεσίες μη προσανατολισμένες σε σύνδεση (connectionless) αλλά όχι αξιόπιστες υπηρεσίες. Το UDP έχει επιλεγεί ως το πρωτόκολλο μεταφοράς του RTP για δύο λόγους:

- Πρώτον, το RTP είναι κυρίως σχεδιασμένο για multicast επικοινωνία κάτι το οποίο δε συμβαδίζει με το προσανατολισμένο σε σύνδεση TCP.
- Δεύτερον, συνήθως για πολυμεσικά δεδομένα, η αξιοπιστία δεν είναι τόσο σημαντική όσο η έγκαιρη μετάδοση. Η αξιόπιστη μετάδοση η οποία επιτυγχάνεται μέσω της επαναμετάδοσης των χαμένων πακέτων, μπορεί να μην είναι επιθυμητή διαδικασία, αφού μπορεί να προκαλέσει υπερφόρτωση του δικτύου, και προβλήματα στη συνεχή μετάδοση των δεδομένων.

Στο RTCP, οι εφαρμογές που έχουν πρόσφατα μεταδώσει πολυμεσικά δεδομένα παράγουν μία αναφορά αποστολέα η οποία στέλνεται σε όλα τα μέλη της συνόδου. Η αναφορά αυτή περιέχει μετρητές πληροφοριών των πακέτων και των bytes που έχουν σταλεί και οι παραλήπτες μπορούν να εκτιμήσουν τον πραγματικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Για την εγκαθίδρυση μιας RTP συνόδου, η εφαρμογή που χρησιμοποιεί το RTP καθορίζει ένα ζευγάρι διευθύνσεων προορισμού (δηλαδή μια IP διεύθυνση δικτύου και δύο θύρες (ports), μια για το RTP και μια για το RTCP). Η διεύθυνση μπορεί να είναι είτε μια unicast διεύθυνση δικτύου είτε μια multicast διεύθυνση δικτύου. Σε μια σύνοδο πολυμέσων, το κάθε μέσο μεταφέρεται σε μια ξεχωριστή RTP σύνοδο, και τα RTCP πακέτα αναφέρουν την ποιότητα λήψης για κάθε σύνοδο ξεχωριστά. Αυτό σημαίνει ότι ο ήχος και το βίντεο θα μεταδίδονται σε διαφορετικές RTP συνόδους κατά την διάρκεια μια τηλεδιάσκεψης.

Αν τα RTP / RTCP πακέτα μεταφέρονται σε UDP πακέτα, τα πακέτα δεδομένων και ελέγχου χρησιμοποιούν δύο συνεχόμενες θύρες, και η θύρα δεδομένων (πρωτόκολλο

RTP) είναι πάντα η κατώτερη και έχει μονό αριθμό. Αν άλλα πρωτόκολλα υπάρχουν κάτω από το RTP στην στοίβα πρωτοκόλλων (π.χ. το RTP κατευθείαν πάνω από AAL5: - ATM Adaptation Layer type 5), είναι δυνατόν να μεταφέρεται τόσο το τμήμα δεδομένων (πρωτόκολλο RTP) όσο και το τμήμα ελέγχου (πρωτόκολλο RTCP) σε μία μόνο μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου χαμηλότερου επιπέδου, με τον έλεγχο να ακολουθείται από τα δεδομένα.

Συνοψίζοντας, μια RTP σύνοδος ορίζεται από τα παρακάτω "συστατικά":

- IP διεύθυνση συμμετεχόντων: Αυτή μπορεί να είναι είτε μια multicast IP διεύθυνση, που αντιστοιχεί στην multicast σύνοδο της ομάδας των συμμετεχόντων είτε ένα σύνολο από unicast διευθύνσεις.
- RTP θύρα (port number): πρόκειται για τον αριθμό θύρας που χρησιμοποιούν όλα τα μέλη της συνόδου για την αποστολή δεδομένων.
- RTCP θύρα (port number): ο αριθμός της θύρας που χρησιμοποιούν τα μέλη της συνόδου για την αποστολή μηνυμάτων ελέγχου RTCP μηνυμάτων.

Η επικεφαλίδα (header) του RTP παρέχει την πληροφορία συγχρονισμού που είναι απαραίτητη για να συγχρονίζονται και να παρουσιάζονται τα δεδομένα ήχου και βίντεο, καθώς και για να προσδιορίζεται το αν τα πακέτα έχουν χαθεί ή έχουν φτάσει εκτός σειράς. Επιπροσθέτως, η επικεφαλίδα καθορίζει τον τύπο ωφέλιμου φορτίου, επιτρέποντας έτσι πολλαπλούς τύπους δεδομένων και συμπίεσης. Το RTP έρχεται στα μέτρα μιας συγκεκριμένης εφαρμογής μέσω βοηθητικών προδιαγραφών δομής και σχήματος ωφέλιμου φορτίου.

Για να επιτρέπεται ένα υψηλότερο επίπεδο συγχρονισμού ή για να συγχρονίζονται μη περιοδικά μεταδιδόμενες ροές δεδομένων, το RTP χρησιμοποιεί ένα μονοτονικό ρολόι. Το ρολόι αυτό συνήθως αυξάνεται σε χρονικές μονάδες που είναι μικρότερες από το μικρότερο μέγεθος μπλοκ της ροής δεδομένων. Η αρχική τιμή του ρολογιού είναι τυχαία. Μια εφαρμογή δεν χρησιμοποιεί τις χρονοσημάνσεις του RTP απευθείας: αντίθετα χρησιμοποιεί τις χρονοσημάνσεις του NTP (Network Time Protocol - Πρωτόκολλο Χρόνου Δικτύου) [13] και τις χρονοσημάνσεις του RTP από τα μεταδιδόμενα RTCP πακέτα για κάθε ροή που θέλει να συγχρονίσει.

Τα μέλη της συνόδου παράγουν αναφορές παραλήπτη για όλους τους αποστολείς - πηγές βίντεο και ήχου από τις οποίες έχουν λάβει δεδομένα πρόσφατα. Οι αναφορές περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τον υψηλότερο αριθμό ακολουθίας που έχει ληφθεί, τον αριθμό των πακέτων που έχουν χαθεί, την διακύμανση καθυστέρησης (jitter), και τις χρονοσημάνσεις τις οποίες χρειάζονται για να υπολογιστεί μια εκτίμηση της καθυστέρησης μετάδοσης μετά επιστροφής (RTT - Round Trip Time).

Όπως έχει σημειωθεί και προηγουμένως, το RTP και το RTCP δημιουργούν διαφορετικές συνόδους για διαφορετικές ροές δεδομένων. Η RTCP αναφορά αποστολέα περιέχει μια ένδειξη του πραγματικού χρόνου και μία αντίστοιχή RTP χρονοσήμανση η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συγχρονιστούν πολλαπλές ροές μέσων στον παραλήπτη.

Τα RTP πακέτα δεδομένων αναγνωρίζουν την προέλευση τους μόνο μέσω ενός 32 - bit αριθμού που έχει παραχθεί τυχαία, ενώ τα RTCP μηνύματα περιέχουν ένα πακέτο περιγραφής πηγής (source description, SDES) το οποίο με τη σειρά του περιέχει έναν αριθμό κειμένων για την παροχή πληροφοριών. Ένα τέτοιο κείμενο πληροφορίας είναι το αποκαλούμενο κανονικό όνομα, ένας σφαιρικά μοναδικός κωδικός αναγνώρισης του συμμετέχοντος στη σύνοδο. Άλλα πιθανά SDES αντικείμενα

περιλαμβάνουν το όνομα του χρήστη, τη διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, τον αριθμό τηλεφώνου, και πληροφορίες εφαρμογών.

Το RTCP παρέχει πληροφορίες ανάδρασης σχετικά με τις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου και την ποιότητα λήψης, επιτρέποντας στις εφαρμογές να προσαρμόζονται αυτόματα στις μεταβολές των δικτυακών συνθηκών. Για παράδειγμα, μια επιβράδυνση (slowdown) η οποία παρατηρείται από πολλούς παραλήπτες οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα σε ένα πρόβλημα δικτύου (πχ ένας T1 σύνδεσμος που έχει αποτύχει και έχει αντικατασταθεί από μια πιο αργή γραμμή των 56 Kbps) και όχι σε έναν συγκεκριμένο υπολογιστή. Στην περίπτωση αυτή, ο αποστολέας θα μπορούσε να διαλέξει να αλλάξει χωρίς καθυστέρηση το σχήμα κωδικοποίησής της, να απαλείψει προσωρινά το τμήμα βίντεο μιας μετάδοσης (να μη στέλνει για λίγο εικόνα), ή να αλλάξει από χρώμα σε μονοχρωμία ώστε να μειωθεί ο ρυθμός μετάδοσης των πολυμέσων.

Σε άλλες περιπτώσεις, οι διαχειριστές δικτύου μπορούν να χρησιμοποιήσουν πληροφορίες των RTCP πακέτων για να εκτιμήσουν την απόδοση των δικτύων τους. Αφού το RTCP στέλνει πληροφορίες ανάδρασης όχι μόνο στον αποστολέα, αλλά επίσης και σε όλους τους άλλους παραλήπτες μιας multicast ροής, επιτρέπει σε έναν χρήστη να καταλάβει αν κάποιο πρόβλημα οφείλεται στον τοπικό τερματικό κόμβο ή στο δίκτυο γενικά.

Η βάση για τον έλεγχο ροής και συμφόρησης παρέχεται από τις RTCP αναφορές αποστολέα και παραλήπτη. Αναλύοντας το πεδίο διακύμανσης καθυστέρησης (jitter), το οποίο περιέχεται στην αναφορά του αποστολέα, μπορούμε να μετρήσουμε τη διαταραχή ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος και να υποδείξουμε την πιθανότητα συμφόρησης προτού αυτή εμφανιστεί και προκαλέσει απώλεια πακέτων.

2.1.2 Μεταφραστές και Μείκτες

Το RTP υποστηρίζει την έννοια των αναμεταδοτών. Αναμεταδότες στο RTP είναι συστήματα τα οποία λειτουργούν στο επίπεδο μεταφοράς δεδομένων και μπορούν να λαμβάνουν και να αποστέλλουν δεδομένα προς τα μέλη μιας συνόδου. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες ένα μέλος μιας συνόδου αποστέλλει δεδομένα σε ένα άλλο μέλος, αλλά δεν μπορεί να το κάνει άμεσα είτε γιατί δε χρησιμοποιεί καμία από τις κωδικοποιήσεις δεδομένων που χρησιμοποιεί ο συνομιλητής του, είτε γιατί το άλλο άκρο βρίσκεται πίσω από μια διάταξη φίλτρου πακέτων (firewall) και δεν μπορεί να έχει άμεση επικοινωνία με κανέναν κόμβο στο Διαδίκτυο.

Μία κατηγορία αναμεταδότη είναι ο μείκτης (mixer) ο οποίος μπορεί να λαμβάνει δεδομένα από μία ή περισσότερες πηγές πληροφορίας να τις συνδυάζει σε μία ροή την οποία και να αποστέλλει σε έναν ή περισσότερους παραλήπτες. Κατά τη μείξη των διαφορετικών ροών έχει τη δυνατότητα να αλλάζει και τη μέθοδο κωδικοποίησης και συμπίεσης δεδομένων. Κατά την ανάμειξη πληροφοριών δεν είναι απαραίτητο όλες οι ροές να έχουν συγχρονισμένες χρονοσημάνσεις. Ο μείκτης αναλαμβάνει να προσθέσει στην τελική ροή το δικό του χρονισμό και να προσθέσει τον εαυτό του σαν την πηγή της πληροφορίας.

Παράδειγμα μείκτη είναι ένα σύστημα που αναμειγνύει τις ροές δεδομένων που μεταφέρουν την ομιλία των μελών μιας τηλεδιάσκεψης. Κάποιοι σταθμοί ενδέχεται να είναι συνδεδεμένοι με γραμμές χαμηλής ταχύτητας, μέσω των οποίων είναι δύσκολο να μεταφερθούν όλες οι ροές ομιλιών. Ο μείκτης αναλαμβάνει στην

περίπτωση αυτή να λάβει από όλους τους σταθμούς την ομιλία, να αναμείξει την ομιλία και να μεταδώσει ξανά τη συνδυασμένη ροή προς όλους τους ενδιαφερόμενους σταθμούς. Στα συνδυασμένα πακέτα περιλαμβάνονται οι κωδικοί από όλες τις πηγές πληροφορίας που μετέχουν σε αυτά.

Ο μεταφραστής (translator) είναι ένας απλούστερος αναμεταδότης ο οποίος για κάθε πακέτο που λαμβάνει επεξεργάζεται και αποστέλλει ένα μόνο πακέτο. Αυτός μπορεί να αλλάξει την αρχική κωδικοποίηση της πληροφορίας, προκειμένου αυτή να γίνει αναγνωρίσιμη και επεξεργάσιμη από σταθμούς που δεν την υποστηρίζουν. Μπορεί επίσης να αυξήσει τη συμπίεση των δεδομένων, ώστε αυτά να διακινούνται και μέσω γραμμών χαμηλής χωρητικότητας, έστω και με χαμηλότερη ποιότητα. Άλλο παράδειγμα χρήσης είναι η επικοινωνία σταθμών που δεν υποστηρίζουν όλοι τη multicast επικοινωνία. Ο μεταφραστής έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει δεδομένα από μία πηγή που υποστηρίζει multicast και να αποστέλλει πληροφορία σε ένα σύνολο από κόμβος που υποστηρίζουν μόνο unicast.

2.1.3 Το Πρωτόκολλο Ελέγχου RTCP

Το πρωτόκολλο RTP χρησιμοποιείται μόνο για τη μεταφορά των δεδομένων πραγματικού χρόνου. Αυτό το ίδιο δεν αποτελεί μέσο για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της μετάδοσης των δεδομένων πραγματικού χρόνου. Το τελευταίο είναι στόχος του πρωτοκόλλου RTCP. Το RTCP είναι ένα πρωτόκολλο ελέγχου που σχεδιάστηκε για να συνεργάζεται με το RTP. Το RTCP παρέχει τις παρακάτω υπηρεσίες:

- Παρακολούθηση ποιότητας υπηρεσίας και έλεγχο συμφόρησης (QoS monitoring και congestion control). Είναι μια από τις βασικές λειτουργίες του RTCP. Το RTCP παρέχει πληροφορίες ανάδρασης (feedback) στις εφαρμογές για την ποιότητα της μετάδοσης των δεδομένων. Το RTCP χρησιμοποιεί μετάδοση multicast και είναι εύκολο με αυτόν τον τρόπο όλα τα μέλη μιας τηλεδιάσκεψης να αποστέλλουν και να λαμβάνουν στοιχεία σχετικά με την ποιότητα της μετάδοσης. Για παράδειγμα οι παραλήπτες δεδομένων πραγματικού χρόνου μπορούν από τα RTCP πακέτα του αποστολέα να συμπεράνουν το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και να εκτιμήσουν την τελική ποιότητα μιας εφαρμογής τηλεδιάσκεψης. Παρόμοια ο αποστολέας δεδομένων μπορεί από τα RTCP πακέτα των παραληπτών να λάβει γνώση της ποιότητας της εφαρμογής τηλεδιάσκεψης και να εκτιμήσει το αν τα προβλήματα παρουσιάζονται μόνο σε μια μικρή ομάδα παραληπτών ή αν τα προβλήματα αυτά είναι καθολικά. Ανάλογα με την εκτιμούμενη κατάσταση είναι δυνατόν να ληφθούν μέτρα για τη διόρθωσή των προβλημάτων. Ένα τέτοιο ενδεχόμενο είναι να μειωθεί η ποιότητα των συμπιεσμένων δεδομένων προκειμένου να επιτευχθεί χαμηλότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ώστε να μειωθούν οι απώλειες των πακέτων.

- Αναγνώριση Αποστολέα (source identification). Στα πακέτα δεδομένων του RTP, οι πηγές - αποστολείς (sources) αναγνωρίζονται μέσω 32 bit αναγνωριστικών (identifiers) οι οποίοι παράγονται τυχαία. Τα αναγνωριστικά αυτά δεν είναι βολικά για τους ανθρώπους. Τα RTCP SDES πακέτα περιέχουν πληροφορία σε μορφή κειμένου που καλείται “κανονικά ονόματα” ή canonical names (CNAME), στη θέση των αναγνωριστικών. Αυτό το CNAME χρησιμοποιείται για να παρακολουθούνται τα άτομα που συμμετέχουν σε μια RTP σύνοδο. Το RTCP παρέχει την δυνατότητα στον

αποστολέα δεδομένων να εσωκλείσει πληροφορία για την ταυτότητα του σε μορφή κειμένου μέσα στα RTCP πακέτα. Είναι ευκολότερο τότε ιδιαίτερα στους παραλήπτες που μετέχουν ταυτόχρονα σε πολλές τηλεδιασκέψεις να συσχετίζουν μια ροή δεδομένων με συγκεκριμένη τηλεδιάσκεψη. Επίσης, οι παραλήπτες χρησιμοποιούν το CNAME για να συνδέουν πολλαπλές ροές δεδομένων από ένα συγκεκριμένο άτομο που συμμετέχει στη σύνοδο σε ένα σύνολο συνδεδεμένων RTP συνόδων (π.χ. για το συγχρονισμό ήχου και εικόνας).

- Συγχρονισμός ανάμεσα στα μέσα (inter - media synchronization). Οι RTCP αναφορές παραλήπτη περιέχουν πληροφορίες για τον πραγματικό χρόνο και την αντίστοιχή RTP χρονοσήμανση. Η πληροφορία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εσωτερικό συγχρονισμό διαφορετικών ροών δεδομένων (π.χ. εικόνα και ήχος σε ένα βίντεο. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, κατά την μετάδοση πολυμεσικών δεδομένων με την χρήση RTP / RTCP, κάθε μέσο μεταδίδεται σε ξεχωριστή ροή δεδομένων.
- Έλεγχος του αριθμού συμμετεχόντων (control information scaling). Τα RTCP πακέτα στέλνονται περιοδικά ανάμεσα σε αυτούς που συμμετέχουν στην σύνοδο. Καθώς ο αριθμός των συμμετεχόντων αυξάνεται, γίνεται απαραίτητη η αποκατάσταση κάποιας ισορροπίας ανάμεσα στην πληροφορία ελέγχου που ανταλλάσσεται και της ωφέλιμης πληροφορίας η οποία μεταδίδεται στο δίκτυο. Το πρωτόκολλο RTCP χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του πλήθους των μελών μιας τηλεδιάσκεψης, καθώς κάθε μέλος αποστέλλει τακτικά μηνύματα RTCP. Καθώς όμως ο αριθμός των μελών μιας συνόδου αυξάνεται, μεγαλώνει επίσης και ο αριθμός των RTCP πακέτων που κυκλοφορούν στο δίκτυο. Για να αποτραπεί η κατανάλωση όλων των πόρων του δικτύου από την κυκλοφορία ελέγχου και για να επιτραπεί στο RTP να εξυπηρετεί έναν μεγάλο αριθμό ατόμων που συμμετέχουν σε μια σύνοδο, τα μηνύματα έλεγχου περιορίζονται στο πέντε τοις εκατό το πολύ του συνολικού διαθέσιμου εύρους ζώνης. Αυτό το όριο επιβάλλεται ρυθμίζοντας το ρυθμό με τον οποίο τα RTCP πακέτα μεταδίδονται σαν μια συνάρτηση των ατόμων που συμμετέχουν. Αφού ο κάθε συμμετέχων μεταδίδει πακέτα ελέγχου σε όλους τους άλλους, ο καθένας μπορεί να παρακολουθεί τον συνολικό αριθμό των συμμετεχόντων και να χρησιμοποιεί τον αριθμό αυτό για να υπολογίζει το ρυθμό με τον οποίο πρέπει να μεταδίδει RTCP πακέτα.

2.1.4 Τα Είδη των RTCP Πακέτων

Η μετάδοση δεδομένων RTCP αποτελείται από μία δέσμη διαφορετικών τύπων πακέτων, τα οποία ενσωματώνονται συνήθως σε ένα UDP πακέτο δεδομένων (ή σε διαφορετικό τύπο πακέτου αν χρησιμοποιείται διαφορετικό πρωτόκολλο). Τα είδη των RTCP πακέτων (όπως αναφέραμε και παραπάνω) είναι τα ακόλουθα:

- Αναφορά αποστολέα (Sender Report - SR) και αναφορά παραλήπτη (Receiver Report - RR). Οι παραλήπτες πληροφορίας σε μία RTP / RTCP σύνοδο επιστρέφουν στον εκάστοτε αποστολέα δεδομένα που αφορούν την ποιότητα μετάδοσης. Ο αποστολέας είναι σε θέση από τις αναφορές αυτές να διαπιστώσει το είδος ενός προβλήματος, το αν περιορίζεται σε μία στενή γεωγραφική περιοχή ή εξαπλώνεται σε πολύ μεγαλύτερη. Έχουν μάλιστα δημιουργηθεί συστήματα τα οποία παρακολουθούν μόνο τα RTCP πακέτα,

και όχι τα RTP, από τα οποία εξάγουν συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση του multicast στα δίκτυα που παρακολουθούν. Αν ένα μέλος μιας συνόδου είναι μόνο παραλήπτης πληροφορίας αποστέλλει αναφορές παραλήπτη, ενώ αν είναι και αποστολέας πληροφορίας αποστέλλει και αναφορές αποστολέα.

- Περιγραφείς αποστολέα (Source Description - SDES). Είναι ο τύπος του πακέτου που χρησιμοποιείται για να παρέχουν τα μέλη μιας συνόδου πληροφορίες σχετικές με τον εαυτό τους, για παράδειγμα όνομα, διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου το όνομα της εφαρμογής που χρησιμοποιείται στη σύνοδο καθώς και άλλα στοιχεία. Ο Πίνακας 1 καταγράφει τους τύπους πληροφορίας που περιέχονται σε ένα SDES / RTCP πακέτο.
- Πακέτο αποχαιρετισμού (Goodbye - BYE). Ο τύπος αυτός σηματοδοτεί την αποχώρηση από τη σύνοδο ενός ή περισσοτέρων μελών. Για την επισήμανση των μελών που αποχωρούν το πακέτο περιέχει τη λίστα με τους αντίστοιχους κωδικούς των πηγών. Συνηθίζεται τα μέλη να εσωκλείσουν στο πακέτο και τους λόγους για τους οποίους αποχωρούν από τη σύνοδο. Όταν ένας μείκτης (mixer) λαμβάνει ένα τέτοιο πακέτο αφήνει τους κωδικούς πηγών πληροφορίας αναλλοίωτους.
- Συγκεκριμένες συναρτήσεις εφαρμογής (Application specific - APP). Ο ειδικός αυτός τύπος πακέτου χρησιμοποιείται για πειραματικούς σκοπούς στην ανάπτυξη νέων εφαρμογών και χαρακτηριστικών χωρίς να απαιτείται να γίνουν επίσημα αποδεκτοί νέοι τύποι μέσων επικοινωνίας. Μετά από τις αναγκαίες δοκιμές και αφού ο νέος τύπος μετάδοσης πληροφορίας ή τα νέα χαρακτηριστικά γίνουν ευρέως αποδεκτά γίνεται αίτηση στον οργανισμό IANA για την επίσημη κατοχύρωση του συγκεκριμένου τύπου πακέτου.

ΤΙΜΗ	ΟΝΟΜΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
0	END	End of SDES list.
1	CNAME	Canonical name: unique among all participants within one RTP session
2	NAME	Real user name of the source
3	EMAIL	E - mail address
4	PHONE	Telephone number
5	LOC	Geographic location
6	TOOL	Name of application generating the stream
7	NOTE	Transient message describing the current state of the source
8	PRIV	Private experimental or application - specific extensions

Πίνακας 1. Τα είδη πληροφορίας ενός SDES / RTCP πακέτου

2.1.5 Σενάρια Χρήσης των RTP/RTCP

Η πιο συχνή χρήση των πρωτοκόλλων πραγματικού χρόνου γίνεται μέχρι σήμερα για την πραγματοποίηση τηλεδιασκέψεων με χρήση κατά κύριο λόγω ήχου και βίντεο. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιάσουμε το βασικό τρόπο λειτουργίας των πρωτοκόλλων RTP / RTCP στο παράδειγμα μιας εφαρμογής τηλεδιάσκεψης με χρήση ήχου και βίντεο.

Σε τέτοιου είδους τηλεδιασκέψεις μετέχουν συνήθως περισσότερα από δύο άτομα. Για την αποδοτικότερη λειτουργία από πλευράς χρήσης των δικτυακών πόρων, χρησιμοποιείται η multicast μετάδοση δεδομένων. Με χρήση του RTP, για κάθε ξεχωριστό μέσο που απαιτεί μετάδοση πραγματικού χρόνου, όλα τα μέλη της τηλεδιάσκεψης χρησιμοποιούν μία (την ίδια) multicast διεύθυνση και ορίζουν σε αυτή μία RTP και μία RTCP θύρα (port).

Η μετάδοση των μέσων γίνεται με χρήση διαφορετικών συνόδων (sessions), για λόγους που έχουν να κάνουν με την ευχρηστία και ευελιξία του πρωτοκόλλου, κατά την εφαρμογή του σε ένα ετερογενές περιβάλλον, όπως είναι το Διαδίκτυο. Για την πραγματοποίηση μιας τηλεδιάσκεψης δεν είναι απαραίτητο όλα τα μέλη να διαθέτουν τον ίδιο εξοπλισμό σε υλικό και λογισμικό ούτε να είναι συνδεμένα με το δίκτυο με συνδέσεις ίδιων ταχυτήτων. Για κάθε ένα μέλος λοιπόν ένας διαφορετικός συνδυασμός δικτυακών παραμέτρων, κωδικοποιήσεων και συμπιέσεων δεδομένων είναι κατάλληλος. Για την επικοινωνία μεταξύ "ετερογενών" χρηστών οι απαιτούμενες μετατροπές είναι απαραίτητο να γίνονται σε πραγματικό χρόνο. Πολύ συχνά επίσης διαφορετικές ροές δεδομένων ήχου ή βίντεο χρειάζεται να πολυπλεχτούν προκειμένου να αποσταλούν σε ομάδες χρηστών. Οι διαδικασίες αυτές είναι περισσότερο εύκολο να γίνουν όταν κάθε "κανάλι" RTP / RTCP μεταφέρει ένα μόνο μέσο επικοινωνίας και γίνονται από ειδικό λογισμικό που λέγεται μείκτης (που περιγράψαμε παραπάνω).

Το RTP δεν είναι ένα πλήρες πρωτόκολλο μεταφοράς και ελέγχου δεδομένων. Απλά ορίζει μία δομή πακέτων και ένα σύνολο στοιχειωδών συναρτήσεων που χρησιμοποιούν εφαρμογές για τη μετάδοση πληροφορίας. Για να είναι λειτουργικό πρέπει να συμπληρώνεται από συναρτήσεις και δομές πληροφορίας που αφορούν συγκεκριμένες κωδικοποιήσεις δεδομένων όπως για παράδειγμα MPEG, H.261, H.263, JPEG, κ.α.

Σε μία αρχιτεκτονική οργάνωσης πρωτοκόλλων σε επίπεδα προτείνονται διάφοροι τρόποι σχετικά με την υλοποίηση διαφόρων μηχανισμών για την αντιμετώπιση ιδιαίτερων καταστάσεων. Ο ένας από αυτούς προτείνει το χειρισμό των θεμάτων αυτών στο επίπεδο της εφαρμογής. Για παράδειγμα στην περίπτωση απώλειας δεδομένων ή λήψης αλλοιωμένων πακέτων πληροφορίας είναι η εφαρμογή υπεύθυνη για την απόφαση της επαναμετάδοσης ή μη της λανθασμένης πληροφορίας. Αν μάλιστα αποφασίσει πως πρέπει να γίνει επαναμετάδοση τότε την υλοποιεί αυτή η ίδια και όχι το πρωτόκολλο μεταφοράς. Αυτή η τεχνική έχει σαν στόχο να γίνονται οι εφαρμογές περισσότερο ευέλικτες και να μην περιορίζονται από τις ιδιαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων. Για παράδειγμα μια εφαρμογή τηλεδιάσκεψης μπορεί να αποφασίσει πως οι απώλειες που παρουσιάζονται στα ροή δεδομένων την οποία λαμβάνει είναι εντός ανεκτών ορίων και μπορεί να συνεχίσει την λήψη και αναπαραγωγή δεδομένων, χωρίς ιδιαίτερο πρόβλημα. Στην περίπτωση που οι απώλειες συνεχίζονται, ίσως με αυξανόμενο ρυθμό, είναι μάλλον προτιμότερο να ειδοποιήσει τον αποστολέα για την άσχημη

απόδοση μετάδοσης, προκειμένου να αλλάξει η μέθοδος συμπίεσης και να μειωθούν οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η απόδοση και μειώνονται οι απώλειες.

2.1.6 Χαρακτηριστικά των RTP/RTCP

Συνοψίζοντας τις παραπάνω παραγράφους το RTP/RTCP έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Το RTP παρέχει υπηρεσίες για την παράδοση πολυμεσικών δεδομένων με χαρακτηριστικά πραγματικού χρόνου, όπως βίντεο και ήχος, αλλά δεν παρέχει κανένα μηχανισμό που να εγγυάται την έγκαιρη μετάδοση. Χρειάζεται υποστήριξη από άλλα επίπεδα που έχουν τον έλεγχο των πόρων. Για τη δέσμευση των απαραίτητων πόρων, το RTP μπορεί να βασίζεται για παράδειγμα στο RSVP.
- Το RTP δεν υποθέτει τίποτα για το δίκτυο, εκτός από το γεγονός ότι το δίκτυο παρέχει δυνατότητα μετάδοση πακέτων δεδομένων. Το RTP "τρέχει" πάνω από το UDP, αλλά έχουν γίνει προσπάθειες ώστε να γίνει συμβατό και με άλλα πρωτόκολλα.
- Δεν παρέχει κανενός είδους αξιοπιστία. Υποστηρίζει χρονοσημάνσεις και αριθμούς ακολουθίας. Παρέχει υποστήριξη για έλεγχο ροής και συμφόρησης, αλλά η υλοποίηση τους αφήνεται αποκλειστικά στην εφαρμογή.
- Το RTP δε μπορεί να θεωρηθεί ολοκληρωμένο, αλλά είναι ανοικτό στην εισαγωγή νέων δυνατοτήτων και νέου λογισμικού πολυμέσων.
- Το RTP/RTCP παρέχει λειτουργικότητα και μηχανισμούς ελέγχου για τη μεταφορά δεδομένων πραγματικού χρόνου. Δεν είναι όμως υπεύθυνο για τις δραστηριότητες υψηλότερου επιπέδου, όπως ο συγχρονισμός, οι οποίες γίνονται στο επίπεδο της εφαρμογής.
- Οι πληροφορίες σχετικά με τον έλεγχο ροής και συμφόρησης στο RTP παρέχεται από τις RTCP αναφορές αποστολέα και παραλήπτη.

2.2 ΔΕΣΜΕΥΣΗ ΠΟΡΩΝ – ΠΑΡΟΧΗ ΕΓΓΥΗΣΕΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

Η παροχή ποιότητας υπηρεσίας στο Διαδίκτυο είναι ένα σημαντικό και ένα πολυσύνθετο ζήτημα, που αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας τα τελευταία χρόνια. Ένας τυπικός ορισμός για την έννοια της ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) είναι: Η ικανότητα ενός στοιχείου του δικτύου να παρέχει ένα επίπεδο διαβεβαίωσης (εγγύησης) σε ένα υποσύνολο κίνησης ότι οι απαιτήσεις υπηρεσίας της μπορεί να επιτευχθούν με συγκεκριμένη (πολύ μεγάλη) πιθανότητα. Ουσιαστικά οι μηχανισμοί της ποιότητας υπηρεσίας δεν παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα στο δίκτυο ή κάτι παρόμοιο, αλλά απλώς κάνουν καλύτερη διαχείριση του δικτύου ώστε να χρησιμοποιείται πιο αποδοτικά και σύμφωνα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Έχουν προταθεί δύο αρχιτεκτονικές για την παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας στο Διαδίκτυο:

- Η αρχιτεκτονική Integrated Service (IntServ) [8]: Η λογική της αρχιτεκτονικής αυτής είναι η δέσμευση πόρων, όπου οι πόροι του δικτύου

διατίθενται με βάση τις ανάγκες των εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα για κάθε πελάτη που επιθυμεί κάποιο επίπεδο ποιότητα εξυπηρέτησης γίνεται στο δίκτυο κράτηση πόρων ώστε να εξυπηρετούνται οι εφαρμογές του.

- Η αρχιτεκτονική Differentiated Service (DiffServ) [9]: Η αρχιτεκτονική αυτή βασίζεται στη διαδικασία παροχής προτεραιότητας σε ορισμένα πακέτα (differentiated service). Η κίνηση του δικτύου διαχωρίζεται και οι πόροι διανέμονται δίκαια με βάση τα κριτήρια αστυνόμευσης και διαχείρισης του εύρους ζώνης. Προκείμενου να επιτευχθεί ποιότητα στην υπηρεσία, οι διαχωρισμοί (classifications) που έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις απολαμβάνουν προνομιακή μεταχείριση από το δίκτυο.

Στην συνέχεια παρουσιάζουμε αναλυτικότερα τις δύο παραπάνω αρχιτεκτονικές.

2.2.1 Η Αρχιτεκτονική Integrated Service (IntServ)

Ο οργανισμός Internet Engineering Task Force (IETF), ανταποκρινόμενος στην απαίτηση για ανάπτυξη ολοκληρωμένων υπηρεσιών στο Διαδίκτυο, προχώρησε στην ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών (Integrated Services (IS) architecture ή εν συντομία IntServ). Η αρχιτεκτονική IntServ σχεδιάστηκε αρχικά για να παρέχει ένα σύνολο προεκτάσεων στο παραδοσιακό μοντέλο μετάδοσης "καλύτερης προσπάθειας" (best effort) του Διαδικτύου. Στόχος της ήταν να παρέχει κάποια ιδιαίτερη μεταχείριση σε ορισμένους τύπους κυκλοφορίας / κίνησης και να παρέχει ένα μηχανισμό στις εφαρμογές ώστε αυτές να έχουν τη δυνατότητα να επιλέξουν ανάμεσα σε πολλά επίπεδα υπηρεσιών μετάδοσης για την κυκλοφορία / κίνηση τους.

Η βασική ιδέα της αρχιτεκτονικής IntServ είναι ότι δεν απαιτείται να τροποποιηθεί η βασική υποκείμενη αρχιτεκτονική του Διαδικτύου, αλλά αρκεί να προστεθούν κάποιες προεκτάσεις που θα παρέχουν υπηρεσίες πέρα από την παραδοσιακή υπηρεσία "καλύτερης προσπάθειας" (best effort). Η ομάδα εργασίας του μοντέλου IntServ έχει εστιάσει στους εξής στόχους:

- Στον ξεκάθαρο καθορισμό των υπηρεσιών που θα παρέχονται. Δηλαδή στον καθορισμό και την τεκμηρίωση αυτού του νέου και βελτιωμένου μοντέλου υπηρεσιών του Διαδικτύου.
- Στον καθορισμό των υπηρεσιών στο επίπεδο της εφαρμογής, του χρονοπρογραμματισμού των δρομολογητών του Διαδικτύου σχετικά με την δέσμευση των δικτυακών πόρων, και των διασυνδέσεων των δρομολογητών μεταξύ τους (Link Layer).
- Στην ανάπτυξη απαιτήσεων εγκυρότητας στους δρομολογητές του Διαδικτύου για να εξασφαλίζεται η παροχή της κατάλληλης υπηρεσίας. Το Διαδίκτυο θα συνεχίσει να περιέχει ένα ετερογενές σύνολο δρομολογητών, να τρέχει διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης και να χρησιμοποιεί διαφορετικούς αλγορίθμους δρομολόγησης. Για αυτό η ομάδα εργασίας πρέπει να θέσει κάποιες απαιτήσεις στους δρομολογητές που θα εξασφαλίζουν ότι το Διαδίκτυο μπορεί να υποστηρίξει το νέο μοντέλο υπηρεσιών.

Ο όρος εγγύηση ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) στο περιβάλλον του IntServ αναφέρεται στη φύση της υπηρεσίας μετάδοσης πακέτων που παρέχεται από το δίκτυο, όπως αυτή χαρακτηρίζεται από παραμέτρους όπως το εύρος ζώνης, η καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων και ο ρυθμός απώλειας πακέτων. Κόμβος του

δικτύου θεωρείται κάθε συνιστώσα του δικτύου που χειρίζεται πακέτα δεδομένων και έχει τη δυνατότητα επιβολής ελέγχου ποιότητας υπηρεσίας στα δεδομένα που ρέουν διαμέσου της. Στους κόμβους συμπεριλαμβάνονται οι δρομολογητές, τα τελικά συστήματα και τα υποδίκτυα. Ένας IntServ - capable κόμβος είναι ένας κόμβος του δικτύου που μπορεί να παρέχει μία ή περισσότερες υπηρεσίες του μοντέλου IntServ. Ένας IntServ - aware κόμβος είναι ένας κόμβος του δικτύου που υποστηρίζει τις συγκεκριμένες διασυνδέσεις που απαιτούνται από το μοντέλο αλλά που δε μπορεί να παρέχει τη ζητούμενη υπηρεσία. Παρόλο που ένας IntServ - aware κόμβος δε μπορεί να παρέχει καμία από τις υπηρεσίες QoS, μπορεί απλά να κατανοεί τις παραμέτρους της ζητούμενης υπηρεσίας και να απαντάει αρνητικά σε αυτές τις αιτήσεις.

Σημαντικό ρόλο στο μοντέλο IntServ παίζει η έννοια του ελέγχου των πόρων. Οι πόροι του δικτύου (π.χ. εύρος ζώνης) πρέπει να ελέγχονται ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο ποιότητα υπηρεσίας. Μια θεμελιώδης αρχή του μοντέλου IntServ είναι ότι η κυκλοφορία που διαχειρίζεται από αυτό το μοντέλο πρέπει να υπόκειται σε μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής. Επίσης, εκτός από τον έλεγχο αποδοχής, το μοντέλο IntServ φροντίζει για ένα μηχανισμό δέσμευσης πόρων. Οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου δε μπορούν να ικανοποιηθούν χωρίς εγγυήσεις πόρων, και οι εγγυήσεις πόρων δε μπορούν να γίνουν χωρίς δέσμευση πόρων. Για την υλοποίηση αυτού του μηχανισμού δέσμευσης πόρων χρησιμοποιείται ένα πρωτόκολλο, όπως το RSVP. Σκοπός του πρωτοκόλλου αυτού είναι να αποτελεί το μέσο καθορισμού των πόρων του δικτύου που απαιτούνται για την επίτευξη της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσίας. Η λογική του RSVP είναι πως πρέπει κατά μήκος όλης της διαδρομής που ακολουθούν τα πακέτα, να γίνουν δεσμεύσεις πόρων σύμφωνα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Η διαδικασία δέσμευσης πόρων είναι ακολουθιακή και ο πρώτος δρομολογητής στέλνει κατάλληλο μήνυμα στον επόμενο όπου ζητά δέσμευση πόρων. Η διαδικασία αυτή εξελίσσεται μέχρι να φτάσει στον παραλήπτη, ο οποίος τότε στέλνει στην αντίθετη διαδρομή επιβεβαιώσεις κράτησης. Οι IntServ υπηρεσίες που έχουν προταθεί έως σήμερα είναι η Guaranteed, που είναι η πλησιέστερη δυνατή στα αφιερωμένα ιδεατά κυκλώματα (dedicated virtual circuits) και η Controlled Load που είναι ισοδύναμη με την υπηρεσία καλύτερης προσπάθειας σε συνθήκες έλλειψης φόρτου.

2.2.2 Η Αρχιτεκτονική Differentiated Service (IntServ)

Το μοντέλο DiffServ αποτελεί τη δεύτερη σημαντική προσπάθεια για την παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας (QoS) στο Διαδίκτυο. Η πρώτη προσπάθεια (IntServ) εμφάνισε αρκετά μειονεκτήματα με κυριότερο αυτό της μη επεκτασιμότητας σε μεγάλα δίκτυα. Ο σκοπός της ομάδας εργασίας DiffServ ήταν να ορίσει το DS πεδίο στην επικεφαλίδα των IP πακέτων, αντικαθιστώντας το πεδίο TOS (στο IPv4) ή το πεδίο Traffic Class (στο IPv6) [14].

Οι DiffServ υπηρεσίες χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι παρέχονται προς μια κατεύθυνση (unidirectional) και άρα είναι μη συμμετρικές. Η αρχιτεκτονική DiffServ μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για unicast μετάδοση και το μοντέλο δε μπορεί ακόμα να υποστηρίξει multicast μετάδοση.

Περιληπτικά η λειτουργία του μοντέλου έχει ως εξής: Οι πελάτες ζητούν ένα συγκεκριμένο επίπεδο υπηρεσίας, μαρκάροντας το DS πεδίο του κάθε πακέτου με μια συγκεκριμένη τιμή. Η τιμή αυτή προσδιορίζει την ανά κόμβο συμπεριφορά του

δικτύου (Per - Hop Behavior, PHB) ως προς το πακέτο. Οι τιμές του DS πεδίου είναι μέσα στα πλαίσια της συμφωνίας ανάμεσα στον πάροχο και στον πελάτη (Service Level Agreement, SLA) και ορίζουν τις παραμέτρους του επιπέδου υπηρεσίας, όπως ο ρυθμός μετάδοσης, η προτεραιότητα μετάδοσης και απόρριψης, η εξυπηρέτηση στην ουρά κ.α.

Η αρχιτεκτονική DiffServ αποτελεί το πιο δυναμικό σημείο για την παροχή υπηρεσιών QoS. Η λογική της είναι να αναγνωρίζει κάποιες ροές πακέτων και να τις διαχειρίζεται προνομιακά έναντι των υπολοίπων. Γενικά έχουν προταθεί δύο είδη DiffServ υπηρεσιών (per hop behaviors) που περιγράφονται παρακάτω. Με τον όρο per hop behavior καλείται η "συμπεριφορά προώθησης" (forwarding behavior) που εφαρμόζεται στα πακέτα σε κάθε κόμβο του DiffServ domain.

- Expedited Forwarding (EF). Σε αυτή την κατηγορία υπηρεσιών στόχο αποτελεί η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης και της διακύμανσης καθυστέρησης ενώ παράλληλα στοχεύει ώστε να παρέχει ποιότητα υπηρεσίας στον υψηλότερο βαθμό. Τα πακέτα που υπερβαίνουν το προφίλ της κίνησης που έχει συμφωνηθεί ότι θα εισάγει ο χρήστης (στο SLA που υπογράφηκε) απορρίπτονται. Γενικά οι υπηρεσίες αυτές της κατηγορίες εξομοιώνουν τη λειτουργία μιας εικονικής μισθωμένης γραμμής.
- Assured Forwarding (AF). Η κατηγορία αυτή διαθέτει το πολύ 4 κλάσεις εξυπηρέτησης και το πολύ τρία επίπεδα απόρριψης για κάθε κλάση. Η AF κίνηση που υπερβαίνει τα χαρακτηριστικά διανέμεται με όχι τόσο μεγάλη πιθανότητα όσο η εντός προφίλ κίνηση, γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί να υποβιβάζεται αλλά δεν σημαίνει απαραίτητα ότι απορρίπτεται.

Η λειτουργία της DiffServ Αρχιτεκτονικής βασίζεται σε μια σειρά από μηχανισμούς οι οποίοι ενεργούν πάνω στις ροές και αναλυτικά είναι οι ακόλουθοι.

- Ταξινόμηση των πακέτων (packet classification). Ο μηχανισμός αυτός ταξινομεί τα πακέτα που φτάνουν σε ένα κόμβο σε ροές ή συνενώσεις ροών ώστε στη συνέχεια αυτά να εξυπηρετηθούν κατάλληλα. Η ταξινόμηση γίνεται με βάση την "behavior aggregate" ταξινόμηση που πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μια οκτάδα από bits που υπάρχει την επικεφαλίδα των IPv4 πακέτων και η οποία ονομάζεται Type of Service (ToS). Σε αυτή, τα τρία πρώτα ψηφία δηλώνουν την προτεραιότητα κάθε πακέτου και συνεπώς υπάρχουν οκτώ διαφορετικές κλάσεις προτεραιότητας. Επίσης, στο ToS τα έξι πιο σημαντικά bits αναπαριστούν το DiffServ Code Point το οποίο ουσιαστικά δημιουργεί 64 δυνατές συνδυασμούς για τη διαχείριση ουρών και χρονοδρομολόγησης των IP πακέτων. Τέλος να αναφέρουμε πως αντίστοιχο πεδίο έχει οριστεί και για το πρωτόκολλο IPv6.
- Μαρκάρισμα (marking) των πακέτων. Με το μηχανισμό αυτό τα πακέτα μαρκάρονται ανάλογα με την κλάση στην οποία ανήκουν (προέκυψε από τον προηγούμενο μηχανισμό) είτε με βάση άλλα κριτήρια όπως τα χαρακτηριστικά της κίνησης που παρουσιάζουν κ.λ.π.
- Μέτρηση (metering) της κίνησης. Στην προκειμένη περίπτωση ο μηχανισμός αυτός ελέγχει το προφίλ της κίνησης που δέχεται και το συγκρίνει με το προσυμφωνηθέν προφίλ κίνησης όπως προκύπτει από το SLA που έχει υπογράψει με τον διαχειριστή του δικτύου. Στη συνέχεια ο μηχανισμός αυτός διαχωρίζει τα πακέτα σε έναν αριθμό κατηγοριών (ανάλογα αν βρίσκονται στα νόμιμα πλαίσια ή όχι). Ο αριθμός των κατηγοριών αυτών εξαρτάται από τη

συμφωνία που έχει γίνει με το δίκτυο όπου επίσης καθορίζεται η μεταχείριση που θα έχουν τα πακέτα όλων των κατηγοριών. Στην περίπτωση αυτή συνήθως χρησιμοποιείται ο γνωστός μηχανισμός token bucket [15].

- Μηχανισμός μορφοποίησης (shaping) της κίνησης όπου τροποποιούνται τα χαρακτηριστικά της κίνησης που έλαβε ο κόμβος. Επίσης αντί του μηχανισμού αυτού μπορεί να υπάρχει μηχανισμός απόρριψης (dropping) των πακέτων. Ο πιο γνωστός μηχανισμός που εφαρμόζεται για shaping είναι ο leaky bucket.

Προκειμένου να υλοποιηθούν υπηρεσίες παροχής ποιότητας υπηρεσίας απαιτείται η σωστή χρήση των μηχανισμών διαχείρισης των ουρών και χρονοδρόμολογησης. Η λειτουργία του μηχανισμού διαχείρισης ουρών είναι να εισάγει τα πακέτα στην σωστή ουρά, να τα απορρίπτει αν η ουρά είναι γεμάτη καθώς και να ειδοποιεί για συμφόρηση (μέσω του ECN ή των μηχανισμών RED και WRED). Ο επόμενος πιο σημαντικός μηχανισμός είναι η χρονοδρομολόγηση που ο ρόλος της είναι να καθορίζει πως χειρίζεται το δίκτυο τις ουρές. Οι πιο γνωστοί μηχανισμοί είναι ο FIFO, Priority Queuing, Round Robin, Class Based Weighted fair Queueing, Weighted Round Robin και τέλος ο Modified Deficit Round Robin που είναι ο πιο σύγχρονος και πιο αποδοτικός.

Οι υπηρεσίες που έχουν προταθεί και υλοποιηθεί γενικά με βάση την DiffServ αρχιτεκτονική είναι αρκετές. Αρχικά, η IP - Premium, που ανήκει στην κατηγορία των EF - based (EF - PHB) υπηρεσιών και στόχο έχει την παροχή εγγυημένου εύρους ζώνης και διακύμανσης καθυστέρησης. Η δεύτερη υπηρεσία είναι η Gold που επίσης ανήκει στην κατηγορία υπηρεσιών που έχουν ως στόχο να εξομοιώσουν μια εικονική μισθωμένη γραμμή με βάση την Expedited Forwarding Per - Hop - Behavior (EF PHB). Γενικά η Gold απευθύνεται, όπως όλες οι EF - based υπηρεσίες, σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου ευαίσθητες στην καθυστέρηση, στην διακύμανση καθυστέρησης ή / και τις απώλειες πακέτων. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι οι Voice - over - IP, streaming βίντεο, H.323 εφαρμογές κλπ. Η επόμενη υπηρεσία είναι η υπηρεσία relative που ανήκει στις AF - based (AF - PHB) υπηρεσίες. Στόχος είναι να εξασφαλίσει την εξυπηρέτηση των πακέτων μιας ροής η οποία συμμορφώνεται σε ένα συμφωνηθέντα ρυθμό με πολύ μεγάλη πιθανότητα (μικρή πιθανότητα απόρριψης), ενώ υποστηρίζει την κίνηση που ξεφεύγει από το συμφωνηθέν προφίλ με μικρότερη πιθανότητα εξυπηρέτησης των πακέτων. Τέλος, έχει δοκιμαστεί και η υπηρεσία «less than best effort» που επίσης ανήκει στις AF - PHB based υπηρεσίες και απευθύνεται σε εφαρμογές που μπορούν να δεχτούν ποιότητα εξυπηρέτησης χειρότερη από την best effort, όπως FTP mirroring, grid data transfer, network backups, experimental data transfer.

2.2.3 Σύγκριση της Δέσμευσης Πόρων με την Προσαρμογή της Μετάδοσης

Η σύγκριση της δέσμευσης πόρων με την προσαρμογή της μετάδοσης έχει απασχολήσει σημαντικά την ερευνητική κοινότητα με υποστηριχτές και των δύο απόψεων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της δέσμευσης πόρων και της προσαρμογής της μετάδοσης.

Το βασικό πλεονέκτημα των μηχανισμών δέσμευσης πόρων στο Διαδίκτυο είναι ότι παρέχουν συγκεκριμένες εγγυήσεις ποιότητας στις εφαρμογές. Το βασικό μειονέκτημα των μηχανισμών δέσμευσης πόρων στο Διαδίκτυο είναι ότι αυξάνουν

την πολυπλοκότητα του δικτύου λόγω του ότι εισάγουν επεκτάσεις στους δρομολογητές για την δέσμευση των πόρων και την τυχών χρέωση των χρηστών. Επιπλέον λόγω του ελέγχου πρόσβασης (Admission Control) που πρέπει να υλοποιηθεί στο δίκτυο μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα περιορισμού πρόσβασης κάποιον χρηστών στο δίκτυο κατά την διάρκεια περιόδων υψηλής κίνησης. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει στην δυσαρέσκεια των χρηστών.

Το βασικό πλεονέκτημα των μηχανισμών προσαρμογής της μετάδοσης πολυμεσικών δεδομένων με την χρήση ελέγχου ροής και συμφόρησης από άκρο σε άκρο είναι ότι δεν απαιτούν αλλαγές στο δίκτυο και λειτουργούν αποκλειστικά στα τελικά συστήματα. Οι μηχανισμοί αυτοί στοχεύουν στο να αυξάνουν την ποιότητα της μετάδοσης με το να προσαρμόζουν τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων με στόχο να μειωθούν οι απώλειες πακέτων και να αυξηθεί η χρησιμοποίηση του δικτύου συνολικά ώστε να ωφεληθούν οι εφαρμογές που μεταδίδουν δεδομένα στο δίκτυο. Κατά συνέπεια με κόστος μια μικρή πτώση της ποιότητας των πολυμέσων τα οποία λαμβάνει ο τελικός χρήστης, η εφαρμογή μπορεί να προσαρμόσει το εύρος ζώνης το οποίο καταναλώνει δεδομένης την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Ειδικότερα για την μετάδοση πολυμέσων μελέτες έχουν δείξει πως η ποιότητα απεικόνισης στον τελικό χρήστη μιας ροής δεδομένων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης με λίγες απώλειες πακέτων είναι καλύτερη σε σχέση με μια ροή δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης με πολλές απώλειες πακέτων. Επιπλέον οι μηχανισμοί προσαρμογής της μετάδοσης πολυμεσικών δεδομένων συμπεριφέρονται καλύτερα σε περιβάλλοντα όπου οι πόροι του δικτύου μεταβάλλονται συχνά, γεγονός που ευνοεί σημαντικά τις εφαρμογές πολυμέσων οι συνδέσεις των οποίων συνήθως κρατούν μεγάλο χρονικό διάστημα. Αντίθετα οι μηχανισμοί δέσμευσης θα πρέπει να διαπραγματευτούν ξανά του όρους της δέσμευσης πόρων σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο δικτυακό περιβάλλον. Επιπλέον η δέσμευση πόρων μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο οι εφαρμογές που έχουν δεσμεύσει δικτυακούς πόρους να μην τους χρησιμοποιούν για κάποιο λόγο και αυτοί οι δικτυακοί πόροι να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλες εφαρμογές που έχουν την δυνατότητα να τους χρησιμοποιήσουν.

2.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δημιουργία του Διαδικτύου το οποίο απλώνεται διαρκώς και με ραγδαίους ρυθμούς σε όλες τις δραστηριότητες αποτελεί πλέον φυσική επέκταση του σημερινού περιβάλλοντος εργασίας του ανθρώπου και όχι μόνο. Σε αντίθεση με τα κλασικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα των προηγούμενων δεκαετιών τα οποία χρησιμοποιούσαν τεχνικές μεταγωγής κυκλώματος (circuit switching), το Διαδίκτυο χρησιμοποιεί την τεχνική της μεταγωγής πακέτου (packet switching). Παλιότερα, όλα τα δεδομένα που μεταφέρονταν μέσω δικτύου ήταν συνήθως κείμενα (textual). Σήμερα, με την ανάπτυξη των πολυμεσικών και δικτυακών τεχνολογιών, η πολυμεσική πληροφορία (multimedia) έχει κυριαρχήσει στο Διαδίκτυο. Προκείμενου να υποστηριχθεί η μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας πάνω από το Διαδίκτυο θα πρέπει να παρέχονται στις εφαρμογές πολυμέσων είτε εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας είτε η δυνατότητα προσαρμογής της μετάδοσης των πολυμέσων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ΦΙΛΙΚΟΙ ΠΡΟΣ ΤΟ TCP

ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ΦΙΛΙΚΟΙ ΠΡΟΣ ΤΟ TCP

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφέρουμε αρχικά τα χαρακτηριστικά που έχει ένα δικτυακό μονοπάτι στο Διαδίκτυο. Τα χαρακτηριστικά αυτά όπως το εύρος ζώνης (bandwidth), ο ρυθμός απώλειας πακέτων (packet loss ratio), η διακύμανση της καθυστέρησης (jitter delay) και ο χρόνος διπλής διαδρομής (Round Trip Time – RTT) έχουν ιδιαίτερη σημασία σε όλες τις εφαρμογές του Διαδικτύου και κατά συνέπεια και στις εφαρμογές πολυμέσων. Αυτά τα μετρικά στην ουσία μας καθοδηγούν στη σχεδίαση μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης που θα πρέπει να διακρίνονται εκτός των άλλων και από τη φιλικότητά τους προς το πρωτόκολλο TCP, το οποίο αποτελεί και το πρωτόκολλο μεταφοράς πολύ σημαντικών εφαρμογών του Διαδικτύου.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τους κυριότερους μηχανισμούς ελέγχου συμφόρησης που έχουν σχεδιασθεί κυρίως για τη μεταφορά πληροφορίας πολυμέσων. Οι μηχανισμοί αυτοί είτε έχουν αναγνωρισθεί ως διεθνή πρότυπα από την IETF είτε βρίσκονται στο στάδιο αξιολόγησης και αποτελούν τη ποιο σημαντική συνεισφορά της ερευνητικής κοινότητας στο περιοχή των μηχανισμών συμφόρησης που είναι φιλικοί προς το TCP. Για τη δική μας εργασία οι μηχανισμοί αυτοί έχουν ιδιαίτερη σημασία καθώς τους χρησιμοποιούμε είτε για να αντλήσουμε πολύτιμη εμπειρία για τη σχεδίαση των δικών μας μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης που θα παρουσιάσουμε στα επόμενα κεφάλαια, είτε για να συγκρίνουμε την αποτελεσματικότητα των δικών μας προτάσεων με τους μηχανισμούς αυτούς.

3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΟΣ ΔΙΚΤΥΑΚΟΥ ΜΟΝΟΠΑΤΙΟΥ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

Συνήθως οι μόνες συσκευές οι οποίες έχουν σαφής εικόνα για την κατάσταση και τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου είναι οι δρομολογητές του δικτύου. Δυστυχώς στο Διαδίκτυο σήμερα δεν υπάρχει κάποιος μηχανισμός προκειμένου οι δρομολογητές να μπορούν να ενημερώνουν τις εφαρμογές στα τελικά συστήματα για την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι εφαρμογές στα τελικά συστήματα του Διαδικτύου να πρέπει να εκτιμήσουν από μόνες τους τις τρέχουσες δικτυακές συνθήκες μετρώντας διάφορες παραμέτρους του δικτύου χωρίς να υποστηρίζονται για αυτό τον σκοπό άμεσα από τις δικτυακές συσκευές. Με βάση τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτών οι εφαρμογές μπορούν να εξάγουν συμπεράσματα για την κατάσταση του δικτύου και να προσαρμόσουν ανάλογα την μετάδοση των δεδομένων τους. Οι παράμετροι τις οποίες μπορούν να εκτιμήσουν οι εφαρμογές και βοηθούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την κατάσταση του δικτύου είναι οι παρακάτω:

- Εύρος ζώνης (Bandwidth - BW).
- Ρυθμός απώλειας πακέτων (packet loss ratio - PLR).
- Διακύμανση καθυστέρησης (jitter delay).
- Χρόνος καθυστέρησης μετάδοσης μετά επιστροφής (Round Trip Time - RTT).

Γενικά μπορούμε να πούμε πως η ποιότητα αναπαραγωγής πολυμέσων σε μια εφαρμογή πραγματικού χρόνου εξαρτάται από την απώλεια πακέτων και η διακύμανση της καθυστέρησης (jitter delay ή ποιο απλά jitter). Επίσης όταν παρουσιάζονται τα παραπάνω φαινόμενα αποτελούν ένδειξη πως υπάρχει κάποιο πρόβλημα με την μετάδοση των δεδομένων και αντιστοίχως πρέπει να ληφθούν μέτρα από την εφαρμογή ώστε αυτά τα φαινόμενα και εξαφανιστούν και αν αυτό δεν είναι δυνατόν να περιοριστούν.

Στην συνέχεια αναλύουμε τις παραπάνω παραμέτρους και περιγράφουμε πως αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την κατάσταση του δικτύου.

3.1.1 Εύρος Ζώνης (Bandwidth)

Με τον όρο εύρος ζώνης (bandwidth) αναφερόμαστε στην ποσότητα της πληροφορίας η οποία μπορεί να μεταφερθεί σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (συνήθως ένα δευτερόλεπτο) πάνω από ένα δικτυακό σύνδεσμο. Ένας πιο τεχνικός ορισμός του εύρους ζώνης είναι το εύρος των συχνοτήτων τις οποίες χρησιμοποιεί ένα σήμα σε ένα μέσο μετάδοσης. Κάθε ψηφιακό ή αναλογικό σήμα έχει ένα εύρος ζώνης. Στα ψηφιακά συστήματα το εύρος ζώνης εκφράζεται σε bit δεδομένων ανά δευτερόλεπτο (bit per second - bps). Θα πρέπει να τονίσουμε ότι τα δικτυακά μονοπάτια συνήθως αποτελούνται από μια σειρά από δικτυακούς συνδέσμους που ο καθένας έχει το δικό του εύρος ζώνης. Εάν ένας από αυτούς τους δικτυακούς συνδέσμους είναι σημαντικά αργότερος σε σχέση με τους άλλους τότε θεωρούμε τον δικτυακό αυτό σύνδεσμο ως σημείο συμφόρησης του δικτυακού μονοπατιού ή περιοριστικό σύνδεσμο (bottleneck) γιατί περιορίζει το εύρος ζώνης όλου του δικτυακού μονοπατιού.

3.1.2 Ρυθμός Απώλειας Πακέτων (Packet Loss Ratio)

Ο ρυθμός απώλειας πακέτων ορίζεται ως το κλάσμα των συνολικών πακέτων που για κάποιο λόγο δεν φτάνουν στον παραλήπτη. Σε περίπτωση συμφόρησης στο δίκτυο οι δρομολογητές του δικτύου μπορεί να αρχίσουν να απορρίπτουν πακέτα αντί να τα προωθούν. Οι απώλειες αυτές μπορούν να ανιχνευτούν με αριθμούς ακολουθίας (sequence numbers) που τοποθετούνται στα πακέτα δεδομένων. Ο παραλήπτης μπορεί να υπολογίσει τον ρυθμό απώλειας πακέτων δεδομένων μετρώντας τον αριθμό των πακέτων δεδομένων που χάθηκαν στο δίκτυο με τον αριθμό των πακέτων δεδομένων που μεταδόθηκαν (βάσει του αριθμού ακολουθίας) για ένα χρονικό διάστημα. Πολλές φορές η επιλογή του χρονικού διαστήματος στο οποίο θα γίνει η μέτρηση είναι σημαντική και μπορεί να επηρεάσει του υπολογισμούς. Για αυτόν τον λόγο οι μετρήσεις του ρυθμού απώλειας των πακέτων δεδομένων φιλτράρονται με την χρήση κατάλληλων φίλτρων ώστε να μας δίνουν πιο αξιόπιστες μετρήσεις. Τα πρωτόκολλα RTP / RTCP παρέχουν τον απαραίτητο μηχανισμό ώστε ο παραλήπτης να ενημερώνει τον αποστολέα για τον ρυθμό απώλειας των πακέτων δεδομένων. Στα σημερινά δίκτυα οι απώλειες πακέτων δεδομένων οφείλονται κυρίως σε συμφόρηση του δικτύου και όχι σε λάθη μετάδοσης όπως συνέβαινε παλαιότερα.

3.1.3 Διακύμανση Καθυστέρησης (Jitter Delay)

Γενικά η διακύμανση καθυστέρησης είναι μια έννοια η οποία είναι δύσκολο να ορισθεί. Υπάρχουν ορισμοί της διακύμανσης καθυστέρησης οι οποίοι σχετίζονται με την μέση ή την μέγιστη τιμή της. Ορισμένοι ερευνητές ορίζουν την διακύμανση καθυστέρησης ως την διαφορά ανάμεσα στην μέγιστη και ελάχιστη καθυστέρηση για μια περίοδο χρόνου. Κάποιοι άλλοι ορίζουν την διακύμανση καθυστέρησης ως την μέγιστη καθυστέρηση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά πακέτα για μια περίοδο χρόνου. Σε αυτή την διδακτορική διατριβή, χρησιμοποιούμε για να ορίσουμε την διακύμανση καθυστέρησης το ορισμό που χρησιμοποιείται στην RFC 3550 σύμφωνα με την οποία η διακύμανση καθυστέρησης ορίζεται ως η μέση απόκλιση (σε ομαλοποιημένη (smoothed) απόλυτη τιμή) της διαφοράς D σε χρόνους πακέτων δεδομένων στον παραλήπτη συγκρινόμενη με το αποστολέα για ένα ζεύγος πακέτων. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχέση, ο παραπάνω ορισμός είναι ισοδύναμος με την διαφορά σε σχετικούς χρόνους μετάδοσης για δύο πακέτα (ως σχετικό χρόνο μετάδοσης εννοούμε την διαφορά ανάμεσα στην χρονοσήμανση (timestamp) που φέρει το πακέτο και την τιμή του ρολογιού του παραλήπτη την στιγμή που λαμβάνει το πακέτο). Εάν S_i είναι η χρονοσήμανση του πακέτου i και R_i είναι ο χρόνος που λαμβάνεται το πακέτο, τότε για δύο πακέτα i και j, το D ορίζεται ως εξής:

$$D(i,j) = (R_j - R_i) - (S_j - S_i) = (R_j - S_j) - (R_i - S_i)$$

Εξίσωση 1. Υπολογισμός διαφοράς χρόνου δύο διαδοχικών πακέτων

Η διακύμανση καθυστέρησης θα πρέπει να υπολογίζεται συνεχώς για κάθε πακέτο i το οποίο λαμβάνεται χρησιμοποιώντας την διαφορά D αυτού του πακέτου σε σχέση με το προηγούμενο, βάσει του παρακάτω τύπου:

$$J_i = J_{i-1} + (|D(i-1,j)| - J_{i-1})/16$$

Εξίσωση 2. Υπολογισμός jitter delay

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω τύπο η νέα τιμή της διακύμανσης καθυστέρησης καθορίζεται από την προηγούμενη καθώς επίσης και από τον τρέχον υπολογισμό. Το φαινόμενο της διακύμανσης καθυστέρησης οφείλεται κυρίως στους παρακάτω λόγους:

- Καθυστερήσεις στις ουρές (queues) του δικτύου: Εάν όλα τα πακέτα κατά την κυκλοφορία τους στο δίκτυο συναντούν τις ίδιες ουρές, και τα ίδια μήκη στις ουρές, στο μονοπάτι το οποίο διανύουν, καθυστερούν περίπου τον ίδιο χρόνο, με αποτέλεσμα παρόλο που η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο μπορεί να είναι μεγάλη, να μην υπάρχουν διακυμάνσεις στην καθυστέρηση. Το φαινόμενο της διακύμανσης καθυστέρησης παρουσιάζεται όταν διαδοχικά πακέτα καθυστερούν διαφορετικές χρόνους στις ουρές που συναντούν. Οι διαφορετικές καθυστερήσεις σχετίζονται άμεσα με το μοντέλο εξυπηρέτησης το οποίο χρησιμοποιείται από την ουρά (για παράδειγμα αν το μοντέλο είναι FIFO, RED κλπ.) και την διασταυρωμένη κίνηση (cross traffic) στην ουρά.
- Καθυστερήσεις λόγω του αποστολέα: Συχνά το φαινόμενο της διακύμανσης καθυστέρησης δεν οφείλεται αποκλειστικά σε δικτυακά φαινόμενα αλλά σχετίζεται και με προβλήματα τα οποία οφείλονται στον

αποστολέα. Αυτό συμβαίνει γιατί ο υπολογιστής του αποστολέα δεν συμπεριφέρεται πάντα όπως αναμένουμε, ιδιαίτερα αν αυτός ο υπολογιστής εκτελεί περισσότερες από μια εργασίες ταυτόχρονα. Αν το λογισμικό ή το υλικό το οποίο χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση των πολυμέσων έχει μη αναμενόμενη συμπεριφορά μπορεί να παρουσιαστεί το φαινόμενο της διακύμανσης καθυστέρησης ακόμη και αν δεν υπάρχουν προβλήματα στο δίκτυο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρονοσήμανση η οποία τοποθετείται σε κάθε πακέτο αντιστοιχεί στον χρόνο που η πληροφορία που περιέχει το πακέτο κωδικοποιήθηκε και κατά συνέπεια προσδιορίζει τον χρόνο στον οποίο πρέπει να παρουσιασθεί στην εφαρμογή του παραλήπτη. Επιπλέον αυτή η χρονοσήμανση, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της καθυστέρησης του δικτύου και κατά συνέπεια στον υπολογισμό της διακύμανσης καθυστέρησης. Εάν περάσει αξιοσημείωτος χρόνος από την στιγμή που το πακέτο κωδικοποιήθηκε μέχρι το πακέτο να τοποθετηθεί στο δίκτυο (λόγω του ότι ο επεξεργαστής είναι απασχολημένος με άλλες εργασίες) τότε επηρεάζονται και οι υπολογισμοί της διακύμανσης καθυστέρησης. Αν δεν ληφθεί υπόψη αυτός ο παράγοντας, μπορούμε να οδηγηθούμε σε λάθος συμπεράσματα για την κατάσταση του δικτύου.

Σαν συμπέρασμα μπορούμε να πούμε πως η διακύμανση καθυστέρησης από μόνο της δεν αρκεί για να εξάγουμε συμπεράσματα για την κατάσταση του δικτύου. Κατά συνέπεια η διακύμανση καθυστέρησης θα πρέπει να συνδυάζεται με άλλους παραμέτρους, όπως για παράδειγμα τις απώλειες πακέτων για να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για την κατάσταση του δικτύου.

3.1.4 Χρόνος Διπλής Διαδρομής (Round Trip Time - RTT)

Ο χρόνος καθυστέρησης μετάδοσης μετά επιστροφής RTT αντιπροσωπεύει τον χρόνο που απαιτείται για ένα πακέτο δεδομένων να πάει από ένα τελικό σύστημα σε ένα άλλο και στην συνέχει να επιστρέψει στο αρχικό σύστημα. Ο χρόνος RTT περιλαμβάνει τον χρόνο μετάδοσης του πακέτου στα φυσικά μέσα, τον χρόνο αναμονής και επεξεργασίας στις ουρές των δικτυακών συσκευών και τον χρόνο επεξεργασίας στα τελικά συστήματα. Ο πιο απλός τρόπος για τον υπολογισμό του χρόνου RTT ανάμεσα σε δύο τελικά συστήματα Α και Β είναι να μεταδώσουμε ένα πακέτο από το τελικό σύστημα Α, το οποίο περιέχει τον χρόνο $T_{ΑΠ}$ που μεταδόθηκε (timestamp), στο τελικό σύστημα Β και το τελικό σύστημα Β μόλις λάβει το πακέτο δεδομένων να το επιστρέφει στο τελικό σύστημα Α και το τελικό σύστημα Α να το λαμβάνει την χρονική στιγμή $T_{ΛΗ}$. Σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος RTT μπορεί να υπολογιστεί ως η διαφορά των χρόνων $T_{ΛΗ}$ και $T_{ΑΠ}$:

$$t_{RTT} = T_{ΛΗ} - T_{ΑΠ}$$

Εξίσωση 3. Υπολογισμός χρόνου RTT

Η μέτρηση της καθυστέρησης προς τη μια κατεύθυνση είναι πιο περίπλοκη. Λόγω της πιθανής ασυμμετρίας στις γραμμές του δικτύου που συνδέσουν τα δύο τελικά συστήματα δεν μπορούμε να υπολογίσουμε την καθυστέρηση προς τη μια κατεύθυνση ως το μισό του χρόνου RTT. Για να εκτιμήσουμε την καθυστέρηση προς τη μια κατεύθυνση θα μπορούσε το τελικό σύστημα Α να στείλει ένα πακέτο

δεδομένων με μία χρονοσήμανση (timestamp) $T_{ΑΠ}^{A}$ στο τελικό σύστημα Β και το τελικό σύστημα Β να το παραλάβει την χρονική στιγμή $T_{ΛΗ}^{B}$. Σε αυτή την περίπτωση η καθυστέρηση προς τη μια κατεύθυνση θα μπορούσε να υπολογιστεί ως:

$$t_{oneway} = T_{ΛΗ}^{B} - T_{ΑΠ}^{A}$$

Εξίσωση 4. Υπολογισμός χρόνου μονής διαδρομής

Για να ισχύει ο παραπάνω υπολογισμός θα πρέπει τα τελικά συστήματα να έχουν συγχρονισμένα ρολόγια. Γενικά ο συγχρονισμός των ρολογιών στα δικτυακά περιβάλλοντα δεν είναι απλή διαδικασία και χρησιμοποιούνται είτε πρωτόκολλα (π.χ. Πρωτόκολλο Χρόνου Δικτύου, (Network Time Protocol - NTP) [16]) ή συσκευές GPS (Global Positioning System) [17] που έχουν υψηλό κόστος. Επίσης εκτός από το πρόβλημα του συγχρονισμού υπάρχει και το πρόβλημα του ότι τα ρολόγια μπορεί να τρέχουν με διαφορετική ταχύτητα γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε επιπλέον προβλήματα.

3.2 TCP-FRIENDLY RATE CONTROL (TFRC)

Το TFRC είναι ένας μηχανισμός ελέγχου ροής ο οποίος έχει σχεδιασθεί για τη μετάδοση μιας ροής (unicast) σε δίκτυα μη εγγυημένης ποιότητας όπως το Διαδίκτυο και μοιράζονται το διατιθέμενο εύρος ζώνης με ανταγωνιστικές TCP ροές. Το TFRC δεν αποτελεί ένα πλήρες πρωτόκολλο, αλλά ένα μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ένα πρωτόκολλο μεταφοράς, όπως ο RTP, ή από μία εφαρμογή που είναι δυνατόν να περιλαμβάνει ένα μηχανισμό ελέγχου ροής, στο επίπεδο εφαρμογών.

Το TFRC έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι "εύλογα δίκαιο" όταν ανταγωνίζεται για το διατιθέμενο εύρος ζώνης με TCP ροές. Μια ροή είναι "εύλογα δίκαιη" εάν ο ρυθμός μετάδοσης είναι ο ίδιος ή διπλάσιος από μια TCP ροή κάτω από τις ίδιες συνθήκες του δικτύου. Ωστόσο, το TFRC έχει πολύ μικρότερη διακύμανση του ρυθμού μετάδοσης σε σύγκριση με το TCP, που το καθιστούν περισσότερο κατάλληλο για εφαρμογές, όπως η τηλεφωνία μέσω Διαδικτύου (VoIP) ή οι εφαρμογές πολυμέσων. Η "ποινή" έχοντας μικρότερες διακυμάνσεις στο ρυθμό μετάδοσης είναι ότι το TFRC ανταποκρίνεται βραδύτερα από ότι το TCP στις μεταβολές του δικτύου σε ότι αφορά το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Το TFRC είναι ένας μηχανισμός που βασίζεται στις μετρήσεις του παραλήπτη για τον υπολογισμό της συμφόρησης. Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ καλά προσαρμοσμένη σε εφαρμογές όπου ο αποστολέας καλείται να εξυπηρετήσει είναι ένα μεγάλο αριθμό ταυτόχρονων συνδέσεων, καθόσον ο παραλήπτης έχει μεγαλύτερες δυνατότητες μνήμης συμπεριλαμβανομένων των διαθέσιμων κύκλων του επεξεργαστή (CPU) για υπολογισμούς. Επιπλέον, ένας μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης που βασίζεται στις εκτιμήσεις του παραλήπτη είναι πιο κατάλληλος για να συμπεριληφθεί σε μηχανισμούς ελέγχου συμφόρησης πολλαπλής διανομής (multicast).

3.2.1 Μηχανισμοί του Πρωτοκόλλου

Για τη λειτουργία του μηχανισμού ελέγχου της συμφόρησης, το TFRC χρησιμοποιεί μια εξίσωση ελέγχου που αφορά το μέγιστο ρυθμό εκπομπής, ως συνάρτηση του ρυθμού απώλειας και του χρόνου RTT. Προκειμένου να ανταγωνιστεί ικανοποιητικά με το TCP, το TFRC χρησιμοποιεί την εξίσωση υπολογισμού της ρυθμοαπόδοσης

(throughput) του TCP, η οποία περιγράφει περίπου το ρυθμό μετάδοσης του TCP, ως συνάρτηση του ρυθμού απώλειας, το χρόνο RTT και το μέγεθος του πακέτου.

Γενικότερα οι λειτουργίες του TFRC συνοψίζονται όπως παρακάτω:

- Ο παραλήπτης υπολογίζει το ρυθμό απώλειας πακέτων και τροφοδοτεί τα στοιχεία αυτά στον αποστολέα.
- Ο αποστολέας χρησιμοποιεί επίσης μηνύματα ανατροφοδότησης για τη μέτρηση του χρόνου RTT.
- Οι τιμές του ρυθμού απώλειας και του χρόνου RTT χρησιμοποιούνται από την εξίσωση ρυθμοαπόδοσης του TFRC για τον υπολογισμό του ρυθμού μετάδοσης.
- Ο αποστολέας προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης με βάση το νέο υπολογιζόμενο ρυθμό από το παραλήπτη.

3.2.2 Υπολογισμός Ρυθμού Μετάδοσης

Η εξίσωση υπολογισμού του ρυθμού μετάδοσης του TFRC αποτελεί μια απλουστευμένη διατύπωση της εξίσωσης του TCP Reno [18] και περιγράφεται όπως παρακάτω:

$$X = \frac{s}{R*\sqrt{\frac{2*b*p}{3}} + t_RTO*\left(3*\sqrt{\frac{3*b*p}{8}}\right)*p*\left(1+\left(32*p^2\right)\right)}$$

Εξίσωση 5. Υπολογισμός ρυθμού μετάδοσης του TFRC

όπου, X είναι ρυθμός μετάδοσης (σε bytes/sec), s είναι το μέγεθος του πακέτου σε bytes, p είναι ο ρυθμός απώλειας πακέτων, t_RTO χρόνος κατά τον οποίο πραγματοποιείται η αναμετάδοση ενός πακέτου από το TCP, R είναι ο χρόνος RTT σε seconds και b είναι ο αριθμός των επιβεβαιωμένων ληφθέντων TCP πακέτων. Στην RFC 3448 [2] συνιστώνται οι τιμές $b = 1$ και $t_RTO = 4*R$.

3.2.3 Λειτουργίες του Αποστολέα

Ο αποστολέας μεταδίδει τα πακέτα πληροφορίας στο παραλήπτη με έναν ελεγχόμενο ρυθμό μετάδοσης όπου όταν ο αποστολέας λάβει μια αναφορά κατάστασης από το παραλήπτη τότε προσαρμόζει ανάλογα το ρυθμό μετάδοσης των πακέτων. Εάν ο αποστολέας δεν λάβει μια αναφορά κατάστασης από το παραλήπτη σε χρόνο μεγαλύτερο του $2*R$ τότε μειώνει κατά το ήμισυ το ρυθμό μετάδοσής του.

Οι λειτουργίες του αποστολέα περιγράφονται στη παρακάτω διαδικασία:

- Μέτρηση της μέσης τιμής του μεγέθους των πακέτων.
- Ενέργειες του αποστολέα όταν λάβει ένα μήνυμα κατάστασης από το παραλήπτη.
- Ενέργειες του αποστολέα σε περίπτωση παρέλευσης του χρόνου t_RTO.
- Παρεμπόδιση των ταλαντεύσεων του ρυθμού μετάδοσης.
- Προγραμματισμός της μετάδοσης για συστήματα μη-πραγματικού χρόνου.

3.2.4 Λειτουργίες του Παραλήπτη

Ο παραλήπτης μεταδίδει περιοδικά μηνύματα κατάστασης με ρυθμό ένα μήνυμα κατάστασης σε κάθε χρόνο RTT. Εάν ο αποστολέας μεταδίδει με ρυθμό μετάδοσης μικρότερο του ενός πακέτου σε κάθε χρόνο RTT τότε ο παραλήπτης μεταδίδει ένα μήνυμα κατάστασης για κάθε πακέτο που λαμβάνει. Ο αποστολέας μεταδίδει επίσης ένα μήνυμα κατάστασης σε κάθε περίπτωση που διαπιστώνει ένα γεγονός απώλειας πακέτων.

Οι λειτουργίες του παραλήπτη περιγράφονται στη παρακάτω διαδικασία όταν λάβει ένα πακέτο πληροφορίας:

- Προσθέτει το πακέτο σε μια λίστα, η οποία ονομάζεται "ιστορία πακέτου".
- Εάν η προγενέστερη τιμή του ρυθμού απώλειας p των πακέτων είναι p_{prev} τότε υπολογίζει τη νέα τιμή του p.
- Εάν $p > p_{prev}$ τότε προκαλείται η εκπνοή του χρονομέτρου ανάδρασης και ο παραλήπτης υπολογίζει ένα νέο ρυθμό μετάδοσης με βάση την υπάρχουσα κατάσταση στο δίκτυο.
- Εάν $p < p_{prev}$ τότε ο παραλήπτης δεν εκτελεί καμία ενέργεια.

Περισσότερες λεπτομέρειες για τη λειτουργία του TFRC μπορούν να αναζητηθούν στην RFC 3448 [2].

3.3 TCP-FRIENDLY MULTICAST CONGESTION CONTROL (TFMCC)

Το TFMCC είναι ένας μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης για μετάδοση πολλαπλής εκπομπής (multicast) σε δίκτυα μη εγγυημένης ποιότητας όπως το Διαδίκτυο. Είναι ένας μηχανισμός ελέγχου μια ροής όπου ο ρυθμός μετάδοσης του αποστολέα καθορίζεται από τις μετρήσεις του παραλήπτη με τις μικρότερες δυνατότητες λήψης στην ομάδα πολλαπλής διανομής. Το TFMCC είναι "εύλογα δίκαιο" με τις ανταγωνιστικές TCP ροές διαθέτοντας μηχανισμούς τέτοιους που αποτρέπουν τις μεγάλες διακυμάνσεις του ρυθμού εκπομπής κάνοντας το TFMCC κατάλληλο για εφαρμογές πολυμέσων.

Για να εξυπηρετήσει ένα μεγάλο αριθμό δεκτών το TFMCC διαθέτει μηχανισμούς ελέγχου των μηνυμάτων ανάδρασης από τους δέκτες. Έτσι μόνο επιλεγμένοι δέκτες μεταδίδουν μηνύματα κατάστασης προς το παραλήπτη.

3.3.1 Μηχανισμοί του Πρωτοκόλλου

Το TFMCC επεκτείνει τους βασικούς μηχανισμούς του TFRC από το επίπεδο των συνδέσεων απλής διανομής (unicast) στο επίπεδο των συνδέσεων πολλαπλής διανομής (multicast). Ο ρυθμός μετάδοσης υπολογίζεται με βάση την εξίσωση ρυθμοαπόδοσης του TCP ως συνάρτηση του ρυθμού απώλειας των πακέτων, το χρόνο RTT και το μέγεθος του πακέτου. Έτσι ως αποτέλεσμα της εξίσωσης αυτής ο ρυθμός μετάδοσης είναι φιλικός προς ανταγωνιστικές TCP ροές που μοιράζονται τους ίδιους πόρους του δικτύου. Ο ρυθμός μετάδοσης του TFMCC μεταβάλλεται με βάση τις μετρήσεις του παραλήπτη που υφίσταται τις χειρότερες συνθήκες του δικτύου από

όλους τους υπόλοιπους δέκτες που ανήκουν στην ίδια ομάδα πολλαπλής διανομής. Η απόκριση όμως του TFMCC στις απότομες μεταβολές της κατάστασης του δικτύου είναι μικρότερη από αυτή του TCP. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χαμηλότερη ρυθμοαπόδοση του TFMCC ιδιαίτερη σε δίκτυα με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης.

Γενικότερα οι λειτουργίες του TFMCC συνοψίζονται όπως παρακάτω:

- Κάθε παραλήπτης υπολογίζει το ρυθμό απωλειών πακέτων και το χρόνο RTT με τον αποστολέα.
- Κάθε παραλήπτης υπολογίζει ένα φιλικό προς το TCP ρυθμό μετάδοσης με βάση τις παραπάνω μετρήσεις χρησιμοποιώντας την εξίσωση ρυθμοαπόδοσης του TCP.
- Μόνο σε ένα υποσύνολο από τους δέκτες που ανήκουν στην ίδια ομάδα πολλαπλής διανομής επιτρέπεται η εκπομπή αναφορών κατάστασης μέσω ενός μηχανισμού καταστολής των αναφορών αυτών. Αυτό γίνεται για να αποφθεχθεί η κατάρρευση του αποστολέα συνέπεια του πολύ μεγάλου αριθμού αναφορών κατάστασης από τους δέκτες. Ο μηχανισμός καταστολής εξασφαλίζει ότι δέκτες με χαμηλό ρυθμό λήψης έχουν υψηλή πιθανότητα αποστολής αναφορών.
- Οι δέκτες που επιτρέπεται να εκπέμπουν αναφορές κατάστασης υπολογίζουν ένα φιλικό προς το TCP ρυθμό λήψης καθώς και το χρόνο RTT προς τον αποστολέα.
- Ο αποστολέας επιλέγει με βάση τις αναφορές κατάστασης τον "τρέχοντα περιοριστικό παραλήπτη" (Current Limiting Receiver, CLR). Όταν εμφανισθεί ένας παραλήπτης με χαμηλότερο ρυθμό λήψης τότε αυτός γίνεται ο νέος CLR. Ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνει όταν ο CLR αναφέρει ένα νέο επιθυμητό ρυθμό λήψης μεγαλύτερο από τον τρέχοντα ρυθμό εκπομπής.

3.3.2 Υπολογισμός Ρυθμού Μετάδοσης

Η εξίσωση υπολογισμού του ρυθμού μετάδοσης του TFRC αποτελεί μια απλουστευμένη διατύπωση της εξίσωσης του TCP Reno και περιγράφεται όπως παρακάτω:

$$X = \frac{s}{R * \sqrt{\frac{2 * p}{3}} + \left(12 * \sqrt{\frac{3 * p}{8}}\right) * p * \left(1 + \left(32 * p^2\right)\right)}$$

Εξίσωση 6. Υπολογισμός ρυθμού μετάδοσης του TFMCC

όπου, X είναι ρυθμός μετάδοσης (σε bytes/sec), s είναι το μέγεθος του πακέτου σε bytes, p είναι ο ρυθμός απώλειας πακέτων, και R είναι ο χρόνος RTT σε seconds.

3.3.3 Λειτουργίες του Αποστολέα

Ο αποστολέας μεταδίδει πακέτα πληροφορίας στην ομάδα πολλαπλής διανομής. Κάθε φορά που λαμβάνει μια αναφορά κατάστασης από ένα παραλήπτη ελέγχει εάν πρέπει να αλλάξει τον CLR της ομάδας με βάση την αναφερόμενη τιμή του επιθυμητού ρυθμού λήψης καθώς και το ρυθμό εκπομπής.

Γενικότερα οι κυριότερες λειτουργίες του αποστολέα είναι:

- Η προσαρμογή του ρυθμού εκπομπής.
- Ο έλεγχος των αναφορών λήψης.
- Η βοήθεια προς τους δέκτες ώστε να υπολογίσουν το χρόνο RTT προς τον αποστολέα.

3.3.4 Λειτουργίες του Παραλήπτη

Κάθε παραλήπτης υπολογίζει τις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου (χρόνο RTT, και ρυθμό απώλειας πακέτων) και χρησιμοποιεί τις πληροφορίες αυτές στον υπολογισμό ενός φιλικού προς το TCP ρυθμού λήψης. Ο παραλήπτης αναφέρει τον επιθυμητό αυτό ρυθμό λήψης στον αποστολέα με την αποστολή αναφορών κατάστασης. Επειδή είναι ενδεχόμενο να υπάρχει ένας πολύ μεγάλος αριθμός δεκτών που ανήκουν στην ίδια ομάδα πολλαπλής εκπομπής οι δέκτες δεν εκπέμπουν όλοι ταυτόχρονα τις αναφορές κατάστασης προς τον αποστολέα.

Γενικότερα οι κυριότερες λειτουργίες του παραλήπτη είναι:

- Ο υπολογισμός του ρυθμού απωλειών πακέτων.
- Ο υπολογισμός του χρόνου RTT.
- Ο υπολογισμός του επιθυμητού ρυθμού λήψης.
- Η αποστολή αναφορών κατάστασης προς τον αποστολέα.

Περισσότερες λεπτομέρειες για τη λειτουργία του TFRC μπορούν να αναζητηθούν στην RFC 4654 [1].

3.4 PRAGMATIC GENERAL MULTICAST CONGESTION CONTROL (PGMCC)

Ο μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης PGMCC απευθύνεται σε μετάδοση μιας ροής και αποτελεί μια επέκταση του πρωτοκόλλου Pragmatic Multicast Protocol (PGM) [19]. Το PGMCC χρησιμοποιεί ένα παρόμοιο μηχανισμό ελέγχου ροής με το TCP ο οποίος βασίζεται σε θετικές αναφορές λήψης (ACKs) μεταξύ του αποστολέα και ενός αντιπροσώπου της ομάδας πολλαπλής διανομής. Αυτός ο αντιπρόσωπος (*acker*) είναι ο παραλήπτης με τη χαμηλότερη δυνατότητα λήψης στην ομάδα.

3.4.1 Μηχανισμοί του Πρωτοκόλλου

Ο έλεγχος του ρυθμού μετάδοσης του αποστολέα στο PGMCC ώστε να είναι φιλικός προς το TCP αποτελεί τη κεντρική ιδέα στη σχεδίασή του. Ο αποστολέας προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης με βάση τις αναφορές που λαμβάνει από τον *acker*. Ο αποστολέας υπολογίζει το χρόνο RTT με βάση τον αριθμό ταυτότητας του κάθε πακέτου και όχι με βάση τη χρονοσήμανση του κάθε πακέτου. Αυτό το γεγονός κάνει το PGMCC ανεξάρτητο από συγχρονισμένα ρολόγια μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη. Από την άλλη μεριά όμως ο υπολογισμός του χρόνου RTT για κάθε παραλήπτη είναι "υπολογιστικά ακριβός" και απαιτεί αυξημένες υπολογιστικές δυνατότητες του αποστολέα. Οποιοσδήποτε μηχανισμός καταστολής των αναφορών των δεκτών θα έχει επιπτώσεις στην ορθή λειτουργία του PGMCC. Συνοψίζοντας τα κυριότερα σημεία στη λειτουργία του PGMCC περιγράφονται όπως παρακάτω:

- Ο αποστολέας υπολογίζει το χρόνο RTT στο δικτυακό μονοπάτι με τους δέκτες με βάση τον αριθμό ταυτότητας του κάθε πακέτου.
- Οι δέκτες αποστέλλουν αναφορές κατάστασης (NACKs) προς τον αποστολέα όπου αναφέρουν το ρυθμό απώλειας πακέτων.
- Ο αποστολέας επιλέγει τον *acker* και μιμείται τη συμπεριφορά του TCP μεταξύ αυτού και του *acker*.
- Όποτε απαιτηθεί ο αποστολέας επιλέγει το καινούργιο *acker* με βάση τις NACKs αναφορές κατάστασης.

3.4.2 Επιλογή του Acker

Η επιλογή του *acker* βασίζεται σε αρνητικές αναφορές λήψης (NACKs) οι οποίες πληροφορούν τον αποστολέα για τη τιμή του ρυθμού απώλειας πακέτων όπως αυτή υπολογίζεται από τους δέκτες. Οι NACKs αναφορές αποστέλλονται από όλους τους δέκτες στην ομάδα και ο αποστολέας επιλέγει τον *acker* με το παρακάτω αλγόριθμο:

Δίνοντας τη τιμή της παραμέτρου X_i (π.χ. ρυθμός απώλειας, χρόνος RTT) για το παραλήπτη i, ο αποστολέας υπολογίζει τη ρυθμοαπόδοση $T(X_i)$ έτσι ώστε να καθορίσει το παραλήπτη με τις χαμηλότερες δυνατότητες λήψης, τον *acker*.

$$i : T(X_i) \le T(X_j) \forall j \in \{R\}$$ **Εξίσωση 7. Εύρεση του *acker***

όπου, R είναι το σύνολο των δεκτών στην ομάδα πολλαπλής διανομής.

3.4.3 Υπολογισμός Ρυθμού Μετάδοσης

Το PGMCC χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης ανάμεσα στον αποστολέα και τον *acker* παρόμοιο με αυτό του TCP. Ο αποστολέας ελέγχει ουσιαστικά δύο μεταβλητές. Το μέγεθος του παραθύρου W, και τον αριθμητή των επιβεβαιώσεων λήψης πακέτων T. Και οι δύο μεταβλητές έχουν αρχική τιμή κατά την έναρξη της συνόδου ίση με 1. Το μέγεθος του παραθύρου W μπορεί να μεταφραστεί ως μια εκτίμηση των αριθμών των πακέτων που βρίσκονται στη διαδρομή από το παραλήπτη στον αποστολέα χωρίς όμως να έχουν παραληφθεί ακόμη. Ο αληθινός ρόλος όμως του W είναι ο καθορισμός της ταχύτητας με την οποία το παράθυρο "ανοίγει". Η μεταβλητή T ρυθμίζει τη ταχύτητα δημιουργία των πακέτων. Ποιο συγκεκριμένα οι μεταβλητές W και T ενημερώνονται με το παρακάτω αλγόριθμο:

- Έναρξη συνόδου: $W = 1, T = 1$
- Μετάδοση: $T = T - 1$
- Λήψη ACK: $W = W + 1/W, T = T + 1 + 1/W$
- Ανίχνευση απώλειας πακέτου: $W = W/2$, αγνόησε επόμενες $W/2$ acks

Ο υπολογισμός του ρυθμού μετάδοσης είναι βασισμένος σε μια απλουστευμένη μορφή της εξίσωσης ρυθμοαπόδοσης του TCP, όπως φαίνεται στη παρακάτω εξίσωση:

$$r^i_{tcp} \propto \frac{1}{t^i_{RTT}\sqrt{p^i}}$$

Εξίσωση 8. Υπολογισμός ρυθμοαπόδοσης στο PGMCC

όπου, r^i_{tcp} είναι η εκτίμηση του αποστολέα για το παραλήπτη i (σε bytes/sec), t^i_{RTT} είναι ο χρόνος RTT μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη i, και p^i είναι ο ρυθμός απώλειας πακέτων του παραλήπτη i.

Περισσότερες λεπτομέρειες για τη λειτουργία του PGMCC μπορούν να αναζητηθούν στην εργασία [3].

3.5 SMOOTH MULTICAST CONGESTION CONTROL (SMCC)

Ο μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης SMCC έχει σχεδιασθεί για συνδέσεις πολλαπλής διανομής πολλαπλών σωρευτικών στρωμάτων (layered encoding) και χρησιμοποιεί το TFMCC ως το μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης της ροής του κάθε στρώματος. Επομένως εφόσον ο ρυθμός μετάδοσης της κάθε ροής ελέγχεται από το TFMCC τότε όλες οι ιδιότητες του TFMCC μεταφέρονται αυτόματα σε κάθε μια ροή του SMCC και κυρίως η ιδιότητα που εξασφαλίζει φιλικούς προς το TCP ρυθμούς μετάδοσης. Ο μηχανισμός SMCC συνδυάζει τα οφέλη του TFMCC (ομαλοί ρυθμοί μετάδοσης, φιλικότητα προς το TCP) με τη κλιμάκωση και την ευελιξία που προσφέρει η μετάδοση πολλαπλών στρωμάτων σε ότι αφορά τη μεγαλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του διατιθέμενου εύρου ζώνης του δικτύου. Κάθε παραλήπτης λαμβάνει τόσα στρώματα όσα του επιτρέπεται από την εξίσωση ρυθμοαπόδοσης του TCP και είναι η ίδια εξίσωση που χρησιμοποιείται από το TFMCC. Ο μηχανισμός SMCC δεν προϋποθέτει καμία επιπρόσθετη υποστήριξη από τους δρομολογητές του δικτύου εκτός από τη δυνατότητα δρομολόγησης πολλαπλής διανομής.

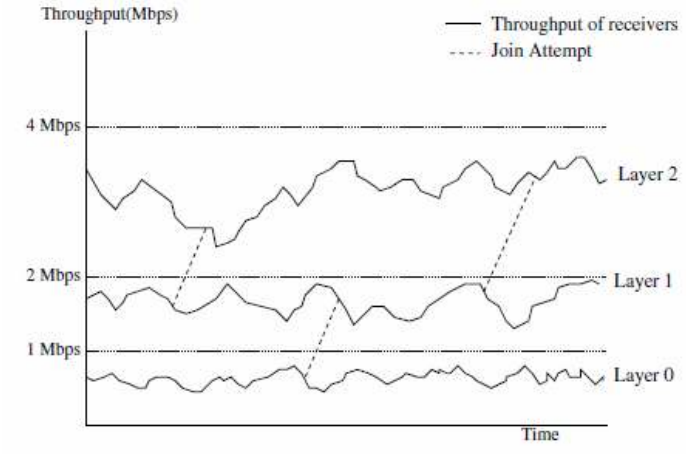
3.5.1 Μηχανισμοί του Πρωτοκόλλου

Το SMCC σε αντίθεση με άλλους μηχανισμούς πολλαπλών σωρευτικών στρωμάτων που χρησιμοποιούν σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης σε κάθε ένα στρώμα, έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης της ροής του κάθε στρώματος.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του SMCC περιγράφονται όπως παρακάτω:

- Κάθε παραλήπτης λαμβάνει ένα σύνολο από σωρευτικά στρώματα πληροφορίας ξεκινώντας από ένα στρώμα με το χαμηλότερο ρυθμό λήψης (βασικό στρώμα) και φθάνοντας στο στρώμα με τον υψηλότερο δυνατό ρυθμό εκπομπής. Ο παραλήπτης χαρακτηρίζεται ως "ενεργός" στη ροή του στρώματος με τον υψηλότερο ρυθμό λήψης ενώ χαρακτηρίζεται ως "παθητικός" σε όλες τις υπόλοιπες ροές των χαμηλότερων σε ρυθμό στρωμάτων.
- Κάθε στρώμα i εκπέμπεται με ρυθμό μετάδοσης που κυμαίνεται σε ένα καθορισμένο διάστημα τιμών και μεταβάλλεται ανάλογα με τις τιμές ρυθμοαπόδοσης του TFMCC.
- Ο τρέχων περιοριστικός παραλήπτης (CLR) της ροής του κάθε στρώματος επιλέγεται ανάμεσα από τους ενεργούς δέκτες του στρώματος αυτού.

- Κάθε παραλήπτης υπολογίζει έναν επιθυμητό ρυθμό λήψης. Εάν ο επιθυμητός ρυθμός λήψης είναι υψηλότερος του ρυθμού μετάδοσης της τρέχουσας ροής του στρώματος τότε ο παραλήπτης προσθέτει το επόμενο στρώμα υψηλότερου ρυθμού.
- Εάν ο υπολογιζόμενος ρυθμός λήψης είναι χαμηλότερος του ρυθμού εκπομπής της τρέχουσας ροής του στρώματος τότε ο παραλήπτης απορρίπτει το στρώμα με τη ροή υψηλότερου ρυθμού.



Σχήμα 2. Στρώματα του SMCC

3.5.2 Δημιουργία Ροών – Current Limited Receiver (CLR)

Στο SMCC κάθε παραλήπτης εκτελεί εγγραφή/διαγραφή σε ένα στρώμα πληροφορίας με μια διαδοχική σειρά. Στο Σχήμα 2 μπορούμε να δούμε πως τα τρία διαφορετικά στρώματα πληροφορίας μεταβάλουν το ρυθμό μετάδοσής τους καθώς και την προσπάθεια του παραλήπτη να ακολουθήσει ή να απορρίψει ένα στρώμα μεγαλύτερου ή χαμηλότερου ρυθμού σε συνδυασμό με τη τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Ο καθορισμός του μέγιστου ρυθμού εκπομπής της ροής του κάθε στρώματος γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο: Εάν B_0 είναι ο μέγιστος ρυθμός εκπομπής της ροής του χαμηλότερου στρώματος (*βασικού στρώματος*) τότε ο ρυθμός μετάδοσης των υπολοίπων στρωμάτων είναι:

$$B_i = 2^i * B_0 \; for \; i \geq 1$$

Εξίσωση 9. Υπολογισμός ρυθμού μετάδοσης στο SMCC

Έτσι λοιπόν ένας παραλήπτης j που έχει επιθυμητό ρυθμό εκπομπής r_j θα πρέπει να λαμβάνει όλες τις ροές του στρώματος i έτσι ώστε $B_i \leq 2r_j$. Ένας παραλήπτης που έχει υπολογίσει τιμές ρυθμοαπόδοσης στη περιοχή $[0, B_0]$ πρέπει πάντα να λαμβάνει τη ροή του βασικού στρώματος L_0.

Επιπρόσθετα είναι δυνατόν κάθε παραλήπτης να ταυτιστεί με το στρώμα στο οποίο είναι ενεργός. Έτσι λοιπόν το στρώμα L_i είναι *υπεύθυνο* για όλους τους δέκτες με ρυθμούς λήψης στη περιοχή $[B_{i-1}, B_i]$. Ισοδύναμα καθορίζεται το επίπεδο εγγραφής

S_j του παραλήπτη j να είναι το υπεύθυνο στρώμα για το παραλήπτη αυτό. Το επίπεδο εγγραφής του παραλήπτη με υπολογιζόμενη ρυθμοαπόδοση x καθορίζεται ως:

$$S_0 = \left\lceil \log_2 \frac{x}{B_0} \right\rceil$$

Εξίσωση 10. Καθορισμός επιπέδου εγγραφής στο SMCC

Για παράδειγμα, ένας παραλήπτης με αναμενόμενη ρυθμοαπόδοση 6 Mbps όπου $B_0 = 1$ Mbps έχει επίπεδο εγγραφής 3 (εκτελεί εγγραφή στα στρώματα L_0, L_1, L_2 και L_3 και το L_3 είναι υπεύθυνο για αυτό το παραλήπτη. Σε κάθε χρονική στιγμή υπάρχει ένας και μόνο ένας τρέχων περιοριστικό παραλήπτης (C_i) ανά στρώμα i και είναι ο ενεργός παραλήπτης j που έχει τη χαμηλότερη τιμή της αναμενόμενης ρυθμοαπόδοσης στη περιοχή $\left[B_{i-1}, B_i\right]$.

3.5.3 Δυναμική Προσαρμογή Ρυθμού Μετάδοσης

Ο αποστολέας προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης του βασικού στρώματος L_0 βασιζόμενος στις αναφορές κατάστασης του περιοριστικού παραλήπτη C_0. Οι υπόλοιποι δέκτες του βασικού στρώματος δεν στέλνουν αναφορές κατάστασης εκτός εάν υπολογίσουν τιμές ρυθμοαπόδοσης μικρότερες της ρυθμοαπόδοσης R_0 του περιοριστικού παραλήπτη.

Οι δέκτες με τιμές ρυθμοαπόδοσης στη κλίμακα $\left[B_0, 2B_0\right]$ εκτελούν εγγραφή στα στρώματα L_0 και L_1. Εάν T_1 είναι η συνολική τιμή της ρυθμοαπόδοσης που υπολογίζεται από το τρέχοντα περιοριστικό σύνδεσμο στο στρώμα L_1 τότε ο ρυθμός εκπομπής R_1 στο στρώμα 1 υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ του T_1 και του R_0. Γενικότερα η ίδια αρχή χρησιμοποιείται για να υπολογισθεί ο ρυθμός εκπομπής R_i για το στρώμα i:

$$R_i = T_i - \sum_{j=0}^{i-1} R_j$$

Εξίσωση 11. Καθορισμός ρυθμού εκπομπής στρώματος i

όπου T_i είναι ο συνολικός επιθυμητός ρυθμός λήψης του παραλήπτη C_i. Επομένως ο ρυθμός μετάδοσης R_i του στρώματος i κυμαίνεται μεταξύ των παρακάτω ορίων:

$$\forall i : 0 \le R_i < B_i - B_{i-2}$$

Εξίσωση 12. Όρια διακύμανσης ρυθμού εκπομπής του στρώματος i

3.5.4 Αποφυγή Αυξομειώσεων του Ρυθμού Μετάδοσης

Το SMCC αντιμετωπίζει τις απότομες αυξομειώσεις που σχετίζονται με τον υπολογισμό της ρυθμοαπόδοσης από τους δέκτες ως εξής: Κάθε παραλήπτης επιτρέπεται να κάνει εγγραφή στο επόμενο στρώμα υψηλότερου ρυθμού L_{i+1} εάν η

τιμή της ρυθμοαπόδοσης για το παραλήπτη αυτό είναι στη κλίμακα $\left[\alpha \bullet \mathrm{B}_{t}, \mathrm{B}_{t+1}\right]$ με ένα συντελεστή απόσβεσης α έτσι ώστε $1 < \alpha < 2$. Η τιμή του συντελεστή απόσβεσης καθορίζεται να είναι $\alpha = 1.2$.

Περισσότερες λεπτομέρειες για τη λειτουργία του SMCC μπορούν να αναζητηθούν στην εργασία [5].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ (CROSS LAYER) ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΓΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ (CROSS LAYER) ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΓΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζουμε τα θέματα τα οποία αφορούν στη διαστρωματική προσαρμογή (cross layer adaptation) για τη μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας στα ασύρματα δίκτυα.

Καθώς οι ασύρματες επικοινωνίες καταλαμβάνουν με τη πάροδο του χρόνο κεντρική θέση στην έρευνα και την ανάπτυξη, η καταλληλότητα των γνωστών πρακτικών βελτίωσης που βασίζεται στη βελτιστοποίηση της απόδοσης μιας εφαρμογής στη βάση του μοντέλου του OSI τίθεται κάτω από λεπτομερέστερη διερεύνηση. Αν και οι αρχιτεκτονικές βελτίωσης της απόδοσης του μοντέλου του OSI έχουν παρουσιάσει πολύ καλά αποτελέσματα στα ενσύρματα δίκτυα κρίνονται ότι δεν είναι και οι πλέον κατάλληλες για την βελτιστοποίηση της απόδοσης των ασυρμάτων δικτύων. Για να αποτυπωθεί καλύτερα η θέση αυτή η ερευνητική κοινότητα αναφέρεται μια νέα φιλοσοφία βελτιστοποίησης που ονομάζεται διεθνώς ως "*cross layer adaptation*". Γενικότερα, η διαστρωματική (cross layer) σχεδίαση αναφέρεται στη μελέτη των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των πρωτοκόλλων των διαφόρων στρωμάτων του OSI, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός συστήματος.

4.1 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Η διαστρωματική σχεδίαση αποτελεί μια προσαρμογή με μεγάλες προκλήσεις εξαιτίας του συνδυασμού πολλών παραμέτρων οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αυτή η παράγραφος περιγράφει τις πιο σημαντικές από τις παραμέτρους αυτές καθώς και τους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν επιχειρείται η βελτιστοποίηση της απόδοσης στα ασύρματα δίκτυα μέσω της διαστρωματικής προσαρμογής.

4.1.1 Τα Στοιχεία του Δικτύου που Λαμβάνουν Μέρος στη Διαστρωματική Σχεδίαση

Στη μετάδοση των πολυμέσων μπορούμε να αναγνωρίσουμε τρία βασικά στοιχεία που λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία μεταφοράς της πληροφορίας. Αυτά είναι ο "αποστολέας", το "δίκτυο" (ζεύξεις, δρομολογητές) και ο "παραλήπτης". Ο όρος αποστολέας περιλαμβάνει είτε έναν εξυπηρετητή είτε ένα ανταποκριτή, ο οποίος συμμετέχει στην ανταλλαγή πολυμεσικής πληροφορίας με έναν άλλο απομακρυσμένο παραλήπτη. Υπάρχουν διάφορες απόψεις για τον εάν πρέπει να συμμετέχουν και τα τρία αυτά στοιχεία σε μια διαδικασία διαστρωματικής προσαρμογής με σκοπό την υψηλότερη ποιότητα υπηρεσιών που προσφέρεται τελικά στο χρήστη. Η μεγαλύτερη πρόκληση και ίσως η ποιο αποτελεσματική προσέγγιση θα ήταν η συμμετοχή και των τριών στοιχείων της επικοινωνία (αποστολέας, δίκτυο, παραλήπτης), ειδικότερα όταν η πολυμεσική πληροφορία μεταφέρεται μέσω διαφορετικών δικτύων. Παρόλα αυτά ακόμα και στο ίδιο δίκτυο που βρίσκεται κάτω από ελεγχόμενη από εμάς διαχείριση μπορεί να τεθεί το ερώτημα εάν θα πρέπει μόνο ο αποστολέας ή μόνο ο παραλήπτης ή

και οι δύο να συμμετέχουν στη διαστρωματική προσαρμογή. Κάποιος θα συμφωνούσε ότι η πολυπλοκότητα της διαδικασίας αυτής αυξάνεται όταν η πολυμεσική πληροφορία μεταδίδεται σε δίκτυα που βρίσκονται κάτω από διαφορετική διαχείριση. Επομένως με βάση τα παραπάνω μπορούμε να διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες:

- Διαστρωματική προσαρμογή με βάση τον αποστολέα: Σε αυτή τη περίπτωση ο αποστολέας εκτελεί διαστρωματική προσαρμογή. Αυτή η περίπτωση έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται καμία υποστήριξη ή συμμετοχή των στοιχείων του δικτύου και των δεκτών. Από την άλλη μεριά έχει περιορισμένες δυνατότητες προσαρμογής.
- Διαστρωματική προσαρμογή με βάση το παραλήπτη: Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα και σε αυτή τη περίπτωση είναι ότι δεν απαιτείται καμία συμμετοχή των στοιχείων του δικτύου και του αποστολέα. Πάλι και εδώ έχουμε περιορισμένες δυνατότητες προσαρμογής.
- Διαστρωματική προσαρμογή με βάση την υποστήριξη από το δίκτυο: Σε αυτή τη περίπτωση τα στοιχεία του δικτύου συμμετέχουν στη προσαρμογή. Η πρόκληση εδώ είναι οι διάφορες συμφωνίες-πολιτικές που θα πρέπει να υλοποιηθούν προκειμένου να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα σε δίκτυα που βρίσκονται κάτω από διαφορετική διαχείριση ώστε να είναι δυνατή μια καθολική διαστρωματική προσαρμογή.
- Υβριδική διαστρωματική προσαρμογή: Αποτελεί το συνδυασμό δύο ή και περισσοτέρων από τις παραπάνω κατηγορίες. Αυτή η κατηγορία είναι η ποιο σύνθετη αλλά παρέχει μεγάλες δυνατότητες προσαρμογής.

4.1.2 Τα Επίπεδα της Στοίβας του OSI που Λαμβάνουν Μέρος στη Διαστρωματική Σχεδίαση

Οι ποιο γνωστές εργασίες στη βιβλιογραφία ([20],[21],[22]) επικεντρώνονται σε μια από κοινού προσαρμογή των επιπέδων PHY και MAC θεωρώντας τα ως περισσότερο σημαντικά σε μια διαστρωματική προσαρμογή. Όμως και το επίπεδο των εφαρμογών έχει μελετηθεί σε μια ενδεχόμενη διαστρωματική προσαρμογή. Παρόλο όμως που τα τρία αυτά επίπεδα έχουν μελετηθεί διεξοδικά, δεν καλύπτουν μια λογική "καθολικής" προσαρμογής σε όλη τη στοίβα του OSI. Το επίπεδο μεταφοράς για παράδειγμα μπορεί να παίξει ένα σοβαρό ρόλο σε μια προσπάθεια διαστρωματικής προσαρμογής καθώς έχει μελετηθεί διεξοδικά στα ενσύρματα δίκτυα και έχει αποκαλύψει μια σειρά από δυνατότητες που θα μπορούσαμε να τις εκμεταλλευτούμε στα ασύρματα δίκτυα. Τέλος αν και το επίπεδο του δικτύου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα σε διαστρωματική προσαρμογή παρέχει δυνατότητες έμμεσης διαστρωματικής προσαρμογής μέσω υπηρεσιών που αυξάνουν τη ποιότητα των υπηρεσιών.

4.1.1 Παράμετροι που Λαμβάνουν Μέρος στη Διαστρωματική Σχεδίαση

Σε κάθε επίπεδο της στοίβας του OSI υπάρχει ένας αριθμός παραμέτρων που η κατάλληλη εκμετάλλευσή τους μπορεί να μας βοηθήσει σε διαστρωματική προσαρμογή. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων αυτών μας οδηγεί σε καλύτερα

αποτελέσματα. Παρόλα αυτά όμως θα πρέπει να επισημάνουμε ότι η προσαρμογή μιας παραμέτρου σε ένα επίπεδο είναι δυνατόν, και πολλές φορές συμβαίνει, να επηρεάζει τη συμπεριφορά και την απόδοση ενός άλλου επιπέδου. Επομένως κατά τη προσαρμογή θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τη παραπάνω υπόθεση. Ανακεφαλαιώνοντας τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι κάθε προσπάθεια προσέγγισης στη κατεύθυνση της βέλτιστης προσαρμογής των παραμέτρων αυτών πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα παρακάτω:

- Βελτιστοποίηση των παραμέτρων που επηρεάζουν μόνο το επίπεδο στο οποίο αναφέρονται.
- Βελτιστοποίηση των παραμέτρων που επηρεάζουν δύο ή και περισσότερα επίπεδα.

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τις παραμέτρους οι οποίες εμπλέκονται σε μια διαστρωματική προσαρμογή.

Layer	Parameters
PHY	Signal modulation
MAC	ARQ, FEC, QoS (802.11e)
Network	QoS (Diffserv, IntServ), IPv6
Transport / Session	Adaptive Transmission Rates (TFRC, DCCP, other mechanisms (Van der Schaar, 2007))
Application	Encoding parameters (Layered Encoding, MPEG4)

Πίνακας 2. Παράμετροι διαστρωματικής προσαρμογής σε ασύρματα δίκτυα

4.1.2 Σηματοδοσία Ανάμεσα στα Στρώματα της Στοίβας του OSI

Μια ακόμη σημαντική πτυχή είναι η σηματοδοσία ανάμεσα στα διάφορα επίπεδα. Θα πρέπει λοιπόν να αναπτυχθεί ένας μηχανισμός επικοινωνίας μεταξύ των στρωμάτων ώστε να είμαστε σε θέση να υλοποιήσουμε μια διαστρωματική προσαρμογή. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις στο θέμα αυτό περιγράφονται παρακάτω:

- Υπάρχοντα πρωτοκόλλα – Επικεφαλίδες πακέτων: Κάτω από αυτή τη προσέγγιση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις επικεφαλίδες των πακέτων για σηματοδοσία. Μια ελκυστική λύση είναι η χρησιμοποίηση της επικεφαλίδας του πακέτου IPv6 (επίπεδο δικτύου) με το μηχανισμό επέκτασης της επικεφαλίδας των πακέτων του έτσι ώστε να μεταφέρονται πληροφορίες για διαστρωματική σηματοδοσία. Μία δεύτερη λύση θα ήταν η χρησιμοποίηση των πρωτοκόλλων RTP/RTCP που και αυτά προσφέρουν παρόμοιες δυνατότητες σηματοδοσίας, αν και οι πληροφορίες είναι ορατές μόνο στο επίπεδο μεταφοράς. Επομένως θα πρέπει να αναπτυχθούν επιπλέον μηχανισμοί για τη διάδοση των πληροφοριών και στα υπόλοιπα επίπεδα.
- Μηνύματα ICMP: Το πρωτόκολλο ICMP (Internet Control Message Protocol) [23] χρησιμοποιείται ευρέως για σηματοδοσία σε δίκτυα IP. Σε αυτή τη

περίπτωση οι απαιτούμενες πληροφορίες είναι δυνατό να μεταφέρονται από μηνύματα ICMP στα διάφορα επίπεδα του OSI. Ένα νέο ICMP μήνυμα δημιουργείται μόνο όταν μια παράμετρος έχει αλλάξει.

- Υπηρεσίες δικτύου: Σε αυτή τη προσέγγιση μια ανεξάρτητη υπηρεσία θα μπορούσε να συλλέγει τις απαιτούμενες πληροφορίες και να τις διαβιβάζει στα ενδιαφερόμενα επίπεδα.
- Τοπικό προφίλ: Σε αυτή τη περίπτωση κάθε επίπεδο συλλέγει πληροφορίες και τις αποθηκεύει στο σύστημα αρχείων του. Έτσι κάθε ενδιαφερόμενο στρώμα μπορεί να έχει πρόσβαση στις πληροφορίες αυτές τοπικά, όποτε απαιτηθεί.

4.1.3 Στρατηγικές Προσαρμογής

Οι στρατηγικές προσαρμογής είναι ένα ακόμη θέμα που πρέπει να αντιμετωπισθεί σε μια cross layer προσαρμογή. Μπορούμε να διακρίνουμε τις παρακάτω προσεγγίσεις:

- Bottom-up: Σε αυτή τη προσέγγιση τα χαμηλότερα επίπεδα (PHY και MAC) παρέχουν πληροφορίες στα ποιο πάνω από αυτά επίπεδα με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους.
- Top-down: Το επίπεδο εφαρμογών (APP) ενημερώνει για τη σπουδαιότητα του κάθε ενός πακέτου τα παρακάτω από αυτό επίπεδα. Τα χαμηλότερα επίπεδα μεταχειρίζονται με διαφορετικό τρόπο τα πακέτα δεδομένων με βάση κριτήρια ποιότητας υπηρεσιών. Τα πρωτόκολλα κάθε υψηλότερου επιπέδου βελτιστοποιούν τις παραμέτρους για το επόμενο χαμηλότερο επίπεδο.
- MAC-centric: Σε αυτή τη προσέγγιση το επίπεδο εφαρμογών σηματοδοτεί στο επίπεδο MAC τις απαιτήσεις μετάδοσης των διαφόρων πακέτων με βάση κριτήρια ποιότητας υπηρεσιών.
- Integrated: Αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει το μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας καθώς η όποια διαστρωματική προσαρμογή αποφασίζεται από κοινού από όλα τα επίπεδα.

Όλες οι παραπάνω στρατηγικές διαστρωματικής προσαρμογής παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για τη μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας μέσω ασυρμάτων δικτύων. Η επιλεγόμενη λύση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως οι απαιτήσεις της εφαρμογής, τα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα, η πολυπλοκότητα καθώς και οι περιορισμοί της κάθε λύσης. Ανακεφαλαιώνοντας θεωρούμε ότι η ποιο ελκυστική λύση είναι η ολοκληρωμένη (Integrated) αλλά είναι και η ποιο δύσκολη στην εφαρμογή της λόγω της υψηλής πολυπλοκότητας.

4.1.4 Περιορισμοί

Οι περιορισμοί σε μια διαστρωματική προσαρμογή μπορούν να περιγραφούν όπως παρακάτω:

- Περιορισμοί τερματικών: Είναι γνωστό ότι οι φορητές συσκευές παρουσιάζουν περιορισμένες δυνατότητες σε σχέση με το σταθερό εξοπλισμό γραφείου. Αυτοί οι περιορισμοί περιλαμβάνουν, το μικρότερο μέγεθος της οθόνης, επεξεργαστές με χαμηλότερη απόδοση καθώς και περιορισμούς κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

- Περιορισμοί δικτύων: Οι περιορισμοί αυτοί σχετίζονται με το διαθέσιμο εύρος ζώνης, την καθυστέρηση, το χρόνο RTT και την υποστήριξη του δικτύου σε θέματα ποιότητας υπηρεσιών.
- Περιορισμοί εφαρμογών: Οι περιορισμοί των εφαρμογών σχετίζονται κυρίως με τη μέγιστη τιμής της καθυστέρησης, με τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της διακύμανσης της καθυστέρησης (jitter delay) ειδικά σε εφαρμογές τηλεδιάσκεψης, το ρυθμό απώλειας πακέτων και τέλος τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.

Ο αντικειμενικός σκοπός στη διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι η επιλογή των παραπάνω παραμέτρων προσφέροντας τη μέγιστη δυνατή ποιότητα υπηρεσίας στο τελικό χρήστη.

4.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Στην εποχή μας μετακινούμαστε από το χώρο της στατικής δικτύωσης των ενσύρματων δικτύων στο χώρο της ασύρματης επικοινωνίας λόγω της αυξανόμενης χρήσης των ασυρμάτων δικτύων με τη μορφή των PAN (Personal Area Networks π.χ. Bluetooth), LAN (Local Area Networks π.χ. IEEE 802.11) και MAN (Metropolitan Area Networks π.χ. IEEE 802.16) ή με τη μορφή των δικτύων 3G και των μελλοντικών 4G δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η διαστρωματική σχεδίαση μπορεί να αποτελέσει τη λύση σε τωρινές και μελλοντικές εφαρμογές παρέχοντας ένα ενοποιημένο σχήμα το οποίο θα επιτρέψει την αδιάκοπη χρήση των μέσων μέσα στο νέο αυτό δικτυακό περιβάλλον, προσαρμόζοντας το ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με τις δυνατότητες του ασύρματου δικτύου και των τερματικών. Επιπλέον η διαστρωματική σχεδίαση θα επιτρέψει την ομαλή λειτουργία των εφαρμογών πολυμέσων στα ασύρματα δίκτυα σε κάθε περίπτωση μετάπτωσης από τη παρούσα τεχνολογία σε μια νέα.

4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάσαμε τις προκλήσεις στη σχεδίαση και την υλοποίηση των σχημάτων της διαστρωματικής προσαρμογής που απευθύνεται κυρίως στα ασύρματα δίκτυα, χωρίς όμως να εξαιρείται και η χρησιμότητά της στα ενσύρματα δίκτυα. Η διαστρωματική προσαρμογή για τη μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας θα έχει ένα σημαντικό αντίκτυπο τόσο στην ερευνητική κοινότητα όσο και στην βιομηχανία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια αναλυτική παρουσίαση της ερευνητικής περιοχής σε ότι αφορά τα πρωτόκολλα πραγματικού χρόνου για τη μετάδοση πληροφορίας πολυμέσων με δυνατότητα προσαρμογής σε ενσύρματα δίκτυα καθώς και τη τεχνική διαστρωματικής προσαρμογής που αφορά κυρίως τα ασύρματα δίκτυα. Θα αναφερθούν οι εργασίες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής και θα παρουσιαστούν τα κυριότερα σημεία των προτεινομένων προσαρμοστικών πρωτοκόλλων για τη μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο. Επίσης σε ότι αφορά τη διαστρωματική σχεδίαση θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των σημείων εκείνων τα οποία διαφοροποιούν τους μηχανισμούς ή τεχνικές που έχουν παρουσιασθεί στη βιβλιογραφία με τους αντίστοιχους μηχανισμούς και τεχνικές που προτείνονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

Για λόγους ορθότερης παρουσίασης των σχετικών εργασιών θα χωρίσουμε την ερευνητική περιοχή της παρούσας διδακτορικής διατριβής σε τρεις υποπεριοχές οι οποίες και παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

- Μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας με δρομολόγηση πολλαπλής διανομής (multicast),
- Μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας με δρομολόγηση simulcast
- Προτεινόμενο πλαίσιο διαστρωματικής (cross layer) προσαρμογής για μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας σε ασύρματα δίκτυα

5.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ (MULTICAST)

Η μετάδοση δεδομένων με δρομολόγηση πολλαπλής διανομής (multicast) είναι μία επιθυμητή λύση για εφαρμογές που απευθύνονται σε ομάδες χρηστών όπως οι εφαρμογές πολυμέσων, οι εφαρμογές διανομής πληροφοριών, οι υπηρεσίες ενημέρωσης εφαρμογών κ.τ.λ. Παρόλα αυτά, υπάρχουν τεχνικές προκλήσεις και πολλά ανοικτά θέματα τα οποία πρέπει να απαντηθούν και να επιλυθούν όταν σχεδιάζουμε πρωτόκολλα μεταφοράς για μετάδοση πολλαπλής διανομής.

Η RFC 2357 [24] περιγράφει τα κριτήρια τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση τέτοιων πρωτοκόλλων και καταλήγει ότι είναι μη πιθανό να υπάρξει μία λύση η οποία θα είναι κοινά αποδεκτή από όλες τις εφαρμογές στο Διαδίκτυο, όπως αυτό είναι διαμορφωμένο σήμερα. Σύμφωνα με την RFC 2357, η συμπεριφορά οποιουδήποτε πρωτοκόλλου μεταφοράς για μετάδοση πολλαπλής διανομής πρέπει να αναλύεται και να αξιολογείται σε συνδυασμό με τις παρακάτω ιδιότητες:

- Κλιμάκωση (Scalability): Θα πρέπει δηλαδή να εξετάζεται πόσο επεκτάσιμο είναι το πρωτόκολλο σε σχέση με τον αριθμό των αποστολέων ή των παραληπτών σε μια ομάδα πολλαπλής διανομής (multicast group), τον αριθμό των ομάδων πολλαπλής διανομής, και τη διαφορετικότητα των μελών στην

ομάδα. Ποίοι επομένως είναι οι μηχανισμοί οι οποίοι περιορίζουν τη κλιμάκωση του πρωτοκόλλου.

- Έλεγχος συμφόρησης (Congestion control): Με ποιο τρόπο το προτεινόμενο πρωτόκολλο αντιμετωπίζει τη συμφόρηση στο Διαδίκτυο. Πόσο φιλικό είναι στη μετάδοση των TCP πακέτων.
- Ανάκτηση λαθών (Error recovery): Ποιοι είναι οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για τη ανάκτηση λαθών που προκύπτουν από τη μετάδοση.
- Ασφάλεια (Security): Πως το πρωτόκολλο μεταφοράς επιλύει τα προβλήματα εμπιστευτικότητας και ασφάλειας.

Η πολυπλοκότητα των παραπάνω προβλημάτων αυξάνει όταν κάποιος προσπαθεί να σχεδιάσει ένα πρωτόκολλο μεταφοράς για τη μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας. Ο κύριος λόγος είναι ότι οι εφαρμογές πολυμέσων θέτουν τους δικούς τους περιορισμούς και απαιτήσεις σε ότι αφορά τη Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service – QoS), ως αποτέλεσμα της φύσης αυτών των εφαρμογών. Οι εφαρμογές πολυμέσων είναι διαφορετικές από τις υπόλοιπες γνωστές μέχρι τώρα εφαρμογές και χαρακτηρίζονται κυρίως από τις παρακάτω τρεις ιδιότητες:

- Την απαίτηση για μετάδοση δεδομένων με πολύ υψηλούς ρυθμούς (bandwidth-consuming applications).
- Την ευαισθησία στην υστέρηση και τη διαταραχή (latency and jitter).
- Την ανοχή στις απώλειες πακέτων (packet-loss tolerant applications).

Ο έλεγχος της συμφόρησης και η φιλική συμπεριφορά προς τις TCP εφαρμογές θέτουν επιπρόσθετες απαιτήσεις σχεδίασης σε συνδυασμό με τις απότομες διακυμάνσεις του ρυθμού μετάδοσης που είναι δύσκολο να ακολουθηθούν από τους κωδικοποιητές και αποκωδικοποιητές ήχου-βίντεο (Audio-Video (AV) encoders και decoders). Σταθεροί ρυθμοί μετάδοσης χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις, με χαμηλές τιμές της διακύμανσης της καθυστέρησης (jitter delay), αποτελούν σημαντικότερα χαρακτηριστικά για μια εφαρμογή πολυμέσων από ότι η εξασφαλισμένη παράδοση των πακέτων δεδομένων στο παραλήπτη.

5.1.1 Σχετική Εργασία

Η ερευνητική προσπάθεια στην περιοχή της μετάδοσης με δρομολόγηση πολλαπλής διανομής μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο κύριες κατηγορίες, σε σχέση με τον αριθμό των μεταδιδόμενων ροών (στρωμάτων) σε μία σύσκεψη πολλαπλής διανομής:

- Σχεδιασμός μονής ροής (single layer design): Σε αυτήν την κατηγορία ο αποστολέας μεταδίδει μία μόνο ροή πληροφορίας και ο ρυθμός μετάδοσης καθορίζεται από το παραλήπτη με τη χαμηλότερη δυνατότητα λήψης.
- Σχεδιασμός πολλαπλών ροών (multi-layer design): Σε αυτή τη κατηγορία η πληροφορία μεταδίδεται με διαφορετικές ροές και κάθε παραλήπτης ακολουθεί τη ροή εκείνη που είναι πλησιέστερη στις δυνατότητες λήψης του.

Στις επόμενες παραγράφους θα συζητήσουμε εν συντομία την σχετική εργασία στις προαναφερόμενες περιοχές.

5.1.1.1 Σχήματα Μονής Ροής (Single-Rate Schemes)

Στην περιοχή αυτή έχουν αναπτυχθεί αρκετά υποσχόμενες λύσεις τα τελευταία χρόνια. Μία πρώτη εργασία που φέρει την ονομασία TCP-friendly Multicast Congestion Control (TFMCC), επεκτείνει τους βασικούς μηχανισμός του TCP Friendly Rate Control (TFRC), ώστε να εξυπηρετήσει τον έλεγχο ροής σε μετάδοση πολλαπλής διανομής. Η πιο σημαντική ιδιότητα του TFMCC είναι ο μηχανισμός έλεγχου των αναφορών ανάδρασης. Το TFMCC χρησιμοποιεί τον παραλήπτη με την χαμηλότερη ικανότητα λήψης, ο οποίος ενεργεί ως αντιπρόσωπος της σύσκεψης πολλαπλής διανομής. Ο αποστολέας προσαρμόζει τον ρυθμό μετάδοσης λαμβάνοντας υπόψη τις αναφορές ανάδρασης από αυτόν τον αντιπρόσωπο. Το Pragmatic General Multicast Congestion Control (PGMCC) βασίζεται στο πρωτόκολλο TCP και στις θετικές αναφορές (ACKs) μεταξύ του αποστολέα και ενός αντιπροσώπου σε μια σύσκεψη πολλαπλής διαδρομής. Μόνο ο αντιπρόσωπος έχει την ευθύνη να στέλνει θετικές αναφορές προς τον αποστολέα, μιμούμενος έτσι ένα κλασικό TCP παραλήπτη. Οι υπόλοιποι δέκτες στη σύσκεψη αποστέλλουν αρνητικές αναφορές (NACKs) όταν αντιλαμβάνονται απώλειες πακέτων. Η πρόταση με την ονομασία Target Bandwidth Rate Control Algorithm (TBRCA) [25] στοχεύει στην εξυπηρέτηση δεκτών με χαμηλή ικανότητα λήψης. Με την χρήση ενός αλγορίθμου που ρυθμίζει το ρυθμό μετάδοσης ελέγχει δυναμικά την έξοδο του βίντεο κωδικοποιητή. Το LDA+ [26] συνθέτει έναν AIMD (Additive Increase Multiplicative Decrease) αλγόριθμο, στον οποίο η αύξηση και η μείωση του ρυθμού μετάδοσης ρυθμίζονται δυναμικά σε σχέση με την παρούσα κατάσταση του δικτύου. Ο αλγόριθμος Loss-Delay based adaptation Algorithm (LDA+) χρησιμοποιεί το αναλυτικό μοντέλο του TCP για να υπολογίσει μία φιλική προς το TCP ταχύτητα μετάδοσης όταν παρατηρούνται απώλειες πακέτων. Το LDA+ δεν χρησιμοποιεί κανένα μηχανισμό περιορισμού των αναδράσεων εκτός από αυτούς που προσφέρει το πρωτόκολλο RTCP. Ο μηχανισμός Multicast Dissemination Protocol- Congestion Control (MDP-CC) [27] χρησιμοποιεί επίσης αντιπροσώπους για τη προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης από το παραλήπτη. Κατά το MDP-CC, χρησιμοποιείται μία λίστα υποψηφίων αντιπροσώπων μέσα από την οποία γίνεται κάθε φορά η επιλογή του κατάλληλου αντιπροσώπου. Το Explicit Rate Multicast Congestion Control (ERMCC) [28] εφαρμόζει ένα νέο μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης το οποίο βασίζεται σε ένα νέο μετρικό δικτύου με την ονομασία TRAC (Throughput Rate At Congestion). Το ERMCC μπορεί να εγκατασταθεί χωρίς καμία περαιτέρω υποστήριξη από το δίκτυο. Ο αποστολέας επιλέγει δυναμικά ένα από τους ποιο "αργούς" δέκτες ως τον αντιπρόσωπου της ομάδας πολλαπλής διανομής (Congestion Representative, CR) και λαμβάνει υπόψη μόνο τις αναφορές κατάστασης από αυτόν τον αντιπρόσωπο για τη προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης.

5.1.1.2 Σχήματα Πολλαπλών Ροών (Multi-Rate Schemes)

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η πολυμεσική πληροφορία σε αυτά τα σχήματα μεταφέρεται από ένα αριθμό διαφορετικών ροών, τα οποία αναφέρονται ως στρώματα (layers). Κάθε παραλήπτης λαμβάνει τη ροή που βρίσκεται πλησιέστερα στις δυνατότητες λήψης του ή λαμβάνει επιπρόσθετες ροές (layers) ώστε να εκμεταλλευθεί καλύτερα το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επομένως, τα σχήματα πολλαπλών ροών ταιριάζουν καλύτερα σε ετερογενή περιβάλλοντα, στα οποία μπορούν να επιτύχουν καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρου ζώνης.

Το πρωτόκολλο Receiver-driven Layered Multicast (RLM) [29], είναι μία

χαρακτηριστική εργασία σε αυτή τη περιοχή έρευνας κατά την οποία οι δέκτες έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν διαφορετικές ροές σε σχέση με το βαθμό συμφόρησης που παρατηρούν στο δίκτυο. Ο αποστολέας δεν έχει καμία ενεργή συμμετοχή στη διαδικασία ελέγχου της συμφόρησης εκτός από τη μετάδοση της πληροφορίας σε διαφορετικά στρώματα, τα οποία συνθέτουν διαφορετικές ροές πολλαπλής διαδρομής. Έτσι ο παραλήπτης προσθέτει ένα επιπλέον στρώμα, το οποίο αυξάνει τη ποιότητα της πολυμεσικής πληροφορίας, όταν παρατηρεί ότι υπάρχει αδιάθετο εύρος ζώνης στο δικτυακό μονοπάτι με τον αποστολέα. Αντίθετα, ο παραλήπτης απορρίπτει ένα στρώμα όταν παρατηρεί συμφόρηση σε αυτό το δικτυακό μονοπάτι. Οι αιτήσεις εγγραφής-διαγραφής στη σύσκεψη υλοποιούνται με τη χρήση του πρωτοκόλλου Internet Group Management Protocol (IGMP) [30]. Στο πρωτόκολλο PLM [31], το οποίο περιγράφεται ως Packet pair receiver-driven Layered Multicast, οι δέκτες προσθέτουν ή απορρίπτουν επιπλέον στρώματα με βάση τη υψηλότερη συμφόρηση του δικτύου που παρατηρείται στο δικτυακό μονοπάτι μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη. Αυτή η ιδιότητα στο PLM είναι μία βελτίωση του RLM με στόχο την ελάττωση των αρνητικών επιπτώσεων από τη λάθος πρόσθεση ενός στρώματος υψηλού ρυθμού, γεγονός που αυξάνει τη συμφόρηση του δικτύου. Με τη χρήση των πακέτων-ζευγαριών (packet pairs), οι δέκτες δεν θα πρέπει να προσθέτουν ένα επιπλέον στρώμα το οποίο θα απαιτήσει ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους από ότι επιτρέπει ο περιοριστικός σύνδεσμος (bottleneck link) του δικτύου. Ο αποστολέας στο PLM έχει ένα παθητικό ρόλο ο οποίος περιορίζεται μόνο στη μετάδοση των διαφορετικών στρωμάτων. Το πρωτόκολλο TCP-like congestion control for Layered Multicast (RLC) [32] ακολουθεί την ίδια φιλοσοφία με τις προηγούμενες εργασίες αλλά φέρεται να είναι ποιο φιλικό προς το TCP. Ο μηχανισμός Fair Layered Increase/Decrease with Dynamic Layering (FLID-DL) [33] φαίνεται να βελτιώνει γνωστά προβλήματα που σχετίζονται με τη μεγάλη υστέρηση των αιτήσεων διαγραφής του πρωτοκόλλου IGMP, που αφήνει το δίκτυο σε κατάσταση συμφόρησης. Το FLID-DL χρησιμοποιεί "δυναμικά" στρώματα όπου ο αποστολέας μεταβάλει το ρυθμό μετάδοσης κάθε στρώματος περιοδικά στη διάρκεια του χρόνου. Οι δέκτες μπορούν να ελαττώνουν το ρυθμό λήψης όταν δεν προσθέτουν επιπλέον στρώματα υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης. Για να διατηρήσουν ένα δεδομένο ρυθμό μετάδοσης θα πρέπει να προσθέτουν περιοδικά επιπλέον στρώματα με μεσαίους ρυθμούς μετάδοσης.

Στις όλες τις προαναφερόμενες προτάσεις ο αποστολέας έχει ένα παθητικό ρόλο, καθώς τα διάφορα στρώματα μεταδίδονται με σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης. Το πρωτόκολλο Fine-grained layered multicast [34] χρησιμοποιεί μία διαφορετική προσέγγιση, σε μία προσπάθεια να ελαττώσει τα μειονεκτήματα της τεχνικής πρόσθεσης στρωμάτων που αφορούν στην ακρίβεια του επιτρεπόμενου ρυθμού μετάδοσης, όπως αυτό αντιλαμβάνεται από τους παραλήπτες. Το πρωτόκολλο αυτό προτείνει τη μη πρόσθεση επιπλέον στρωμάτων, όταν οι δέκτες αντιλαμβάνονται συμφόρηση στο δίκτυο με βάση τις απώλειες των πακέτων και προσαρμόζουν έτσι το επίπεδο λήψης τους (subscription level) ανάλογα. Το πρωτόκολλο STAIR (Simulate TCP's Additive Increase/multiplicative decrease with Rate-based) [35], μειώνει περαιτέρω τη κυκλοφορία των IGMP μηνυμάτων ελέγχου με τη χρήση των "κλιμακούμενων στρωμάτων" ("stair layers"). Το κλιμακούμενο στρώμα είναι το στρώμα αυτό του οποίου ο ρυθμός αυξάνει δυναμικά στη περίοδο του χρόνου από ένα ρυθμό βάσης ενός πακέτου σε κάθε χρόνο Round Trip Time (RTT) μέχρι ενός μέγιστου ρυθμού, πριν να ελαττωθεί ξανά στο ρυθμό βάσης. Το STAIR εξομοιώνει τη συμπεριφορά μιας σύνδεσης TCP με τη χρήση ενός αλγόριθμου AIMD (Additive Increase/Multiplicative Decrease). Παρόλα αυτά όμως εισαγάγει μεγάλες

αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης οι οποίες δεν είναι επιθυμητές από τις εφαρμογές πολυμέσων.

Ολοκληρώνοντας την αναφορά μας στη σχετική εργασία στη περιοχή μετάδοσης πολυμεσικής πληροφορίας με δρομολόγηση πολλαπλής διανομής κρίνουμε ότι τα σχήματα μονής ροής είναι ευκολότερα στη σχεδίαση και την εφαρμογή και σε γενικές γραμμές δεν απαιτούν επιπλέον υποστήριξη από το δίκτυο. Το μόνο εμφανές μειονέκτημα είναι η μειωμένη εκμετάλλευση του διαθεσίμου εύρους ζώνης διότι ο ρυθμός μετάδοσης του αποστολέα εξαρτάται από τη δυνατότητα λήψης του ποιο "αργού" παραλήπτη. Παρόλα αυτά, οι μηχανισμοί μονής ροής δεν θα πρέπει να αξιολογούνται μόνο ως αυτοτελείς λύσεις μεταφοράς πληροφορίας αλλά περισσότερο ως η βάση πάνω στην οποία μπορούν να οικοδομηθούν μηχανισμοί μεταφοράς πολλαπλών ροών. Οι μηχανισμοί Smooth Multirate Congestion Control (SMCC) και Generalized Multicast Congestion Control (GMCC) [36] αποτελούν πολύ καλά παραδείγματα μηχανισμών πολλαπλών ροών που είναι δομημένα πάνω σε σχήματα μονής ροής.

5.1.2 Adaptive Smooth Multicast Protocol (ASMP)

Το κίνητρό μας επομένως είναι να σχεδιάσουμε ένα πρωτόκολλο μεταφοράς πολλαπλής διανομής το οποίο θα ικανοποιεί τόσο τα κριτήρια αξιολόγησης που τίθενται από την IETF με την RFC 2357, όσο και τις απαιτήσεις QoS και τους περιορισμούς που τίθενται από τις εφαρμογές πολυμέσων.

Το σχεδιαζόμενο πρωτόκολλο στοχεύει να εξυπηρετήσει μόνο τη μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας, καθόσον οι διάφορες εφαρμογές παρουσιάζουν μια ευρύτητα διαφορετικών απαιτήσεων σε ότι αφορά τον έλεγχο ροής και τη διόρθωση λαθών, όπως έχει ήδη επισημανθεί και από την IETF. Η αρχική παρουσίαση του ASSP μαζί με προκαταρκτικά αποτελέσματα απόδοσης έχουν δημοσιευθεί στην εργασία [37]. Η κυρίαρχη ιδέα είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα υπάρχων και ευρέως διαδεδομένο πρωτόκολλο ώστε μέσω αυτού να λάβουμε όλα εκείνα τα απαραίτητα μετρικά του δικτύου τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία του μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης, με δυνατότητες προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης και να εξασφαλίσουμε και την επιθυμητή φιλικότητα προς το πρωτόκολλο TCP. Για το σκοπό αυτό επιλέγουμε το πρωτόκολλο Real-time Transport Protocol (RTP) το οποίο έχει ήδη καθιερωθεί ως η de facto λύση για τη μετάδοση πολυμέσων. Το RTP περιέχει ενδογενείς μηχανισμούς περιορισμού της ανάδρασης από τους δέκτες, αυξάνοντας έτσι την κλιμάκωσή του.

Το πρωτόκολλο ASMP αποτελεί μία καινούργια πρόταση για τη μετάδοση μιας ροής δεδομένων πολλαπλής διανομής και εξυπηρετεί εφαρμογές πολυμέσων. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του ASMP είναι:

- Φιλικότητα προς το TCP
- Προσαρμοζόμενη κλιμάκωση σε μεγάλο αριθμό ανταποκριτών
- Υψηλή εκμετάλλευση του διαθεσίμου εύρους ζώνης (bandwidth), και τέλος
- Βραδείες διακυμάνσεις του ρυθμού μετάδοσης, οι οποίες είναι οι πλέον κατάλληλες στις εφαρμογές πολυμέσων.

Στο ASMP κάθε παραλήπτης υπολογίζει ένα φιλικό προς το TCP ρυθμό μετάδοσης, ο οποίος βασίζεται στο αναλυτικό μοντέλο του TCP που παρουσιάζεται στην εργασία

[38]. Η ομαλή συμπεριφορά του πρωτοκόλλου ταιριάζει με ένα φυσικό τρόπο στις εφαρμογές πολυμέσων, καθώς οι οξείες και συχνές διακυμάνσεις του ρυθμού μετάδοσης είναι πιθανόν να δημιουργούν παραμορφώσεις στους κωδικοποιητές και αποκωδικοποιητές βίντεο. Η χρήση απομονωτών (buffers) μεγάλου μεγέθους με σκοπό να ξεπεραστούν τα προβλήματα των απότομων διακυμάνσεων του ρυθμού μετάδοσης δεν είναι πάντα αποδεκτή, ιδιαίτερα στις εφαρμογές πολυμέσων με υψηλή αλληλεπίδραση όπως οι εφαρμογές τηλεδιάσκεψης.

Το ASMP βρίσκεται στην κορυφή της στοίβας των πρωτοκόλλων RTP/RTCP και χρησιμοποιεί τις αναφορές ανάδρασης τόσο του αποστολέα όσο και του παραλήπτη για την διακίνηση πληροφοριών που περιγράφουν τη κατάσταση του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ASMP δεν απαιτεί καμία επιπλέον υποστήριξη από τους δρομολογητές του δικτύου. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει την εύκολη εφαρμογή του ASMP σε δίκτυα μη εγγυημένης ποιότητας, όπως το Διαδίκτυο.

Η λεπτομερής περιγραφή και η πειραματική αξιολόγηση του πρωτοκόλλου ASMP παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

5.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ SIMULCAST

Η εκπομπή πολλαπλών ροών με δρομολόγηση πολλαπλής διανομής παρουσιάζει καλύτερη κλιμάκωση από ότι τα σχήματα απλής ροής, είναι περισσότερο εύκαμπτη και εκμεταλλεύεται σε μεγαλύτερο βαθμό τις πηγές του δικτύου, ειδικά σε ότι αφορά το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Συναντάται κυρίως σε δύο μορφές: Στα σχήματα πολλαπλών στρωμάτων κάθε αρχείο βίντεο κωδικοποιείται σε ένα στρώμα βάσης και σε ένα αριθμό ενισχυτικών στρωμάτων. Τα στρώματα αυτά μπορεί να είναι αλληλένδετα ή σωρευτικά ή μπορεί να είναι και ανεξάρτητα.

Η simulcast τεχνική συνιστά στη μετάδοση ενός αριθμού ανεξαρτήτων ροών με το ίδιο περιεχόμενο, το οποίο διαφέρει σε ποιότητα και συνεπώς σε διαφορετικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι δεν απαιτεί τους πολύ εξελιγμένους και σύνθετους κωδικοποιητές πολλαπλών στρωμάτων. Η τεχνολογία simulcast είναι αρκετή απλή όταν συγκρίνεται με τη τεχνική πολλαπλών στρωμάτων. Παρόλα αυτά όμως οι πολλαπλές εκδόσεις του ίδιου αρχείου πολυμέσων που μεταδίδεται παράλληλα στο δίκτυο μπορούν να θεωρηθούν ως σπατάλη του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Αυτό βέβαια γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι δέκτες να λαμβάνουν κάθε φορά την έκδοση του αρχείου που είναι πλησιέστερα στις δυνατότητες λήψεώς τους. Επομένως είναι σημαντικό να μειώσουμε τον αριθμό των στρωμάτων που μεταδίδονται έτσι ώστε να μειώσουμε τις απαιτήσεις του δικτύου σε εύρος ζώνης. Αυτό μπορεί να είναι εφικτό μόνο εάν οι simulcast ροές δεν έχουν ένα καθορισμένο ρυθμό μετάδοσης αλλά ακολουθούν τις διάφορες μεταβολές του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να αυξηθεί ο αριθμός των ανταποκριτών οι οποίοι εξυπηρετούνται από τις ροές αυτές.

Ένα ακόμη μεγάλο ζήτημα το οποίο σχετίζεται με τη μετάδοση πολυμέσων, είναι η φιλικότητα προς το TCP πρωτόκολλο. Για να το εξηγήσουμε καλύτερα ας θεωρήσουμε μια υπηρεσία μετάδοσης βίντεο ή τηλεφωνίας μέσω διαδικτύου (Voice over IP-VoIP) οι οποίες χρησιμοποιούν το User Datagram Protocol (UDP) ως πρωτόκολλο μεταφοράς στη κορυφή του πρωτοκόλλου RTP. Το πρωτόκολλο UDP δεν διαθέτει κανένα μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης και ως εκ τούτου δεν είναι φιλικό προς το TCP. Το αποτέλεσμα είναι ότι η κατανομή του εύρους ζώνης

μοιράζεται ανισομερώς μεταξύ των διαφόρων εφαρμογών. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει στο Διαδίκτυο τη παύση των πολύ γνωστών εφαρμογών (web browsing, e-mail, ftp κ.τ.λ) πού χρησιμοποιούν το TCP ως πρωτόκολλο μεταφοράς.

5.2.1 Σχετική Εργασία

Στη περιοχή της μετάδοσης simulcast μια αντιπροσωπευτική πρόταση αποτελεί το πρωτόκολλο Destination Set Grouping (DSG). Η πηγή εκπομπής της πληροφορίας μεταδίδει τρεις διαφορετικές ροές του ίδιου περιεχομένου βίντεο χαμηλής, μεσαίας και υψηλής ποιότητας. Ένας ανταποκριτής (παραλήπτης) ακολουθεί τη ροή εκείνη η οποία είναι πλησιέστερα στις δυνατότητες λήψης του. Το DSG διαθέτει εσωτερικούς μηχανισμούς που καθορίζουν το ρυθμό μετάδοσης της κάθε ροής μέσα σε κάποια προκαθορισμένα όρια και επίσης υποστηρίζει τη προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης τόσο με μηχανισμούς στη πηγή εκπομπής όσο και στους ανταποκριτές του. Έτσι επιτρέπει σε έναν ανταποκριτή να μεταπηδά από μια ροή χαμηλού ρυθμού σε μια ροή υψηλότερου ρυθμού και αντίστροφα ώστε να ικανοποιήσει έτσι καλύτερα τις απαιτήσεις λήψης του. Στη πρόταση που περιγράφεται ως Inter-Receiver Fair Multicast [39] ο ρυθμός κάθε ροής είναι προσαρμοστικός με σκοπό την αύξηση του βαθμού δικαιοσύνης στο σύνολο των δεκτών σε μια σύσκεψη πολλαπλής διανομής. Με το βαθμό δικαιοσύνης μετράται η συλλογική ικανοποίηση των δεκτών μια σύσκεψης. Στη πρόταση Sender-Receiver based Adaptation scheme for Multicast Transmission using Simulcast (SRAMT-S) [40] ο ρυθμός εκπομπής κάθε simulcast ροής καθορίζεται από μετρήσεις που εκτελούν τόσο η πηγή όσο και οι δέκτες της πληροφορίας. Το πρωτόκολλο SRAMT-S προσφέρει υψηλή κλιμάκωση καθόσον οι αλλαγές στο ρυθμό μετάδοσης της κάθε simulcast ροής προσαρμόζεται με βάση τις αλλαγές που παρατηρούνται στη κατάσταση του δικτύου.

Η τεχνική simulcast έχει ήδη εφαρμοσθεί σε εμπορικές εφαρμογές μετάδοσης βίντεο. Η εταιρεία RealNetworks' RealSystem G2 εφαρμόζει τη μετάδοση simulcast με την ονομασία SureStream, η οποία δημιουργεί έναν αριθμό ροών διαφορετικής ποιότητας βίντεο όπου ο κάθε ανταποκριτής ακολουθεί τη ροή εκείνη που βρίσκεται πλησιέστερα στις απαιτήσεις του.

5.2.2 Adaptive Smooth Simulcast Protocol (ASSP)

Όλα τα παραπάνω θέματα τέθηκαν υπόψη στο σχεδιασμό του Adaptive Smooth Simulcast Protocol (ASSP) το οποίο συνιστά ένα νέο πρωτόκολλο πολλαπλής ροής για simulcast μετάδοση σε δικτυακά περιβάλλοντα που στα οποία δεν παρέχεται καμία εγγύηση υπηρεσιών, όπως το Διαδίκτυο. Η αρχική παρουσίαση του ASSP μαζί με προκαταρκτικά αποτελέσματα απόδοσης έχουν δημοσιευθεί στην εργασία [41].

Το πρωτόκολλο ASSP αποτελεί την επέκταση του πρωτοκόλλου μεταφοράς απλής ροής ASMP, το οποίο παρουσιάζεται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ως αποτέλεσμα στο ASSP η μετάδοση κάθε simulcast ροής ελέγχεται από το μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης του ASMP. Η κύρια λειτουργία του ASSP έγκειται στο συγχρονισμό και στη διαχείριση των simulcast ροών.

Κατά το σχεδιασμό του ASSP έχουμε επικεντρώσει τη προσοχή μας στη μετάδοση αρχείων πολυμέσων στο Διαδίκτυο και έτσι σχεδιάζουμε το ASSP ως το πρωτόκολλο μεταφοράς για κάθε ενσύρματο δίκτυο στο οποίο δεν υπάρχουν εγγυήσεις ποιότητας και για το οποίο δεν απαιτείται καμία υποστήριξη από άλλα ενδιάμεσα στοιχεία του

δικτύου (δρομολογητές) εκτός από τη μετάδοση πολλαπλής διανομής. Επομένως η σχεδίαση του ASSP δεν αναφέρεται στη μετάδοση πολυμέσων μέσα από ελεγχόμενα συνδρομητικά δίκτυα, από τα οποία όμως δεν αποκλείεται η λειτουργία του.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του ASSP είναι:

- TCP φιλικότητα
- Προσαρμοζόμενοι ρυθμοί εκπομπής για κάθε μία simulcast ροή ξεχωριστά
- Προσαρμοζόμενη κλιμάκωση ανάλογα με τον αριθμό των δεκτών σε μια σύσκεψη πολλαπλής διανομής και τέλος
- Ομαλότητα στις μεταβολές του ρυθμού εκπομπής, στοιχείο κατάλληλο για τη μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας

Το ASSP εκμεταλλεύεται αυτό το οποίο αποκαλούμε "ομαλή μετάδοση" (*smooth transmission*) έτσι ώστε να αποφεύγονται οι απότομες διακυμάνσεις του ρυθμού εκπομπής σε κάθε simulcast ροή και να μειώνονται οι προσπάθειες εγγραφής-διαγραφής ενός ανταποκριτή στις διάφορες συσκέψεις πολλαπλής διανομής. Αυτό το θέμα σχετίζεται με τη καθυστέρηση που παρατηρείται κατά τη διαγραφή ενός ανταποκριτή από μια τέτοια σύσκεψη ως αποτέλεσμα του πρωτοκόλλου Internet Group Management Protocol (IGMP). Για να το εξηγήσουμε καλύτερα ας υποθέσουμε έναν ανταποκριτή ο οποίος διαγράφεται από μια σύσκεψη ώστε να κάνει εγγραφή σε μια νέα σύσκεψη όπου ο ρυθμός μετάδοσης είναι πλησιέστερα στις δυνατότητες λήψης του ανταποκριτή αυτού. Ο χρόνος για να ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως "*καθυστέρηση απομάκρυνσης*" (leave latency). Η μεγάλη χρονική διάρκεια της διαδικασίας αυτής που σχετίζεται άμεσα με το σχεδιασμό του πρωτοκόλλου IGMP και τους δρομολογητές του δικτύου δημιουργεί συμφόρηση στο δίκτυο. Εάν το πρωτόκολλο μεταφοράς αντιδρά πολύ γρήγορα στις στιγμιαίες και απότομες αλλαγές του δικτύου τότε θα αυξάνονται οι εγγραφές-διαγραφές από μια σύσκεψη σε μια άλλη. Αυτή η κατάσταση θα δημιουργεί συμφόρηση στο δίκτυο.

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό του ASSP είναι η "*φιλικότητά του προς το TCP*" καθόσον κάθε παραλήπτης υπολογίζει το μέγιστο ρυθμό λήψης με βάση το αναλυτικό μοντέλο του TCP.

Τέλος το ASSP είναι μια λύση από "*άκρο-σε-άκρο*" και δεν απαιτεί καμία υποστήριξη από το δίκτυο εκτός από την υποστήριξη της δρομολόγησης πολλαπλής διανομής (IP-multicast). Αυτό σημαίνει ότι το ASSP μπορεί να εφαρμοσθεί τόσο στους εξυπηρετητές όσο και στους δέκτες μιας εφαρμογής πολυμέσων χωρίς καμία αλλαγή στα ενδιάμεσα στοιχεία του δικτύου. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει την εφαρμογή του ASSP σε δίκτυα που υπόκεινται σε διαφορετική διαχείριση. Επιπλέον έχουμε αναπτύξει το ASSP στο επίπεδο των εφαρμογών χωρίς έτσι να επηρεάσουμε ούτε το λειτουργικό σύστημα αλλά ούτε και τη στοίβα των πρωτοκόλλων.

Η λεπτομερής περιγραφή και η πειραματική αξιολόγηση του πρωτοκόλλου ASSP παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7.

5.3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ (CROSS LAYER) ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Η μετάδοση των πολυμέσων στα ασύρματα δίκτυα κληρονομεί όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά που αφορούν τις ιδιαιτερότητες της μετάδοσης στον ελεύθερο χώρο όπου οι συνθήκες μετάδοσης είναι πολύ διαφορετικές από ότι στα ενσύρματα δίκτυα. Μια πολύ βασική διαφορά μεταξύ ενσύρματων και ασυρμάτων δικτύων είναι το αίτιο που προκαλεί την απώλεια των πακέτων. Ενώ δηλαδή το κυριότερο αίτιο για την απώλεια των πακέτων στα ενσύρματα δίκτυα είναι η συμφόρηση του δικτύου, στα ασύρματα δίκτυα παρατηρούνται απώλειες λόγω αλλοιωμένων πακέτων ως αποτέλεσμα του χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio - SNR), της εξασθένησης του σήματος αλλά και των παρεμβολών από σήματα άλλων πηγών. Μια δεύτερη διαφορά έχει να κάνει με το γεγονός ότι σε πολλές περιπτώσεις ένας ασύρματος παραλήπτης βρίσκεται σε κίνηση σε αντίθεση με έναν ενσύρματο παραλήπτη. Έτσι λοιπόν η κίνηση αυτή εισαγάγει και ένα επιπρόσθετο εμπόδιο στη μετάδοση πολυμέσων.

Η ερευνητική κοινότητα με βάση τα δεδομένα αυτά έχει διατυπώσει έναν αριθμός προτάσεων με σκοπό τη βελτίωση της Ποιότητας Υπηρεσιών που αφορούν εφαρμογές πολυμέσων μέσω στρατηγικών διαστρωματικής σχεδίασης. Η διαστρωματική αρχιτεκτονική μπορεί να διαιρεθεί στις παρακάτω κατηγορίες:

- Δημιουργία νέων διεπαφών: Διάφορες αρχιτεκτονικές σχεδίασης απαιτούν τη δημιουργία νέων διεπαφών μεταξύ των στρωμάτων της στοίβας του OSI. Οι διεπαφές αυτές χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των στρωμάτων σε πραγματικό χρόνο.
- Συγχώνευση των προσκείμενων στρωμάτων: Μια μέθοδος διαστρωματικής σχεδίασης είναι ο σχεδιασμός δύο ή περισσοτέρων προσκείμενων στρωμάτων έτσι ώστε η νέα υπηρεσία που θα παρέχεται να είναι η ένωση των υπηρεσιών που παρέχονται από το καθένα από τα στρώματα αυτά.
- Σύζευξη στρωμάτων χωρίς νέες διεπαφές: Σε αυτή τη περίπτωση δεν δημιουργούνται νέες διεπαφές αλλά συγχωνεύονται δύο ή και παραπάνω στρώματα οπότε δεν απαιτείται η δημιουργία νέων διεπαφών για ανταλλαγή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο.
- Κάθετη προσαρμογή: Η προσαρμογή των παραμέτρων προσαρμογής εκτείνεται σε όλη τα στρώματα της στοίβας του OSI.

5.3.1 Σχετική Εργασία

Η ερευνητική κοινότητα έχει παρουσιάσει τεχνικές με τις οποίες είναι δυνατή η διαστρωματική προσαρμογή με σκοπό την καλύτερη απόδοση των εφαρμογών πολυμέσων σε ασύρματα κυρίως δίκτυα. Στην εργασία [42] εξετάζεται η σκοπιμότητα της διαστρωματικής σχεδίασης και προτείνεται ένα πλαίσιο μεταξύ των επιπέδων εφαρμογών (APP), ζεύξης δεδομένων (MAC) και φυσικού επιπέδου (PHY). Στην ίδια εργασία παρουσιάζονται και οι διαφορετικές μεθοδολογίες για την επίτευξη

διαστρωματικής προσαρμογής. Η εργασία [43] διαπραγματεύεται τις μεθόδους με τις οποίες υψηλότερα επίπεδα του μοντέλου του OSI θα μπορούσαν να παρέχουν πληροφορίες στα χαμηλότερα επίπεδα έτσι ώστε να γίνεται καταλληλότερη διαχείριση των πηγών του δικτύου, σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή με κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας. Στην εργασία [44] προτείνεται ένα πλαίσιο διαστρωματικής προσαρμογής λαμβάνοντας υπόψη τις τελευταίες επεκτάσεις του πρότυπου MPEG-4. Θέματα σηματοδοσίας ανάμεσα στα επίπεδα του μοντέλου του OSI για μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας αναφέρονται στην εργασία [45]. Αν και η πρόταση αυτή αποφεύγει την αποστολή ICMP μηνυμάτων παρουσιάζει πολύ υψηλή πολυπλοκότητα. Στην εργασία [46] παρουσιάζεται ένα ακόμη πλαίσιο διαστρωματικής προσαρμογής ανάμεσα στα επίπεδα APP, MAC και PHY. Ο χρονοπρογραμματισμός (scheduling) της μετάδοσης των πακέτων εκτελείται με βάση έναν αλγόριθμο που λαμβάνει υπόψη προτεραιότητες που καθορίζονται από την ίδια την εφαρμογή. Η εργασία [47] περιγράφει την αναγκαιότητα της διαστρωματικής προσαρμογής ώστε να αντιμετωπιστούν έτσι γνωστά θέματα στη μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας σε ασύρματα δίκτυα που σχετίζονται με τις απώλειες και τις καθυστερήσεις των πακέτων καθώς και θέματα που αφορούν κινητούς ανταποκριτές.

5.3.2 Προτεινόμενο Πλαίσιο Διαστρωματικής Προσαρμογής

Σε όλες τις προηγούμενες εργασίες η διαστρωματική προσαρμογή λαμβάνει υπόψη μόνο ένα υποσύνολο των επιπέδων του μοντέλου του OSI. Αυτό που διαφοροποιεί τη δική μας σχεδίαση είναι ότι η κυρίαρχη λογική έχει να κάνει με μια "ολιστική" προσέγγιση όπου όλα τα επίπεδα του μοντέλου του OSI συμμετέχουν στη διαδικασία προσαρμογής. Επιπλέον στη σχεδίασή μας έχουμε συμπεριλάβει το σενάριο όπου η ανταλλαγή της πληροφορίας γίνεται ταυτόχρονα μεταξύ ενσύρματων και ασύρματων ανταποκριτών παρέχοντας έτσι μια ποιο ολοκληρωμένη προσέγγιση καθόσον η πλειοψηφία των δικτύων σήμερα αποτελείται τόσο από ασύρματους όσο και από ενσύρματους ανταποκριτές.

Έτσι λοιπόν η πρότασή μας είναι ποιο ολοκληρωμένη σε σχέση με προηγούμενες προτάσεις που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία για τους παρακάτω λόγους: Πρώτα από όλα τα αίτια της απώλειας των πακέτων είναι διαφορετικά στα ασύρματα από ότι στα ενσύρματα δίκτυα. Έτσι λοιπόν δημιουργείται η ανάγκη για διαφορετικούς μηχανισμούς διόρθωσης λαθών και ελέγχου της συμφόρησης. Δεύτερον, στο ενσύρματο τμήμα του προτεινόμενου πλαισίου μπορούμε εύκολα να υλοποιήσουμε μηχανισμούς ελέγχου της συμφόρησης με τη χρήση νέων πρωτοκόλλων τα οποία έχουν σχεδιασθεί για τη μετάδοση της πολυμεσικής πληροφορίας. Τρίτον, με το προτεινόμενο πλαίσιο μειώνουμε την "απόσταση", στην ουσία τον αριθμό των ενδιαμέσων κόμβων για τη μετάδοση της πληροφορίας από τον αποστολέα στους ασύρματους ανταποκριτές. Έτσι είναι δυνατόν να πετύχουμε τοπική αναμετάδοση RTP πακέτων στους ασύρματους ανταποκριτές ικανοποιώντας παράλληλα τους περιορισμούς της εφαρμογής που έχουν σχέση με τις μέγιστες τιμές της καθυστέρησης των πακέτων.

Η αναλυτική παρουσίαση του προτεινομένου πλαισίου με τη πειραματική του αξιολόγηση παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 8.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ (MULTICAST)

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ (MULTICAST)

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε τη πρότασή μας για τη μετάδοση πληροφορίας πολυμέσων με δρομολόγηση πολλαπλής διανομής (multicast) που φέρει την ονομασία Adaptive Smooth Multicast Protocol (ASMP). Το πρωτόκολλο ASMP αποτελεί μια νέα πρόταση στο επίπεδο μεταφοράς και είναι δομημένο πάνω στα πρωτόκολλα RTP/RTCP, εκμεταλλευόμενο τα κυριότερα χαρακτηριστικά και τους μηχανισμούς ενημέρωσης που προσφέρουν. Αφού γίνεται μια λεπτομερής περιγραφή των χαρακτηριστικών του ASMP προχωρούμε στην αξιολόγησή του και στη σύγκρισή του με τις δύο ποιο διαδεδομένες και αποδεκτές λύσεις στη περιοχή έρευνας της μεταφοράς πολυμεσικής πληροφορίας σε δίκτυα μη εγγυημένης ποιότητας με δρομολόγηση πολλαπλής διανομής.

6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ADAPTIVE SMOOTH MULTICAST PROTOCOL (ASMP)

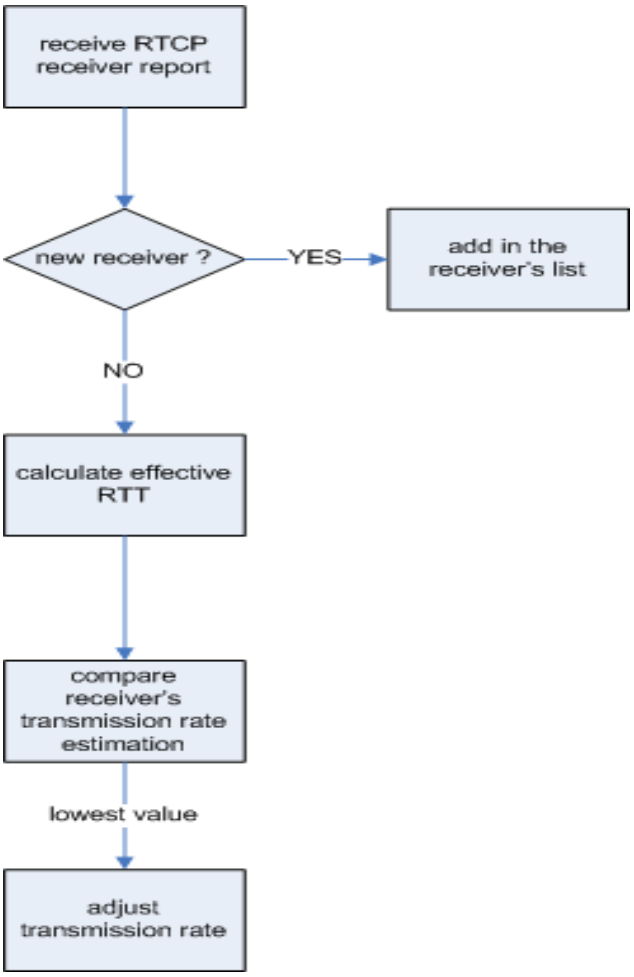
Το ASMP [48] αποτελείται από ένα μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης μονής ροής, ο οποίος εκμεταλλεύεται τις αναφορές ελέγχου αποστολέα και παραλήπτη του πρωτοκόλλου RTP Control Protocol (RTCP). Η πρωτοτυπία στο ASMP σχετίζεται με τη δυναμική προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης στον αποστολέα λαμβάνοντας υπόψη τις αναφορές ελέγχου των παραληπτών. Η προσπάθειά μας επικεντρώνεται στο να προσαρμόσουμε το ρυθμό μετάδοσης του αποστολέα έτσι ώστε να μειώσουμε τις διακυμάνσεις του. Μία ακόμη σημαντική ιδιότητα του ASMP είναι η φιλική προς το TCP συμπεριφορά, έτσι ώστε η πολυμεσική πληροφορία να μην καταλαμβάνει περισσότερο εύρος από ότι μια TCP σύνδεση που ακολουθεί το ίδιο δικτυακό μονοπάτι από τον αποστολέα στο παραλήπτη με τη πολυμεσική πληροφορία. Επιπλέον, με τη χρήση των RTCP αναφορών κατάστασης επιτυγχάνουμε καλύτερη κλιμάκωση καθόσον ο αριθμός των αναφορών αυτών ελέγχεται από το πρωτόκολλο RTCP και δεν επιτρέπεται η κατάληψη του διαθεσίμου εύρους πάνω από μια τιμή αναφοράς (threshold) ως ποσοστό του συνολικού διαθέσιμου εύρους στη σύσκεψη [6]. Επομένως, αποφεύγοντας τη χρήση επιπλέον αναφορών κατάστασης (ACKSs, NACKs) και ελέγχοντας δυναμικά τον αριθμό των αναφορών κατάστασης επιτυγχάνουμε μεγαλύτερο ωφέλιμο εύρος ζώνης για τη μετάδοση της πολυμεσικής πληροφορίας. Ολοκληρώνοντας είναι σκόπιμο να αναφέρουμε ότι το πρωτόκολλο ASMP έχει αναπτυχθεί στη κορυφή της στοίβας των πρωτοκόλλων RTP/RTCP. Αυτή η προσέγγιση παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα καθόσον μεταφέρουμε τη πολυπλοκότητα στο επίπεδο εφαρμογής, αποφεύγοντας οποιασδήποτε αλλαγές τόσο στο λειτουργικό σύστημα όσο και στα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου και κυρίως στους δρομολογητές. Το πρωτόκολλο RTP με φιλική προς το TCP συμπεριφορά [49] είναι επίσης βασισμένο στη παραπάνω προσέγγιση. Το μόνο ίσως εμφανές μειονέκτημα σχετίζεται με τη μεγάλη περίοδο μεταξύ δύο διαδοχικών αναφορών κατάστασης, όταν οι συνθήκες του δικτύου μεταβάλλονται απότομα. Για το λόγο

αυτό αυξάνουμε την απόκριση του ASMP με τη χρήση στατιστικών πληροφοριών για τη καλύτερη ενημέρωση ως προς τη κατάσταση του δικτύου. Οι πληροφορίες αυτές είναι βασισμένες σε αυτό που ονομάζουμε ως "*δείκτες συμφόρησης*", Congestion Indicators (CI), οι οποίοι ενεργοποιούν το μηχανισμό ενημέρωσης της επερχόμενης συμφόρησης. Με βάση τις ενδείξεις αυτές συντονίζουμε ανάλογα το "*συντελεστή απόκρισης*" (smoothness factor) του ASMP ο οποίος ρυθμίζει το μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης καθιστώντας τον λιγότερο ή περισσότερο επιθετικό με βάση το επίπεδο συμφόρησης στο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε να έχουμε ένα μηχανισμό ελέγχου ροής ο οποίος παρουσιάζει αμβλείες διακυμάνσεις του ρυθμού μετάδοσης και παράλληλα υψηλή απόκριση στις απότομες αλλαγές του δικτύου. Θα παρατηρήσουμε στις επόμενες παραγράφους πως το ASMP ανταποκρίνεται στα διάφορα γεγονότα που επιφέρουν αλλαγές στη κατάσταση του δικτύου. Οι λειτουργίες του ASMP περιγράφονται παρακάτω:

- Ο παραλήπτης υπολογίζει το ρυθμό απώλειας πακέτων και το μέγεθος της διακύμανσης καθυστέρησης (jitter delay) με βάση τον αριθμό ταυτότητας και τη χρονοσήμανση των πακέτων RTP που λαμβάνει.
- Ο παραλήπτης υπολογίζει το χρόνο RTT στο δικτυακό μονοπάτι μεταξύ του εαυτού του και του αποστολέα με βάση τις μετρήσεις καθυστέρησης μονής διαδρομής τις οποίες υπολογίζει ο αποστολέας.
- Ο παραλήπτης υπολογίζει ένα φιλικό προς το TCP ρυθμό λήψης βασισμένο στο αναλυτικό μοντέλο του TCP.
- Ο παραλήπτης ειδοποιείται από τους δείκτες συμφόρησης έτσι ώστε να προσαρμόζει το συντελεστή απόκρισης συμφόρησης και εν συνεχεία υπολογίζει ένα νέο ρυθμό λήψης απαλλαγμένο από υψηλές διακυμάνσεις.
- Ο παραλήπτης αποστέλλει το νέο ρυθμό λήψης στον αποστολέα κάνοντας χρήση τους μηχανισμούς επέκτασης των πακέτων RTP/RTCP.
- Ο παραλήπτης προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης βασισμένος στις αναφορές κατάστασης RTCP.

Η περιγραφή των παραπάνω λειτουργιών παρουσιάζεται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

6.1.1 ASMP Αποστολέας



Σχήμα 3. Λειτουργίες του ASMP αποστολέα

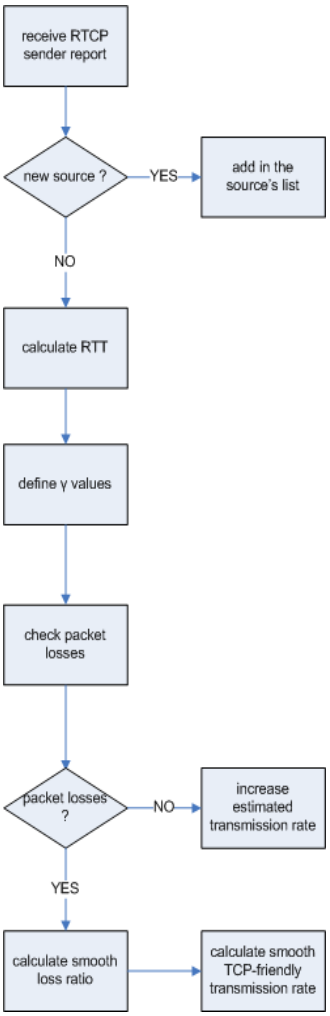
Στο ASMP ο αποστολέας είναι υπεύθυνος για δύο κύριες διεργασίες: α) στον υπολογισμό του χρόνου RTT στο δικτυακό μονοπάτι μεταξύ αυτού και κάθε ενός από τους παραλήπτες και β) στη προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης έτσι ώστε αυτός ο ρυθμός να μπορεί να ακολουθηθεί από το παραλήπτη με τις χαμηλότερες δυνατότητες λήψης. Για την υλοποίηση των παραπάνω ο παραλήπτης χρησιμοποιεί ένα συγκεκριμένο τμήμα στις RTCP αναφορές του παραλήπτη, στο οποίο αναφέρει τη μέτρηση του χρόνου RTT του παραλήπτη i καθώς και τον αριθμό ταυτότητας του παραλήπτη i στον οποίο ανταποκρίνεται ο χρόνος αυτός. Ο αποστολέας αποθηκεύει όλες τις τελευταίες τιμές r_{tcp}^{i} από τους δέκτες κάθε φορά που λαμβάνει μία εισερχόμενη RTCP αναφορά. Η προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης γίνεται με βάση τη σύγκριση του υπολογιζόμενου ρυθμού μετάδοσης του παραλήπτη i προς όλες τις τελευταίες μετρήσεις που έχουν σταλεί από τους υπόλοιπους δέκτες. Εάν η τελευταία μέτρηση είναι μικρότερη από τις υπόλοιπες μετρήσεις τότε ο αποστολέας προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης σύμφωνα με τη παρακάτω εξίσωση :

$$r_{tx} = \min(r_{tcp}^{1},...,r_{tcp}^{i})$$

Εξίσωση 13. Υπολογισμός ρυθμού μετάδοσης

όπου, r_{tx} είναι ο νέος ρυθμός μετάδοσης. Το Σχήμα 3 μας δείχνει τη ροή αυτών των λειτουργιών.

6.1.2 ASMP Παραλήπτης



Σχήμα 4. Λειτουργίες του ASMP παραλήπτη

Ο ASMP παραλήπτης είναι υπεύθυνος για τις παρακάτω λειτουργίες: α) υπολογισμός χρόνου RTT, β) προσαρμογή του συντελεστή απόκρισης, γ) υπολογισμό ρυθμού απώλειας πακέτων και τέλος δ) υπολογισμό ρυθμού μετάδοσης φιλικό προς το TCP. Ο παραλήπτης προσποιείται τη συμπεριφορά ενός TCP παραλήπτη με τη χρήση του αναλυτικού μοντέλου του TCP και υπολογίζει ένα ρυθμό μετάδοσης r_{tcp}^{i} φιλικό προς το TCP κάθε φορά που στέλνει μία RTCP αναφορά. Το Σχήμα 4 μας δείχνει τη ροή αυτών των λειτουργιών. Θα συζητήσουμε στις επόμενες παραγράφους τις λεπτομέρειες αυτών των λειτουργιών που αφορούν τον ASMP παραλήπτη.

6.1.3 Υπολογισμός του Ρυθμού Απώλειας Πακέτων

Η μέθοδος με την οποία πραγματοποιείται ο υπολογισμός του ρυθμού απώλειας πακέτων είναι κρίσιμη για τον υπολογισμό του φιλικού προς το TCP ρυθμού

μετάδοσης. Ο παραλήπτης υπολογίζει τις απώλειες πακέτων κατά τη διάρκεια μιας RTCP αναφοράς, κάνοντας χρήση τις λειτουργίες του πρωτοκόλλου RTP. Ο αριθμός ταυτότητας που περιέχεται στην επικεφαλίδα του RTP πακέτου παρέχει ένα άμεσο τρόπο για την ανακάλυψη των πακέτων τα οποία έχουν απολεσθεί. Για να αποφύγουμε δυσάρεστα αποτελέσματα στον υπολογισμό του ρυθμού μετάδοσης από την απώλεια ενός και μόνο πακέτου χρησιμοποιούμε το παρακάτω φίλτρο, το οποίο υπολογίζει το μέσο όρο των απωλειών m με βάση συντελεστές βαρύτητας από τους ποιο πρόσφατους υπολογισμούς των ρυθμών απωλειών l_i^m:

$$l_i^m = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} w_i l_i}{\sum_{i=0}^{m-i} w_i}$$

Εξίσωση 14. Υπολογισμός ρυθμού απωλειών

όπου, l_i^m είναι η προσαρμοσμένη τιμή του ρυθμού απώλειας πακέτων του παραλήπτη i. Οι συντελεστές βαρύτητας w_i επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε πολύ πρόσφατες απώλειες πακέτων να έχουν την ίδια βαρύτητα, ενώ η βαρύτητα μειώνεται σταδιακά στη τιμή μηδέν για ποιο παλαιές τιμές. Η τιμή του συντελεστή m καθορίζει την απόκριση του ASMP στη συμφόρηση του δικτύου. Μεγάλες τιμές του m αυξάνουν το χρόνο απόκρισης του ASMP όταν οι ASMP δέκτες μοιράζονται τις πηγές του δικτύου με TCP συνδέσεις. Στη δική μας εφαρμογή χρησιμοποιούμε $m = 8$ και τις παρακάτω τιμές για τους συντελεστές βαρύτητας βασισμένοι στις προτάσεις που έχουν δημοσιευθεί στην RFC 3448:

$$w_i = \{1,1,1,1,0.8,0.6,0.4,0.2\}$$

Εξίσωση 15. Συντελεστές βαρύτητας

6.1.4 Μέτρηση της Διακύμανση Καθυστέρησης (jitter delay)

Οι μετρήσεις για τον υπολογισμό της διαταραχής έχουν βασισθεί στον αλγόριθμο που δημοσιεύθηκε στην RFC 3550. Εάν S_i είναι η χρονοσήμανση του πακέτου i, και R_i ο χρόνος λήψης του πακέτου i, τότε για δύο διαδοχικά πακέτα i and j, η διαταραχή D μπορεί να εκφρασθεί ως:

$$D = (R_j - R_i) - (S_j - S_i)$$

Εξίσωση 16. Μέτρηση καθυστέρησης D

Η διαταραχή αυτή υπολογίζεται για κάθε RTP πακέτο. Η RFC 3550 προτείνει το παρακάτω φίλτρο ώστε να αποφύγουμε στιγμιαία φαινόμενα διακυμάνσεων και έτσι τελικά η διαταραχή υπολογίζεται με τη παρακάτω εξίσωση:

$$J_i = (15/16)J_{i-1} + (1/16)D$$

Εξίσωση 17. Μέτρηση διαταραχής J

6.1.5 Μέτρηση του Χρόνου RTT

Όταν ο παραλήπτης i λάβει ένα RTP πακέτο από τον αποστολέα, τότε χρησιμοποιεί

τον αλγόριθμο που περιγράφεται παρακάτω ώστε να υπολογίσει το χρόνο RTT μεταξύ αυτού και του παραλήπτη. Ο παραλήπτης χρησιμοποιεί τη χρονοσήμανση του RTP πακέτου ($T_{timestamp}$) και το χρόνο λήψης ($T_{receiver}$) στον υπολογισμό του χρόνου απλής διαδρομής (T_{oneway}) στο δικτυακό μονοπάτι μεταξύ αυτού και του αποστολέα:

$$T_{oneway} = T_{receiver} - T_{timestamp}$$

Εξίσωση 18. Υπολογισμός χρόνου απλής διαδρομής

Εάν αυτό το μονοπάτι ήταν συμμετρικό και είχε την ίδια καθυστέρηση και προς τις δύο κατευθύνσεις, τότε ο χρόνος RTT μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη θα ήταν απλά δύο φορές ο χρόνος της απλής διαδρομής:

$$t_{RTT} = 2T_{oneway}$$

Εξίσωση 19. Υπολογισμός χρόνου διπλής διαδρομής

Οι παραπάνω προϋποθέσεις δεν είναι όμως αληθείς για το Διαδίκτυο. Επομένως, οι δέκτες θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη αυτό τον περιορισμό όταν εκτελούν ακριβείς υπολογισμούς του χρόνου RTT (t_{RTT}). Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούμε τη παράμετρο a και γράφουμε την Εξίσωση 19 ως:

$$t_{RTT} = (1+a)T_{oneway}$$

Εξίσωση 20. Χρήση παραμέτρου a

Η παράμετρος α χρησιμοποιείται ώστε να μειώσουμε την απόκλιση μεταξύ του υπολογιζόμενου χρόνου RTT από τη πραγματική τιμή του, εξαιτίας της πιθανότητας ύπαρξης μη συγχρόνων ρολογιών και της ασυμμετρίας του δικτυακού μονοπατιού μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη. Για να υπολογίσουμε τη τιμή της παραμέτρου α, οι δέκτες χρειάζονται μια ενεργή τιμή του χρόνου RTT, η οποία είναι δυνατόν να ανακτηθεί από τις RTCP αναφορές κατάστασης. Η RTCP αναφορά του παραλήπτη περιέχει δύο επιπλέον πεδία: τη τιμή t_{LSR} (είναι η χρονοσήμανση της ποιο πρόσφατης RTCP αναφοράς που στάλθηκε από τον αποστολέα) και τη τιμή t_{DLSR} (είναι η διαφορά χρόνου μεταξύ του χρόνου λήψης της τελευταίας RTCP αναφοράς του αποστολέα από το χρόνο αποστολής της RTCP αναφοράς του παραλήπτη). Με αυτό τον τρόπο ο αποστολέας μπορεί να υπολογίζει τη τιμή του ενεργού χρόνου RTT για το δικτυακό μονοπάτι μεταξύ του εαυτού του και του παραλήπτη με τη χρήση της παρακάτω εξίσωσης: (A είναι ο χρόνος στον οποίο ο αποστολέας έχει λάβει την RTCP αναφορά από το παραλήπτη):

$$t_{RTT}^{r-i} = A - t_{LSR} - t_{DLSR}$$

Εξίσωση 21. Χρήση χρόνων t_{LSR} και t_{DLSR}

Ο αποστολέας υπολογίζει την ενεργή τιμή του χρόνου RTT για το παραλήπτη i, κάθε φορά που λαμβάνει μία RTCP αναφορά από το παραλήπτη. Στη συνέχεια περιλαμβάνει τη μέτρηση αυτή μαζί τον αριθμό ταυτότητας του παραλήπτη στην επόμενη RTCP αναφορά. Όταν ο παραλήπτης λάβει την ενεργή τιμή του χρόνου RTT από τον αποστολέα τότε υπολογίζει τη τιμή της παραμέτρου a με τη χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$a = \frac{t_{RTT}^{r-i}}{T_{oneway}} - 1$$

Εξίσωση 22. Υπολογισμός τιμής παραμέτρου a

Επιπρόσθετα, για να αποφύγουμε μεμονωμένα φαινόμενα από μια υψηλή στιγμιαία τιμή του χρόνου RTT, η οποία θα επηρεάσει γενικότερα τους υπολογισμούς μας, χρησιμοποιούμε τη παρακάτω εξίσωση:

$$t_{RTT} = t_{RTT}^{inst} \cdot \beta + (1-\beta) \cdot t_{RTT}$$

Εξίσωση 23. Χρήση φίλτρου για τον υπολογισμό του χρόνου t_{RTT}

όπου, t_{RTT}^{inst} είναι η στιγμιαία μέτρηση του χρόνου RTT η οποία έγινε από το παραλήπτη και β μια προκαθορισμένη τιμή. Μία υψηλή τιμή του β προσδίδει μεγαλύτερο βάρος στη στιγμιαία τιμή του RTT με αποτέλεσμα ποιο ακριβείς μετρήσεις. Παρόλα αυτά όμως υπάρχει η πιθανότητα οι υψηλές στιγμιαίες τιμές RTT να δημιουργούν υψηλές διακυμάνσεις της τιμής t_{RTT}. Οι διακυμάνσεις αυτές όμως είναι μη επιθυμητές από τις εφαρμογές πολυμέσων. Τα αποτελέσματα αξιολόγησης του ASMP δείχνουν ότι η επιλογή του $\beta = 0.5$ προσφέρει ένα λογικό συμβιβασμό μεταξύ σταθερών ρυθμών μετάδοσης και απόκρισης στις εναλλασσόμενες συνθήκες του δικτύου. Επομένως, καθορίζουμε αυτή τη τιμή σε όλα τα πειράματα προσομοίωσης τα οποία παρουσιάζουμε σε αυτή την εργασία.

6.1.6 Υπολογισμός Φιλικού προς το TCP Ρυθμού Μετάδοσης

Ο παραλήπτης μιμείται τη συμπεριφορά του TCP και υπολογίζει ένα φιλικό προς το TCP ρυθμό μεταφοράς r_{tcp}^{i} όταν αντιλαμβάνεται απώλειες πακέτων κάθε φορά που στέλνει μια RTCP αναφορά. Για τον υπολογισμό του ρυθμού μετάδοσης χρησιμοποιούμε τη παρακάτω εξίσωση, η οποία έχει παρουσιασθεί στην εργασία [38]:

$$r^{i}_{tcp} = \frac{P}{t_{RTT}\sqrt{\frac{2Dl}{3}} + t_{out}\min(1, 3\sqrt{\frac{3Dl}{8}})l(1+32l^2)}$$

Εξίσωση 24. Υπολογισμός φιλικού προς το TCP ρυθμού μετάδοσης

όπου, r_{tcp}^{i} είναι η εκτίμηση του παραλήπτη i (σε Bytes/sec), P είναι το μέγεθος του πακέτου σε bytes, l είναι ο ρυθμός απώλειας πακέτων, t_{out} χρόνος κατά τον οποίο πραγματοποιείται η αναμετάδοση ενός πακέτου από το TCP, t_{RTT} είναι ο χρόνος RTT σε seconds και D είναι ο αριθμός των επιβεβαιωμένων ληφθέντων TCP πακέτων. Στη δική μας εφαρμογή χρησιμοποιούμε $D = 1$ και $t_{out} = 4t_{RTT}$. Για να αποφύγουμε απότομες αλλαγές του ρυθμού μετάδοσης καθορίζουμε τη παρακάτω σχέση σύμφωνα με την οποία, όταν ο παραλήπτης δεν αντιμετωπίζει απώλειες πακέτων δεν αυξάνει τον υπολογιζόμενο ρυθμό μετάδοσης πάνω από ένα πακέτο σε κάθε χρόνο RTT (P / RTT) σε bytes/second:

$$r_{tcp}^{i} = r_{tcp}^{i} + \frac{1}{t_{RTT}} P$$

Εξίσωση 25. Υπολογισμός ρυθμού μετάδοσης χωρίς απώλειες πακέτων

Στη συνέχεια, καθορίζουμε το παρακάτω φίλτρο το οποίο μειώνει τις διακυμάνσεις στον υπολογισμό του ρυθμού μετάδοσης:

$$r_{tcp}^{i} = r_{tcp}^{inst} \cdot \gamma + (1-\gamma) \cdot r_{tcp}^{i}$$

Εξίσωση 26. Χρήση φίλτρου

όπου, το r_{tcp}^{inst} συμβολίζει τη τελευταία υπολογιζόμενη τιμή του ρυθμού μετάδοσης η οποία μετρήθηκε από το παραλήπτη, και το γ παίρνει μία προκαθορισμένη τιμή μεταξύ μηδέν και ένα.

$$0 \le \gamma \le 1$$

Εξίσωση 27. Πεδίο τιμών μεταβλητής γ

Η τιμή του γ θα πρέπει να επιλεχθεί προσεκτικά γιατί οι χαμηλές τιμές κάνουν γενικά τον αλγόριθμο αποφυγής της συμφόρησης λιγότερο ευαίσθητο στις αλλαγές της κατάστασης του δικτύου. Για τιμές $\gamma = 1$, το r_{tcp}^{i} παίρνει τη τιμή της στιγμιαίας μέτρησης r_{tcp}^{inst}. Στην εργασία μας [37] εξετάσαμε την επίδραση διαφόρων τιμών του γ στην απόδοση του ASMP. Συμπερασματικά, υπάρχει πάντα ένας είδος διαπραγμάτευσης μεταξύ απόκρισης στις ξαφνικές αλλαγές του δικτύου και ομαλών αλλαγών του ρυθμού μετάδοσης. Το ποιο σημαντικό θέμα όμως για εμάς είναι να αποφύγουμε τις μεγάλες διακυμάνσεις του ρυθμού μετάδοσης, έτσι ώστε να μπορέσουμε να εναρμονίσουμε τη προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης με τους περιορισμούς που θέτουν οι εφαρμογές πολυμέσων.

6.1.7 Δείκτες Συμφόρησης

Έχουμε αναφέρει προηγουμένως ότι η τιμή του γ επηρεάζει τη συμπεριφορά του ASMP ως προς α) την απόκρισή του στις ξαφνικές αλλαγές του δικτύου, και β) την ομαλότητα των διακυμάνσεων του ρυθμού μετάδοσης. Επομένως, θα πρέπει να προσαρμόσουμε τη τιμή του γ με βάση το βαθμό συμφόρησης του δικτύου. Δυστυχώς όμως μόνο οι μετρήσεις του ρυθμού απώλειας πακέτων ή οι μετρήσεις του χρόνου RTT δεν μπορούν να μας δώσουν μία καθαρή εικόνα για το επίπεδο συμφόρησης του δικτύου [50]. Επιπλέον, όταν παρατηρούνται απώλειες πακέτων το δίκτυο είναι ήδη σε κατάσταση συμφόρησης. Επομένως, για να αποφύγουμε τις απώλειες πακέτων πρέπει να αναπτύξουμε έναν αλγόριθμο "*εγκαίρου προειδοποίησης*", που στην ιδεατή περίπτωση θα αντιλαμβάνεται την επερχόμενη συμφόρηση του δικτύου πριν την απώλεια πακέτων. Η εφαρμογή μας που είναι βασισμένη στο πρωτόκολλο RTP παρέχει τις πληροφορίες εκείνες στις αναφορές ελέγχου RTCP του αποστολέα και του παραλήπτη και εναπόκειται πλέον στις δυνατότητες του σχεδιαστή του πρωτοκόλλου μεταφοράς με ποιο τρόπο θα εκμεταλλευθεί τα στοιχεία που παρέχονται από το RTP, ώστε να προβλέψει την επερχόμενη συμφόρηση του δικτύου. Στη δική μας εργασία εκτιμούμε τη κατάσταση του δικτύου βασισμένο στις μετρήσεις της σωρευτικής διαταραχής (cumulative jitter)

[51]. Έτσι δεχόμαστε ότι το δίκτυο μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις παρακάτω καταστάσεις:

- *Condition CONGESTED*: Στη κατάσταση αυτή οι τιμές του cumulative jitter έχουν αυξητική τάση καθόσον η διαταραχή (jitter) αυξάνει με το χρόνο. Επομένως, θα πρέπει να προσαρμόσουμε το ρυθμό μετάδοσης του αποστολέα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποφύγουμε τη συμφόρηση του δικτύου η οποία θα οδηγήσει σε απώλειες πακέτων. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να δώσουμε μία χαμηλή τιμή στη παράμετρο γ, έτσι ώστε να ρυθμίσουμε την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης σε τιμές κάτω του ενός πακέτου σε κάθε χρόνο RTT. Σε αντίθετη περίπτωση εάν ο αποστολέας συνεχίσει να αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης με ένα σταθερό ρυθμό P/RTT θα προκαλέσει συμφόρηση και απώλειες πακέτων.

- *Condition UNLOADED*: Στη κατάσταση αυτή οι τιμές του cumulative jitter είναι σταθερές. Η παράμετρος γ πρέπει να έχει τιμές πλησίον του ένα ώστε να επιτρέπει την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης που θα είναι πλησιέστερα σε τιμές P/RTT.

Μία αποτελεσματική μέθοδος για να εκτιμήσουμε το επίπεδο συμφόρησης είναι να συγκρίνουμε τη μέση τιμή του cumulative jitter σε ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα (από την έναρξη της σύνδεσης) και το οποίο ονομάζουμε ως *long running average* με τη μέση τιμή του cumulative jitter σε ένα μικρότερο χρονικό διάστημα (μεταξύ δύο διαδοχικών RTCP αναφορών) και το ονομάζουμε ως *short running average*. Όταν η τιμή του *short running average* είναι μεγαλύτερη από τη τιμή του *long running average* τότε το επίπεδο συμφόρησης έχει αυξητική τάση, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι πλησιάζουμε στη κατάσταση *CONGESTED*. Αντίθετα, όταν η τιμή του *short running average* είναι μικρότερη από αυτή του *long running average* τότε εκτιμούμε ότι το δίκτυο είναι *UNLOADED*.

Ο μέσος όρος της αλληλουχίας i των τιμών $CJ_1,...CJ_i$ μέχρι το παρόντα χρόνο καθορίζεται ως:

$$A_i = \frac{CJ_1 + ... + CJ_i}{i}$$

Εξίσωση 28. Υπολογισμός μέσης τιμής A

Όταν μία νέα τιμή CJ_{i+1} γίνεται διαθέσιμη τότε ενημερώνουμε το μέσο όρο όπως στη παρακάτω σχέση:

$$A_{i+1} = A_i + \frac{CJ_{i+1} - A_i}{i+1}$$

Εξίσωση 29. Ενημέρωση μέσης τιμής A

όπου, η αρχική τιμή A_0 μπορεί να ληφθεί ίση με το μηδέν. Οι παραπάνω υπολογισμοί παρουσιάζουν πολύ χαμηλή πολυπλοκότητα κάθε φορά που προσθέτουμε μια νέα τιμή CJ_{i+1}. Η τιμή του *long running average* λαμβάνει υπόψη όλες τις τιμές του cumulative jitter από την αρχή της μετάδοσης έως το παρόντα χρόνο. Η τιμή του *short running average* υπολογίζεται μεταξύ δύο διαδοχικών RTCP αναφορών. Ο παραλήπτης εκτιμά το επίπεδο συμφόρησης κάθε φορά που αποστέλλει μια RTCP αναφορά με βάση το παρακάτω αλγόριθμο:

$$
\begin{aligned}
&if\,(A_{short_avg} \geq A_{long_avg})\ then\ \{\\
&\quad smoothness_factor\ =\ CONGESTED\\
&\}\ else\ smoothness_factor\ =\ UNLOADED
\end{aligned}
$$

Εξίσωση 30. Εκτίμηση επιπέδου συμφόρησης

Η συχνότητα εκπομπής των RTCP αναφορών καθορίζεται δυναμικά από το πρωτόκολλο RTCP σύμφωνα με τον αριθμό των ανταποκριτών που συμμετέχουν σε μια σύσκεψη πολλαπλής διανομής. Επομένως, το παράθυρο δειγματοληψίας είναι μεγάλο σε συσκέψεις με μεγάλο αριθμό ανταποκριτών και μικρό σε συσκέψεις με μικρό αριθμό ανταποκριτών. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε καλύτερα να συσχετίσουμε τον αλγόριθμο εκτίμησης συμφόρησης με τον αριθμό των ανταποκριτών σε μία σύσκεψη, καθόσον σε συσκέψεις με μεγάλο αριθμό ανταποκριτών ο αποστολέας λαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό RTCP αναφορών από τους δέκτες. Στις προσομοιώσεις που παρουσιάζουμε στη συνέχεια καθορίζουμε τις παρακάτω τιμές της παραμέτρου γ οι οποίες έχουν εξαχθεί από πειράματα για τις δύο διαφορετικές καταστάσεις του δικτύου:

$$
\begin{aligned}
&UNLOADED \rightarrow \gamma = 0.9\\
&CONGESTED \rightarrow \gamma = 0.2
\end{aligned}
$$

Εξίσωση 31. Καθορισμένες τιμές παραμέτρου γ

6.1.8 Κλιμάκωση (Scalability)

Η RFC 3550 προτείνει ότι το ποσοστό των αναφορών ελέγχου RTCP δεν θα πρέπει να καταλαμβάνει ποσοστό μεγαλύτερο του 5% από το συνολικά διαθέσιμο εύρος ζώνης σε μία σύσκεψη πολλαπλής διανομής. Αυτή η τιμή αναφοράς όμως αυξάνει το χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών RTCP αναφορών όταν ο αριθμός των ανταποκριτών αυξάνει, καθώς περισσότεροι ανταποκριτές μοιράζονται το ποσοστό του 5%. Το πρόβλημα θα μπορούσε να επιλυθεί εάν μπορούσαμε να αυξήσουμε το ποσοστό του εύρους ζώνης για την αποστολή των αναφορών ελέγχου σε σχέση με τον αριθμό των ανταποκριτών. Δυστυχώς όμως οι πηγές του δικτύου είναι περιορισμένες και θα πρέπει να βρούμε άλλους μηχανισμούς οι οποίοι θα μπορούσαν να μειώσουν τα παράπλευρα αρνητικά αποτελέσματα του περιορισμού του 5% σε συσκέψεις της τάξης των χιλιάδων ανταποκριτών.

Για την επίλυση αυτού του προβλήματος εφαρμόζουμε μία αποτελεσματική λύση η οποία έχει προταθεί και αξιολογηθεί στην εργασία [52]. Σύμφωνα με αυτή τη λύση, όταν ένας παραλήπτης παρατηρεί αύξηση του χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών αναφορών (retransmission interval), ο οποίος καθορίζεται ως μεγαλύτερος του χρόνου $T_{suspent}$, (που σημαίνει ότι ο αριθμός των ανταποκριτών έχει επίσης αυξηθεί) τότε χρησιμοποιεί ένα ρολόι αναμετάδοσης που βασίζεται σε μια εκθετικά περικογμένη κατανομή με διάστημα $[0, T_{rand}]$ (truncated exponentially distributed retransmission timer) και πυκνότητα:

$$
\begin{aligned}
&T_{wait} = \frac{1}{e^{\lambda}} \cdot \frac{\lambda}{T_{random}} \cdot e^{\frac{\lambda}{T_{random}} \cdot z} && if\ 0 \leq z \leq T_{random}\\
&T_{wait} = 0 && otherwise
\end{aligned}
$$

Εξίσωση 32. Αλγόριθμος κλιμάκωσης

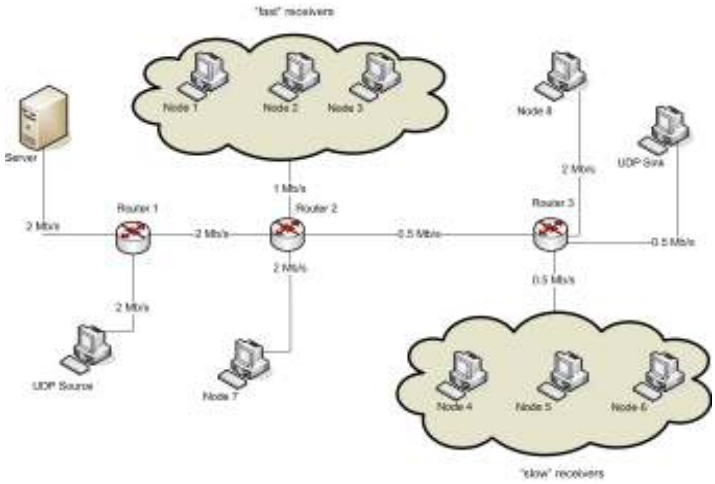
Κάθε παραλήπτης προγραμματίζει το χρόνο αποστολής μεταξύ δύο διαδοχικών RTCP αναφορών να είναι T_{wait}. Εάν ο παραλήπτης λάβει μία RTCP αναφορά η οποία

έχει μόλις αποσταλεί από ένα άλλο παραλήπτη στη ίδια σύσκεψη, με εκτίμηση ρυθμού μετάδοσης παρόμοια με τη δική του, τότε αναστέλλει την εκπομπή της δικής του RTCP αναφοράς (θεωρούμε ότι δύο εκτιμήσεις του ρυθμού μετάδοσης φιλικού προς το TCP είναι παρόμοιες όταν διαφέρουν έως και 2%). Έχει αποδειχθεί στην εργασία [52] ότι με μια κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων μπορούμε να μειώσουμε δραματικά τον αριθμό των αναφορών ελέγχου κρατώντας παράλληλα ενημερωμένο το μηχανισμό ανάδρασης. Επομένως, ο αποστολέας είναι παράλληλα ικανός να συλλέγει τις αναφορές ελέγχου από ένα αντιπροσωπευτικό αριθμό δεκτών.

6.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ASMP

6.2.1 Μοντέλο Προσομοίωσης

Η τοπολογία την οποία χρησιμοποιούμε για την αξιολόγηση του ASMP είναι ένα τοπικό ενσύρματο δίκτυο (Local Area Network-LAN), το οποίο αποτελείται από ένα εξυπηρετητή και έξι ετερογενείς δέκτες. Η διαφορετικότητα των δεκτών έχει σχέση με τη χωρητικότητα των συνδέσεων μεταξύ εξυπηρετητή και δεκτών. Στη τοπολογία αυτή έχουμε δημιουργήσει ένα περιοριστικό σύνδεσμο μεταξύ των δρομολογητών 1 και 2 με σκοπό τη δημιουργία δύο διαφορετικών ομάδων δεκτών. Η πρώτη ομάδα δεκτών (Δέκτες 1,2,3 "γρήγοροι δέκτες") είναι ικανή να λαμβάνει σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης από ότι η δεύτερη ομάδα (δέκτες 4,5,6 "αργοί δέκτες"). Έχοντας δύο διαφορετικές ομάδες δεκτών με διαφορετικές δυνατότητες λήψης μπορούμε να εξετάσουμε πως ο ASMP εξυπηρετητής προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης λαμβάνοντας υπόψη τις αναφορές ελέγχου από τους αργούς δέκτες. Ο εξυπηρετητής μεταδίδει μια απλή ροή πολλαπλής διανομής (single rate multicast stream) σε όλους τους δέκτες που συμμετέχουν στη σύσκεψη. Ο αρχικός ρυθμός μετάδοσης είναι 150 Kb/s. Όλοι οι δέκτες συμμετέχουν στη σύσκεψη ταυτόχρονα. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζουμε τη τοπολογία του μοντέλου προσομοίωσης.



Σχήμα 5. Τοπολογία του δικτύου προσομοίωσης

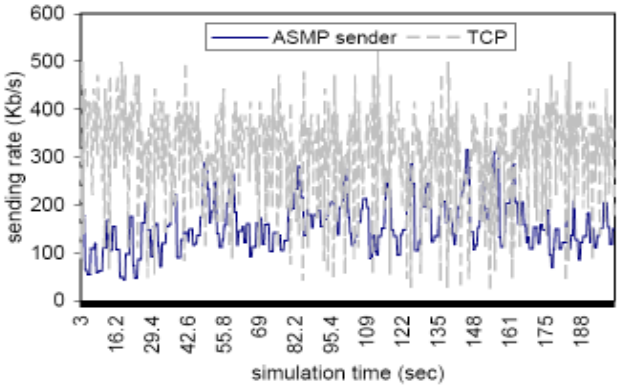
Αξιολογούμε την απόδοση του ASMP κάτω από συνθήκες διαφορετικών σεναρίων προσομοίωσης με σκοπό να εξετάσουμε:

- Τη φιλική προς το TCP συμπεριφορά, όταν οι ASMP δέκτες μοιράζονται το ίδιο περιοριστικό σύνδεσμο με πολλαπλές TCP συνδέσεις.
- Την ομαλή συμπεριφορά του ASMP παρέχοντας τη δυνατότητα αποφυγής μεγάλων διακυμάνσεων του ρυθμού μετάδοσης.
- Την αντίδρασή του ASMP όταν κάποιος παραλήπτης με χαμηλό ρυθμό λήψης εισέρχεται σε προγενέστερο χρόνο στη σύσκεψη, και τέλος
- Την απόκριση του ASMP στις αλλαγές κατάστασης του δικτύου εξαιτίας της συμφόρησης, η οποία δημιουργείται από άλλες ανταγωνιστικές πηγές παραγωγής πληροφορίας.

Σε ότι αφορά τα κριτήρια αξιολόγησης έχουμε λάβει υπόψη τα μετρικά που παρουσιάζονται στη πρόσφατη RFC 5166 [55].

6.2.2 Φιλικότητα προς το TCP

Σε αυτή την προσομοίωση, αναλύουμε τη φιλικότητα προς το TCP χωρίς να χρησιμοποιήσουμε το μηχανισμό ελέγχου των διακυμάνσεων του ρυθμού μετάδοσης "smooth function" που εκφράζεται στην Εξίσωση 26. Ο ανταποκριτής 7 (TCP αποστολέας) αρχίζει τη μετάδοση προς τον ανταποκριτή 8 (TCP παραλήπτης), μέσου της διαδρομής από το δρομολογητή 2 στο δρομολογητή 3.

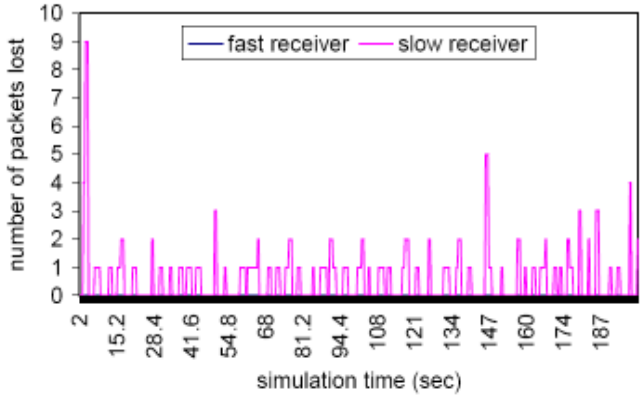


Σχήμα 6. Φιλικότητα προς TCP – Ρυθμοί μετάδοσης

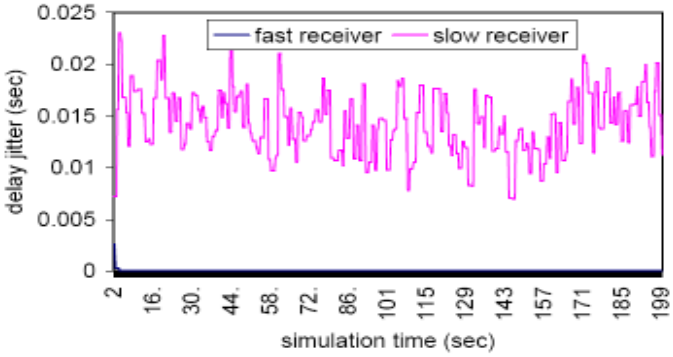
Για την αξιολόγησή μας χρησιμοποιούμε Random Early Drop (RED) ουρά στους δρομολογητές ώστε να αποφύγουμε το συγχρονισμό στους δρομολογητές από τα διάφορες ροές δεδομένων. Με αυτή τη προσέγγιση είμαστε βέβαιοι ότι όλες οι διαφορετικές ροές πληροφορίας θα αντιμετωπίσουν παρόμοιες απώλειες πακέτων στους δρομολογητές λόγω συμφόρησης. Ένας δρομολογητής RED αντιλαμβάνεται την επερχόμενη συμφόρηση υπολογίζοντας το μέσο όρο του μεγέθους στη σειρά των πακέτων. Όταν ο μέσος όρος αυτός ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο κατώφλι αναφοράς τότε ο δρομολογητής απορρίπτει κάθε νεοεισερχόμενο πακέτο με κάποια πιθανότητα. Όταν ο μέσος όρος ξεπεράσει ένα μέγιστο σημείο αναφοράς τότε ο δρομολογητής απορρίπτει όλα τα νεοεισερχόμενα πακέτα. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο διατηρεί το μέσο όρο του μεγέθους της σειράς χαμηλό, αλλά κάνει βέβαιο ότι όλες οι ροές θα δεχθούν τον ίδιο ρυθμό απώλειας πακέτων και αποφεύγεται παράλληλα και ο συγχρονισμός μεταξύ των διαφορετικών ροών.

Όπως παρατηρούμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχήμα 6), στην αρχή της προσομοίωσης, ο εξυπηρετητής μειώνει το ρυθμό μετάδοσης καθώς

αντιλαμβάνεται τη συμφόρηση στο δίκτυο. Στον υπόλοιπο χρόνο της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι η TCP ροή μεταδίδεται με ρυθμό υψηλότερο από ότι ο αρχικός ρυθμός μετάδοσης, επιβεβαιώνοντας τη φιλική προς το TCP συμπεριφορά του ASMP.



Σχήμα 7. TCP-φιλικότητα – Απώλειες πακέτων



Σχήμα 8. TCP-φιλικότητα – Διαταραχή

Οι "γρήγοροι" και "αργοί" δέκτες παρουσιάζουν τους ίδιους ρυθμούς λήψης. Παρατηρούμε όμως ότι το ASMP είναι περισσότερο φιλικό προς το TCP από ότι θα έπρεπε να είναι. Όπως εξηγήσαμε στις προηγούμενες παραγράφους, η προσπάθειά μας έγκειται στην ενσωμάτωση ενός φιλικού προς το TCP μηχανισμού βασισμένο στις RTCP αναφορές ελέγχου. Οι αναφορές αυτές εκπέμπονται κατά μεγαλύτερα διαστήματα χρόνου από ότι οι αναφορές ελέγχου του TCP (TCP ACKs), κάνοντας τον εξυπηρετητή ASMP να έχει βραδύτερη απόκριση στις ξαφνικές αλλαγές της κατάστασης του δικτύου[1]. Το TCP ανταποκρίνεται με γρηγορότερο ρυθμό στις αλλαγές αυτές με αποτέλεσμα να καταλαμβάνει ένα μεγαλύτερο μέρος από το διαθέσιμο εύρος στο δίκτυο.

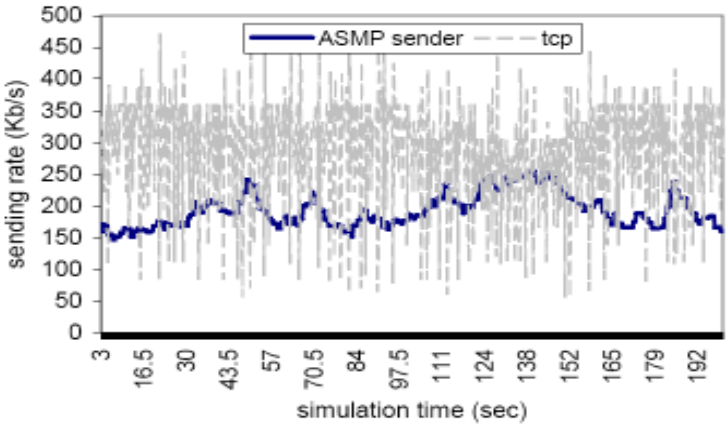
Παρόλα αυτά όμως, επιβεβαιώνουμε ότι ο ASMP εξυπηρετητής είναι σε θέση να μεταδώσει πολυμεσική πληροφορία στους δέκτες σε ρυθμούς αποδεκτούς σε σχέση με τα κριτήρια ποιότητας (QoS) των εφαρμογών πολυμέσων. Το Σχήμα 7 μας δείχνει τις απώλειες πακέτων από δύο αντιπροσωπευτικά δείγματα των δύο ομάδων. Οι

[1] Σύμφωνα με την RFC 3550 το διάστημα χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών RTCP αναφορών σχετίζεται με τον αριθμό των ανταποκριτών σε μια multicast σύσκεψη. Όταν ο αριθμός αυτός αυξάνει τότε αυξάνει και το διάστημα χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών RTCP αναφορών.

"γρήγοροι" δέκτες παρουσιάζουν σχεδόν μηδενικές απώλειες πακέτων ενώ οι "αργοί" δέκτες παρουσιάζουν ελάχιστες απώλειες. Οι τιμές της διακύμανσης καθυστέρησης (jitter delay) στους "γρήγορους" δέκτες είναι κοντά στο μηδέν, ενώ στους "αργούς" δέκτες κυμαίνονται μεταξύ 1 και 23 milliseconds (Σχήμα 8).

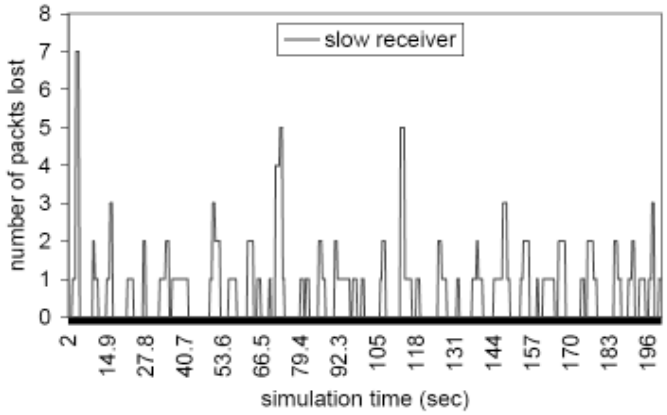
6.2.3 Ομαλή Συμπεριφορά

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης εξετάζουμε κατά πόσο ο μηχανισμός ελέγχου ομαλής ροής μεταφοράς ανταποκρίνεται στους στόχους της σχεδίασής μας χωρίς να επηρεάζει τη μετάδοση TCP πακέτων. Παρατηρούμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχήμα 9) ότι η TCP πληροφορία απολαμβάνει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Αυτή είναι μια πρώτη ενθαρρυντική ένδειξη ότι οι ομαλοί ρυθμοί μετάδοσης δεν είναι μόνο μια επιθυμητή ιδιότητα για τις εφαρμογές πολυμέσων αλλά εξυπηρετούν παράλληλα και τη μετάδοση της TCP πληροφορίας. Παρατηρούμε επίσης στα ίδια αποτελέσματα ότι ο ρυθμός μετάδοσης του ASMP είναι ομαλός με πολύ μικρές απώλειες πακέτων (Σχήμα 10). Οι γρήγοροι δέκτες παρουσιάζουν σχεδόν μηδενικές απώλειες. Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός απώλειας πακέτων στους αργούς δέκτες είναι πολύ χαμηλός για μια εφαρμογή πολυμέσων. Μηχανισμοί Forward Error Correction (FEC) μπορούν να αμβλύνουν τα αρνητικά αποτελέσματα από το μικρό ρυθμό απώλειας πακέτων χωρίς να επιβαρύνουν ιδιαίτερα το ρυθμό μετάδοσης. Οι τιμές της διαταραχής είναι ίδιες με τη προηγούμενη προσομοίωση (Σχήμα 11). Οι γρήγοροι κάτω από αυτές τις συνθήκες προσομοίωσης παρουσιάζουν σχεδόν μηδενική διαταραχή.

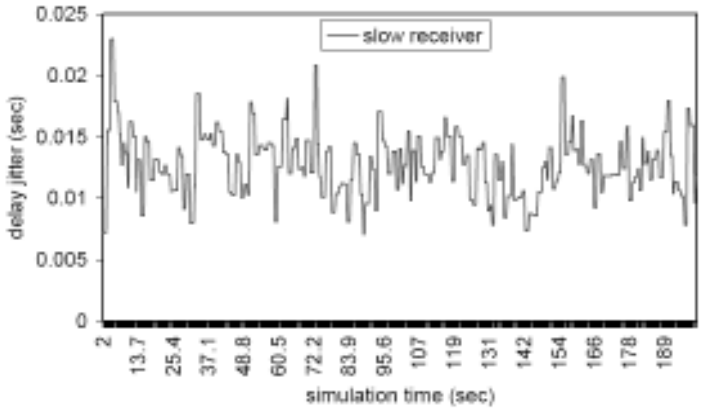


Σχήμα 9. Ομαλή συμπεριφορά – Ρυθμοί μετάδοσης

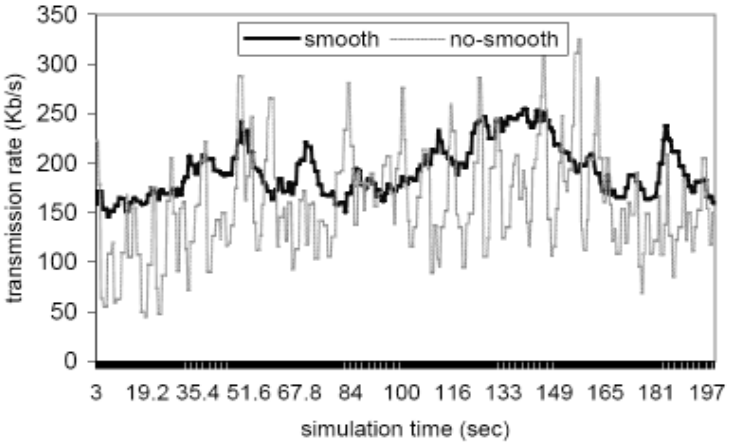
Στο Σχήμα 12 παρουσιάζουμε τη σύγκριση που αφορά τις διακυμάνσεις του ρυθμού μετάδοσης με ή χωρίς το μηχανισμό προσαρμογής του ASMP. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι οι ομαλοί ρυθμοί μετάδοσης αποτρέπουν τις διακυμάνσεις και έτσι είναι κατάλληλοι για τις εφαρμογές πολυμέσων. Το μόνο ορατό μειονέκτημα είναι η ελαφρά αύξηση του ρυθμού απωλειών των πακέτων διότι το ASMP δεν ανταποκρίνεται άμεσα στις στιγμιαίες και απότομες διακυμάνσεις των συνθηκών του δικτύου.



Σχήμα 10. Ομαλή συμπεριφορά – Απώλειες πακέτων



Σχήμα 11. Ομαλή συμπεριφορά - Διαταραχή

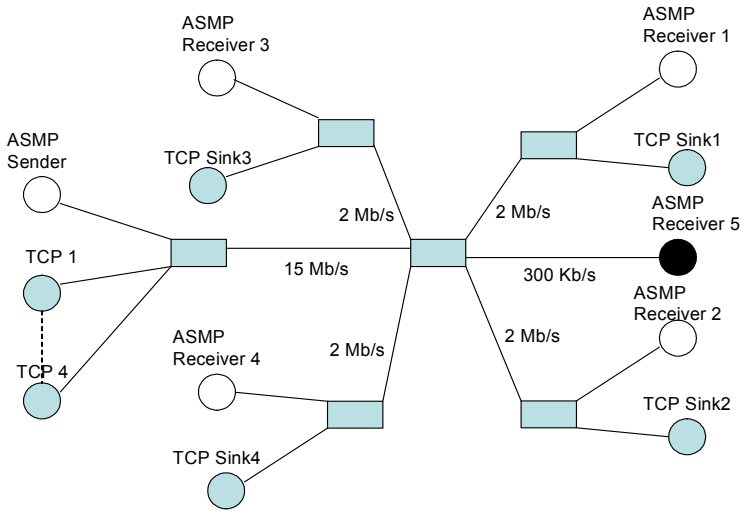


Σχήμα 12. Ομαλή συμπεριφορά έναντι μη ομαλής συμπεριφοράς

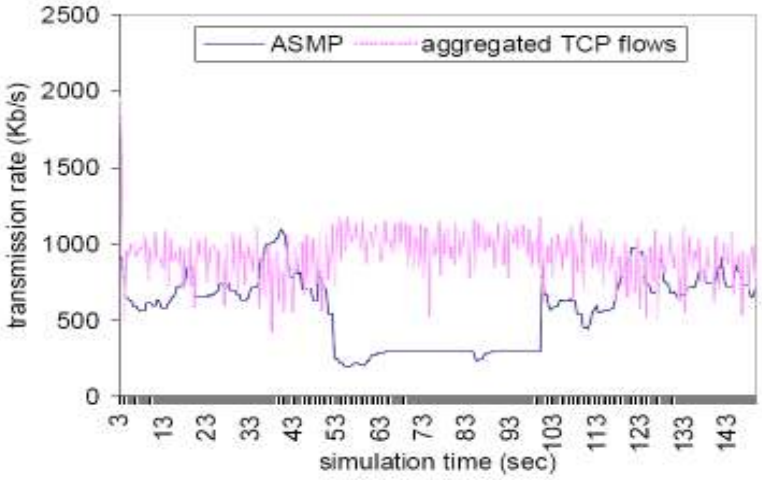
6.2.4 Μεταγενέστερη Είσοδος Παραλήπτη στην Ομάδα με Χαμηλό Ρυθμό Λήψης

Κατά τη μετάδοση πολλαπλής διανομής είναι φυσικό πολλές φορές οι δέκτες να έχουν διαφορετική δυνατότητα λήψης. Επομένως ο αποστολέας θα πρέπει να

προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης ακόμα και όταν ένας παραλήπτης ακολουθεί μια σύσκεψη όπου οι υπόλοιποι δέκτες έχουν υψηλότερη δυνατότητα λήψης. Αυτό είναι το σενάριο το οποίο θα εξετάσουμε σε αυτή την προσομοίωση. Κατά το σενάριο αυτό δημιουργούμε μία τοπολογία όπου μια σύσκεψη πολλαπλής διανομής αποτελείται από πέντε ASMP δέκτες που μοιράζονται πόρους του δικτύου με τέσσερις TCP συνδέσεις.



Σχήμα 13. Τοπολογία προσομοίωσης με "αργό" παραλήπτη



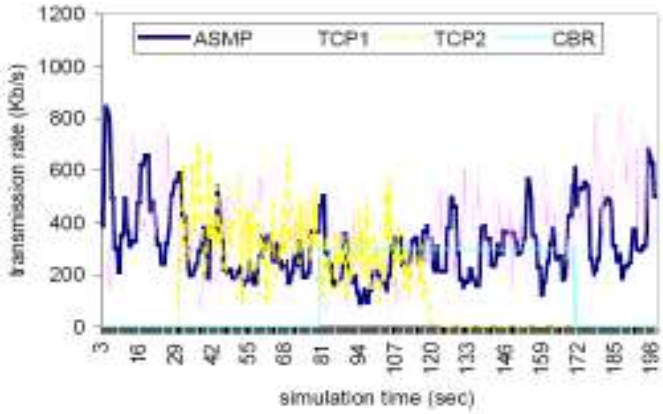
Σχήμα 14. Ρυθμοί μετάδοσης του ASMP (μεταγενέστερη είσοδος "αργού" παραλήπτη στη σύσκεψη)

Όλοι οι δέκτες (ASMP και TCP) συνδέονται με ζεύξεις χωρητικότητας 1.5 Mb/s (Σχήμα 13). Στην έναρξη της προσομοίωσης ο ASMP αποστολέας μεταδίδει με ρυθμό 500 Kb/s και μόνο τέσσερις από τους πέντε ASMP δέκτες ακολουθούν τη σύσκεψη. Κατά το 50κοστό δευτερόλεπτο της προσομοίωσης ένας ακόμη ASMP παραλήπτης με χαμηλό ρυθμό λήψης 300 Kb/s ακολουθεί τη σύσκεψη. Παρατηρούμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ότι ο ASMP αποστολέας προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης αφού λαμβάνει υπόψη το χαμηλό ρυθμό λήψης του αργού παραλήπτη (Σχήμα 14). Κατά το 100τοστό δευτερόλεπτο της προσομοίωσης ο αργός παραλήπτης εγκαταλείπει τη σύσκεψη και τότε ο ASMP αποστολέας προσαρμόζει το

ρυθμό μετάδοσης ανάλογα ώστε τώρα να εξυπηρετεί καλύτερα τους δέκτες με υψηλότερες δυνατότητες λήψης. Συμπεραίνουμε από αυτό το σενάριο ότι ο ASMP αποστολέας όχι μόνο είναι σε θέση να εξυπηρετήσει τους ανταποκριτές του δικτύου ανάλογα με την δυνατότητα λήψης τους αλλά και διατηρεί την ομαλότητα στις διακυμάνσεις του ρυθμού μετάδοσης.

6.2.5 Απόκριση στις Δυναμικές Αλλαγές του Δικτύου από Ανταγωνιστικά Πρωτόκολλα

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης μελετάμε την απόκριση και γενικότερα τη συμπεριφορά του ASMP σε ένα περιβάλλον με ανταγωνιστικές πηγές ροών πληροφορίας μέσα από τον ίδιο περιοριστικό σύνδεσμο. Η εξεταζόμενη τοπολογία του δικτύου αποτελείται από μια ASMP ροή που μοιράζεται τις πηγές του δικτύου με δύο ροές TCP. Η πρώτη TCP ροή πληροφορίας (TCP1) μεταδίδεται κατά την έναρξη της προσομοίωσης ταυτόχρονα με τη ASMP ροή. Η δεύτερη TCP ροή (TCP2) μεταδίδεται κατά το 30κοστό δευτερόλεπτο της προσομοίωσης. Σε αυτό το σημείο έχουμε τρεις ροές πληροφορίας οι οποίες μοιράζονται τις πηγές του δικτύου. Παρατηρούμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχήμα 15) ότι το εύρος ζώνης στο περιοριστικό σύνδεσμο μοιράζεται εξίσου από τις τρεις ροές καθώς η μέχρι τώρα συμφόρηση στο δίκτυο δεν είναι υψηλή. Εξάλλου οι μηχανισμοί αποφυγής συμφόρησης τόσο του TCP όσο και του ASMP εγγυώνται μια τέτοια κατάσταση. Κατά το 80κοστό δευτερόλεπτο προσομοίωσης προσθέτουμε μια πηγή συνεχούς ρυθμού εκπομπής (Constant Bit Rate, CBR) η οποία μεταδίδει με ρυθμό 300 Kb/s και η οποία προκαλεί συμφόρηση στο δίκτυο. Παρόλα αυτά το ASMP ανταποκρίνεται στις νέα συνθήκες του δικτύου σε διάστημα ολίγων δευτερολέπτων και προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης με βάση την επικρατούσα κατάσταση του δικτύου. Στη χειρότερη περίπτωση ο ρυθμός μετάδοσης ότι ASMP είναι περίπου 100 Kb/s. Στο 120 δευτερόλεπτο της προσομοίωσης η ροή TCP2 τερματίζεται. Παρατηρούμε ότι ο ASMP αποστολέας από το σημείο αυτό και μετά αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης. Κατά το 170 δευτερόλεπτο προσομοίωσης η CBR πηγή τερματίζει τη μετάδοση των πακέτων και παρατηρούμε ότι ο ASMP αποστολές αυξάνει εκ νέου το ρυθμό μετάδοσης με βάση τη παρατηρούμενη συμφόρηση στο δίκτυο.



Σχήμα 15. Απόκριση του ASMP στις δυναμικές αλλαγές του δικτύου

Με αυτή την προσομοίωση συμπεραίνουμε ότι η επίδραση του μηχανισμού ελέγχου ροής του ASMP ανταποκρίνεται πολύ ικανοποιητικά στις διακυμάνσεις της

κατάστασης του δικτύου διατηρώντας τα χαρακτηριστικά του ομαλού ρυθμού μετάδοσης.

6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ASMP ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ - ΔΙΕΘΝΗ ΠΡΟΤΥΠΑ

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζεται η σύγκριση του ASMP μα τις δύο ποιο αντιπροσωπευτικές προτάσεις που αφορούν τον έλεγχο της συμφόρησης σε απλές ροές δεδομένων που μεταδίδονται σε ομάδες χρηστών σε δίκτυα μη εγγυημένης ποιότητας όπως το Διαδίκτυο.

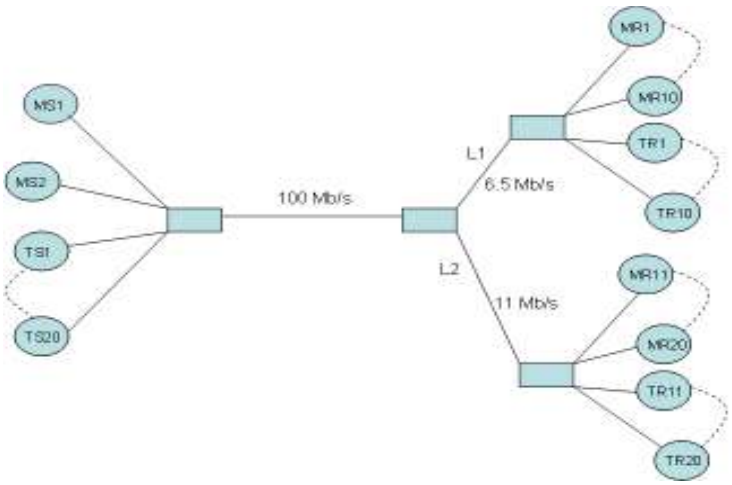
6.3.1 Σύγκριση με το Μηχανισμό TFMCC

Για τη μελέτη μας ενσωματώνουμε το κώδικα του TFMCC και του ASMP στο λογισμικό προσομοίωσης ns-2 (ο πηγαίος κώδικας είναι διαθέσιμος στις διευθύνσεις [56] και [57], αντίστοιχα). Έχοντας έτσι ενσωματώσει το κώδικα μπορούμε να συγκρίνουμε τις δύο προτάσεις σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον εκτελώντας τις παρακάτω εξομοιώσεις και εξετάζοντας:

- Τη φιλική προς το TCP συμπεριφορά, όταν δέκτες που ακολουθούν μια σύσκεψη πολλαπλής διανομής μοιράζονται πηγές του δικτύου με πολλαπλές TCP συνδέσεις.
- Τη συμπεριφορά του κάθε μηχανισμού όταν ένας "αργός" παραλήπτης ακολουθεί σε μεταγενέστερο χρόνο μια υπάρχουσα σύσκεψη.
- Την απόκρισή τους στις απότομες μεταβολές του δικτύου από την απώλεια πακέτων στη ζεύξη και τέλος
- Την απόκρισή του σε περιβάλλον όπου ανταγωνίζονται τις πηγές του δικτύου με άλλες ροές δεδομένων.

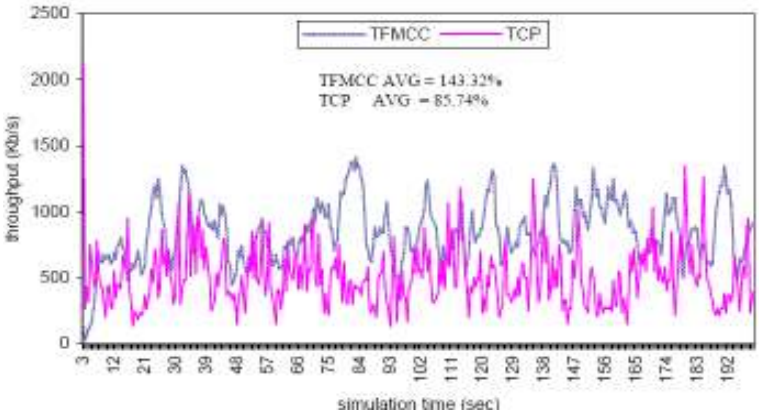
6.3.1.1 Φιλικότητα προς το TCP

Σε αυτή την προσομοίωση αξιολογούμε τη φιλικότητα του ASMP και του TFMCC προς TCP ροές δεδομένων, σε μια τοπολογία δικτύου με περιοριστικούς συνδέσμους, όπου δύο ροές πολλαπλής διανομής μοιράζονται τις πηγές του δικτύου με είκοσι TCP ροές (Σχήμα 16). Συμβολίζουμε με MS και MR τους αποστολείς και δέκτες αντίστοιχα της ροής πολλαπλής διανομής, ενώ με TS και TR τους αποστολείς και δέκτες της TCP κίνησης. Το εύρος ζώνης των περιοριστικών συνδέσμων θα πρέπει να μοιράζεται ισομερώς ανάμεσα στις δύο ροές πολλαπλής διανομής και στη TCP κίνηση που σημαίνει ότι κάθε παραλήπτης πολλαπλής διανομής δεν θα πρέπει να δεσμεύει περισσότερο από το 9.09% της κοινής ζεύξης (κάθε ζεύξη LI και L2 εξυπηρετεί 10 TCP ροές και μια ροή πολλαπλής διανομής). Έτσι αναμένουμε ότι κάθε ροή θα καταναλώνει $100\%/11 = 9.09\%$ του διαθεσίμου εύρους. Επομένως οι δέκτες πολλαπλής διανομής στη ζεύξη L1 (L1=6.5 Mb/s) δεν θα πρέπει να δεσμεύσουν περισσότερο από 590.85 Kb/s, ενώ στη ζεύξη με υψηλότερο εύρος (L2=11 Mb/s) δεν θα πρέπει να δεσμεύσουν περισσότερο από 1 Mb/s. Το υπόλοιπο διαθέσιμο εύρος θα πρέπει να κατανέμεται στις TCP ροές και αναμένουμε ότι κάθε TCP σύνδεση θα λάβει το ολιγότερο το ίδιο εύρος όπως και η ροή πολλαπλής διανομής.

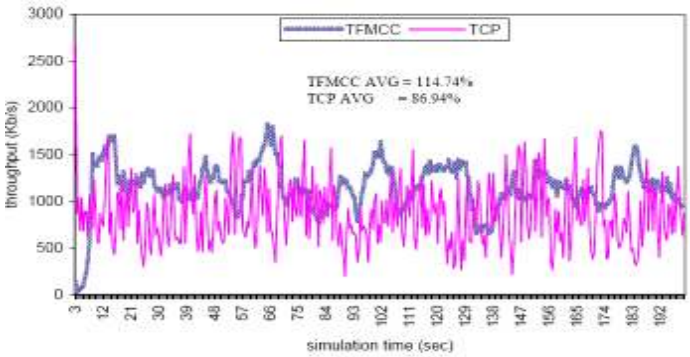


Σχήμα 16. Τοπολογία TCP φιλικότητας

Στο Σχήμα 17 και Σχήμα 18 παρουσιάζουμε τη ρυθμοαπόδοση του TFMCC και του TCP στις ζεύξεις L1 και L2 αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι το TFMCC στη ζεύξη χαμηλής ταχύτητας (L1) καταναλώνει το 143% από το αναμενόμενο ποσοστό του ενώ το TCP επιτυγχάνει απόδοση περίπου 85%. Στη ζεύξη υψηλότερης χωρητικότητας (L2) το TFMCC απολαμβάνει επίσης υψηλότερο ποσοστό κατανάλωσης του διαθεσίμου εύρους από ότι οι TCP ροές. Η εκτίμησή μα; είναι ότι οι TCP ροές θα αντιμετωπίσουν σοβαρά προβλήματα μετάδοσης εάν μοιράζονται πηγές του δικτύου με πολλαπλές TFMCC ροές.

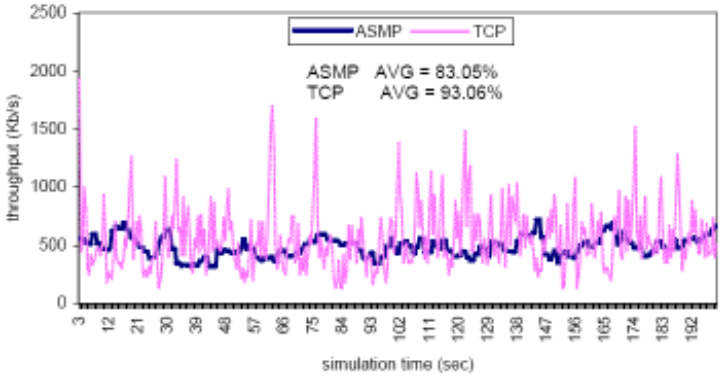


Σχήμα 17. Σύγκριση TFMCC και TCP κίνησης στη ζεύξη L1

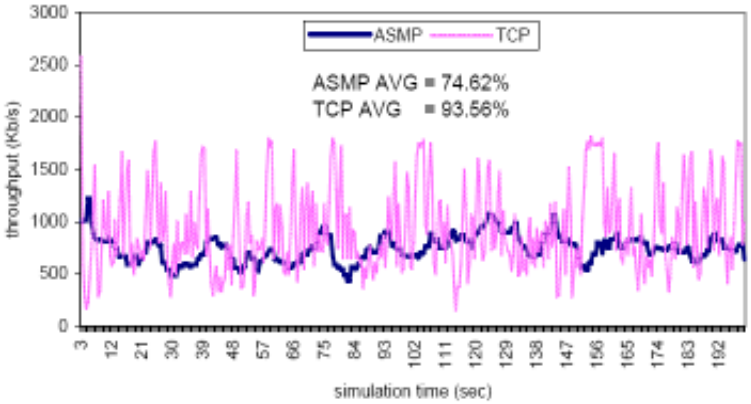


Σχήμα 18. Σύγκριση TFMCC και TCP κίνησης στη ζεύξη L2

Αντίθετα το ASMP είναι περισσότερο φιλικό προς το TCP από ότι το TFMCC. Παρατηρούμε στο Σχήμα 19 και Σχήμα 20 ότι η TCP κίνηση απολαμβάνει ένα ποσοστό απόδοσης 93% και στις δύο ζεύξεις L1 και L2, που είναι πολύ κοντά στη απόλυτη τιμή του 100%.

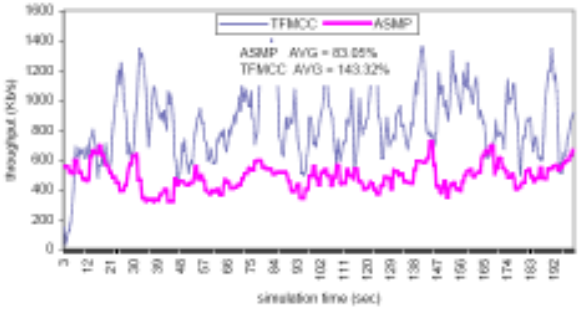


Σχήμα 19. Σύγκριση ASMP και TCP κίνησης στη ζεύξη L1

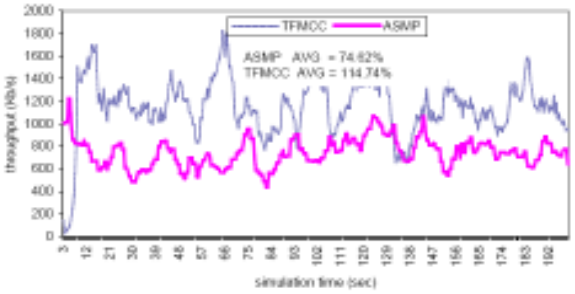


Σχήμα 20. Σύγκριση ASMP και TCP κίνησης στη ζεύξη L2

Παρατηρούμε επίσης εκτός από τη φιλικότητα προς το TCP την ομαλότητα των ρυθμών μετάδοσης του ASMP σε σχέση με το TFMCC όταν συγκρίνουμε τα δύο πρωτόκολλα στο Σχήμα 21 και Σχήμα 22. Είναι απόλυτα δικαιολογημένο και δίκαιο να συμπεράνουμε ότι το ASMP αποτρέπει τις απότομες διακυμάνσεις του ρυθμού μετάδοσης σε σχέση με το TFMCC. Ο Πίνακας 3 και ο Πίνακας 4 παρουσιάζουν τη ρυθμοαπόδοση του κάθε πρωτοκόλλου.



Σχήμα 21. Σύγκριση TFMCC και ASMP ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη L1



Σχήμα 22. Σύγκριση TFMCC και ASMP ρυθμού μετάδοσης στη ζεύξη L2

	Link utilization	Average transmission rates
TFMCC	L1: 143.32%	846,800.6 Kb/s
	L2: 114.74%	1.147 Mb/s
TCP	L1: 85.74%	506.59 Kb/s
	L2: 86.94%	869.40 Kb/s

Πίνακας 3. Σύγκριση ρυθμοαπόδοσης TFMCC και TCP

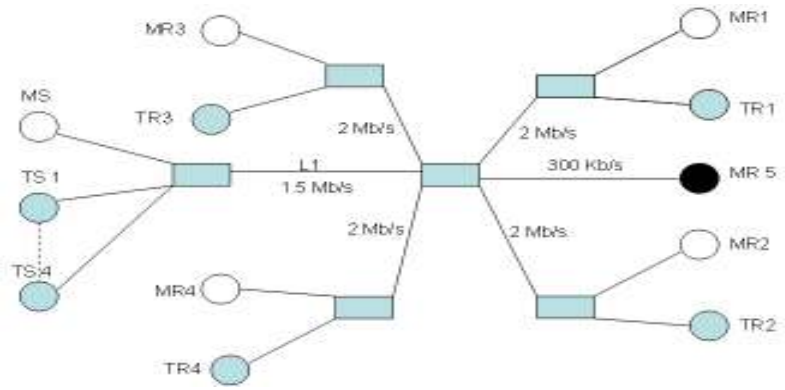
	Link utilization	Average transmission rates
ASMP	L1: 83.05%	490 Kb/s
	L2: 74.62%	746.20 Kb/s
TCP	L1: 95.06%	561.66 Kb/s
	L2: 93.56%	935.60 Kb/s

Πίνακας 4. Σύγκριση ρυθμοαπόδοσης ASMP και TCP

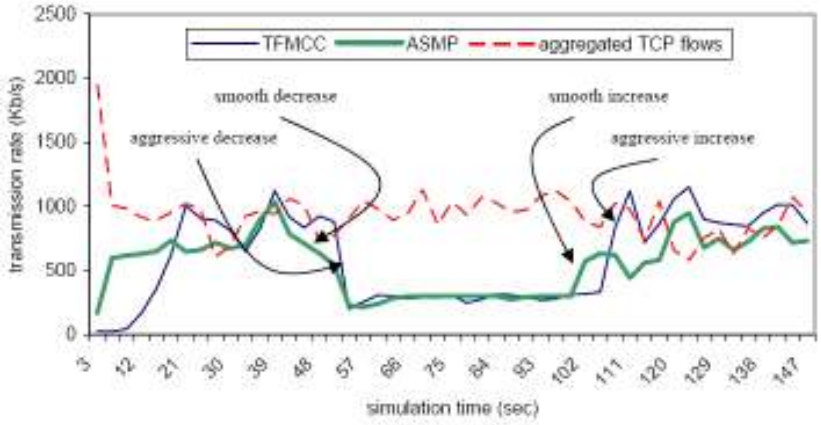
6.3.1.2 Μεταγενέστερη Ακολουθία Παραλήπτη στη Σύσκεψη

Στην προσομοίωση αυτή μία ζεύξη πιθανής συμφόρησης (L1) με χωρητικότητα 1.5 Mb/s εξυπηρετεί μία ροή πολλαπλής διανομής και τέσσερις TCP συνδέσεις (Σχήμα 23). Κατά την έναρξη της προσομοίωσης ο αποστολέας πολλαπλής διανομής μεταδίδει με ρυθμό 500 Kb/s και τέσσερις δέκτες πολλαπλής διανομής ακολουθούν τη σύσκεψη. Στο 50κοστό δευτερόλεπτο της προσομοίωσης ένας ακόμα παραλήπτης πολλαπλής διανομής (MR5) με χαμηλότερη δυνατότητα λήψης (300 Kb/s) ακολουθεί

τη σύσκεψη. Παρατηρούμε ότι απαιτούνται κάποια ελάχιστα δευτερόλεπτα μέχρι το TFMCC να αντιληφθεί τη παρουσία του MR5 στη σύσκεψη, ώστε να προσαρμόσει ανάλογα το ρυθμό εκπομπής του. Επιπλέον το TFMCC αντιδρά με τέτοιο τρόπο ελαττώνοντας απότομα το ρυθμό εκπομπής υπό το φως της πρώτης απώλειας των πακέτων λόγω συμφόρησης (Σχήμα 24). Αντίθετα το ASMP δεν αντιδρά με τον ίδιο τρόπο στο εξεταζόμενο σενάριο και προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσής του με ομαλότερο τρόπο. Στο 100στό δευτερόλεπτο της προσομοίωσης ο παραλήπτης MR5 εγκαταλείπει τη σύσκεψη και παρατηρούμε ότι το TFMCC αυξάνει και πάλι απότομα το ρυθμό εκπομπής κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργεί απότομες διακυμάνσεις. Το ASMP αντίθετα αυξάνει το ρυθμό εκπομπής σταδιακά, αποφεύγοντας τις υψηλές διακυμάνσεις (Σχήμα 24). Τα συμπεράσματά μας από αυτή την προσομοίωση είναι ότι το ASMP όχι μόνο είναι σε θέση να αντιληφθεί την είσοδο ενός μεταγενέστερου παραλήπτη με χαμηλότερη δυνατότητα λήψης αλλά και ότι αντιδρά κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγει τις απότομες αυξομειώσεις του ρυθμού εκπομπής.



Σχήμα 23. Τοπολογία εισόδου "αργού" παραλήπτη

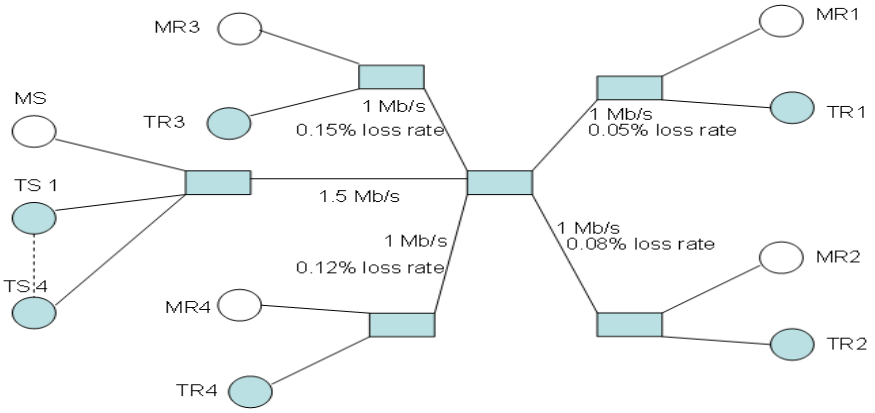


Σχήμα 24. Ρυθμοί μετάδοσης TFMCC έναντι ASMP

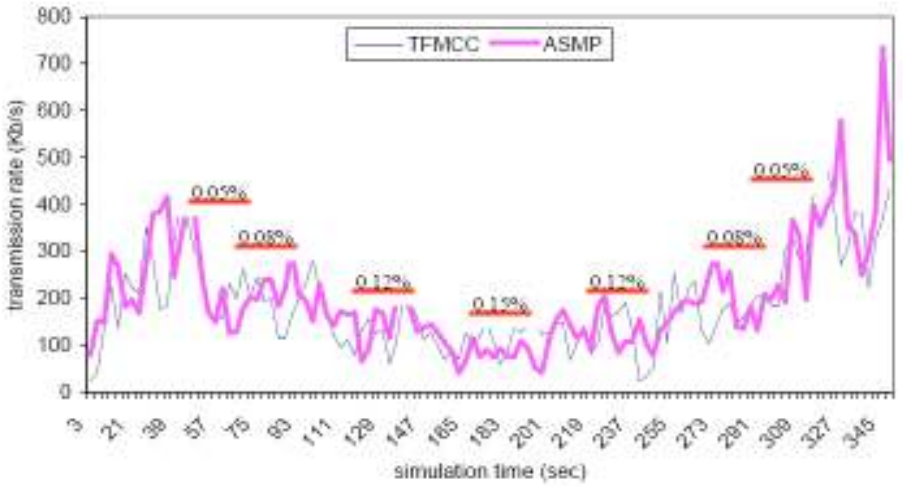
6.3.1.3 Απόκριση στις Μεταβολές του Ρυθμού Απωλειών Πακέτων

Σε αυτό το σενάριο εξετάζουμε πως το TFMCC και το ASMP ανταποκρίνονται σε ένα περιβάλλον δικτύου με μεταβαλλόμενες απώλειες πακέτων στις ζεύξεις του. Οι μεταβολές στη απώλεια των πακέτων επηρεάζουν την εκτίμηση για το επιτρεπόμενο

εύρος ζώνης το οποίο είναι φιλικό προς το TCP. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε μία τοπολογία "αστέρα" με τέσσερις ζεύξεις και με ρυθμό απωλειών 0.05%, 0.08%, 0.12%, and 0.15%, αντίστοιχα (Σχήμα 25). Κατά την έναρξη της προσομοίωσης έχουμε μόνο ένα παραλήπτη που ακολουθεί τη σύσκεψη ενώ οι υπόλοιποι δέκτες ακολουθούν τη σύσκεψη σε διαστήματα των 50 δευτερολέπτων. Οι δέκτες με χαμηλότερο ρυθμό απωλειών στις ζεύξεις τους ακολουθούν πρώτοι τη σύσκεψη. Μετά από 200 δευτερόλεπτα οι δέκτες εγκαταλείπουν τη σύσκεψη κατά αντίστροφη σειρά δηλαδή οι δέκτες με τις μεγαλύτερες απώλειες στις ζεύξεις τους αφήνουν πρώτοι τη σύσκεψη. Παράλληλα TCP ροές μοιράζονται το διαθέσιμο εύρος στις τέσσερις ζεύξεις μαζί με τη ροή πολλαπλής διανομής. Το Σχήμα 26 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι η ομαλή συμπεριφορά του ASMP δεν διαταράσσει την απόκρισή του στο μεταβαλλόμενο αυτό περιβάλλων. Η αντίδραση του TFMCC είναι πολύ κοντά σε αυτή του ASMP. Αναμέναμε τη συμπεριφορά αυτή του TFMCC, καθόσον ένας σημαντικός στόχος στο σχεδιασμό του TFMCC είναι η ομαλή του αντίδραση στις απώλειες των πακέτων έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση δεδομένων από τις εφαρμογές πολυμέσων. Η πρότασή μας όμως προσφέρει ακόμα ομαλότερες αντιδράσεις σε περιβάλλον απώλειες πακέτων από ότι το TFMCC.



Σχήμα 25. Τοπολογία με μεταβαλλόμενο ρυθμό απωλειών

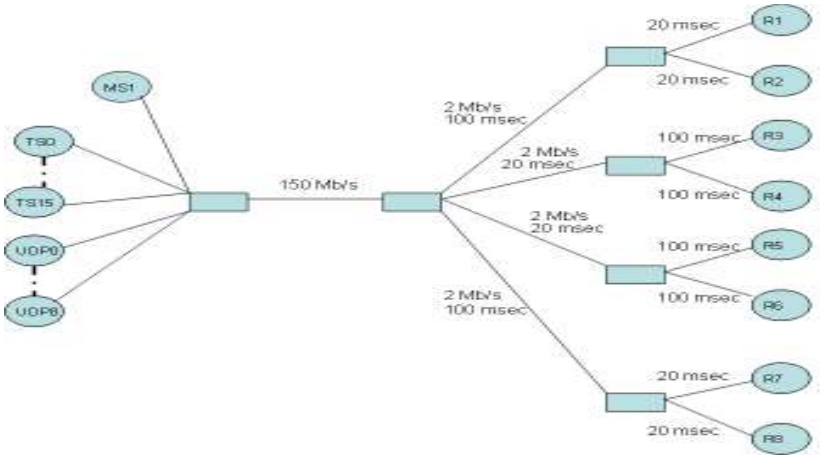


Σχήμα 26. Απόκριση σε μεταβαλλόμενους ρυθμούς απωλειών

6.3.1.4 Απόκριση στις δυναμικές μεταβολές του δικτύου υπό τη παρουσία άλλων ανταγωνιστικών πηγών

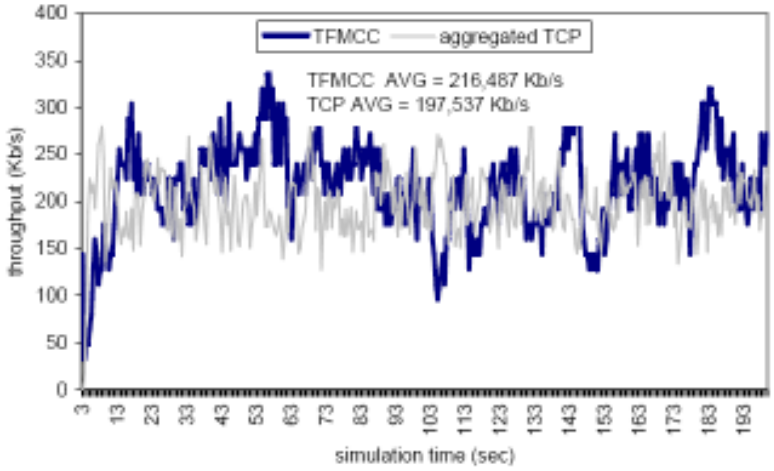
Στην παρούσα προσομοίωση συγκρίνουμε το TFMCC και ASMP σε ένα ετερογενές δυναμικό δίκτυο το οποίο έχει που χρησιμοποιηθεί για παρόμοια πειράματα στην εργασία [28]. Στο Σχήμα 27 οκτώ δέκτες (R1 έως R8) συνδέονται με ζεύξεις των 2 Mb/s και δημιουργούμε τουλάχιστο μία ζεύξη με καθυστέρηση 100 msec μεταξύ αποστολέα και δεκτών. Σε κάθε ζεύξη δύο TCP ροές ξεκινούν και τερματίζουν τυχαία τη μετάδοσή τους σύμφωνα με μια Pareto διανομή με μέση τιμή χρόνου των 5 δευτερολέπτων. Δύο συμπληρωματικές UDP ροές των 400 Kb/s ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται με τυχαία σειρά επίσης σε κάθε ζεύξη.

Οι διαφορετικές αυτές ροές δημιουργούν με δυναμικό τρόπο σημεία συμφόρησης καθιστώντας έτσι το δίκτυο ως ετερογενές. Έτσι υπάρχει τουλάχιστον μια ροή πολλαπλής διανομής από το αποστολέα πολλαπλής διανομής (MS1) προς όλους τους δέκτες. Ως εκ τούτου, σε κάθε χρονική στιγμή υπάρχουν το πολύ πέντε ροές σε κάθε σύνδεση: δύο TCP, δύο UDP και μία ροή πολλαπλής διανομής. Η κάθε ροή πολλαπλής διανομής αναμένεται να λάβει περίπου μερίδιο 400 Kb/s από το διατιθέμενο εύρο ζώνης της κάθε ζεύξης.

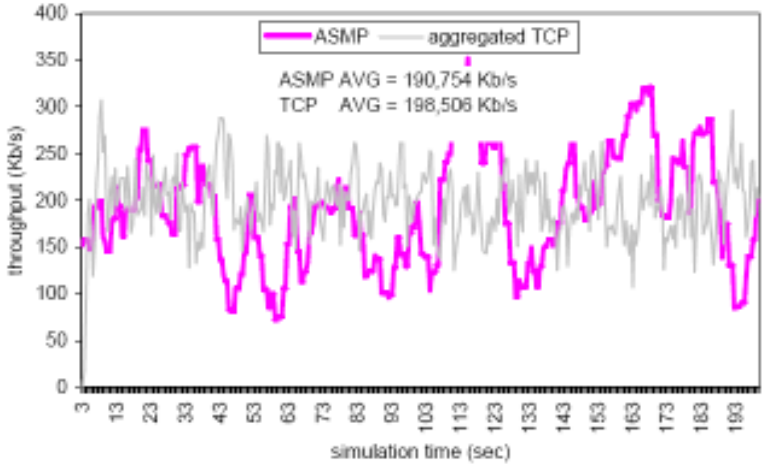


Σχήμα 27. Ετερογενές δυναμικό δίκτυο

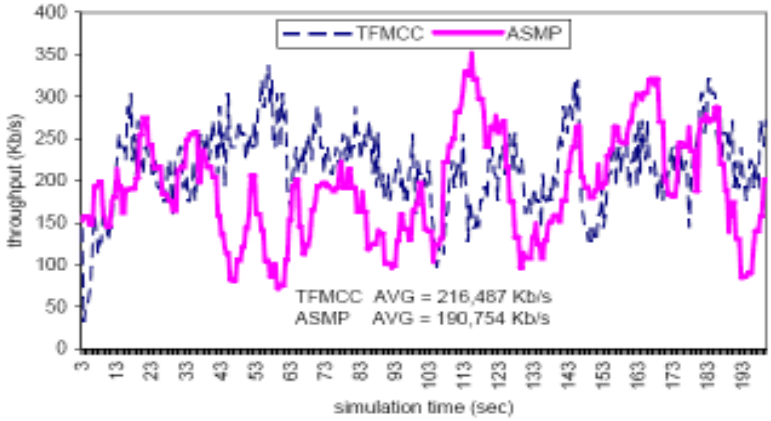
Παρατηρούμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχήμα 28) ότι το TFMCC παρουσιάζει υψηλότερη ρυθμοαπόδοση από ότι το ASMP (Σχήμα 29), ενώ η ρυθμοαπόδοση του TCP είναι υψηλότερη όταν μοιράζεται το διατιθέμενο εύρος με το ASMP. Ακόμη μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση (Σχήμα 30) είναι ότι το ASMP παρουσιάζει υψηλή σταθερότητα και προσαρμοστικότητα σε αυτό το ετερογενές περιβάλλον αν και περιμέναμε ότι οι μηχανισμοί ελέγχου των διακυμάνσεων του ρυθμού εκπομπής σε συνδυασμό με τη υψηλή περίοδο μεταξύ δύο διαδοχικών ASMP αναφορών θα μείωναν την απόκριση του ASMP.



Σχήμα 28. Απόκριση σε ανταγωνιστικές πηγές πληροφορίας: Ρυθμοαπόδοση TCP με ανταγωνιστικές UDP και TFMCC ροές



Σχήμα 29. Απόκριση σε ανταγωνιστικές πηγές πληροφορίας: Ρυθμοαπόδοση TCP με ανταγωνιστικές UDP και ASMP ροές



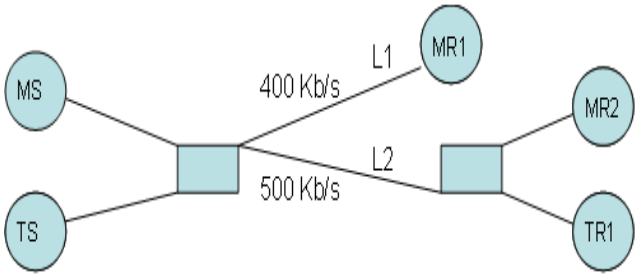
Σχήμα 30. Απόκριση σε ανταγωνιστικές πηγές πληροφορίας: TFMCC έναντι ASMP

6.3.2 Σύγκριση με το Μηχανισμό PGMCC

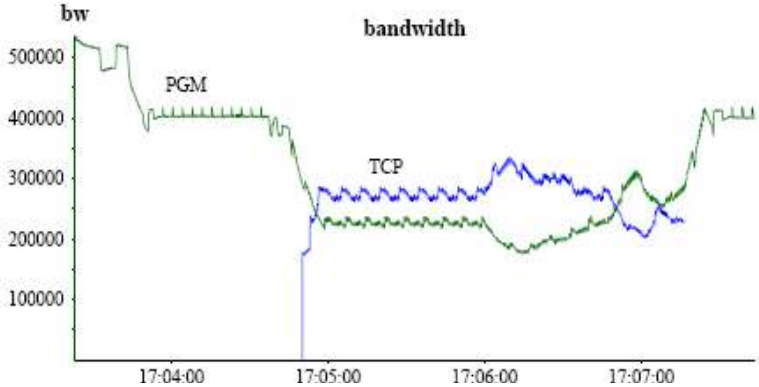
Για τη σύγκριση ASMP και PGMCC χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων του PGMCC από την εργασία [3] και συγκρίνουμε αυτά με παρόμοιες εξομοιώσεις του ASMP με το λογισμικό ns-2.

6.3.2.1 Φιλικότητα προς το TCP

Χρησιμοποιούμε το σενάριο προσομοίωσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 31 με δύο PGMCC δέκτες (MR1, MR2) που ακολουθούν την ίδια σύσκεψη και ένα TCP παραλήπτη (TR). Συμβολίζουμε με MS τον αποστολέα πολλαπλής διανομής και με TS το TCP αποστολέα. Οι ζεύξεις L1 και L2 έχουν χωρητικότητα 400Kb/s και 500 Kb/s αντίστοιχα και η καθυστέρηση διάδοσης είναι 50 msec και για τις δύο ζεύξεις. Κατά την έναρξη της προσομοίωσης ο παραλήπτης MR2 ακολουθεί τη σύσκεψη και εν συνεχεία ακολουθούν οι δέκτες MR1 και TR.



Σχήμα 31. Τοπολογία με περιοριστικό σύνδεσμο



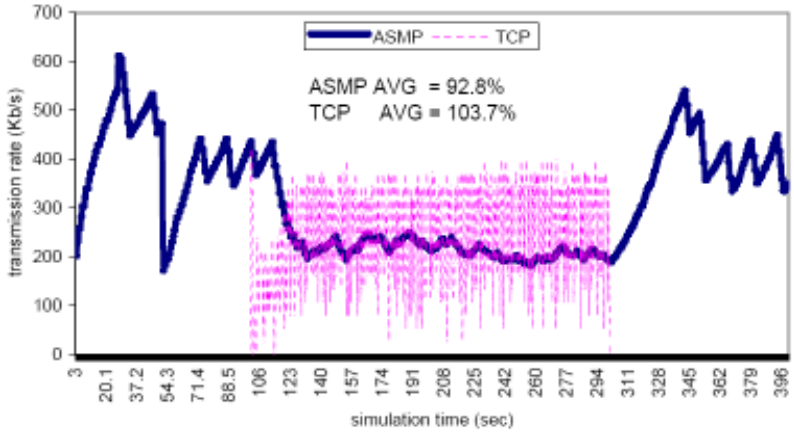
Σχήμα 32. PGMCC έναντι TCP ροής

Παρατηρούμε (Σχήμα 32) ότι στην αρχή της προσομοίωσης ο PGMCC αποστολέας (MS) κατέχει όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης και όταν ο παραλήπτης MR2 προσχωρήσει στην εν λόγω σύσκεψη (χρόνος προσομοίωσης 17:04) ότι μειώνει το ρυθμό μετάδοσης στα 400 Kb/s. Ο PGMCC αποστολέας μειώνει περαιτέρω το ρυθμό μετάδοσης σε περίπου 220 Kb/s όταν ο TCP αποστολέας (TS) ξεκινά τη μετάδοση (χρόνος προσομοίωσης 17:05). Όταν ο TCP αποστολέας τερματίζει τη μετάδοση (χρόνος προσομοίωσης 17:07) ο PGMCC αποστολέας αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης σε 500 Kb/s δημιουργώντας συμφόρηση στον MR1. Η συμφόρηση και η απώλεια πακέτων έχει ως αποτέλεσμα την εναλλαγή του acker από το MR2 στο MR1 και τότε ο ρυθμός μετάδοσης προσαρμόζεται στη τιμή των 400 Kb/s περίπου. Είναι ενδιαφέρον ότι το PGMCC παρουσιάζει μια σταθερή συμπεριφορά σε όλη τη

διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του γεγονότος ότι η εναλλαγή του acker εμφανίζεται μόνο μεταξύ δύο PGMCC δεκτών. Η παρατήρησή μας είναι ότι το PGMCC είναι φιλικό προς το TCP αν και σε αυτό το σενάριο με ήπιο κορεσμένο δίκτυο το PGMCC παρουσίασε μικρότερη ρυθμοαπόδοση από ότι το TCP.

Στο Σχήμα 33 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με την ίδια τοπολογία και χαρακτηριστικά δικτύου αυτή τη φορά με το ASMP. Παρατηρούμε ότι στην αρχή της προσομοίωσης ο ASMP αποστολέας προσπαθεί να καταλάβει όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Κατά το 50κοστό δευτερόλεπτο της προσομοίωσης ο δεύτερος ASMP παραλήπτης (MR1) ακολουθεί τη σύσκεψη και ο αποστολέας μειώνει το ρυθμό μετάδοσης περίπου σε 200 Kb/s, λαμβάνοντας υπόψη την εκτίμηση για ένα φιλικό προς το TCP ρυθμό μετάδοσης από το παραλήπτη MR1. Αυτό συμβαίνει διότι, όταν ένας ASMP παραλήπτης προσχωρήσει για πρώτη φορά σε μια σύσκεψη παρουσιάζει χαμηλή εκτίμηση για το διατιθέμενο εύρος ζώνης.

Ο αλγόριθμος του ASMP απαιτεί λίγα δευτερόλεπτα ώστε να συγκλίνει και πράγματι, στο 57° δευτερόλεπτο της προσομοίωσης ο παραλήπτης MR1 υπολογίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης που πρέπει να είναι περίπου 400 Kb/s. Κατά το 100στό δευτερόλεπτο ο αποστολέας MS μειώνει περαιτέρω το ρυθμό μετάδοσης ως αποτέλεσμα της συμφόρησης που προκαλείται από τη TCP κυκλοφορία. Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης του ASMP είναι σταθερός και ομαλός όταν η ζεύξη L2 κατανέμεται μεταξύ της ροής πολλαπλής διανομής και του TCP. Η ζεύξη L2 είναι σχεδόν εξίσου κατανεμημένη μεταξύ των δύο πηγών. Ο MS αποστολέας έχει ένα μέσο ποσοστό μετάδοσης 232,068 Kb/s και το TCP 259,401 Kb/s. Όταν το TCP σταματά τη μετάδοσή του τότε ο αποστολέας πολλαπλής διανομής αυξάνει βαθμιαία το ρυθμό μετάδοσης με ομαλό τρόπο, όπως ήταν αναμενόμενο.



Σχήμα 33. ASMP έναντι TCP ροής

Εξακριβώνουμε με τη βοήθεια αυτής της προσομοίωσης ότι το ASMP παρουσιάζει σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με το PGMCC, μολονότι το σενάριο αυτό ευνοεί το PGMCC όσον αφορά τον αριθμό των δεκτών που συμμετέχουν στη multicast σύσκεψη στην ομάδα και την έλλειψη δυναμική αλλαγών στη κατάσταση του δικτύου όπου το PGMCC θα έπρεπε να εναλλάσσει συχνά τον acker. Η εκτίμησή μας είναι ότι οι συχνές αλλαγές στην επιλογή του acker θα μειώσουν την απόδοση του PGMCC.

6.3.2.2 Απόκριση στις Απώλειες του Δικτύου

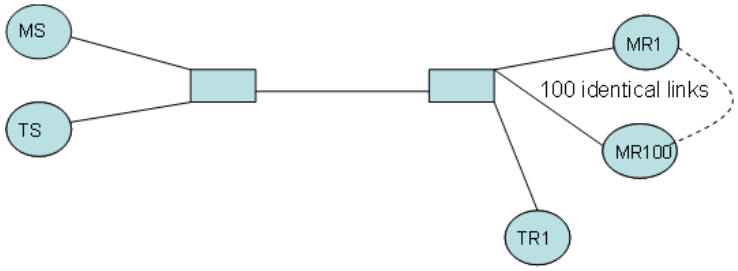
Στην παρούσα προσομοίωση ερευνούμε τη συμπεριφορά του PGMCC και το

συγκρίνουμε με το ASMP σε ένα δίκτυο όπου παρουσιάζονται απώλειες στις ζεύξεις του. Χρησιμοποιούμε ένα σενάριο προσομοίωσης με 100 δέκτες πολλαπλής διανομής πίσω από ανεξάρτητες ζεύξεις με τυχαίο ρυθμό απωλειών 1%. Μια πρόσθετη ζεύξη με τα ίδια χαρακτηριστικά χρησιμοποιείται για τη TCP πληροφορία. Στην αρχή της προσομοίωσης 10 δέκτες πολλαπλής διανομής ακολουθούν τη σύσκεψη και ακολουθούνται από 90 επιπλέον δέκτες κατά το 300 δευτερόλεπτο της προσομοίωσης (Σχήμα 34).

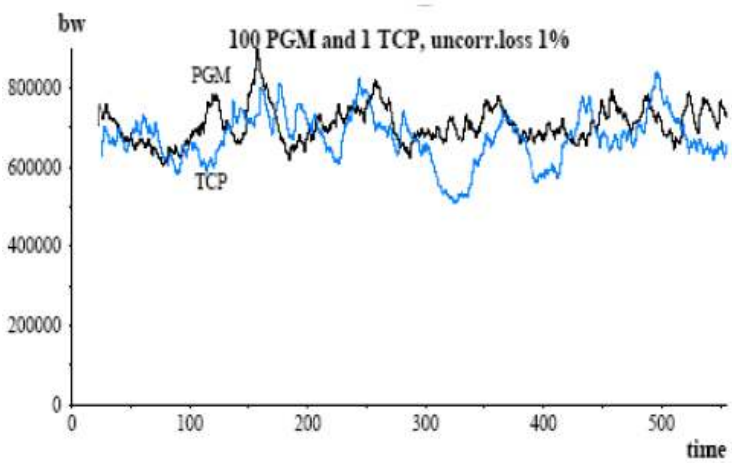
Στο Σχήμα 35 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το PGMCC. Παρατηρούμε ότι το PGMCC επιτυγχάνει χαμηλότερη απόδοση από ότι το TCP, καθώς η προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης στο PGMCC βασίζεται στην επιλογή του acker (ένας από τους 100 PGMCC δέκτες). Η παρουσία των πρόσθετων 90 δεκτών δεν φαίνεται, ωστόσο, να επηρεάσει την επίδοση του PGMCC.

Στο Σχήμα 36 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα για το ASMP. Η ρυθμοαπόδοση του TCP είναι και σε αυτό το σενάριο υψηλότερη από αυτή για το ASMP, καθόσον το TCP παρουσιάζει υψηλότερη απόκριση από ότι το ASMP. Ο ρυθμός μετάδοσης του ASMP μειώνεται στο 300 δευτερόλεπτο της προσομοίωσης όταν οι επιπλέον 300 δέκτες ακολουθούν και αυτοί τη σύσκεψη. Παρόλα αυτά ο ρυθμός μετάδοσης προσαρμόζεται ανάλογα μέσα σε χρόνο λίγων δευτερολέπτων. Οι πρόσθετοι 90 ASMP δέκτες δεν επηρεάζουν την απόδοση του ASMP.

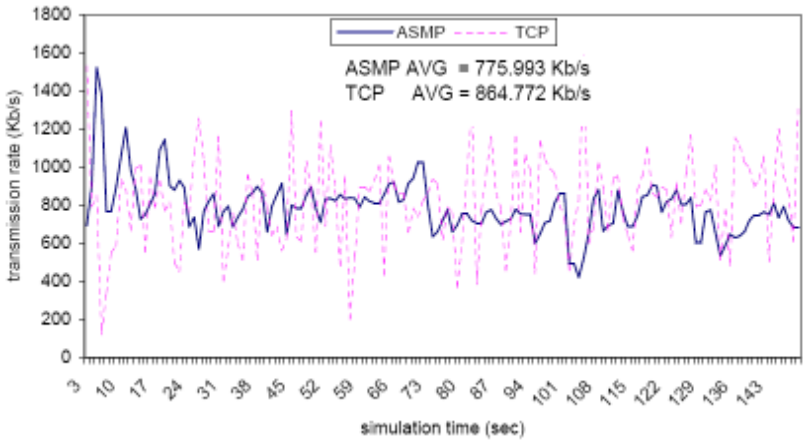
Συμπεραίνουμε από αυτή τη προσομοίωση ότι τόσο το ASMP όσο και το PGMCC έχουν παρόμοια συμπεριφορά σε αυτό το σενάριο με απώλειες στις ζεύξεις του δικτύου.



Σχήμα 34. 100 δέκτες Multicast, ένας TCP



Σχήμα 35. Απόκριση του PGMCC σε ήπιες απώλειες πακέτων



Σχήμα 36. Απόκριση του ASMP σε ήπιες απώλειες πακέτων

6.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΒΙΝΤΕΟ

Στις προηγούμενες παραγράφους συγκρίναμε την απόδοση του ASMP με δύο γνωστούς μηχανισμούς ελέγχου συμφόρησης, το TFMCC και το PGMCC. Ειδικότερα το TFMCC έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης αρκετών ερευνητών και έχει συγκριθεί με άλλες προτεινόμενες λύσεις ([58],[59],[60],[61]). Οι συγκρίσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό προσομοίωσης ns-2 αλλά όμως δεν είναι βασισμένες σε κανένα μοντέλο που να "μιμείται" τουλάχιστο τα χαρακτηριστικά της εκπομπής ενός βίντεο αρχείου. Επομένως η αξιολόγηση της απόδοσης των διαφόρων προτάσεων πραγματοποιήθηκε με "κλασικά" μετρικά δικτύων όπως η ρυθμοαπόδοση, ο ρυθμός απώλειας πακέτων, η καθυστέρηση κ.τ.λ. Βέβαια δεν υπάρχει κανένα λάθος με τη προσέγγιση αυτή καθώς και εμείς έχουμε συγκρίνει στο προηγούμενο κεφάλαιο το ASMP με το TFMCC και το PGMCC με "κλασικά" κριτήρια μετρικών δικτύων. Αυτό όμως που πρέπει να γίνει αντιληπτό είναι ότι οι συγκρίσεις μηχανισμών που στοχεύουν στη μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας και ιδιαίτερα εικόνας και ήχου (βίντεο) δεν είναι πλήρης όταν αγνοούμε τα κριτήρια εκείνα με τα οποία αξιολογούμε τη ποιότητα ενός αρχείου βίντεο, μετά τις παραμορφώσεις που υφίσταται κατά τη μετάδοσή του από τον αποστολέα στο τελικό χρήστη. Αυτό γίνεται διότι τα μετρικά των δικτύων δεν μπορούν από μόνα τους να χαρακτηρίσουν τη ποιότητα ενός αρχείου βίντεο διότι δεν λαμβάνεται υπόψη η αντίληψη του χρήστη σε αυτό που εκείνος θεωρεί καλή ή κακή ποιότητα. Είναι επίσης πάρα πολύ δύσκολο να μετατρέψει κανείς ή και να συσχετίσει τα μετρικά δικτύων σε μετρικά που έχουν σχέση με την εμπειρία του χρήστη και που διεθνώς ονομάζεται Ποιότητα Εμπειρίας (Quality of Experience-QoE).

Έτσι λοιπόν οι παραπάνω περιορισμοί ως μέρος του περιβάλλοντος προσομοίωσης μειώνουν την αξία της οποιαδήποτε πειραματικής αξιολόγησης κατά την οποία απουσιάζουν τα μετρικά ποιότητας μετάδοσης βίντεο. Επιπλέον είναι γνωστό ότι η διαφορετική κωδικοποίηση ενός αρχείου βίντεο είναι δυνατόν να προσφέρει στο χρήστη την εντύπωση μιας καλύτερης εμπειρίας σε ένα λαμβανόμενο αρχείο βίντεο που έχει μεταδοθεί σε ένα δίκτυο με τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά με το ίδιο αρχείο βίντεο που έχει κωδικοποιηθεί με κάποιο άλλο πρωτόκολλο. Επομένως είναι σημαντικό όταν αξιολογούμε μηχανισμούς ή πρωτόκολλα που στοχεύουν ειδικά στη

μετάδοση βίντεο να κάνουμε χρήση πραγματικών αρχείων βίντεο στο περιβάλλον προσομοίωσης και να συνδέουμε τα αποτελέσματά μας με QoE κριτήρια.

Για να ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί έχει σχεδιασθεί ένα περιβάλλον προσομοίωσης με την ονομασία Evalvid [62] που προσφέρει το πλαίσιο εκείνο αλλά και τα εργαλεία για τη μελέτη της μετάδοσης βίντεο. Στο νέο αυτό περιβάλλον προσομοίωσης η πειραματική αξιολόγηση είναι δυνατόν να περιλαμβάνει QoE κριτήρια. Η πρώτη έκδοση του Evalvid ήταν περιορισμένη στη μετάδοση αρχείων βίντεο σταθερού ρυθμού (Constant Bit Rate-CBR). Μια νεώτερη έκδοση με την ονομασία Evalvid-RA [63] επέκτεινε τις δυνατότητες της αρχικής έκδοσης με τη προσθήκη μετάδοσης βίντεο μεταβαλλόμενου ρυθμού. Παρόλα αυτά όμως και αυτή η έκδοση ήταν περιορισμένη μόνο στη unicast μετάδοση και επομένως δεν ήταν δυνατόν να εκτελεσθούν πειράματα με πρωτόκολλα μεταφοράς πολλαπλής διανομής. Έτσι λοιπόν για τις ανάγκες των δικών μας πειραμάτων προχωρήσαμε ένα βήμα παραπάνω επεκτείνοντας τη λειτουργικότητα του Evalvid-RA σε Multi- Evalvid-RA [64]. Με τις δικές μας προσθήκες προσφέρουμε ένα βασικό Application Programming Interface (API) έτσι ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή οποιουδήποτε μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης πάνω στα πρωτόκολλα RTP/RTCP αλλά και η πειραματική τους αξιολόγηση με πραγματικά αρχεία βίντεο και μετρικά που σχετίζονται με QoE κριτήρια.

6.4.1 Μέθοδοι Εκτίμησης Ποιότητας Βίντεο

Στην παρούσα παράγραφο θα συζητήσουμε τις μεθόδους αξιολόγησης της ποιότητας ενός αρχείου βίντεο και τα μετρικά που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του ASMP. Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η μέτρηση της ποιότητας του βίντεο από τον τελικό χρήστη. Ο ορισμός του QoE ορίζεται από την ITU-T στο [65]. Το ενδιαφέρον και το δύσκολο μέρος στη διαδικασία αυτή είναι πώς να επιλέξουμε τις μεθόδους και τα μετρικά για την αξιολόγηση του QoE.

Σε γενικές γραμμές υπάρχουν δύο κατηγορίες μεθόδων για την αξιολόγηση της ποιότητας βίντεο ανάλογα με τη συμμετοχή της ανθρώπινης αλληλεπίδρασης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αξιολόγησης. Κατά τη "υποκειμενική" μέθοδο η ποιότητα του βίντεο καθορίζεται από παρατηρητές όπου οι ίδιοι βαθμολογούν τη ποιότητα του βίντεο με δικά τους κριτήρια. Οι υποκειμενικές μέθοδοι αξιολόγησης καθορίζονται από την ITU-T στο [66]. Οι "αντικειμενικοί" μέθοδοι δοκιμής δεν συνεπάγονται την ανθρώπινη αλληλεπίδραση και ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία, η αξιολόγηση του λαμβανομένου βίντεο εκτελείται με τη σύγκρισή του με το ίδιο αρχείο βίντεο προ της αποστολής. Στη δεύτερη κατηγορία, συγκρίνουμε μόνο ένα μέρος των χαρακτηριστικών του λαμβανομένου βίντεο και όχι όλο το αρχείο. Στην τρίτη κατηγορία δεν εκτελούμε καμία σύγκριση μεταξύ των δύο αρχείων, του ενός δηλαδή προ της αποστολής και του δευτέρου που τελικά λαμβάνει ο τελικός χρήστης, αλλά αξιολογούμε μόνο το λαμβανόμενο αρχείο.

Η επιτροπή Video Quality Expert Group (VQEG) ονομάζει τις μεθόδους αυτές ως η "πλήρης", η "μειωμένη" και η "μέθοδος άνευ αναφοράς" [67]. Οι απαιτήσεις σε QoE για εικόνα και ήχο μπορεί να βασίζονται σε αξιολόγηση υποκειμενικών μετρικών [68] όπως το Mean Opinion Score (MOS) κατά το οποίο ένας αριθμός τηλεθεατών καθορίζουν τη ποιότητα του βίντεο σε μια κλίμακα από το 1 έως το 5, όπου το στο 1 αντιστοιχεί η χαμηλότερη ποιότητα και στο 5 η υψηλότερη ποιότητα. Μολονότι το MOS είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για τη μέτρηση του QoE, η μέτρησή του

θεωρείται ως χρονοβόρα διαδικασία και απαιτεί μεγάλο αριθμό χρηστών για να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Για να ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί σε σχέση με τη μέτρηση του MOS εμείς χρησιμοποιούμε την πλήρη αντικειμενική μέθοδο αξιολόγησης και υπολογίζουμε το Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) συγκρίνοντας τα δύο αρχεία βίντεο προ και μετά της αποστολής τους. Η παρακάτω εξίσωση μας δίνει τον ορισμό για τον υπολογισμό του PSNR μεταξύ μιας εικόνας s προ της αποστολής και της ίδιας εικόνας d μετά από τις παραμορφώσεις που έχει υποστεί κατά τη μετάδοσή της [69]:

$$PSNR(s,d) = 20\log\frac{V_{peak}}{MSE(s,d)} \text{ in dB}$$

where

$V_{peak} = 2^k - 1,\ k$ bit color depth

$MSE(s,d) =$ mean square error of s and d

Εξίσωση 33. Υπολογισμός της τιμής PSNR

PSNR (dB)	MOS	Perceived Quality	Impairment
>37	5	Excellent	Imperceptible
31-37	4	Good	Perceptible, but not annoying
25-30	3	Fair	Slightly annoying
20-24	2	Poor	Annoying
<20	1	Bad	Very annoying

Πίνακας 5. ITU-R πίνακας ποιότητας-εξασθένησης και συσχετισμών τιμών PSNR-MOS

Οι τιμές του PSNR από κάθε πλαίσιο του βίντεο υπολογίζονται με την παραπάνω εξίσωση και έτσι είναι δυνατόν να εξάγουμε το μέσο όρο της τιμής του PSNR που αφορά το συνολικό αρχείο του βίντεο. Με αυτό το τρόπο μπορούμε να εξάγουμε τη τιμή του MOS με βάση το πίνακα αντιστοιχίας της ITU-R (Πίνακας 5). Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημάνουμε ωστόσο ότι, ο συσχετισμός των τιμών του PSNR σε τιμές του MOS παρέχει μόνο μια πρώτη εκτίμηση της αντίληψης του τελικού χρήστη για τη ποιότητα του βίντεο. Άλλες αντικειμενικές μέθοδοι για την εκτίμηση της ποιότητας του βίντεο, όπως η ψυχο-οπτική εφαρμογή που βασίζεται σε μοντέλα του ανθρώπινου οπτικού συστήματος (HVS), έχουν αποδειχθεί ότι είναι υπολογιστικά πιο ακριβή από ότι το PSNR [70]. Ωστόσο, η ψυχο-οπτική εφαρμογή έχει πολύ μεγάλη πολυπλοκότητα και συνεπώς, τεράστιες υπολογιστικές απαιτήσεις σε σύγκριση με το PSNR.

Στη δική μας εργασία καθώς συγκρίνουμε τις επιδόσεις δύο μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης με δρομολόγηση πολλαπλής διανομής, ενδιαφερόμαστε κυρίως για τις σχετικές τιμές του QoE και επομένως οι απόλυτες τιμές του QoE δεν αποτελούν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον μας. Στην περίπτωση αυτή λοιπόν το PSNR μπορεί να

χρησιμοποιηθεί ως το αντικειμενικό μετρικό μέσω του οποίου μπορούμε να αξιολογήσουμε τις επιδόσεις των δύο μηχανισμών.

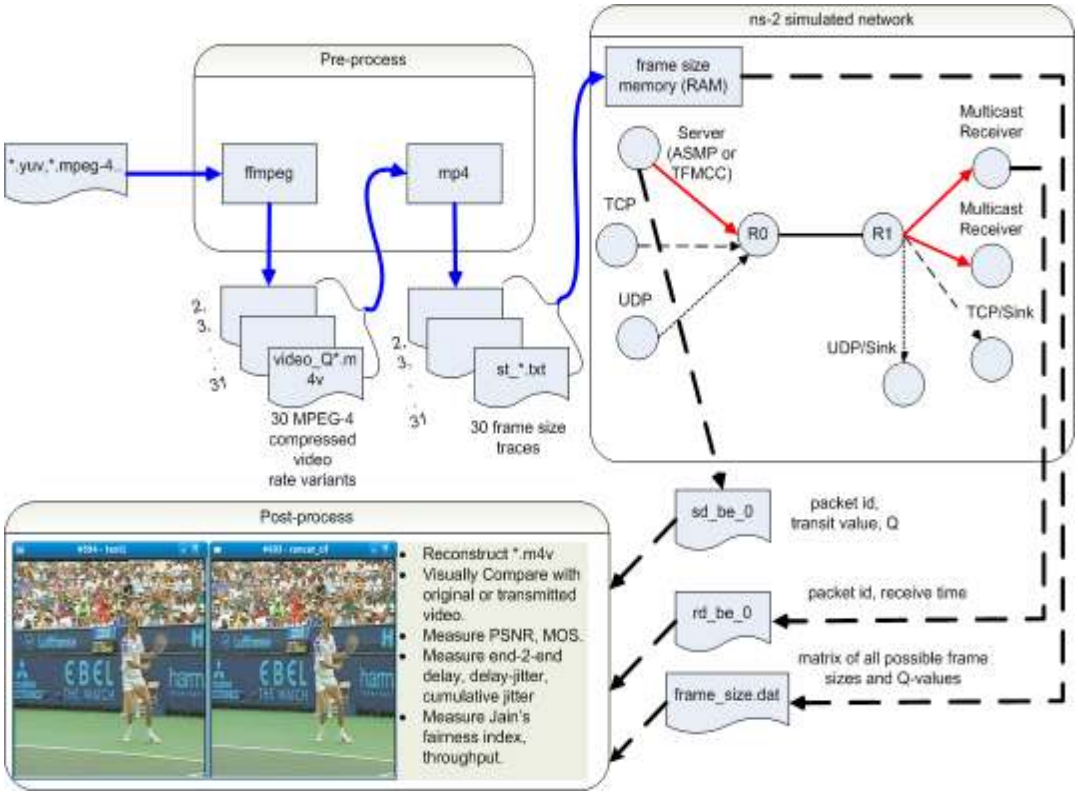
Πρέπει επίσης να επισημάνουμε ότι, γενικά, δεν υπάρχει μια ενιαία και αποδεκτή μέθοδος προκειμένου να αξιολογήσουμε τη ποιότητα ενός συστήματος μετάδοσης βίντεο. Έτσι αν και συζητήσαμε εδώ ορισμένες πτυχές του προβλήματος, μία εις βάθος μελέτη υπερβαίνει το σκοπό της έρευνάς μας.

6.4.2 Περιβάλλον Προσομοίωσης

Το περιβάλλον προσομοίωσης αποτελείται από τρία μέρη όπως φαίνεται στο Σχήμα 37. Κατά τη προ-επεξεργασία ένα ακατέργαστο αρχείο βίντεο που είναι συνήθως της μορφής YUV κωδικοποιείται με τον επιθυμητό κωδικοποιητή, σε 30 διαφορετικά MPEG-4 αρχεία με κλίμακα κωδικοποίησης από 2 έως 30. Η κλίμακα κωδικοποίησης 2 αντιστοιχεί σε βίντεο που έχει την υψηλότερη ποιότητα. Χρησιμοποιούμε για το σκοπό αυτό το κωδικοποιητή ανοικτού κώδικα *ffmpeg* [71]. Ένας MPEG-4 κωδικοποιητής [72] όπως ο *ffmpeg*, παράγει τρεις διαφορετικούς τύπους πλαισίων βίντεο. Τα πλαίσια αυτά τοποθετούνται σε ομάδες εικόνων (Group of Pictures-GOP). Μια ομάδα εικόνων αποτελείται από ένα ακριβώς πλαίσιο τύπου I, (I-frame), ορισμένα συσχετιζόμενα πλαίσια τύπου P, (P-frames) και προαιρετικά κάποια πλαίσια τύπου B, (B-frames). Τα πλαίσια I υποβάλλονται στη χαμηλότερη δυνατή συμπίεση και περιέχουν πληροφορίες από μία ακίνητη εικόνα, ενώ τα πλαίσια P δημιουργούνται από το προηγούμενο I ή P πλαίσιο. Τα πλαίσια B κωδικοποιούνται από το προηγούμενο και το επόμενο I και P πλαίσια. Τα B πλαίσια υπόκεινται στη μεγαλύτερη δυνατή συμπίεση και απαιτούν χαμηλούς ρυθμούς για τη μετάδοσή τους.

Για τις προσομοιώσεις μας χρησιμοποιούμε τα YUV βίντεο αρχεία τα οποία είναι διαθέσιμα στο [73]. Συνδυάζουμε τα αρχεία αυτά με τέτοιο τρόπο ώστε να κωδικοποιήσουμε MPEG-4 αρχεία βίντεο επιθυμητής διάρκειας. Όλα τα MPEG-4 αρχεία βίντεο έχουν χρονική ανάλυση 25 πλαίσια / δευτερόλεπτο (frames/sec) και το κάθε GOP έχει τη μορφή IBPBPBPBPBP, με μέγεθος 12 πλαίσια/GoP. Το μέγεθος του κάθε πλαισίου έχει διαστάσεις 352 x 288 pixels που είναι γνωστό ως Common Intermediate Format (CIF). Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει κατά προσέγγιση τη σχέση μεταξύ κλίμακας κωδικοποίησης και απαιτούμενου ρυθμού μετάδοσης. Εν συνεχεία επεξεργαζόμαστε τα αρχεία βίντεο ώστε να εξάγουμε τα "ίχνη" (traces) του κάθε αρχείου και να δημιουργήσουμε τα στοιχεία εκείνα που θα μας βοηθήσουν στις προσομοιώσεις μας. Στη τελική φάση της προ-επεξεργασίας χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα `mp4.exe` ώστε να δημιουργήσουμε αρχεία τύπου `m4v`.

Το λογισμικό ns-2 αποτελεί το δεύτερο τμήμα του περιβάλλοντος προσομοίωσης. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης το αρχείο βίντεο μεταδίδεται από τον αποστολέα σε μια ομάδα δεκτών και αποθηκεύουμε τα ίχνη από τη μετάδοση αυτή τόσο στον αποστολέα όσο και στους δέκτες της ομάδας. Μπορούμε έτσι με την βοήθεια των αρχείων αυτών να υπολογίσουμε μετρικά των δικτύων καθώς και τις τιμές PSNR και MOS που έχουν σχέση με τη ποιότητα της μετάδοσης του βίντεο.



Σχήμα 37. Επισκόπηση του λογισμικού Multi-Evalvid-RA

Q scale	Encoding rate (Kb/s)	Q scale	Encoding rate (Kb/s)	Q scale	Encoding rate (Kb/s)
2	1642	12	268	22	142
3	1070	13	247	23	135
4	818	14	229	24	129
5	649	15	213	25	124
6	543	16	199	26	120
7	464	17	186	27	155
8	408	18	175	28	111
9	361	19	166	29	116
10	324	20	156	30	104
11	293	21	149	31	100

Πίνακας 6. Ρυθμοί κωδικοποίησης MPEG-4 βίντεο ανά κλίμακα

Το τρίτο μέρος του περιβάλλοντος προσομοίωσης αποτελείται από το λογισμικό που μας βοηθά στην ανακατασκευή του βίντεο και στη μέτρηση των μετρικών για την ανάλυση της ποιότητάς του. Τα παρακάτω μετρικά υπολογίζονται και αποθηκεύονται:

- Τιμές PSNR και MOS.
- Καθυστέρηση από άκρο-σε-άκρο.
- Μεταβολές στη καθυστέρηση των πακέτων.
- Τιμές της σωρευτικής διακύμανσης καθυστέρησης.
- Τιμές της διακύμανσης καθυστέρησης.
- Ρυθμός απώλειας πακέτων και πλαισίων βίντεο.
- Ρυθμοαπόδοση.
- Τιμές του δείκτη δικαιοσύνης Jain.

Το λογισμικό Evaluation Trace Rate Adaptive (*et_ra*) του Evalvid-RA ανασκευάζει το λαμβανόμενο αρχείο βίντεο στο τελικό χρήστη. Έχουμε όμως τροποποιήσει το λογισμικό αυτό ώστε να είμαστε σε θέση να λάβουμε μετρήσεις σχετικές με τις τιμές της καθυστέρησης που αναφέρουμε παραπάνω. Η χρησιμότητα των εργαλείων αυτών με οδηγίες χρήσης προσφέρονται στο πακέτο Multi-Evalvid-RA [64].

6.4.3 Φιλικότητα προς το TCP - Μετρήσεις Δείκτη Jain

Όπως στο πραγματικό κόσμο υπάρχουν περισσότεροι του ενός περιοριστικοί σύνδεσμοι σε ένα δικτυακό μονοπάτι από τον αποστολέα προς το παραλήπτη έτσι και σε αυτή τη προσομοίωση χρησιμοποιούμε τη τοπολογία στο Σχήμα 38. Κάτω από αυτό το σενάριο, δημιουργούμε μια "μακρά" ροή βίντεο που περνά μέσα από δύο περιοριστικούς συνδέσμους. Δύο επιπρόσθετες "βραχείς" TCP ροές περνούν μέσα από ένα μόνο περιοριστικό σύνδεσμο. Οι κόμβοι R1 και R2 συμβολίζουν τους δέκτες του βίντεο αρχείου. Χρησιμοποιούμε Drop Tail ουρές στους δρομολογητές του δικτύου και θέτουμε τη ταχύτητα πρόσβασης των δεκτών στο δίκτυο στα 5 Mb/s με τιμές καθυστέρησης των 20 ms σε κάθε σύνδεσμο. Επομένως η συνολική τιμή της καθυστέρησης μονής διαδρομής ανέρχεται στα 80 ms με χρόνο RTT στα 160 ms. Το μέγεθος του Maximum Transmission Unit (MTU) τίθεται στα 978 bytes, από τα οποία 12 bytes καταλαμβάνονται από την επικεφαλίδα του RTP, (χρησιμοποιούμε το ίδιος μέγεθος και για την επικεφαλίδα του TFMCC), 8 bytes από την επικεφαλίδα του UDP και 20 bytes από την επικεφαλίδα IP. Τη φιλικότητα του κάθε πρωτοκόλλου τη μετρούμε με το δείκτη Jain [74] που καθορίζεται όπως παρακάτω:

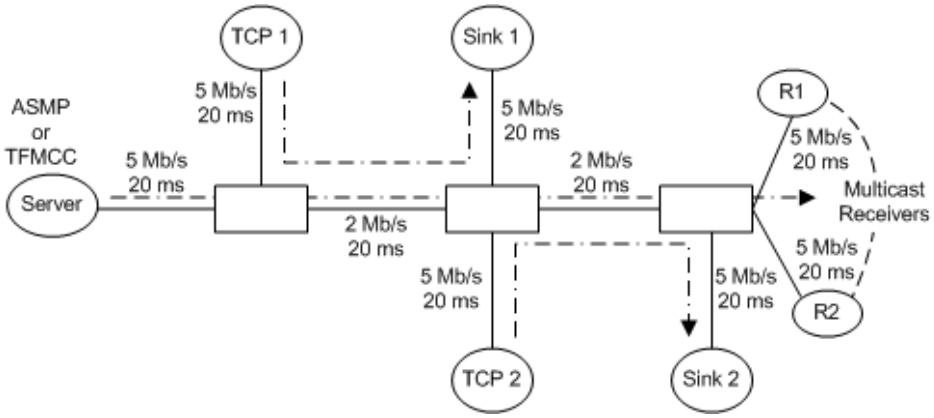
$$f(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n) = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

Εξίσωση 34. Καθορισμός του δείκτη Jain

όπου x είναι η τιμή της ρυθμοαπόδοσης των n ροών που μοιράζονται τις πηγές του δικτύου.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης δημιουργούμε ένα βίντεο της μορφής YUV που αποτελείται από 10000 πλαίσια με διάρκεια 400 δευτερολέπτων. Στο Σχήμα 39 και Σχήμα 40 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ξεχωριστά για το ASMP και TFMCC. Οι δέκτες που βρίσκονται πίσω από τους περιοριστικούς συνδέσμους παρουσιάζουν την ίδια απόδοση. Επομένως, για τη ευκολότερη

παρατήρηση παρουσιάζουμε μόνο τα αποτελέσματα από έναν αντιπροσωπευτικό παραλήπτη για κάθε ένα πρωτόκολλο.

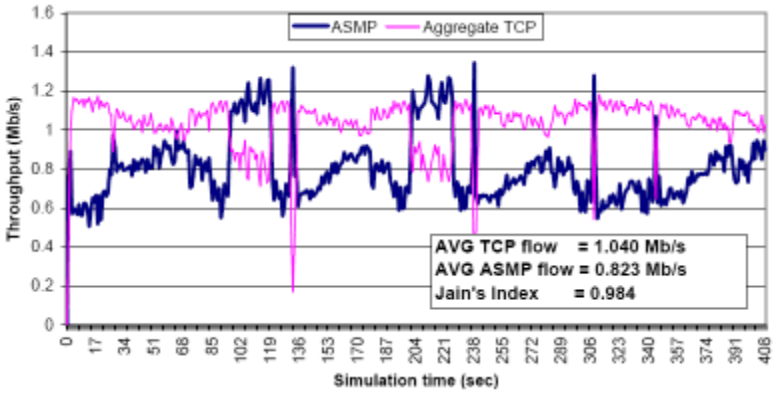


Σχήμα 38. Σενάριο προσομοίωσης parking lot

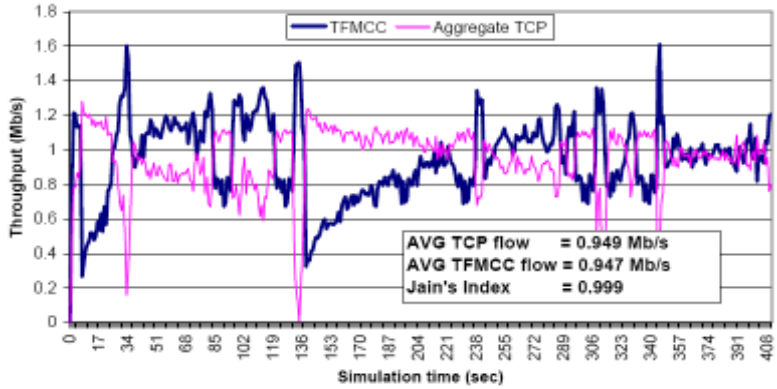
Το TFMCC παρουσιάζει υψηλότερες τιμές ρυθμοαπόδοσης από το ASMP με αυξημένες όμως απώλειες πακέτων. Ο ρυθμός απώλειας πακέτων για το ASMP είναι 0.16% σε αντίθεση με το TFMCC που οι τιμές αυτές ανέρχονται στο 0.67%. Οι τιμές του ρυθμού απώλειας πακέτων έχουν αρνητική επίδραση στις τιμές του PSNR και κατά συνέπεια στη ποιότητα του βίντεο, όπως θα το δούμε αυτό στη διάρκεια των προσομοιώσεων.

Η τιμή του δείκτη Jain είναι υψηλότερη για το TFMCC, γεγονός που καταδεικνύει ότι το διαθέσιμο εύρος ζώνης μοιράζεται σχεδόν ισόποσα μεταξύ των ροών TFMCC και TCP (η τιμή 1.0 αντιστοιχεί στην άριστη απόδοση). Από την άλλη μεριά το ASMP δείχνει να είναι περισσότερο φιλικό προς το TCP από όσο θα έπρεπε να είναι και αυτό είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα των μηχανισμών του ASMP που μειώνουν τις απότομες αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι το TFMCC φαίνεται να έχει καλύτερη απόδοση από το ASMP εάν λάβουμε υπόψη "κλασσικά" μετρικά δικτύων (ρυθμοαπόδοση, δείκτης Jain). Όπως θα δούμε όμως αργότερα στη συνέχεια των προσομοιώσεων το ASMP προσφέρει καλύτερης ποιότητας βίντεο στο τελικό χρήστη όταν συγκρίνουμε μετρικά ποιότητας βίντεο (PSNR και MOS). Ο κυριότερος λόγος είναι ότι το ASMP παρουσιάζει μικρότερες απώλειες από ότι το TFMCC. Αυτή η διαπίστωση είναι πολύ σημαντική και υποστηρίζει τη θέση μας ότι η εκτίμηση της απόδοσης μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης και πρωτοκόλλων μεταφοράς πολυμεσικής πληροφορίας πρέπει να βασίζεται και σε μετρικά που απευθύνονται στη ποιότητα υπηρεσιών εκτός των "κλασικών" μετρικών δικτύων. Σε αντίθετη περίπτωση οδηγούμαστε σε αμφιλεγόμενα συμπεράσματα.



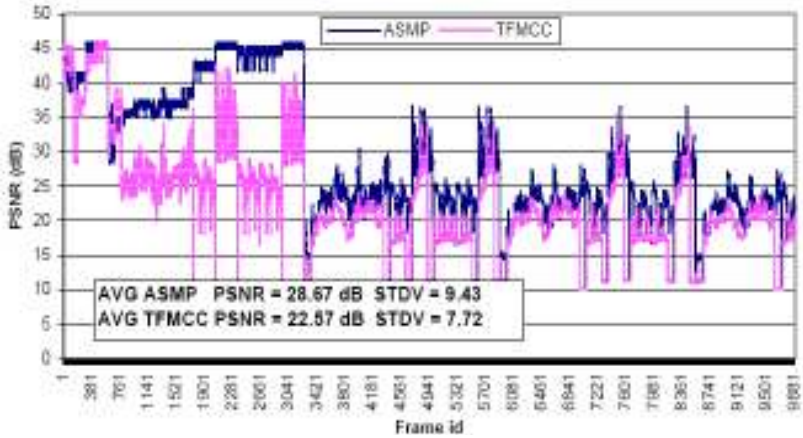
Σχήμα 39. ASMP έναντι TCP



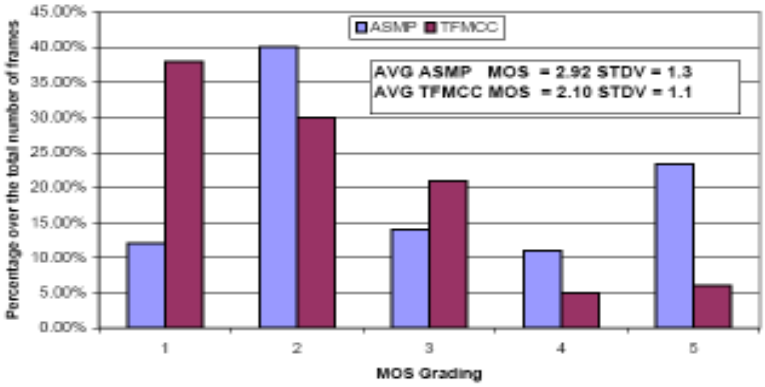
Σχήμα 40. TFMCC έναντι TCP

6.4.4 Αντικειμενικά Μετρικά Απόδοσης Βίντεο

Ακολουθώντας την αξιολόγησή μας μετράμε τις τιμές PSNR και MOS. Για να υπολογίσουμε τις τιμές του PSNR συγκρίνουμε το βίντεο στον αποστολέα με αυτό που έχει λάβει τελικά ο παραλήπτης. Τα αποτελέσματα μας δείχνουν ότι το ASMP υπερτερεί σε απόδοση του TFMCC παρόλο που με μία πρώτη οπτική παρατήρηση φαίνεται ότι τα αποτελέσματα ίσως να είναι παρόμοια.



Σχήμα 41. PSNR τιμές (frame–by-frame TFMCC και ASMP



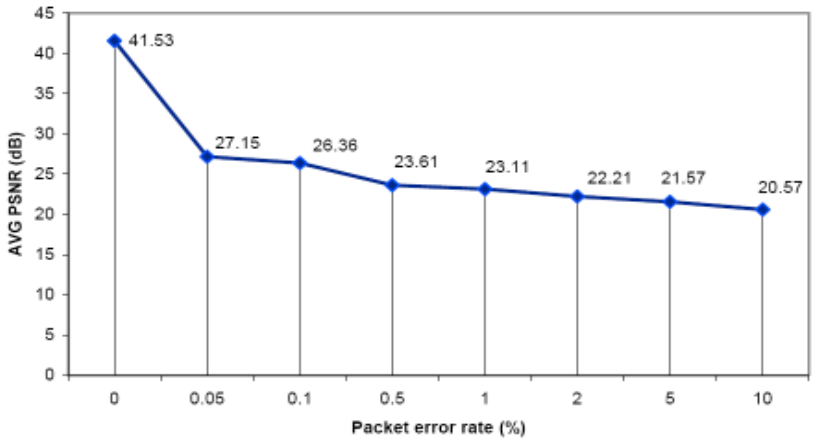
Σχήμα 42. MOS τιμές TFMCC και ASMP

Οι τιμές του PSNR αντιστοιχίζονται σε τιμές MOS έτσι ώστε να λάβουμε την υποκειμενική βαθμολόγηση από το τελικό χρήστη. Παρατηρούμε από τις τιμές του MOS ότι το 50% του περιεχομένου του βίντεο στη περίπτωση του ASMP βαθμολογείται στη κλίμακα από το βαθμό "καλό" 'έως " εξαιρετικό". Η απόδοση για το TFMCC είναι στη περιοχή από "κακό" 'έως "φτωχό" για το μεγαλύτερο μέρος του αρχείου και μόνο κάποια μικρά τμήματα ανήκουν στη κατηγορία "καλό" έως "εξαιρετικό" που αντιστοιχεί περίπου στο 30% του αρχείου. Η μείωση των τιμών του PSNR για το TFMCC συνδέεται άμεσα με τον υψηλότερο ρυθμό απώλειας πακέτων (0.67%) συνέπεια της συμφόρησης στο περιοριστικό σύνδεσμο. Ο μηχανισμός αποφυγής της συμφόρησης του ASMP ελαχιστοποιεί τις απώλειες των πακέτων και αυξάνει τη ποιότητα του βίντεο το οποίο θεωρούμε ότι αποτελεί και τη σημαντικότερη ιδιότητα κάθε μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης για τη μετάδοση αρχείων πολυμέσων.

6.4.5 Επίδραση των Απωλειών Πακέτων στη Ποιότητα του Βίντεο

Κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων έχουμε παρατηρήσει ότι ακόμη και ένας μικρός αριθμός χαμένων πακέτων έχει σημαντικές επιπτώσεις στις τιμές του PSNR. Αυτή η παρατήρηση θέτει το ερώτημα κατά πόσο τελικά οι εφαρμογές πολυμέσων έχουν ανοχή στις απώλειες των πακέτων καθόσον ακόμη και ένας μικρός αριθμός χαμένων πακέτων ελαττώνει σημαντικά την ποιότητα του βίντεο. Παρασυρόμενοι έτσι από τις παρατηρήσεις μας εκτελούμε μια σειρά από προσομοιώσεις προκειμένου να διερευνήσουμε τις επιπτώσεις στη ποιότητα του βίντεο από τις απώλειες των πακέτων σε ένα περιβάλλον δικτύου με υψηλή συμφόρηση.

Έτσι λοιπόν στη τοπολογία του δικτύου στο Σχήμα 38 εξαιρώντας τις TCP ροές εφαρμόζουμε έναν μοντέλο περιοδικού σφάλματος με ποσοστό απώλειας πακέτων από 0,05 % έως 10%. Στο Σχήμα 43 παρουσιάζουμε τις τιμές PSNR σε σχέση με το ποσοστό απώλειας πακέτων. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοιοι και για τα δύο πρωτόκολλα.



Σχήμα 43. Μέση τιμή του PSNR ως συνάρτηση του ρυθμού απώλειας πακέτων

Παρατηρούμε ότι οι επιπτώσεις στη ποιότητα του βίντεο είναι προφανείς ακόμη και με ένα μικρό αριθμό χαμένων πακέτων. Οι τιμές του PSNR μειώνονται περίπου κατά 14 dB στη περίπτωση σφάλματος 0,05 %. Υψηλότερες τιμές απώλειας έχουν ως αποτέλεσμα ακόμη χαμηλότερες τιμές PSNR και ως αποτέλεσμα χαμηλές επιδόσεις από πλευράς ποιότητας του βίντεο. Ως εκ τούτου, είναι σημαντική η ύπαρξη μεθόδων διόρθωσης λαθών που προκύπτουν από τις απώλειες των πακέτων σε μια εφαρμογή μετάδοσης βίντεο, πέρα από τους μηχανισμούς ελέγχου της συμφόρησης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις από τις απώλειες αυτές.

6.4.6 Επιπτώσεις της Σωρευτικής Διακύμανσης Καθυστέρησης

Αυτό που είναι επίσης σημαντικό είναι οι επιπτώσεις της σωρευτικής διακύμανσης της καθυστέρησης (cumulative jitter) σε εφαρμογές μετάδοσης ροής βίντεο. Στο Σχήμα 44 παρουσιάζουμε τους χρονικούς περιορισμούς μεταξύ της παραγωγής των πλαισίων βίντεο κατά την εκπομπή και της αναπαραγωγής τους στο τελικό χρήστη. Για δύο συνεχόμενα πλαίσια *i-1*και *i* η διακύμανση της καθυστέρησης καθορίζεται από τη παρακάτω σχέση:

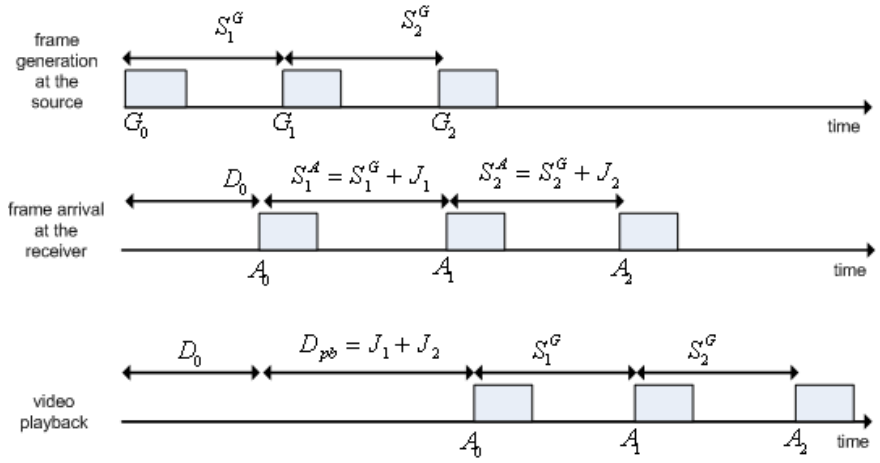
$$J_i = S_i^A - S_i^G = (A_i - A_{i-1}) - (G_i - G_{i-1})$$

Εξίσωση 35. Διακύμανση καθυστέρησης διαδοχικών πλαισίων

Η σωρευτική διακύμανση της καθυστέρησης ή απλούστερα σωρευτική διακύμανση καθορίζεται στη [75] ως *"ο χρόνος της καθυστέρησης της αναπαραγωγής D_{pb} που παρέχεται ώστε να αποφεύγεται η απόρριψη πλαισίων από την ακολουθία του βίντεο"*:

$$CJ_k = \sum_{i=1}^{i} J_i$$

Εξίσωση 36. Σωρευτική διακύμανση

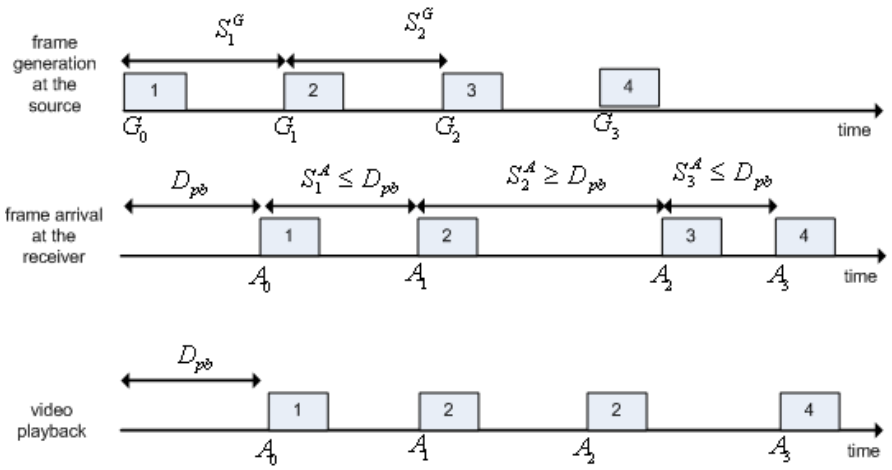


Σχήμα 44. Σχεδιάγραμμα συγχρονισμού μετάδοσης πλαισίων βίντεο

όπου D_o είναι ο χρόνος της καθυστέρησης, G_i είναι ο χρόνος αποστολής του πλαισίου *i*, S_i^G είναι η διαφορά του χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών πακέτων *(i-1)* και *i*, A_i είναι ο χρόνος λήψης του πλαισίου *i*, και S_i^A είναι η διαφορά χρόνου μεταξύ δυο διαδοχικών πλαισίων στο παραλήπτη. Το μετρικό αυτό είναι πολύ σημαντικό για την εκτίμηση της απόδοσης του μηχανισμού ελέγχου της συμφόρησης διότι είναι πολύ στενά συνδεδεμένο με το επίπεδο της συμφόρησης στο δίκτυο. Εάν η τιμή της σωρευτικής διακύμανσης υπερβαίνει τη διάρκεια του απομονωτή στο παραλήπτη D_{pb}, τότε το πλαίσιο δεν είναι χρήσιμο και έτσι απορρίπτεται. Ένας απομονωτής μεγαλύτερης διάρκειας είναι δυνατόν να απορροφήσει τις καθυστερήσεις αυτές αλλά ο χρόνος έναρξης της προβολής του βίντεο στο χρήστη θα αυξηθεί και επιπλέον θα αυξηθούν και οι απαιτήσεις σε μνήμη στο τερματικό του χρήστη.

6.4.7 Προσομοιώσεις με Περιορισμούς στη Τιμή της Καθυστέρησης

Για να εκτιμήσουμε τη ποιότητα του βίντεο στο τελικό χρήστη όταν υπάρχουν περιορισμοί στη τιμή της καθυστέρησης χρησιμοποιούμε μια τοπολογία dumb-bell χωρίς καμία άλλη πηγή πληροφορίας εκτός της ροής του βίντεο και θέτουμε τη χρόνο διάδοσης μονής διαδρομής στα 20 ms. Κάτω από αυτό το σενάριο καθορίζουμε έναν απόλυτο χρόνο για τον απομονωτή κατά την αναπαραγωγή του βίντεο στο παραλήπτη. Στη περίπτωση αυτή όταν τα πλαίσια ληφθούν σε χρόνο με καθυστέρηση ίση ή μικρότερη του χρόνου του απομονωτή D_{pb} τότε θα είναι δυνατή η αναπαραγωγή τους, εφόσον θα τοποθετηθούν στη σωστή σειρά στην ακολουθία των πλαισίων βίντεο. Πλαίσια τα οποία λαμβάνονται σε χρόνο μεγαλύτερο του D_{pb} προκαλούν τη προβολή του αμέσως προηγουμένου πλαισίου. Για να εξηγήσουμε καλύτερα τις συνέπειες της απόλυτης τιμής της διάρκειας του απομονωτή χρησιμοποιούμε την Σχήμα 45. Το πλαίσιο 2 (frame 2) προβάλλεται δύο φορές εξαιτίας της καθυστέρησης στο δίκτυο. Το πλαίσιο 3 (frame 3) δεν προβάλλεται καθόλου διότι λαμβάνεται σχεδόν ταυτόχρονα στο παραλήπτη με το πλαίσιο 4 (frame 4). Έτσι λοιπόν προβάλλεται μόνο το πλαίσιο 4 στο χρήστη, σύμφωνα με το την ακολουθία του βίντεο.

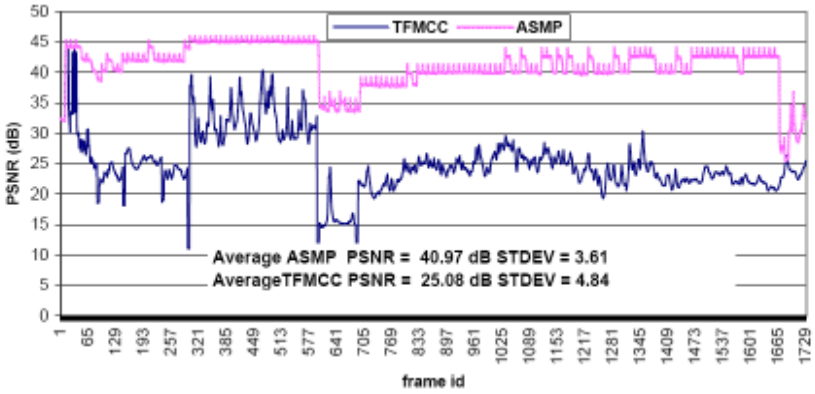


Σχήμα 45. Συνέπειες της απόλυτης τιμής στη διάρκεια του απομονωτή

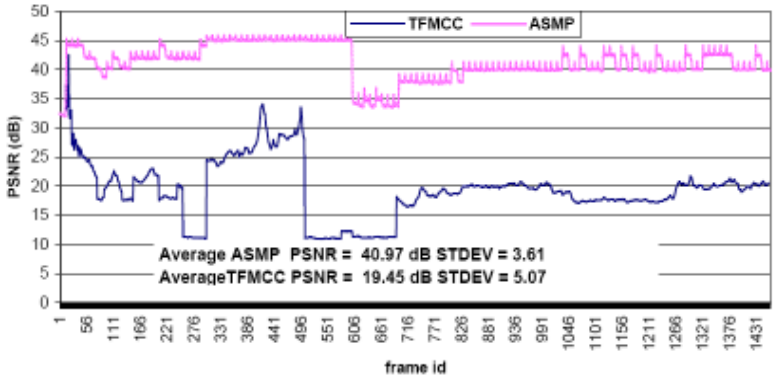
Στις προσομοιώσεις μας θέτουμε τον απόλυτο χρόνο του απομονωτή στα 150 ms, χρόνος ο οποίος αντανακλά το προτεινόμενο χρόνο μονόδρομης καθυστέρησης σε εφαρμογές πολυμέσων επικοινωνιακού χαρακτήρα όπως το VoIP. Για τις προσομοιώσεις αυτές χρησιμοποιούμε αρχεία βίντεο διαφορετικής πολυπλοκότητας που έχουν σχέση με το εάν και κατά πόσο η εικόνα είναι στατική ή μεταβαλλόμενη και με τη παρακάτω σειρά. Το βίντεο *Akiyo* (300-600) έχει πολύ χαμηλή πολυπλοκότητα διότι περιέχει κυρίως στατική εικόνα, το *Stefan* (600-700) είναι πολύ πολύπλοκο διότι περιέχει μεταβαλλόμενη και κινούμενη εικόνα, και τέλος το *Paris* (700-1753) είναι μέσης πολυπλοκότητας. Η ακολουθία αυτή κωδικοποιείται με ένα κωδικοποιητή MPEG4 με χρονική ανάλυση 25 πλαίσια ανά δευτερόλεπτο και GOP με μέγεθος 12 πλαισίων. Συνδυάζοντας έτσι βίντεο αρχεία διαφορετικής πολυπλοκότητας μπορούμε καλύτερα να προσομοιώσουμε την εκπομπή ενός αρχείου βίντεο μεγάλης διάρκειας καθώς μεταφερόμαστε από κάποιες στατικές εικόνες σε ποιο πολύπλοκες λήψεις, όπως περίπου και στο πραγματικό κόσμο.

Στο Σχήμα 46 παρουσιάζουμε τις τιμές του PSNR χωρίς κανένα περιορισμό στη χρονική διάρκεια του απομονωτή. Αυτό σημαίνει πως όλα τα ληφθέντα πλαίσια θα προβληθούν στο χρήστη ανεξάρτητα από το χρόνο λήψης τους και τη καθυστέρηση κατά τη διάδοσή τους. Παρατηρούμε ότι το ASMP παρουσιάζει πολύ υψηλή απόδοση με τιμές του PSNR πάνω από 30 dB ενώ το TFMCC δεν προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του αρχείου βίντεο μεταβαλλόμενης πολυπλοκότητας. Παρατηρούμε ότι στην ακολουθία *Akiyo* (frames 300-600) οι τιμές του PSNR είναι κάτω από 30 dB. Με την ακολουθία *Stefan* (frames 600-700) οι τιμές του PSNR ελαττώνονται κατά 15 dB καθώς η πολυπλοκότητα του βίντεο αυξάνεται.

Αντίθετα το ASMP προσαρμόζεται καλύτερα και παρατηρούμε ότι η εκπομπή της ακολουθίας *Stefan* προκαλεί ελάττωση περίπου 10 dB στις τιμές του PSNR. Είναι πλέον ξεκάθαρο ότι σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης το ASMP ξεπερνά κατά πολύ την απόδοση του TFMCC.

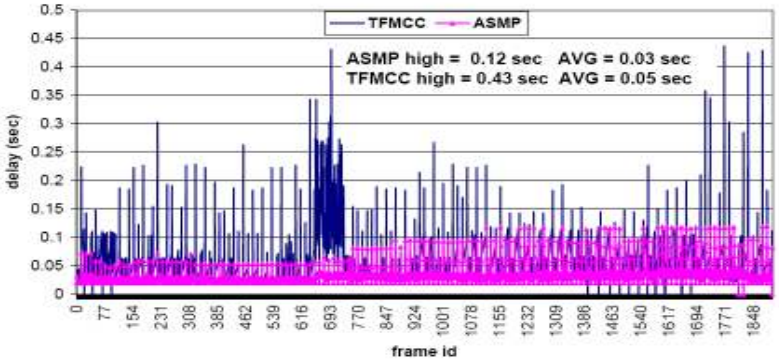


Σχήμα 46. PSNR τιμές με απομονωτή απείρου χρόνου



Σχήμα 47. PSNR τιμές με απομονωτή 150 ms

Στο Σχήμα 47 παρατηρούμε ότι η τιμή των 150 ms στο χρονικό περιορισμό του απομονωτή επηρεάζει κυρίως την απόδοση του TFMCC. Οι τιμές του PSNR ελαττώνονται κατά 5 dB σε όλες τις ακολουθίες βίντεο. Αυτό είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα των υψηλότερων τιμών της καθυστέρησης κατά την τη διάδοση. Το TFMCC παρουσιάζει μεγάλες τιμές μονόδρομης καθυστέρησης ενώ οι αντίστοιχες τιμές για το ASMP είναι λίγο χαμηλότερες των 150 ms (Σχήμα 48). Η παρατήρησή μας είναι ότι τελικά η απόδοση του ASMP δεν επηρεάζεται από τους χρονικούς περιορισμούς του απομονωτή.



Σχήμα 48. Τιμές καθυστέρησης για το TFMCC και ASMP

6.4.8 Προσομοιώσεις με Μεταβαλλόμενες RTT Τιμές

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ της ποιότητας του βίντεο, της ρυθμοαπόδοσης και του ρυθμού απώλειας των πακέτων εκτελούμε μια σειρά προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενες RTT τιμές. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε τη τοπολογία του δικτύου που απεικονίζεται στο Σχήμα 38.

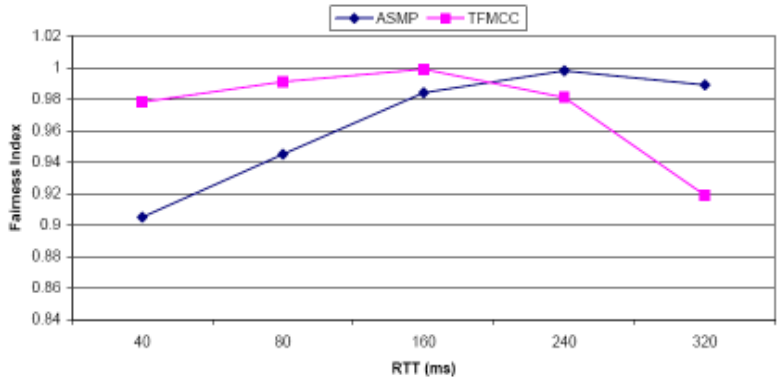
Το TFMCC παρουσιάζει υψηλότερες τιμές του δείκτη Jain από ότι το ASMP για τιμές του RTT χαμηλότερες των 160 ms. Παρατηρούμε ότι καθώς οι τιμές του RTT αυξάνουν, το TFMCC καταλαμβάνει όλο και μεγαλύτερο τμήμα του διατιθέμενου εύρους ζώνης στο περιοριστικό σύνδεσμο, από ότι το TCP. Ειδικότερα το TCP φαίνεται να "υποφέρει" όταν μοιράζεται το εύρος ζώνης με το TFMCC σε τιμές του RTT μεγαλύτερες των 200 ms, (Σχήμα 49). Από την άλλη μεριά, το ASMP διατηρεί τη φιλικότητά του προς το TCP σε όλες τις προσομοιώσεις. Ο λόγος της διαφορετικότητας στη συμπεριφορά προς το TCP βρίσκεται στο γεγονός ότι το TFMCC είναι περισσότερο "επιθετικό" από ότι το ASMP και αυτό προκαλεί συχνές επαναφορές του TCP. Αυτή η συμπεριφορά φαίνεται με μεγαλύτερη ευκρίνεια στο Σχήμα 50 όπου παρουσιάζουμε την εκμετάλλευση των πόρων του δικτύου από το TFMCC και το ASMP στα σενάρια με διαφορετικές RTT τιμές. Το TFMCC υπερέχει σε απόδοση του ASMP σε ότι αφορά την εκμετάλλευση του διατιθέμενου εύρους ζώνης και φαίνεται να είναι καλύτερη λύση όταν η εκμετάλλευση των πόρων του δικτύου είναι το ζητούμενο από ένα πρωτόκολλο μεταφοράς. Παρόλα αυτά η συμπεριφορά αυτή οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες πακέτων (Σχήμα 51) και εισαγάγει μεγαλύτερες αυξομειώσεις στο ρυθμό μετάδοσης. Για να εκτιμήσουμε τη σταθερότητα του κάθε πρωτοκόλλου χρησιμοποιούμε το μετρικό coefficients of variation (CoV)[2] και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα στο Σχήμα 52. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το ASMP παρουσιάζει μεγαλύτερη σταθερότητα από ότι το TFMCC.

Είναι επίσης ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι οι χαμηλές τιμές της ρυθμοαπόδοσης παρέχουν καλύτερης ποιότητας βίντεο καθώς έχουμε χαμηλότερο ρυθμό απώλειας πακέτων. Αυτό το γεγονός το παρατηρούμε σε όλα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όταν συγκρίνουμε τη ποιότητα του βίντεο στα δύο πρωτόκολλα (Σχήμα 53). Σε όλες τις περιπτώσεις το TFMCC παρουσιάζει χαμηλότερες PRNR τιμές (περίπου 5 dB χαμηλότερες του ASMP). Η εκτίμησή μας είναι ότι η "επιθετικότητα" κάθε πρωτοκόλλου μεταφοράς που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πολυμέσων πρέπει να σχεδιάζεται πολύ προσεκτικά διότι μπορεί να οδηγήσει σε συχνές απώλειες πακέτων, οι οποίες μειώνουν τη ποιότητα του βίντεο. Η "επιθετικότητα" καθορίζεται στην RFC 5166 ως *"η μέγιστη αύξηση του ρυθμού μετάδοσης στη διάρκεια του χρόνου RTT, σε πακέτα ανά δευτερόλεπτο, και σε απουσία συμφόρησης (απώλειας πακέτων)"*.

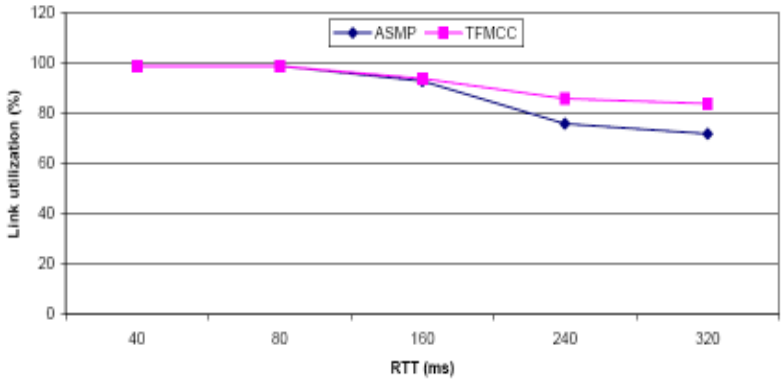
Το TFMCC είναι λοιπόν περισσότερο επιθετικό από το ASMP αν και τα δύο πρωτόκολλα χρησιμοποιούν την ίδια εξίσωση του αναλυτικού μοντέλου του TCP για την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης, όταν διαπιστώνεται απώλεια πακέτων στο δίκτυο. Η διαφορά τους έγκειται όμως στο γεγονός ότι στη περίπτωση μη απώλειας πακέτων το ASMP αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης μεταξύ των τιμών 0.9 packet/sec and 0.2 packet/sec σύμφωνα με την Εξίσωση 31. Εμείς υποστηρίζουμε ότι ο έγκαιρος εντοπισμός της επερχόμενης συμφόρησης στο δίκτυο και ο έλεγχος της αύξησης του

[2] Το μετρικό Coefficient of variation (CoV) ορίζεται ως ο λόγος της σταθερής απόκλισης προς τη μέση τιμή.

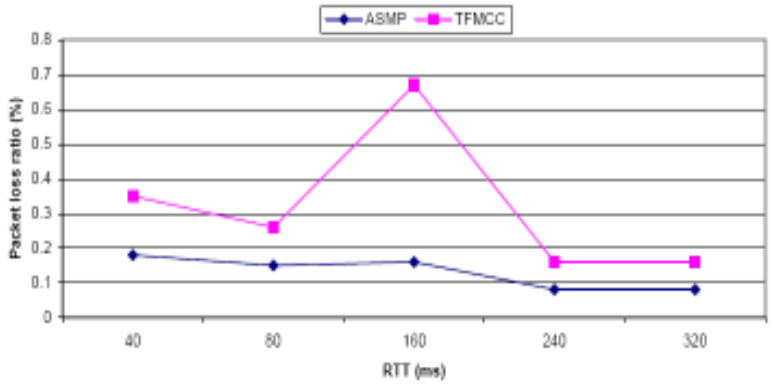
ρυθμού μετάδοσης προσφέρουν καλύτερα αποτελέσματα από ότι η σταθερή αύξηση του ρυθμού μετάδοσης κατά 1 packet/sec. Έτσι όταν το TFMCC διαπιστώνει απώλειες πακέτων τότε ήδη το επίπεδο συμφόρησης είναι υψηλό, με αποτέλεσμα τη περαιτέρω απώλεια των πακέτων. Η σύγκριση των τιμών MOS μας δείχνει ότι το ASMP ξεπερνά κατά πολύ την απόδοση του TFMCC σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης με μεταβαλλόμενες RTT τιμές (Σχήμα 54).



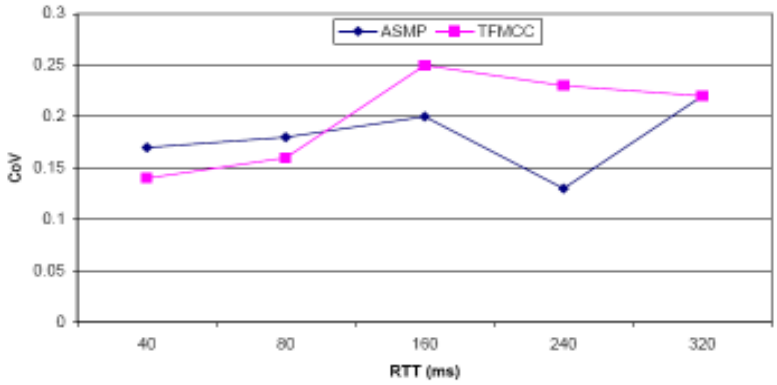
Σχήμα 49. Τιμές του δείκτη Jain



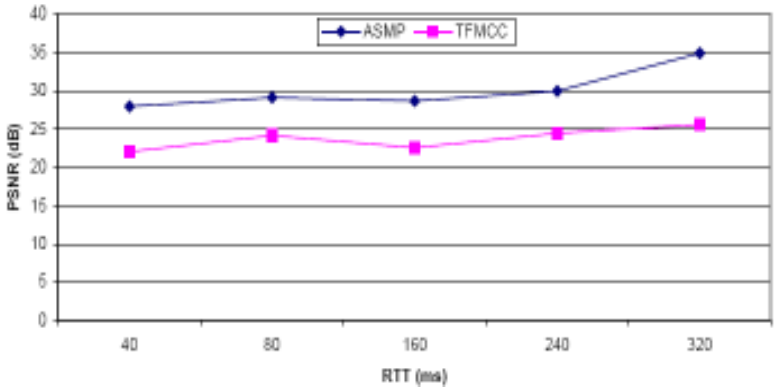
Σχήμα 50. Εκμετάλλευση εύρους ζώνης



Σχήμα 51. Μετρήσεις ρυθμού απώλειας πακέτων

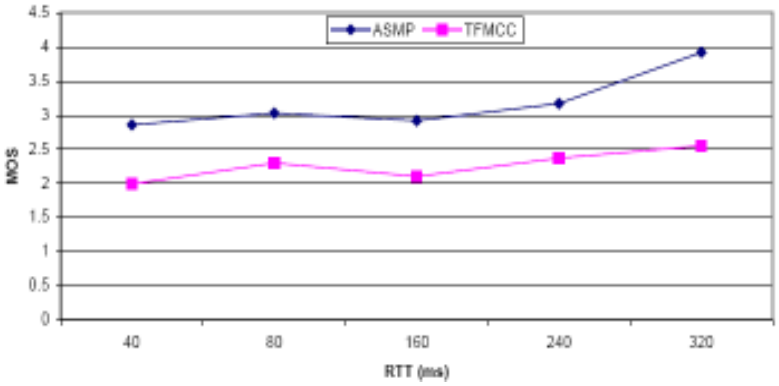


Σχήμα 52. CoV με διαφορετικές RTT τιμές



Σχήμα 53. Ποιότητα βίντεο

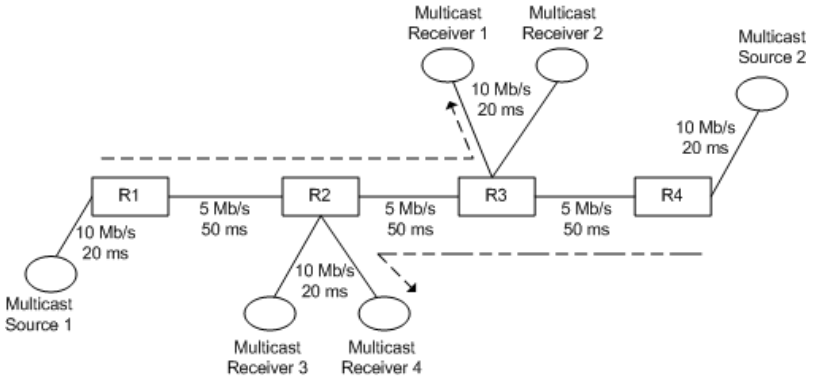
Επομένως οι ελεγχόμενοι ρυθμοί μετάδοσης χωρίς τις μεγάλες και απότομες αυξομειώσεις προσφέρουν καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας στο χρήστη. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να ενεργοποιούνται μηχανισμοί διόρθωσης λαθών ώστε να αποφεύγεται τουλάχιστον η απώλεια των I πλαισίων που έχουν και την υψηλότερη αξία στην ακολουθία των πλαισίων βίντεο. Το ASMP παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από το TFMCC σε τοπολογίες δικτύων με ρεαλιστικές RTT τιμές της τάξης των μερικών εκατοντάδων δευτερολέπτων, καθώς οι εσωτερικοί μηχανισμοί του αποφεύγουν τις απότομες αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης και ελαχιστοποιούν τις απώλειες λόγω της συμφόρησης.



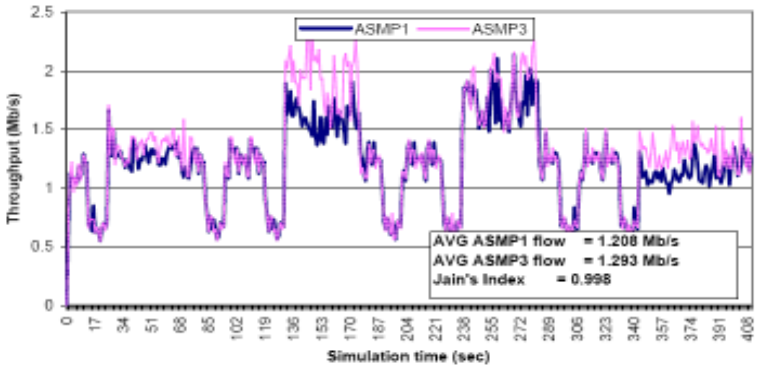
Σχήμα 54. Μετρήσεις κλίμακας MOS

6.4.9 Φιλικότητα προς Ροές του Ιδίου Πρωτοκόλλου

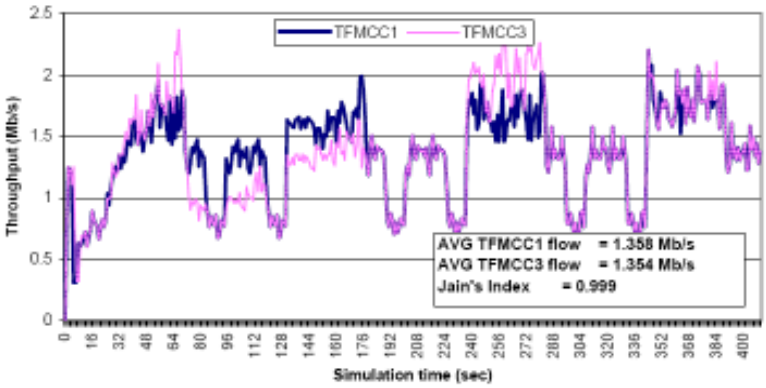
Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης αξιολογούμε τη φιλικότητα προς ροές του ίδιου πρωτοκόλλου συνδέοντας δύο πηγές βίντεο (ASMP ή TFMCC), οι οποίες μεταδίδουν το ίδιο αρχείο βίντεο σε δύο διαφορετικές ομάδες πολλαπλής διανομής όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 55. ΟΙ δύο πηγές βίντεο μεταδίδουν σε αντίθετες κατευθύνσεις δια μέσου συνδέσμων που έχουν το ίδιο εύρος ζώνης και την ίδια καθυστέρηση διάδοσης και μοιράζονται το διατιθέμενο εύρος του περιοριστικού συνδέσμου μεταξύ των δρομολογητών R2 και R3. Χρησιμοποιούμε Drop Tail ουρές στους δρομολογητές R1 μέχρι R4 και θέτουμε το ίδιο μέγεθος πακέτου και για τις δύο πηγές.



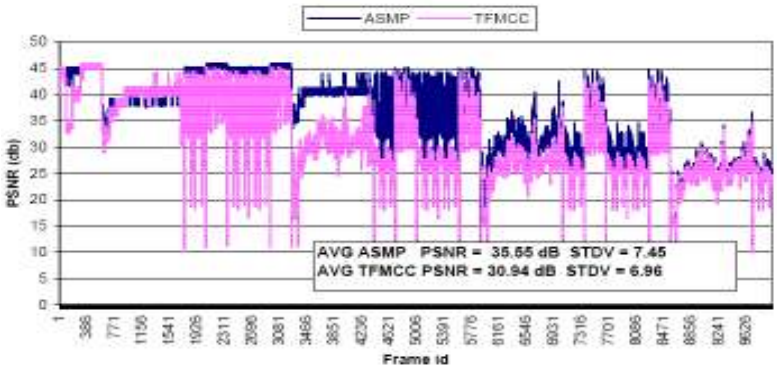
Σχήμα 55. Τοπολογία δικτύου σεναρίου προσομοίωσης



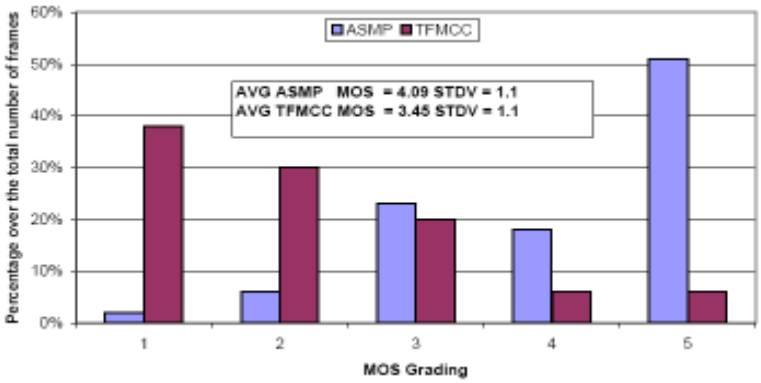
Σχήμα 56. Ρυθμοαπόδοση ASMP



Σχήμα 57. Ρυθμοαπόδοση TFMCC



Σχήμα 58. PSNR τιμές



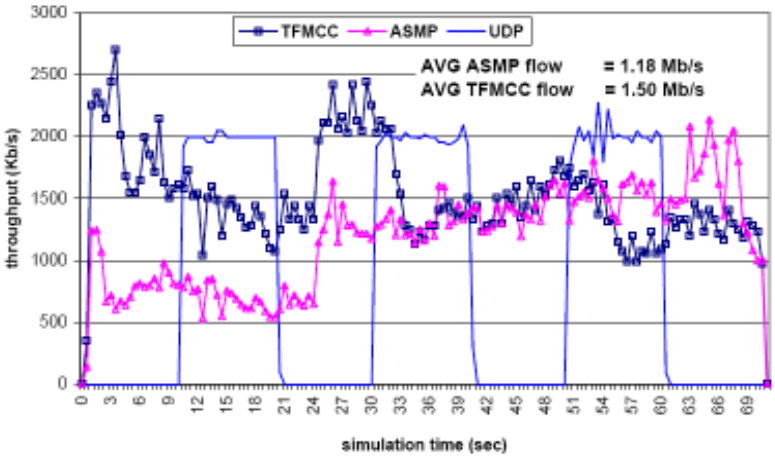
Σχήμα 59. Βαθμολόγηση κλίμακας MOS

Στο Σχήμα 56 και στο Σχήμα 57 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για κάθε ένα πρωτόκολλο χωριστά. Παρατηρούμε λοιπόν ότι τόσο το ASMP όσο και το TFMCC μοιράζονται δίκαια τις πηγές του δικτύου καθώς μετρούμε τιμές της κλίμακας Jain που πλησιάζουν το 0.99. Το TFMCC παρουσιάζει υψηλότερες τιμές ρυθμοαπόδοσης από ότι το ASMP, γεγονός το οποίο έχουμε παρατηρήσει και στις προηγούμενες προσομοιώσεις μας με μεγαλύτερο όμως ρυθμό απώλειας πακέτων. Αυτό γίνεται περισσότερο ευκρινές όταν μετρούμε τις τιμές PSNR (Σχήμα 58), όπου βλέπουμε ότι το ASMP παρουσιάζει υψηλότερη απόδοση από το TFMCC κατά 5 dB. Η βαθμολόγηση της ποιότητας του βίντεο με βάση τη κλίμακα MOS (Σχήμα 59) δείχνει ότι το 70% του αρχείου στο παραλήπτη χαρακτηρίζεται για το TFMCC από "απαράδεκτο" έως "φτωχό". Το ASMP παρουσιάζει σαφώς υψηλότερη απόδοση καθώς το 50% του αρχείου βίντεο στο παραλήπτη βαθμολογείται ως 'εξαιρετικό" ενώ το 90% του συνολικού αρχείου βρίσκεται στη κλίμακα μεταξύ "αποδεκτό" έως "εξαιρετικό".

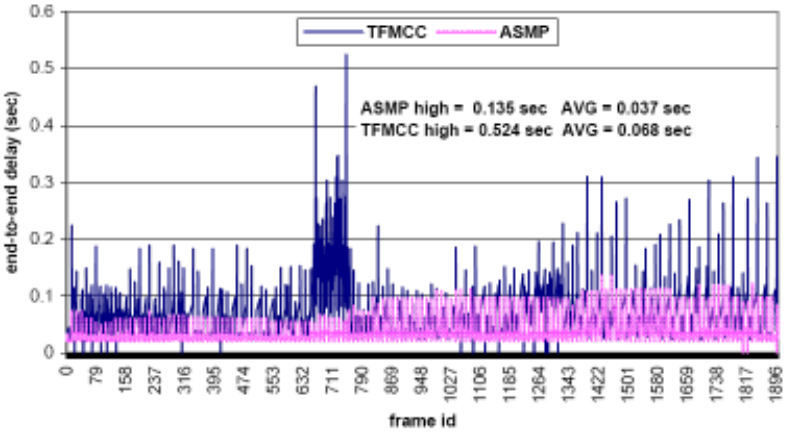
6.4.10 Απόκριση στη Παρουσία Ανταγωνιστικών UDP Ροών

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης μελετούμε την ικανότητα των δύο πρωτοκόλλων να προσαρμόζουν το ρυθμό μετάδοσής τους όταν στο ίδιο δίκτυο μεταδίδουν ανταγωνιστικές UDP ροές για τις οποίες δεν εφαρμόζεται κανένας μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης. Χρησιμοποιούμε προς το σκοπό αυτό μια τοπολογία δικτύου dumbbell όπου ο περιοριστικός σύνδεσμος διαθέτει εύρος ζώνης 4 Mb/s με

καθυστέρηση μετάδοσης 10 ms. Για να μελετήσουμε καλύτερα την απόκριση του κάθε πρωτοκόλλου μεταβάλουμε το διατιθέμενο εύρος ζώνης στο περιοριστικό σύνδεσμο εισάγοντας μια UDP ροή που μεταδίδεται με ρυθμό 2 Mb/s και καταλαμβάνει το μισό του διατιθέμενου εύρους.



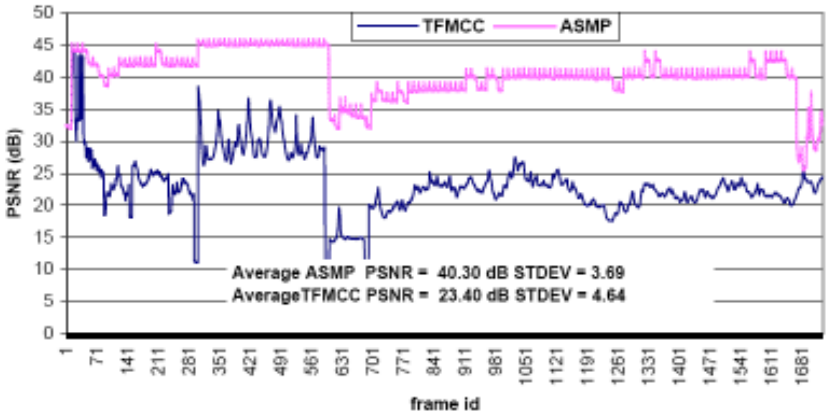
Σχήμα 60. Ρυθμοαπόδοση TFMCC και ASMP



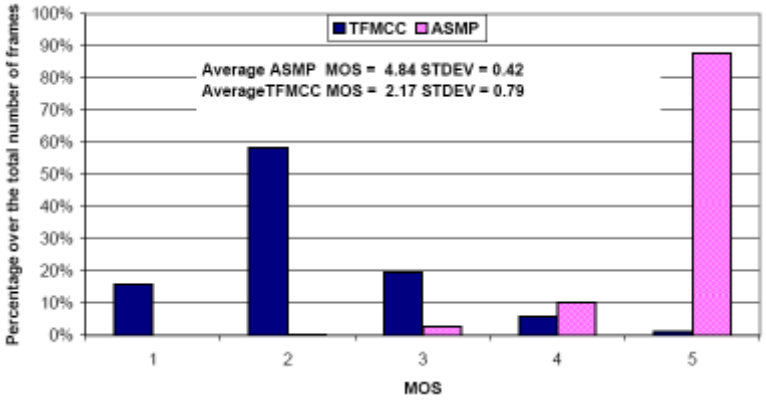
Σχήμα 61. Καθυστέρηση TFMCC και ASMP

Το TFMCC παρουσιάζει υψηλότερη ρυθμοαπόδοση από ότι το ASMP καθώς ανταποκρίνεται ταχύτερα στις αλλαγές της κατάστασης του δικτύου. Το TFMCC αυξάνει απότομα το ρυθμό μετάδοσή τους και μάλιστα εκθετικά, όπως συμβαίνει και με το TCP κατά την αρχική φάση. Έτσι παρατηρούμε στο Σχήμα 60 ότι το TFMCC στα πρώτα κιόλας δευτερόλεπτα της προσομοίωσης έχει ένα ρυθμό μετάδοσης που ανέρχεται στα 2.5 Mb/s. Σε αυτό το σημείο υπάρχει ήδη συμφόρηση στο περιοριστικό σύνδεσμο. Το άμεσο αποτέλεσμα είναι υψηλές απώλειες πακέτων ((1.71%) και υψηλές τιμές της καθυστέρησης από άκρο-σε-άκρο (Σχήμα 61). Αντίθετα το ASMP διαθέτει ένα "συντηρητικό" μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης με χαμηλότερες τιμές ρυθμοαπόδοσης. Το ASMP δεν διαθέτει κάποιο μηχανισμό αρχικής φάσης αλλά αντίθετα αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης σταδιακά μέχρι το πολύ 0.9 packets/sec σε κάθε χρόνο RTT. Έτσι λοιπόν απαιτείται μεγαλύτερη διάρκεια χρόνου για το ASMP ώστε να πετύχει το μέγιστο της απόδοσής του από ότι το TFMCC αλλά το γεγονός αυτό εξασφαλίζει ομαλούς ρυθμούς μετάδοσης έτσι ώστε να αποφεύγονται οι

απώλειες των πακέτων. Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο ρυθμός απώλειας πακέτων είναι πολύ χαμηλός για το ASMP (0.17%) γεγονός που παρέχει υψηλότερες PSNR τιμές (Σχήμα 62). Οι τιμές της κλίμακας MOS φαίνονται στο Σχήμα 63. Παρατηρούμε ότι το ASMP παρουσιάζει σαφώς καλύτερη απόδοση από το TFMCC καθώς περίπου το 85% του αρχείου βίντεο στο παραλήπτη χαρακτηρίζεται ως "εξαιρετικό".



Σχήμα 62. PSNR τιμές



Σχήμα 63. Βαθμολόγηση κλίμακας MOS

6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πρωτόκολλο ASMP αποτελεί μια νέα προσέγγιση για τα μεταφορά πολυμεσικής πληροφορίας με δρομολόγηση πολλαπλής διανομής. Κατά το ASMP ο υπολογισμός ενός φιλικού προς το TCP ρυθμού μετάδοσης δεν περιορίζεται μόνο στις μετρήσεις του χρόνου RTT και των τιμών του ρυθμού απώλειας πακέτων. Το ASMP "φιλτράρει" τη τιμή του ρυθμού μετάδοσης με βάση στατιστικές μετρήσεις της διαταραχής. Οι μηχανισμοί των αναφορών κατάστασης είναι δομημένοι πάνω στο πρωτόκολλο RTP/RTCP. Έτσι η χρησιμοποίηση των μηχανισμών αυτών του RTCP εξαλείφει την ανάγκη της δημιουργίας νέων μηχανισμών αναφορών ελέγχου, που θα απαιτούσαν την αποστολή επιπρόσθετων πακέτων, καταλαμβάνοντας έτσι ένα τμήμα από το ωφέλιμο εύρος ζώνης του χρήστη.

Προσθέσαμε το ASMP στο λογισμικό προσομοίωσης ns-2 έχοντας παράλληλα επεκτείνει τη λειτουργικότητα των πρωτοκόλλων RTP/RTCP με βάση την RFC 2550. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδεικνύουν ότι το ASMP παρουσιάζει πολύ

καλή απόδοση κάτω από δύσκολες συνθήκες του δικτύου με υψηλούς ρυθμούς απωλειών πακέτων και με δυναμικές αλλαγές συνέπεια της ύπαρξης άλλων ανταγωνιστικών πηγών. Η επεκτασιμότητα του ASMP εξασφαλίζεται από το πρωτόκολλα RTCP και επιπρόσθετους μηχανισμούς καταστολής των αναφορών ελέγχου.

Συγκρίναμε την απόδοση του ASMP με δύο γνωστούς μηχανισμούς ελέγχου της συμφόρησης, το TFMCC και το PGMCC. Το TFMCC παρουσιάζει μεγάλες διαταραχές στο ρυθμό μετάδοσης σε αντίθεση με το ASMP το οποίο διατηρεί ομαλές μεταβολές του ρυθμού μετάδοσης σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης. Η απόδοση του PGMCC ομοιάζει με αυτή του ASMP σε ότι αφορά το κριτήριο της ομαλότητας του ρυθμού μετάδοσης σε συνθήκες δικτύου με μικρό αριθμό ανταποκριτών και μικρές τιμές του ρυθμού απώλειας πακέτων.

Το ASMP παρουσιάζει υψηλή απόκριση στις απώλειες των πακέτων και προσαρμόζεται πολύ εύκολα στις συνθήκες του δικτύου, αν και ο χρόνος που απαιτείται για τη προσαρμογή αυτή είναι μεγαλύτερος συγκριτικά με το TFMCC και το PGMCC.

Η επεκτασιμότητα του ASMP ελέγχεται από το πρωτόκολλο RTCP όπου σύμφωνα με αυτό μόνο ένα 5% από το συνολικό εύρος ζώνης μπορεί να χρησιμοποιείτε για τη κυκλοφορία των αναφορών ελέγχου της κατάστασης του δικτύου. Σε μεγάλες ομάδες δεκτών η διαφορά χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών RTCP αναφορών αυξάνει, οπότε απαιτούνται επιπλέον μηχανισμοί καταστολής των αναφορών κατάστασης. Σε αντίθεση το TFMCC διαθέτει ενδογενείς μηχανισμούς ελέγχου των αναφορών κατάστασης με την εκλογή του αντιπροσώπου της ομάδας (CLR). Η επεκτασιμότητα του PGMCC εξαρτάται από τη βοήθεια των υπολοίπων στοιχείων του δικτύου (δρομολογητές). Σε κάθε περίπτωση το PGMCC απαιτεί από όλους τους δέκτες να αποστέλλουν αναφορές NACs έτσι ώστε να είναι δυνατή η εκλογή του αντιπροσώπου της ομάδας (*acker*).

Σε ότι αφορά τις προσομοιώσεις μας με κριτήρια ποιότητας βίντεο συμπεράναμε ότι και τα δύο πρωτόκολλα (ASMP και TFMCC) απέδειξαν ότι είναι φιλικά προς το TCP καθώς μοιράζονται με δίκαιο τρόπο το διατιθέμενο εύρο ζώνης με τις TCP ροές. Η φιλικότητα προς το TCP καθορίζεται με διαφορετικό τρόπο στο TFMCC κατά το οποίο ο ρυθμός μετάδοσής του κυμαίνεται γενικά περίπου στο διπλάσιο του ρυθμού του TCP με το οποίο μοιράζεται το διατιθέμενο εύρο ζώνης σε μια ζεύξη. Από την άλλη μεριά το ASMP είναι ένα "μετριοπαθές" πρωτόκολλο όπου δεν καταλαμβάνει μεγαλύτερο εύρος ζώνης από ότι το TCP.

Το TFMCC απέδειξε ότι είναι ποιο αποτελεσματική λύση όταν η εκμετάλλευση του διατιθέμενου εύρου ζώνης και οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης είναι το κύριο ενδιαφέρον σε μια εφαρμογή. Το μειονέκτημα του TFMCC είναι όμως οι απότομες αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης λόγω της ομοιότητάς του προς το πρωτόκολλο TCP. Αυτές όμως οι αυξομειώσεις οδηγούν στην αύξηση του επιπέδου συμφόρησης και στην απώλεια πακέτων με άμεση συνέπεια τις χαμηλές PSNR τιμές. Το ASMP από την άλλη μεριά απέδειξε ότι είναι ένα πρωτόκολλο που προσφέρει καλύτερης ποιότητας βίντεο στο τελικό χρήστη με υψηλές τιμές της κλίμακας MOS. Η ομαλή συμπεριφορά του μειώνει τις απώλειες πακέτων αλλά όχι όμως και την απόκρισή του στις μεταβολές του δικτύου λόγω της παρουσίας άλλων ανταγωνιστικών πηγών.

Οι απώλειες πακέτων έχουν αρνητικό αποτέλεσμα στη ποιότητα του βίντεο διότι μειώνουν τις τιμές PSNR. Επομένως, πιστεύουμε ότι ρυθμοί μετάδοσης που δεν είναι

ιδιαίτερα υψηλοί αλλά που ικανοποιούν τις απαιτήσεις μιας εφαρμογής βίντεο με μικρό αριθμό απώλειας πακέτων είναι η επιθυμητή συμπεριφορά από τις εφαρμογές αυτές. Σε αντίθετη περίπτωση, θα πρέπει να εφαρμοσθούν μηχανισμοί διόρθωσης λαθών τουλάχιστο για την επανάκτηση των I πλαισίων στο παραλήπτη που έχουν και τη μεγαλύτερη αξία από πλευράς πληροφορίας.

Η "επιθετικότητα" ενός πρωτοκόλλου μεταφοράς πρέπει να σχεδιάζεται πολύ προσεκτικά έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ισορροπία μεταξύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης, μικρής απώλειας πακέτων και αποφυγής υψηλών αυξομειώσεων στο ρυθμό μετάδοσης. Ιδιαίτερα οι αυξομειώσεις αυτές έχουν αρνητική επίδραση στη ποιότητα του βίντεο στο τελικό χρήστη. Το ASMP απέδειξε την ικανότητά του να μεταφέρει MPEG-4 βίντεο αρχεία με υψηλή ποιότητα. Οι χαμηλές τιμές της σωρευτικής διακύμανσης μειώνουν τη τιμή της χρονικής διάρκειας του απομονωτή και κατά συνέπεια το νεκρό χρόνο πριν να αρχίσει η αναπαραγωγή του βίντεο στο τερματικό του χρήστη.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με ανταγωνιστικές UDP πηγές πληροφορίας απέδειξαν ότι το ASMP είναι σε θέση να προσαρμόζει το ρυθμό εκπομπής ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες του δικτύου. Το TFMCC έχει όμως υψηλότερο ρυθμό απόκρισης και επομένως ανταποκρίνεται καλύτερα στις απότομες αλλαγές της κατάστασης του δικτύου.

Η μετάδοση βίντεο χωρίς κανένα έλεγχο ή περιορισμό σε ότι αφορά το ρυθμό μετάδοσης οδηγεί σε απώλειες πακέτων και κατά συνέπεια στη μείωση της ποιότητας του βίντεο. Παρόλα αυτά η εφαρμογή μόνο μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης δεν αποτελεί πανάκεια για την επίλυση του προβλήματος. Ποιο αποτελεσματικοί μέθοδοι κωδικοποίησης σε συνεργασία με μηχανισμούς ελέγχου και διόρθωσης λαθών και σε ένα περιβάλλον με ζεύξης υψηλής ταχύτητας αποτελούν τα κλειδιά ώστε να αυξήσουμε τη ποιότητα υπηρεσίας στο τελικό χρήστη.

Η σύγκριση του TFMCC και του ASMP με μετρικά ποιότητας βίντεο έδειξε ότι η μελέτη της απόδοσης μηχανισμών ή πρωτοκόλλων μεταφοράς που στοχεύουν στη μετάδοση βίντεο δεν είναι πλήρης όταν λαμβάνονται υπόψη μόνο "κλασικά" μετρικά δικτύων. Έτσι λοιπόν θα πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνονται υπόψη μετρικά που έχουν άμεση σχέση με τη ποιότητα του βίντεο όπως την αντιλαμβάνεται αυτή ο τελικός χρήστης.

Τέλος ο Πίνακας 7 παρουσιάζει τα συγκριτικά αποτελέσματα του ASMP σε σχέση με τους προαναφερόμενους μηχανισμούς. Όπως μπορούμε να δούμε το ASMP έχει πολύ καλή απόδοση όταν ανταγωνίζεται για τις πηγές του δικτύου με άλλες TCP ροές ενώ το TFMCC φαίνεται λιγότερο φιλικό προς το TCP. Η φιλικότητα του PGMCC προς το TCP είναι σχεδόν παρόμοια με αυτή του ASMP.

	ASMP	TFMCC	PGMCC
Φιλικότητα προς το TCP	πολύ υψηλή	υψηλή	υψηλή
Σταθερότητα του ρυθμού μετάδοσης	πολύ υψηλή	πολύ χαμηλή	υψηλή

Χρόνος σύγκλισης	μέτρια απόδοση	υψηλή απόδοση	υψηλή απόδοση
Επεκτασιμότητα	μέτρια (εξαρτώμενη από το RTCP)	πολύ υψηλή (εξαρτάται από τον αντιπρόσωπο της ομάδας πολλαπλής διανομής)	μέτρια (εξαρτάται από αναφορές NACs από όλους τους παραλήπτες)
Περιορισμοί και υποστήριξη από το δίκτυο	κανένας	κανένας	απαιτεί υποστήριξη από το δίκτυο

Πίνακας 7. Συγκριτικός πίνακας απόδοσης του ASMP

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ SIMULCAST

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ SIMULCAST

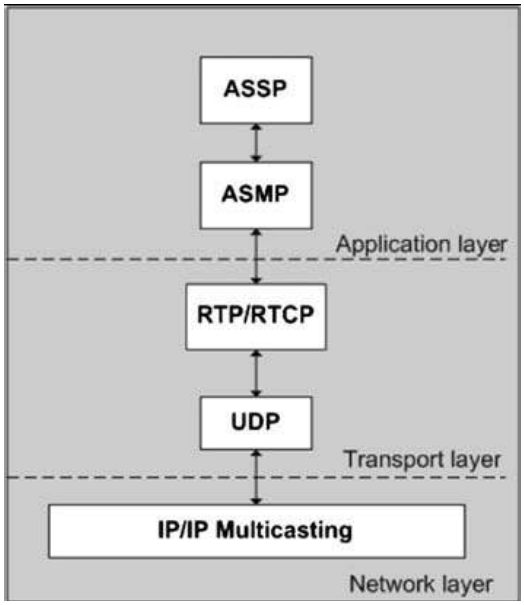
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε τη πρότασή μας στη περιοχή της μετάδοσης πολυμεσικής πληροφορίας με simulcast μετάδοση. Η ανάγκη για simulcast μετάδοση είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανομοιογένεια των χρηστών που υπάρχουν στο Διαδίκτυο. Έτσι λοιπόν για να εξυπηρετηθούν με το καλύτερο δυνατό τρόπο οι χρήστες αυτοί, ο αποστολέας της πολυμεσικής πληροφορίας μεταδίδει το ίδιο αρχείο σε διαφορετικές ροές δεδομένων κωδικοποιημένες με διαφορετική ποιότητα. Οι διαφορετικές ροές δεδομένων μεταφέρουν την ίδια πολυμεσική πληροφορία η οποία έχει κωδικοποιηθεί σε διαφορετικό ρυθμό μετάδοσης, ή ακόμα και σε διαφορετική κωδικοποίηση (για παράδειγμα βίντεο MPEG, H263, JPEG). Έτσι κάθε παραλήπτης λαμβάνει την ροή δεδομένων ανάλογα με τις δυνατότητες λήψης του. Το κύριο μειονέκτημα όμως σε αυτή τη περίπτωση είναι ότι μεταδίδονται ταυτόχρονα στο δίκτυο αντίγραφα του ίδιου αρχείου.

Η δική μας πρόταση με την ονομασία Adaptive Smooth Simulcast Protocol (ASSP) φιλοδοξεί να αποτελέσει μια λύση στη εκπομπή πολυμεσικής πληροφορίας με δρομολόγηση simulcast διότι μπορεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα ένα μεγάλο αριθμό χρηστών που έχουν παρόμοιες δυνατότητες πρόσβασης. Θα δούμε λοιπόν παρακάτω τις αρχές σχεδίασης του πρωτοκόλλου ASSP, τα χαρακτηριστικά του και την αξιολόγησή του μέσα από μια σειρά πειραμάτων. Συγκρίνουμε επίσης την απόδοση του ASSP με το Smooth Multi-rate Congestion Control (SMCC) που αποτελεί μια διαφορετική πρόταση αρκετά γνωστή στη βιβλιογραφία στη περιοχή των μηχανισμών ελέγχου της συμφόρησης σε σχήματα πολλαπλών ροών πολλαπλής διανομής.

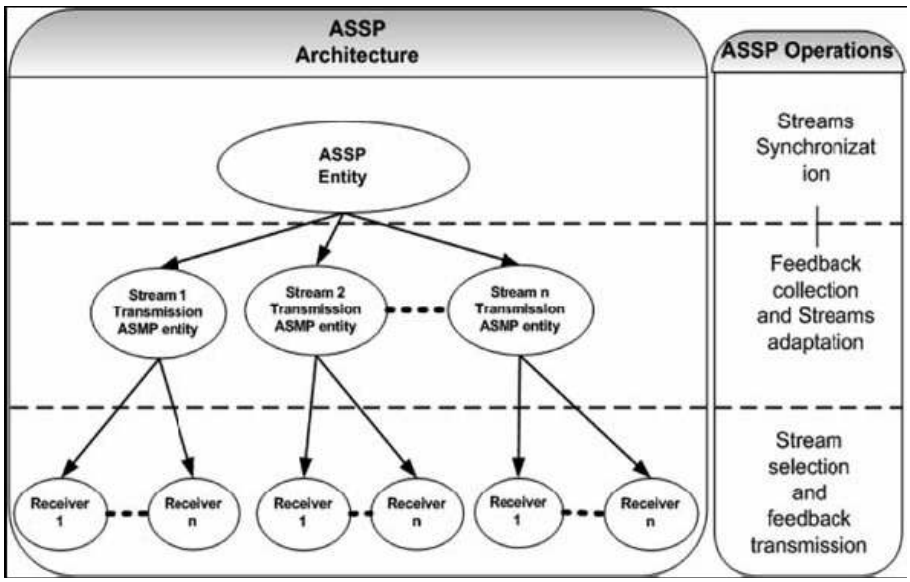
7.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ADAPTIVE SMOOTH SIMULCAST PROTOCOL (ASSP)

Η βασική ιδέα στο ASSP είναι ότι η κάθε ροή δεν μεταδίδεται με σταθερούς και προκαθορισμένους ρυθμούς εκπομπής. Ο ρυθμός εκπομπής σε κάθε ροή είναι προσαρμοσμένος έτσι ώστε να εξυπηρετεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό παραληπτών που έχουν παρόμοιες δυνατότητες λήψης. Με το τρόπο αυτό, μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε τον αριθμό των απαιτούμενων ροών προκειμένου να διαφυλάξουμε τους πόρους του δικτύου σε ότι αφορά το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Οι ροές ωστόσο, πρέπει να κυμαίνονται μέσα σε κάποια προκαθορισμένα ανώτατα και κατώτατα όρια. Η καινοτομία στο ASSP αφορά το τρόπο με τον οποίο οι παραλήπτες λαμβάνουν την απόφαση να προσθέσουν ή να αφαιρέσουν μια ροή υψηλότερης ή χαμηλότερης ποιότητας και βασίζεται σε μια σειρά στατιστικών μετρήσεων που αφορούν στη κατάσταση του δικτύου καθώς και σε μια "αυστηρή" διαδικασία λήψης απόφασης. Ο αλγόριθμος αυτός ελαχιστοποιεί τις συχνές και λανθασμένες αποφάσεις για την εγγραφή/διαγραφή σε ροές χαμηλότερης ή υψηλότερης ποιότητας που είναι δυνατόν να προκαλέσουν αστάθεια και συμφόρηση. Με το τρόπο αυτό, οι παραλήπτες πρέπει πρώτα να αποκτήσουν ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης πριν να προβούν σε τέτοιες αποφάσεις. Το πρωτόκολλο RTCP χρησιμοποιείται για τη διάδοση των αναφορών ελέγχου μεταξύ του αποστολέα και των παραληπτών. Η

κλιμάκωση εξασφαλίζεται από το πρωτόκολλο ASMP, το οποίο παρέχει τους μηχανισμούς για την καταστολή των αναφορών ελέγχου από τους παραλήπτες. Στο Σχήμα 64 παρουσιάζουμε τη στοίβα του πρωτοκόλλου ASSP.



Σχήμα 64. Στοίβα πρωτοκόλλου ASSP



Σχήμα 65. Αρχιτεκτονική του ASSP

Το ASSP μπορεί εύκολα να εφαρμοσθεί σε μη ελεγχόμενα δίκτυα για τους παρακάτω λόγους:

- Τόσο η πηγή όσο και παραλήπτες απαιτούν μόνο απλούς υπολογισμούς και οι υπολογισμοί αυτοί είναι ανεξάρτητοι από τον αριθμό των παραληπτών (υψηλή κλιμάκωση)

- Δεν κάνουμε καμία υπόθεση για την υποστήριξη από ενδιάμεσα στοιχεία του δικτύου (δρομολογητές) εκτός από τη υποστήριξη της δρομολόγησης πολλαπλής διανομής. και
- Το ASSP είναι μια καθαρή λύση από "*άκρο-σε-άκρο*" που εφαρμόζεται στο στρώμα εφαρμογών μη επηρεάζοντας το λειτουργικό σύστημα και τα ενδιάμεσα στοιχεία του δικτύου.

Το ASSP είναι επίσης αποτελεσματικό διότι:

- Είναι φιλικό προς το TCP, γιατί ο μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης σε κάθε επιμέρους ροή είναι φιλικός προς το TCP
- Το πρωτόκολλο δεν απαιτεί επιπλέον πρόσθετα μηνύματα έλεγχου εκτός από τις RTCP αναφορές ελέγχους, και
- Το ASSP παρουσιάζει πολύ καλά αποτελέσματα στις προσομοιώσεις μας.

Μια γενική επισκόπηση της λειτουργικότητας του ASSP παρουσιάζεται όπως παρακάτω:

- Ο παραλήπτης υπολογίζει ένα φιλικό προς το TCP ρυθμό λήψης με τη χρήση του αναλυτικού πρότυπου του TCP με συνδυασμό στατιστικών στοιχείων τα οποία σχετίζονται με τη κατάσταση του δικτύου.
- Ο παραλήπτης συγκρίνει το φιλικό προς το TCP ρυθμό λήψης με το ρυθμό εκπομπής του αποστολέα σε όλες τις simulcast ροές και με τα άνω και κάτω όρια της κάθε ροής. Σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, ο παραλήπτης μπορεί να εγκαταλείψει τη παρούσα ροή και να ακολουθήσει μια άλλη ροή χαμηλότερης ή υψηλότερης λήψης με βάση έναν αλγόριθμο λήψης απόφασης.
- Ο αποστολέας συγκεντρώνει τις RTCP αναφορές ελέγχου του παραλήπτη και προσαρμόζει το ρυθμό εκπομπής σε κάθε ροή με βάση τις αναφερόμενες τιμές από τους παραλήπτες.
- Ο αποστολέας περιλαμβάνει τη μέση τιμή του ρυθμού εκπομπής από κάθε ροή στην RTCP αναφορά ελέγχου.
- Σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα ο αποστολέας ενημερώνει όλους τους παραλήπτες ώστε να υπάρχει συγχρονισμός στη διαδικασία αλλαγής από μια ροή σε μια άλλη.

Στις ακόλουθες παραγράφους, θα παρουσιάσουμε όλα τα θέματα που συνδέονται με τη simulcast μετάδοση, τη διαχείριση και το συγχρονισμό των πολλαπλών ροών πολλαπλής διανομής. Η μετάδοση της κάθε ροής ελέγχεται από το πρωτόκολλο ASMP (Σχήμα 65).

Symbol	Meaning
$rx_inst_j^i(t)$	Instantaneous TCP-Friendly bandwidth share of receiver i in stream j at time t
$tx_inst_j(t)$	Instantaneous transmission rate of stream j at time t

$avg_tx_j(t)$	Average transmission rate of stream j at time t
$avg_rx^i(t)$	Average receiving rate of receiver i at time t
$\Phi()$	EWMA averaging function
α	Exponential averaging factor
β	Transmission rate factor
κ	Current stream leave factor
λ	Higher stream join factor
Δt	Time period over which join or leave decisions are made
j	stream j
$threshold_j$	low BW limit of stream j

Πίνακας 8. Μαθηματικοί Συμβολισμοί

7.1.1 Διαδικασίες Ανατροφοδότησης του Αποστολέα

Οι διαδικασίες ανατροφοδότησης του αποστολέα υλοποιούνται από τις οντότητες του ASMP (τις οντότητες αυτές τις αποκαλούμε "διαχειριστές ροών") οι οποίες συλλέγουν και εκμεταλλεύονται τις RTCP αναφορές ελέγχου των παραληπτών (Σχήμα 66). Ο αποστολέας ακολουθεί τις ακόλουθες διαδικασίες όταν λάβει μια νέα RTCP αναφορά ελέγχου από ένα παραλήπτη:

Subroutine Compare:

for *all receivers in stream j*

$tx_inst_j(t) \leftarrow \min(rx_inst_j^1 ... rx_inst_j^i)$

Receive RTCP packet:

compare()

adjustTransmissionRate()

Εξίσωση 37. Ενέργειες ASSP αποστολέα κατά τη λήψη RTCP πακέτου

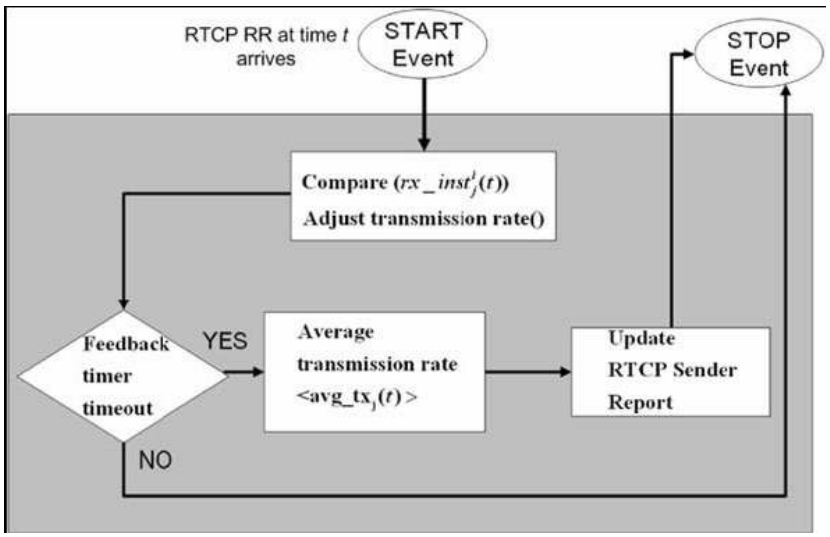
Με άλλα λόγια, ο διαχειριστής της ροής j συγκρίνει τις αναφερόμενες $rx_inst_j^i(t)$ τιμές στο χρόνο t από το παραλήπτη i με όλες τις προηγούμενες αναφερόμενες τιμές των παραληπτών που ακολουθούν τη ροή j. Ο νέος ρυθμός μετάδοσης (τίθεται από την υπορουτίνα *adjustTransmissionRate()*) της ροής j είναι η χαμηλότερη αναφερόμενη $rx_inst_j^i(t)$ τιμή. Στη συνέχεια ο αποστολέας προσθέτει τη τιμή $tx_inst_j(t)$ σε μια λίστα και όταν το ρολόι ανάδρασης υπερβεί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα τότε ο παραλήπτης υπολογίζει το μέση τιμή του ρυθμού εκπομπής της ροής j όπως παρακάτω:

$$avg_tx_j(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t}^{t+\Delta t} tx_inst_j(t)\, dt$$

Εξίσωση 38. Υπολογισμός μέσης τιμής ρυθμού μετάδοσης

Ο αποστολέας περιλαμβάνει τη μέση τιμή του ρυθμού εκπομπής στην RTCP αναφορά ελέγχου. Ως εκ τούτου, σε οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή, κάθε παραλήπτης έχει γνώση της μέσης τιμής του ρυθμού εκπομπής για κάθε μια simulcast ροή. Η συνιστώμενη χρονική διάρκεια για το ρολόι ανάδρασης καθορίζεται σε 5 δευτερόλεπτα μετά από μια σειρά πειραμάτων, τα οποία δείχνουν ότι η τιμή αυτή αποτελεί μια καλή συμβιβαστική λύση μεταξύ ανταπόκρισης και ακρίβειας για τον υπολογισμό του επιπέδου λήψης σε κάθε παραλήπτη. Χαμηλότερες τιμές των 5 δευτερολέπτων δεν παρέχουν το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης για τέτοιες αποφάσεις.

Ως εκ τούτου, σε ότι αφορά την εφαρμογή του ASSP προτείνουμε τη τιμή των 5 δευτερολέπτων, η οποία παρέχει υψηλή στατιστική ακρίβεια χωρίς να επηρεάζεται η απόκριση του πρωτοκόλλου από τις δυναμικές αλλαγές του δικτύου.



Σχήμα 66. Μηχανισμός ανάδρασης του ASSP αποστολέα

7.1.2 Διαδικασίες Ανατροφοδότησης του Παραλήπτη

Ο ASSP παραλήπτης είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση των αναφερόμενων ρυθμών μετάδοσης από τον αποστολέα και προσαρμόζει το επίπεδο λήψης του με βάση έναν αλγόριθμο λήψης απόφασης. Με τη λήψη ενός νέου RTCP πακέτου, ο παραλήπτης ελέγχει τη τιμή μιας μεταβλητής που μεταφέρεται από το RTCP πακέτο του αποστολέα (Σχήμα 67). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε το πεδίο εφαρμογών του RTCP πακέτου για να θέσουμε τη μεταβλητή αυτή που από εδώ και μετά θα αναφέρεται ως δείκτης και ο οποίος ενημερώνει τους παραλήπτες σχετικά με την ένταξη/εγκατάλειψη σε μια ροή υψηλότερης ή χαμηλότερης ποιότητας. Όταν ο δείκτης αυτός έχει θετική τιμή τότε οι παραλήπτες υπολογίζουν το μέσο όρο του ρυθμού λήψεως σε μια χρονική περίοδο Δt.

Ωστόσο, όταν ένας παραλήπτης αφήνει την τρέχουσα ροή για να ενταχθεί σε μια ροή υψηλότερης ή χαμηλότερης ποιότητας υπάρχει μια περίοδος κατά την οποία δεν λαμβάνει κανένα πακέτο δεδομένων. Εάν οι μετρήσεις για το ρυθμό λήψης είχαν ως

βάση μόνο τις στιγμιαίες τιμές, τότε ο παραλήπτης θα εμφανίζει μηδενικές τιμές λήψης τη χρονική περίοδο κατά την οποία αλλάζει το επίπεδο λήψης του. Η κατάσταση αυτή θα οδηγούσε σε μεγάλες αυξομειώσεις σε ότι αφορά το ρυθμό λήψης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε μια συνάρτηση εκθετικά σταθμισμένου κινητού μέσου όρου (Exponential Weighted Moving Average-EWMA) με παράγοντα $0 < \alpha < 1$.

Receive RTCP packet:

$if\ \ (flag = true)\ then$

$compare(avg_rx^i(t))$

$else\ do\ nothing$

$end\ if$

Εξίσωση 39. Διαδικασίες λήψης RTCP πακέτου από τον ASSP παραλήπτη

Με τη χρήση της συνάρτησης EWMA, ελαχιστοποιούμε τις παρενέργειες από το μακρό χρόνο της εγκατάλειψης μιας σύσκεψης πολλαπλής διανομής συνέπεια του πρωτοκόλλου IGMP.

Οι παρακάτω λειτουργίες πραγματοποιούνται όταν ένα RTCP πακέτο ληφθεί από το παραλήπτη. Κατά τη σύνδεση με την υπηρεσία ο αποστολέας ενημερώνει κάθε παραλήπτη σχετικά με τον αριθμό των simulcast ροών και τα κατώτατα όρια της κάθε ροής. Αυτό το χαρακτηριστικό υλοποιείται εύκολα από το πρωτόκολλο RTCP επεκτείνοντας την επικεφαλίδα του RTCP πακέτου:

Subroutine Compare:

$if\,(avg_rx^j(t) > avg_tx_{j+1}(t)\cdot\beta$ **and** $avg_rx^i(t) > threshold_{J+1}\cdot\lambda)$

$\quad leave\ stream\ j$

$\quad join\ \ stream\ (j+1)$

$else\ if\,(avg_rx^j(t) < threshold_j\cdot\kappa)$

$leave\ stream\ j$

$join\ stream\ (j-1)$

Εξίσωση 40. Αλγόριθμος λήψης απόφασης από τον ASSP παραλήπτη

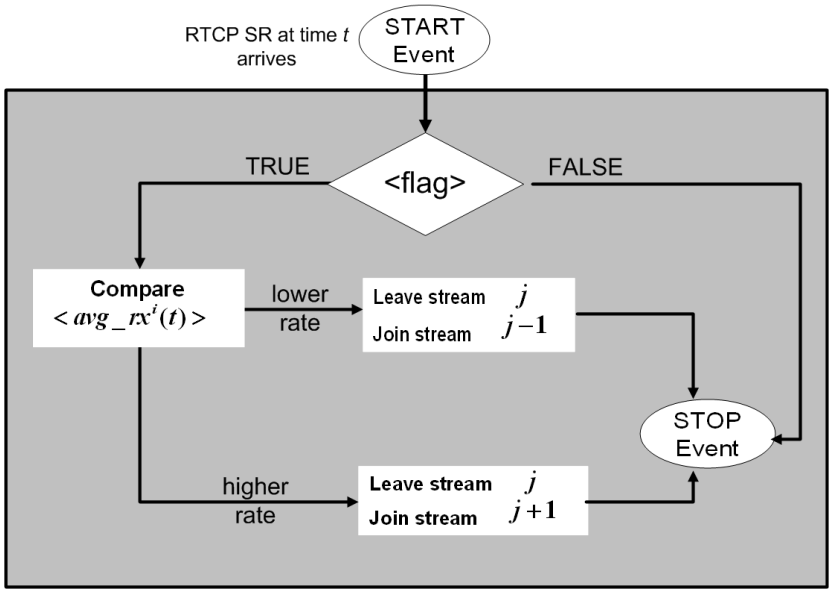
Η μέση τιμή του ρυθμού λήψης του παραλήπτη $avg_rx^i(t)$ στο χρόνο t καθορίζεται όπως παρακάτω:

$$avg_rx^i(t) = \Phi(avg_rx^i(t_0),\alpha)$$
$$avg_rx^i = (1-a)\cdot avg_rx^i(t_0) + a\cdot avg_rx^i(t_1)$$

Εξίσωση 41. Καθορισμός μέσης τιμής λήψης από τον ASSP παραλήπτη

Οι διαφορετικές τιμές της μεταβλητής a καθορίζουν το επίπεδο απόκρισης ενός παραλήπτη στις αλλαγές του δικτύου. Όταν έχουμε υψηλές τιμές του a τότε ο παραλήπτης ανταποκρίνεται ταχύτερα στις αλλαγές αυτές αλλά δημιουργούνται περιττές εγγραφές/διαγραφές στις simulcast συσκέψεις. Ο στόχος μας ωστόσο είναι, να σταθεροποιήσουμε τη συμπεριφορά του παραλήπτη, ώστε να αποφευχθούν αυτές οι συχνές εγγραφές/διαγραφές Επομένως δεν αφήνουμε μια στιγμιαία τιμή του $avg^i_{rx}(t)$ να διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στη διαδικασία λήψης απόφασης του παραλήπτη. Ωστόσο, όπως βλέπουμε στην Εξίσωση 40 η απόφαση του παραλήπτη να εγκαταλείψει μια ροή χαμηλού ρυθμού και να ακολουθήσει μια ροή υψηλότερου ρυθμού δεν βασίζεται μόνο στη μέτρηση της μέσης τιμής του ρυθμού λήψης. Ο

παραλήπτης δεν απαιτείται μόνο να έχει μια μέση τιμή του ρυθμού λήψης που είναι υψηλότερη από το κατώτερο όριο της ρυθμού εκπομπής της υψηλότερης σε ρυθμό ροή, αλλά πρέπει να είναι σε θέση να ακολουθήσει παρεμφερείς ρυθμούς εκπομπής με αυτούς που απαιτείται για τους παραλήπτες που ακολουθούν την υψηλή αυτή ροή.



Σχήμα 67. Μηχανισμός ανάδρασης του ASSP παραλήπτη

Στις προσομοιώσεις μας θέτουμε $a = 0.3$, $\beta = 0.7$, $\kappa = 0.8$ και $\lambda = 1.2$ βασιζόμενοι σε μια σειρά πειραμάτων με διαφορετικές τοπολογίες δικτύων. Γενικότερα το β παίρνει τις ακόλουθες τιμές:

$$0.7 \le \beta \le 1$$

Εξίσωση 42. Τιμές παραμέτρου β

που σημαίνει ότι ο παραλήπτης πρέπει να είναι σε θέση να ακολουθεί ρυθμούς εκπομπής το λιγότερο 70% από τη μέση τιμή $tx_inst_{j+1}(t)$, ώστε να μπορεί να ακολουθήσει τη ροή υψηλότερου ρυθμού $j+1$. Ο παράγοντας που καθορίζει τη δυνατότητα εγγραφής μια ροής υψηλότερου ρυθμού ορίζεται από τις τιμές του λ που κυμαίνονται ανάμεσα στο 1 και το 2.

$$1 \le \lambda \le 2$$

Εξίσωση 43. Τιμές παραμέτρου λ

Αυτό σημαίνει ότι η μέση τιμή λήψεως $avg_rx^i(t)$ πρέπει να είναι το λιγότερο ίση ή υψηλότερη από το κατώτατο όριο του ρυθμού εκπομπής της ροής υψηλότερου ρυθμού. Τέλος, το κ παίρνει τιμές μεταξύ $0.8 \le \kappa \le 1$. Οι παραλήπτες μπορεί να ακολουθούν τη παρούσα ροή j ακόμα και εάν η μέση τιμή του ρυθμού λήψης $avg_rx^i(t)$ παίρνει τιμές υψηλότερες του 80% της τιμής του κατώτατου ορίου του ρυθμού εκπομπής της παρούσας ροής.

Η σημασία των παραπάνω συναρτήσεων έγκειται στο ότι οι παραλήπτες αποκτούν ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης πριν να αποφασίσουν να ακολουθήσουν μια ροή υψηλότερου ρυθμού εκπομπής. Από την άλλη μεριά οι παραλήπτες είναι σε θέση να ακολουθούν τη παρούσα ροή j ακόμη και εάν οι δυνατότητες λήψης τους

παραμένουν σε ένα αποδεκτό επίπεδο, το οποίο είναι χαμηλότερο από το ρυθμό εκπομπής της παρούσας ροής. Επομένως με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουμε μια ποιο σταθερή συμπεριφορά εκ μέρους των παραληπτών. Το κόστος το οποίο είμαστε όμως υποχρεωμένοι να πληρώσουμε είναι ότι οι παραλήπτες δεν εκμεταλλεύονται πλήρως το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Παρόλα αυτά πιστεύουμε όμως ότι οι σταθεροί ρυθμοί λήψης οι οποίοι πλησιάζουν τις τιμές του διαθέσιμου εύρου ζώνης είναι μια συμπεριφορά περισσότερο επιθυμητή για τις εφαρμογές πολυμέσων από ότι η πλήρης εκμετάλλευση του διαθεσίμου εύρους με το κίνδυνο των μεγάλων αυξομειώσεων στο επίπεδο λήψης λόγω των συχνών εγγραφών διαγραφών από τη παρούσα ροή σε μια άλλη ροή υψηλότερου ή χαμηλότερου ρυθμού.

7.1.3 Επεκτάσεις στα Πρωτόκολλα RTP/RTCP

Η λειτουργικότητα του ASSP βασίζεται στην ανταλλαγή πληροφοριών από τον αποστολέα και τους παραλήπτες και η οποία υλοποιείται από τα πρωτόκολλα RTP/RTCP. Τα πρωτόκολλα αυτά παρέχουν δυνατότητες επέκτασης κάνοντας έτσι δυνατή την ανταλλαγή των πληροφοριών οι οποίες μεταφέρονται στις επικεφαλίδες των πακέτων RTCP. Έτσι έχουμε επεκτείνει τα RTCP πακέτα ώστε να περιλαμβάνουν τα παρακάτω πεδία:

- J_flag: Είναι μια *boolean* τιμή η οποία παρέχει στους παραλήπτες την ένδειξη για να μεταπηδήσουν από μια ροή χαμηλότερου ρυθμού σε μια ροή υψηλότερου ρυθμού και αντίστροφα.
- $avg_tx_j, j = 1...n$: Η μέση τιμή του ρυθμού εκπομπής για κάθε simulcast ροή.
- $rx_inst_j^i, j = 1...n, i = 1...n$. Η στιγμιαία τιμή του ρυθμού λήψης της ροής j από το παραλήπτη i.

Η υλοποίηση των παραπάνω επεκτάσεων είναι απλή και δεν παρουσιάζει καμία δυσκολία. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονίσουμε ότι με τις παραπάνω επεκτάσεις αποφεύγουμε την ανάγκη για την ανταλλαγή επιπρόσθετων μηνυμάτων που αφορούν τη τρέχουσα κατάσταση του δικτύου και ως εκ τούτου εξασφαλίζουμε περισσότερο ωφέλιμο εύρος ζώνης για τη μεταφορά πακέτων δεδομένων.

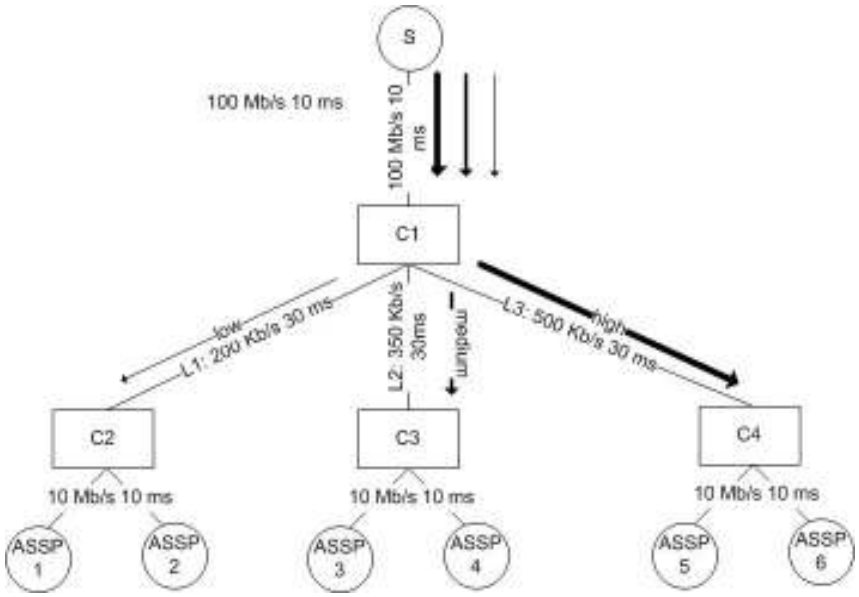
7.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ASSP

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τα οποία χρησιμοποιούμαι για την αξιολόγηση του ASSP. Οι εκτιμήσεις μας βασίζονται τόσο σε μετρικά δικτύων σύμφωνα με τη πρόσφατη RFC 5166 όσο και στις απαιτήσεις Quality of Experience (QoE) που έχουν σχέση με τη ποιότητα του βίντεο και οι οποίες βασίζονται στη σύσταση G.1080 [68] της ITU-T. Επομένως εκτελούμε μια σειρά προσομοιώσεων με σκοπό να ερευνήσουμε τα παρακάτω:

- Την ικανότητα του ASSP να ανιχνεύει το διατιθέμενο εύρος ζώνης στο επίπεδο της ζεύξης και να προσαρμόζει ανάλογα το ρυθμό εκπομπής σε κάθε simulcast ροή.

- Τις τιμές της καθυστέρησης και του σωρευτικής διαταραχής (cumulative jitter) οι οποίες είναι άμεσα συνδεδεμένες με το μέγεθος του απομονωτή σε μια μετάδοση βίντεο.
- Τη φιλικότητα του ASSP προς το TCP.
- Τη φιλικότητα ανάμεσα σε ροές του ιδίου πρωτοκόλλου.
- Τη σταθερότητα του ASSP κάτω από μεταβαλλόμενες καταστάσεις του δικτύου και ιδιαίτερα τη δυνατότητα του ASSP να αποτρέπει τις ταλαντώσεις που παρατηρούνται από τη συχνή εναλλαγή των διαφόρων simulcast ροών (smoothness).
- Την ικανότητα του ASSP να προσαρμόζεται στις αλλαγές του δικτύου συνέπεια της παρουσίας άλλων ανταγωνιστικών πηγών.
- Την απόδοσή του με βάση τις τιμές της κλίμακας Mean Opinion Score (MOS).

7.2.1 Ακρίβεια ανίχνευσης ροής κατάλληλου ρυθμού

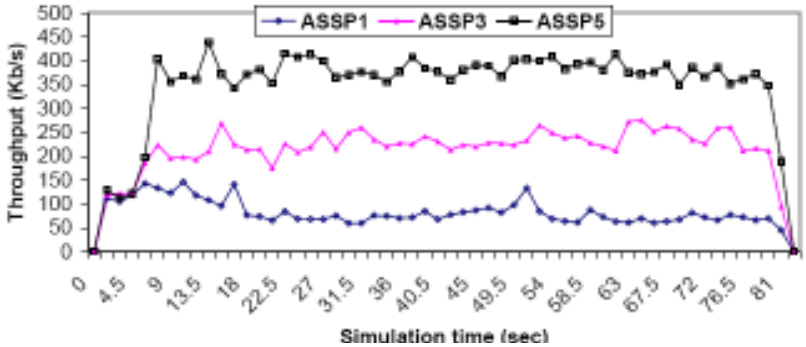


Σχήμα 68. Τοπολογία δικτύου για την ανίχνευση κατάλληλου σε ρυθμού ροής

Στη προσομοίωση αυτή εξετάζουμε την ακρίβεια του ASSP στο να ανιχνεύει το διαθέσιμο εύρος ζώνης και να ακολουθεί τη ροή εκείνη που βρίσκεται πλησιέστερα στις δυνατότητες του παραλήπτη. Εξετάζουμε επίσης τη σταθερότητά του. Το σενάριο προσομοίωσης αποτελείται από έναν εξυπηρετητή (S) και έξι παραλήπτες που εξυπηρετούνται με δρομολόγηση πολλαπλής διανομής, ASSP1 έως ASSP6 (Σχήμα 68). Αφού ονομάζουμε C1 έως C4 τους τέσσερις δρομολογητές του δικτύου, χρησιμοποιούμε Drop Tail σειρές στους δρομολογητές C1 έως C4 και θέτουμε τη τιμή της μονόδρομης καθυστέρησης σε όλα τα δικτυακά μονοπάτια σε 50 ms. Για τη προσομοίωσή μας χρησιμοποιούμε ένα βίντεο ("highway") με κίνηση που προσδίδει μέτρια πολυπλοκότητα και το οποίο αποτελείται από 2000 πλαίσια. Αυτό το βίντεο μέτριας πολυπλοκότητας μας δίνει χαμηλές PSNR τιμές. Ο εξυπηρετητής μεταδίδει τρεις simulcast ροές διαφορετικής ποιότητας. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ο εξυπηρετητής προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης της κάθε ροής με βάση τις αναφορές

που δέχεται από τους παραλήπτες. Οι παραλήπτες είναι συνδεδεμένοι με ζεύξεις που έχουν διαφορετικό εύρος ζώνης. Δημιουργούμε έτσι διαφορετικές ομάδες παραληπτών που η κάθε μια ομάδα έχει και διαφορετική δυνατότητα λήψης.

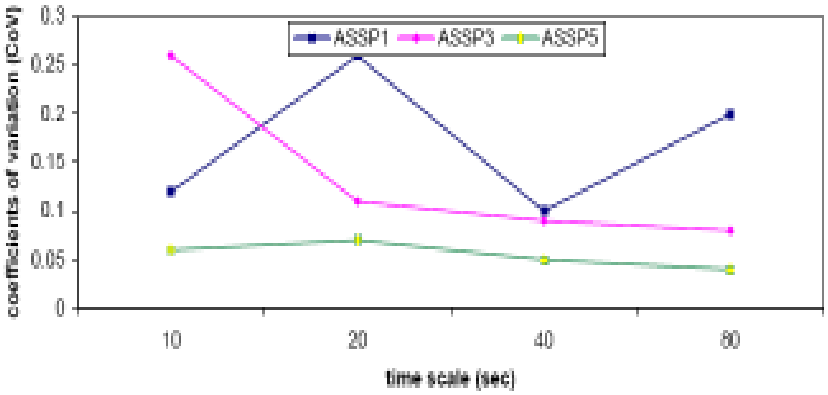
Κατά την έναρξη της προσομοίωσης όλοι οι παραλήπτες ακολουθούν τη ροή με τη χαμηλότερη ποιότητα. Για ευκολότερη παρατήρηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα ενός μόνο παραλήπτη από κάθε ομάδα. Παρατηρούμε ότι κατά τη πρώτη προσπάθεια των παραληπτών να ακολουθήσουν μια ροή μεγαλύτερου ρυθμού εκπομπής ότι οι παραλήπτες ASSP3 και ASSP5 ακολουθούν τη ροή μεσαίου ρυθμού και ακολούθως ο παραλήπτης ASSP5 ακολουθεί τη ροή υψηλής χωρητικότητας, (Σχήμα 69). Είναι ενδιαφέρων να παρατηρήσουμε ότι οι παραλήπτες παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά χωρίς να μεταπηδούν από μια ροή χαμηλότερου ρυθμού σε μια άλλη υψηλότερου ρυθμού και αντίστροφα σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης καθόσον δεν υπάρχουν αλλαγές στη κατάσταση του δικτύου.



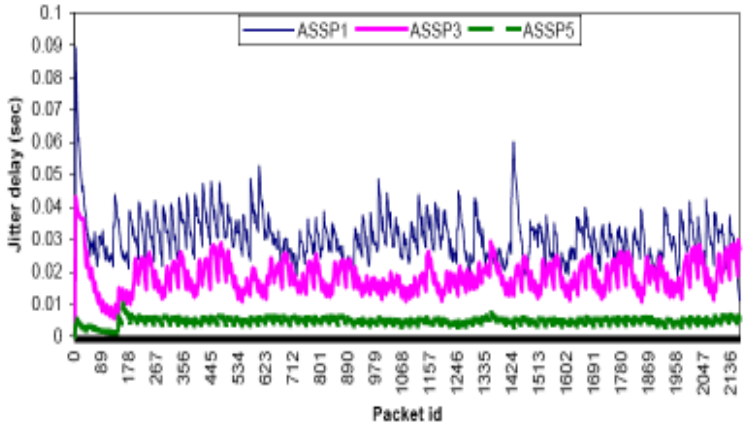
Σχήμα 69. Ρυθμοαπόδοση παραληπτών πολλαπλής διανομής

Η μέση τιμή της ρυθμοαπόδοσης της κάθε ομάδας των παραληπτών είναι 83 Kb/s, 221 Kb/s και 360 Kb/s, με ρυθμό απωλειών πλαισίων 1.6%, 1% και 2% για τη ροή χαμηλού, μεσαίου και υψηλού ρυθμού, αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι οι παραλήπτες που συνδέονται με ζεύξεις χαμηλής χωρητικότητας παρουσιάζουν και αντίστοιχα τη χαμηλότερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Το γεγονός αυτό συνδέεται άμεσα με τη ομαλή συμπεριφορά (smoothing) του μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης. Η επιδίωξή μας στο σχεδιασμό του ASSP είναι η μείωση των ταλαντεύσεων καθώς οδηγούν στην αύξηση του ρυθμού απώλειας πακέτων που οδηγούν σε χαμηλή ποιότητα υπηρεσιών από τη πλευρά του χρήστη. Επομένως υπάρχει πάντα ένας συγκερασμός μεταξύ αύξησης της ρυθμοαπόδοσης και σταθερότητας ενός πρωτοκόλλου.

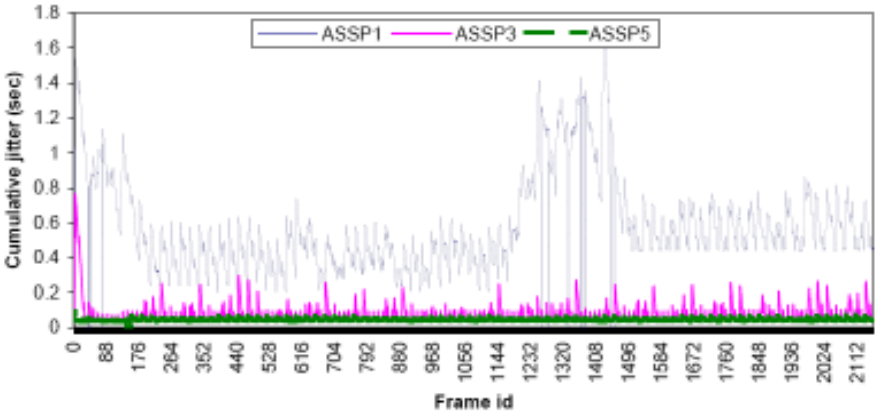
Για να μελετήσουμε τη σταθερότητα του ASSP χρησιμοποιούμε το μετρικό CoV των τιμών της ρυθμοαπόδοσης και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα στο Σχήμα 70. Παρατηρούμε ότι το ASSP παρουσιάζει πολύ σταθερή συμπεριφορά. Οι μετρήσεις της διακύμανσης της καθυστέρησης (jitter) παρουσιάζουν επίσης χαμηλές τιμές (Σχήμα 71) και θεωρούνται κατάλληλες για εφαρμογές VoIP καθώς είναι χαμηλότερες των 150 ms. Η σωρευτική διαταραχή (Σχήμα 72) παρουσιάζει υψηλές τιμές στη περίπτωση της ροής χαμηλού ρυθμού και αυτή είναι μια ένδειξη υψηλής συμφόρησης στο δικτυακό μονοπάτι από τον εξυπηρετητή στους παραλήπτες που συνδέονται με ζεύξεις χαμηλής χωρητικότητας. Οι τιμές αυτές απαιτούν ένα μεγαλύτερο σε μέγεθος απομονωτή ώστε να αποφεύγονται τα αρνητικά αποτελέσματα για τα πλαίσια τα οποία λαμβάνονται με καθυστέρηση.



Σχήμα 70. CoV των τριών ροών ASSP



Σχήμα 71. Διαταραχή καθυστέρησης των τριών ASSP ροών

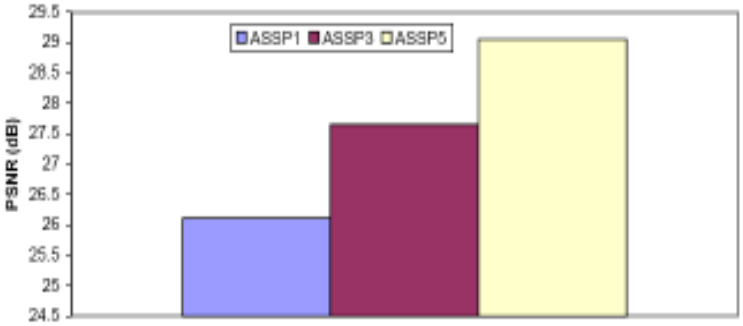


Σχήμα 72. Σωρευτική διαταραχή καθυστέρησης των ASSP ροών

Η μέση τιμή του PSNR από τα τρία ληφθέντα αρχεία βίντεο απεικονίζεται στο Σχήμα 73. Παρατηρούμε ότι η μέση τιμή και των τριών αρχείων χαμηλής, μεσαίας και υψηλής ποιότητας είναι υψηλότερη των 25 dB αν και έχουμε χρησιμοποιήσει σε αυτή τη προσομοίωση ζεύξεις χαμηλής χωρητικότητας οι οποίες δεν επιτρέπουν την μετάδοση αρχείων βίντεο υψηλής ποιότητας. Για να πετύχουμε τη μετάδοση στο συγκεκριμένο αρχείο βίντεο με πολύ υψηλές τιμές του PSNR θα έπρεπε να έχουμε χρησιμοποιήσει ζεύξεις με χωρητικότητα τουλάχιστο 3 Mb/s. Παρόλα αυτά

επιλέξαμε από πρόθεση για τις προσομοιώσεις μας ζεύξεις χαμηλής χωρητικότητας για να εξετάσουμε καλύτερα τους περιορισμούς του ASSP. Οι τιμές του (MOS) και για τρία ληφθέντα αρχεία βαθμολογούνται με 3.0.

Η εκτίμησή μας από τη παραπάνω προσομοίωση είναι ότι το ASSP παρουσιάζει μια σταθερή συμπεριφορά αποτρέποντας τις ταλαντώσεις από λανθασμένες μεταπηδήσεις από τη μια ροή σε άλλη ροή. Οι τιμές του PSNR κυμαίνονται μέσα σε αποδεκτά όρια και αποδεικνύουν ότι το ASSP είναι σε θέση να μεταδώσει αρχεία βίντεο καλής ποιότητας. Ο χαμηλός ρυθμός απώλειας πλαισίων είναι μια ένδειξη της καλής λειτουργίας του μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης.



Σχήμα 73. PSNR τιμές MPEG-4 βίντεο στο τελικό χρήστη

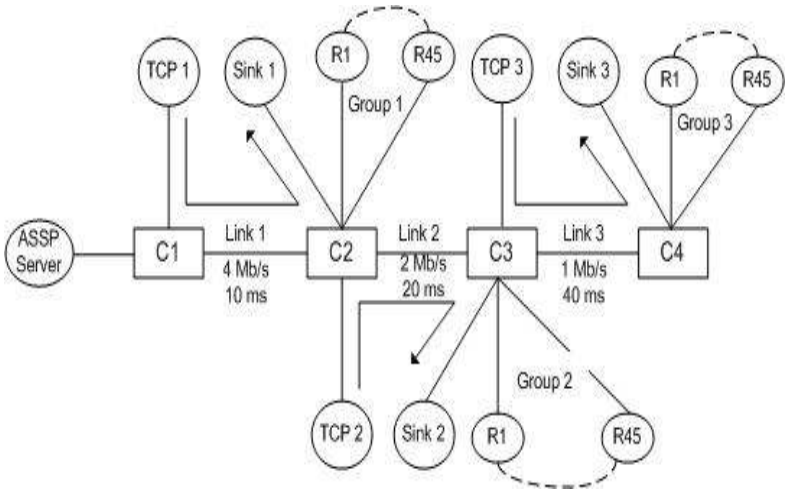
7.2.2 Φιλικότητα

Τη φιλικότητα του ASSP την εξετάζουμε σε δύο διαφορετικές κατευθύνσεις: α) φιλικότητα προς το TCP, και β) φιλικότητα προς ροές του ιδίου πρωτοκόλλου.

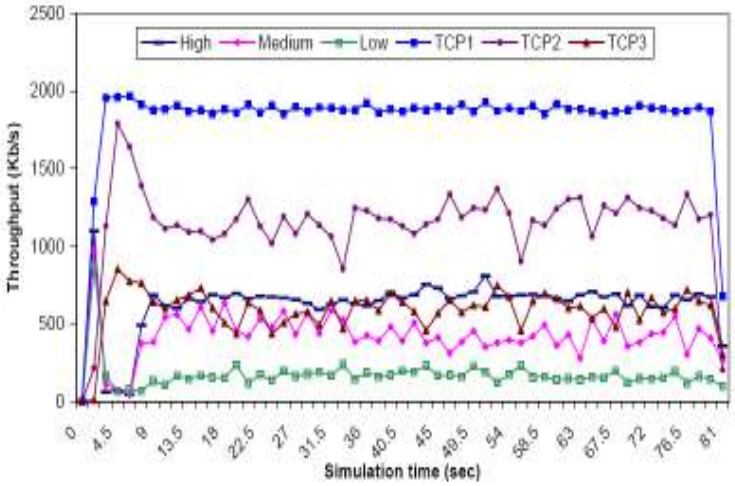
7.2.2.1 Φιλικότητα προς το TCP

Για να εξετάσουμε τη φιλικότητα προς το TCP σχεδιάζουμε ένα σενάριο προσομοίωσης όπου ένα αρχείο βίντεο μεταδίδεται σε έναν αριθμό από διαφορετικές ομάδες παραληπτών πολλαπλής διανομής σε ένα δίκτυο με πολλαπλά σημεία συμφόρησης (Σχήμα 74). Σε αυτή τη τοπολογία το διατιθέμενο εύρος ζώνης μοιράζεται από ASSP και TCP ροές. Σχεδιάζουμε έτσι τρεις διαφορετικές ομάδες παραληπτών που αποτελούνται από σαράντα πέντε ASSP παραλήπτες σε κάθε ομάδα και τοποθετούμε όλους αυτούς τους παραλήπτες πίσω από ζεύξεις οι οποίες έχουν διαφορετική χωρητικότητα και καθυστέρηση διάδοσης. Χρησιμοποιούμε Drop Tail ουρές στους δρομολογητές του δικτύου και το ίδιο μέγεθος πακέτου για τις ASSP και τις TCP ροές ώστε να επιτύχουμε μια δίκαιη σύγκριση. Κατά την αρχή της προσομοίωσης ο εξυπηρετητής μεταδίδει τρεις ροές οι οποίες διαφέρουν σε ποιότητα και όλοι οι ASSP παραλήπτες αρχικά ακολουθούν τη ροή με τη χαμηλότερη ποιότητα. Στο Σχήμα 75 παρουσιάζουμε το γράφημα της ρυθμοαπόδοσης από τις TCP ροές και ενός αντιπροσωπευτικού παραλήπτη από κάθε ομάδα παραληπτών (χαμηλής, μεσαίας και υψηλής ποιότητας). Οι μετρήσεις του δείκτη Jain's (0.962) μας δείχνουν ότι οι διαφορετικές ροές (TCP και ASSP) μοιράζονται σχεδόν εξίσου το διατιθέμενο εύρος ζώνης σε κάθε ζεύξη. Ο ρυθμός απώλειας των πλαισίων για τη ροή χαμηλής, μεσαίας και υψηλής ποιότητας είναι 1.3%, 1.6% και 9%, αντίστοιχα. Με μια πρώτη οπτική παρατήρηση πιστοποιούμε τους σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης τόσο για την ASSP όσο και για τις TCP ροές. Το γράφημα των CoV αποκαλύπτει ότι μετά το 20κοστό δευτερόλεπτο της προσομοίωσης όλες οι ροές βρίσκονται σε

ισορροπία με σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης οι οποίοι δεν μεταβάλλονται σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 76).

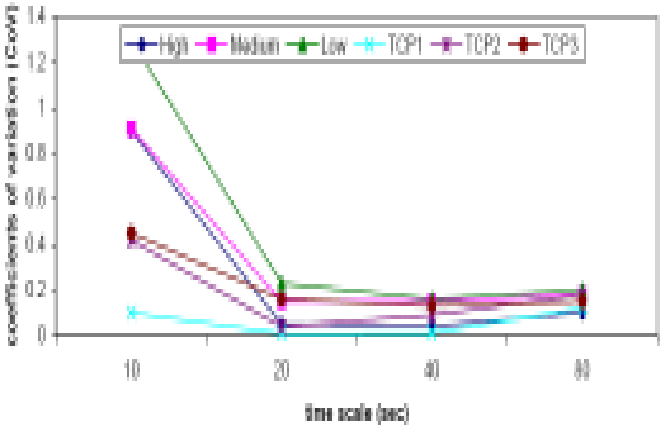


Σχήμα 74. Τοπολογία TCP – φιλικότητας

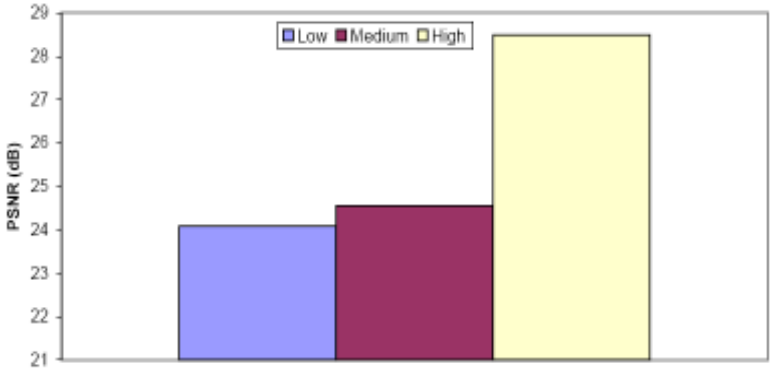


Σχήμα 75. Γράφημα ρυθμοαπόδοσης όλων των ροών

Οι μετρήσεις του PSNR (Σχήμα 77) δείχνουν ότι η ποιότητα των λαμβανόμενων αρχείων βίντεο είναι αρκετά υψηλή. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονίσουμε ότι έχουμε επιτύχει να μεταδώσουμε αρχεία βίντεο σε διαφορετικές και μεγάλες ομάδες παραληπτών με ένα σχετικά μικρό αριθμό simulcast ροών, διότι ο ρυθμός μετάδοσης των διαφορετικών ροών δεν είναι σταθερός αλλά προσαρμόζεται ανάλογα με τη κατάσταση του δικτύου. Εάν εφαρμόσουμε ένα ASSP εξυπηρετητή στα άκρα ενός διευρυμένου δικτύου θα μπορούσαμε να εξυπηρετήσουμε ένα πολύ μεγάλο αριθμό παραληπτών με ένα μικρό αριθμό simulcast ροών. Η εκτίμησή μας από τη παραπάνω προσομοίωση είναι ότι το ASSP είναι πράγματι ένα φιλικό προς το TCP πρωτόκολλο. Ο αλγόριθμος που αποτρέπει τις μεγάλες και απότομες αυξομειώσεις του ρυθμού εκπομπής καθιστούν το ASSP μη επιθετικό όταν μοιράζεται το διατιθέμενο εύρος ζώνης με TCP ροές. Αυτό είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό καθόσον οι ποιο διαδεδομένες εφαρμογές στο Διαδίκτυο είναι βασισμένες στο πρωτόκολλο TCP.



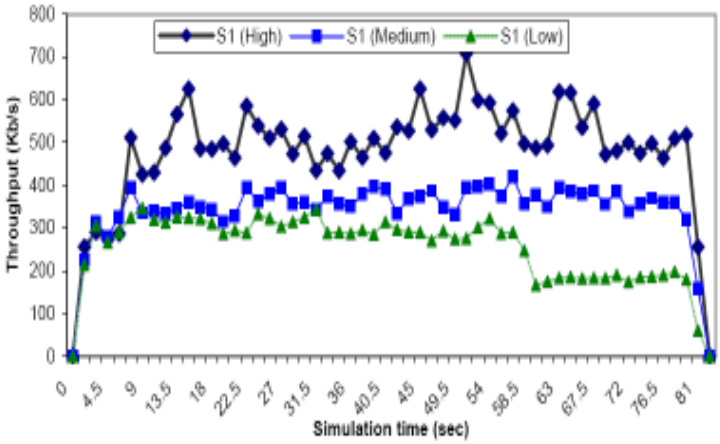
Σχήμα 76. CoV όλων των ροών (TCP και ASSP)



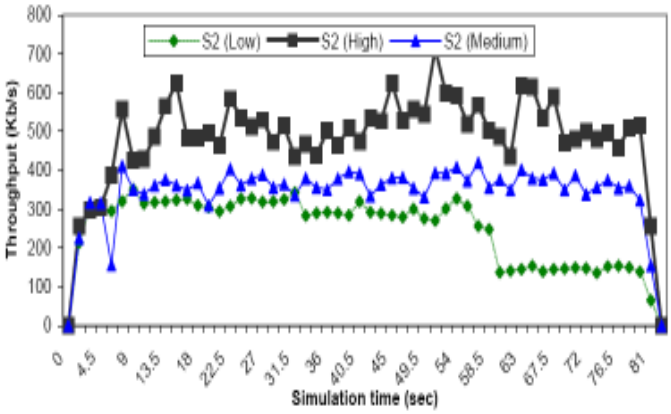
Σχήμα 77. PSNR τιμές MPEG-4 βίντεο στο τελικό χρήστη

7.2.2.2 Φιλικότητα προς ροές του ιδίου πρωτοκόλλου

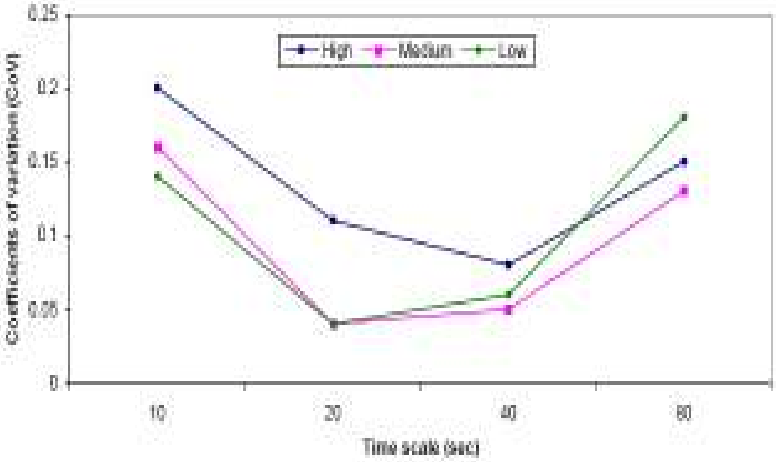
Σε αυτή τη προσομοίωση χρησιμοποιούμε τη τοπολογία που απεικονίζεται στο Σχήμα 74 και συνδέουμε δύο ASSP εξυπηρετητές στο δρομολογητή C1. Στο δίκτυο δεν υπάρχουν άλλες ανταγωνιστικές πηγές εκτός από τις ASSP. Σε κάθε ζεύξη συνδέουμε δύο ομάδες που αποτελούνται από σαράντα πέντε παραλήπτες και κάθε ομάδα λαμβάνει αρχεία βίντεο από τους ASSP εξυπηρετητές. Στο Σχήμα 78 και Σχήμα 79 παρουσιάζουμε την ρυθμοαπόδοση ενός αντιπροσωπευτικού παραλήπτη από τις ομάδες χαμηλού, μεσαίου και υψηλού ρυθμού λήψης. Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα και για τους δύο ASSP εξυπηρετητές. Ο δείκτης Jain's για τις τρεις ζεύξεις έχει τιμές 0.99, γεγονός που μας δείχνει ότι το διατιθέμενο εύρος καταλαμβάνεται ισομερώς από τους δύο ASSP εξυπηρετητές. Ο ρυθμός απωλειών πλαισίων για τις ροές χαμηλού, μεσαίου και υψηλού ρυθμού είναι 0.45%, 0.05% και 0.15%, αντίστοιχα.



Σχήμα 78. Ρυθμοαπόδοση πρώτης ASSP πηγής



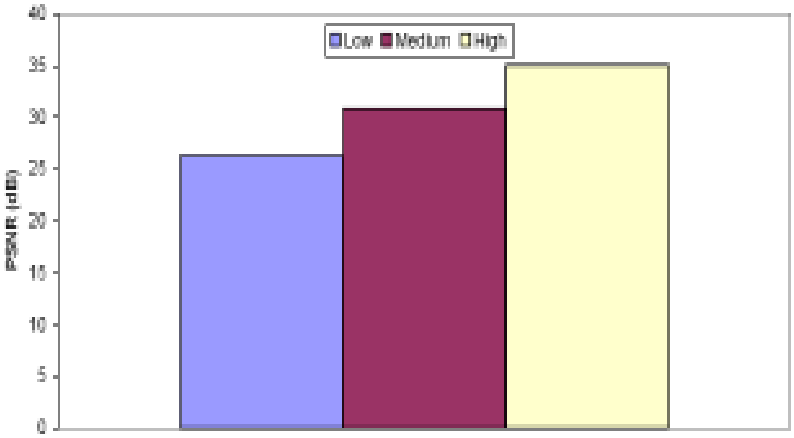
Σχήμα 79. Ρυθμοαπόδοση δεύτερης ASSP πηγής



Σχήμα 80. CoV τριών αντιπροσωπευτικών παραληπτών

Οι τιμές των CoV (Σχήμα 80) είναι πολύ χαμηλές σε όλες τις ροές και κλιμακώνονται ανάμεσα στο 0.2 και 0.005. Αυτή είναι μια ξεκάθαρη ένδειξη της σταθερότητας του ASSP. Οι τιμές του PSNR (Σχήμα 81) είναι υψηλότερες εάν τις συγκρίνουμε με τις

τιμές από την προηγούμενη προσομοίωση όπου το ASSP ανταγωνιζόταν με το TCP. Αυτό είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα του χαμηλού ρυθμού απωλειών. Τα παραπάνω αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι το ASSP παρουσιάζει πολύ υψηλή φιλικότητα προς ροές του ιδίου πρωτοκόλλου. Η ποιότητα του βίντεο είναι επίσης πολύ υψηλή λαμβάνοντας υπόψη τη χαμηλή χωρητικότητα των ζεύξεων που χρησιμοποιήθηκαν στη προσομοίωση αυτή.



Σχήμα 81. PSNR τιμές MPEG-4 βίντεο στο τελικό χρήστη

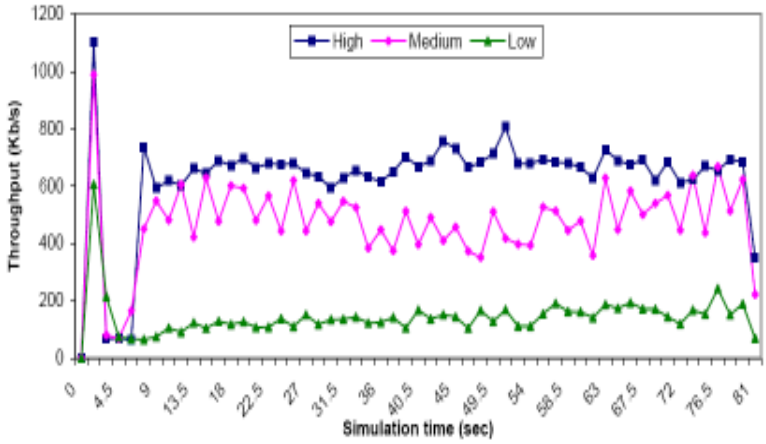
7.2.3 Απόδοση με Ανταγωνιστικές ON-OFF UDP Ροές

Σε αυτή τη προσομοίωση αντικαθιστούμε τις TCP ροές στη τοπολογία που παρουσιάζεται στο Σχήμα 74, με UDP ροές. Στο Σχήμα 82 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τις ανταγωνιστικές ON/OFF UDP ροές. Για ευκολότερη παρατήρηση παρουσιάζουμε μόνο τα αποτέλεσμα ενός ASSP παραλήπτη από κάθε διαφορετική ομάδα χρηστών. Η διάρκεια κατά τη οποία μια UDP πηγή είναι ενεργή (κατάσταση ON) είναι 10 δευτερόλεπτα και με τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε χρονική στιγμή να υπάρχει τουλάχιστο μια ενεργή UDP πηγή σε κατάσταση ON που μεταδίδει με ρυθμό 500 Kb/s.

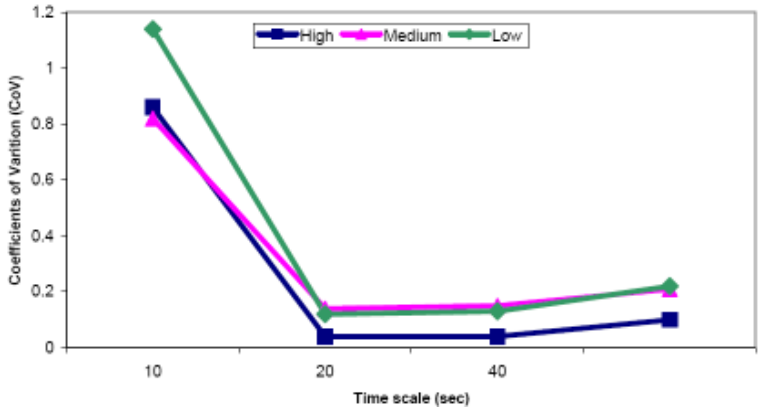
Μελετώντας τις τιμές των CoV (Σχήμα 83), παρατηρούμε ότι κατά την έναρξη της προσομοίωσης οι ASSP παραλήπτες παρουσιάζουν μια ελαφρώς ασταθή συμπεριφορά. Μετά το 20κοστό δευτερόλεπτο, οι ASSP παραλήπτες παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά χωρίς αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης μέχρι το πέρας της προσομοίωσης. Αυτή είναι μια σημαντική ιδιότητα για τη μετάδοση βίντεο.

Ο ρυθμός απωλειών πλαισίων για τις τρεις ροές (χαμηλού, μεσαίου και υψηλού ρυθμού) είναι 0.7%, 0.6%, και 2%, αντίστοιχα, δείχνοντας ότι το ASSP παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά σε αυτό το περιβάλλον με ανταγωνιστικές UDP ροές. Οι μετρήσεις της σωρευτικής διαταραχής (Σχήμα 84) δείχνουν χαμηλές τιμές για τις ροές υψηλού και μεσαίου ρυθμού και υψηλότερες τιμές (μεγαλύτερες των 2 δευτερολέπτων) για τη ροή χαμηλού ρυθμού. Οι υψηλές αυτές τιμές της σωρευτικής διαταραχής στη ροή χαμηλού ρυθμού οφείλονται στη συμφόρηση του δικτύου από την ύπαρξη UDP ροής στη ζεύξη χαμηλής χωρητικότητας, καθόσον η UDP ροή δεν διαθέτει κανένα μηχανισμό ελέγχου ροής σε αντίθεση με το ASSP. Παρατηρούμε επίσης ότι ο ρυθμός απώλειας πλαισίων είναι υψηλότερος από ότι στη προηγούμενη

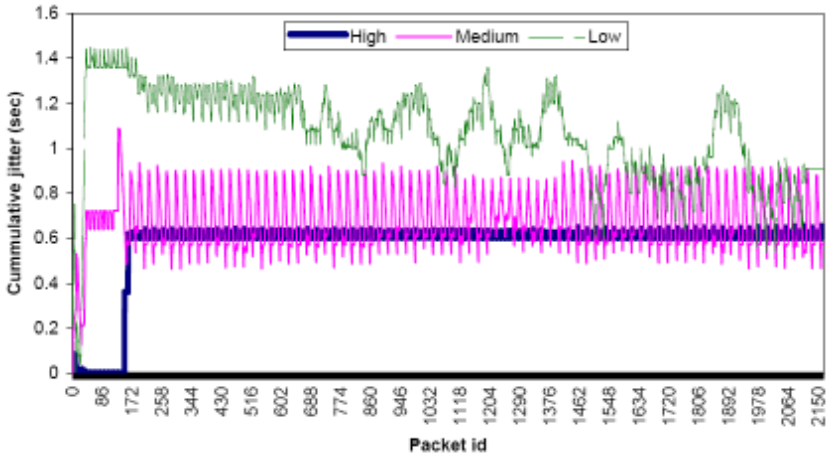
προσομοίωση με ανταγωνιστικές TCP ροές. Παρόλα αυτά όμως το χρήσιμο συμπέρασμα από τη προσομοίωση αυτή είναι ότι το ASSP διατηρεί τα χαρακτηριστικά του και είναι σε θέση να ανταποκριθεί στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου εξαιτίας της παρουσίας ανταγωνιστικών UDP ροών.



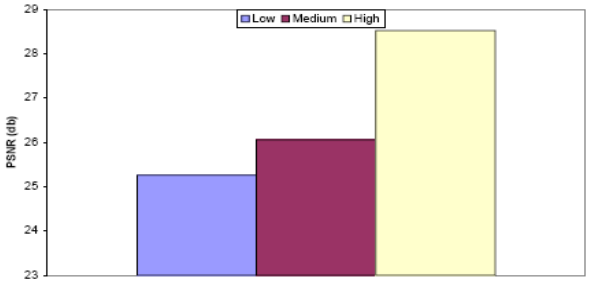
Σχήμα 82. Ρυθμοαπόδοση των ASSP ροών



Σχήμα 83. CoV των ASSP ροών



Σχήμα 84. Σωρευτική διαταραχή καθυστέρησης των ASSP ροών



Σχήμα 85. PSNR τιμές MPEG-4 βίντεο στο τελικό χρήστη (Μέση τιμή PSNR: Low=25.26 dB, Medium=26.06 dB, High=28.52 dB)

7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΗΣ SMOOTH MULTICAST CONGESTION CONTROL (SMCC)

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζουμε τη σύγκριση του ASSP με το Smooth Multirate Multicast Congestion Control (SMCC). Ουσιαστικά, συγκρίνουμε δύο διαφορετικά σχήματα στη περιοχή της πολλαπλής διανομής πολλών ροών. Το SMCC είναι μια προτεινόμενη λύση για τη "σωρευτική στρωματική δρομολόγηση πολλαπλής διανομής" (cumulative layered multicast) ενώ το ASSP είναι μια λύση για simulcast μετάδοση στην οποία ο αποστολέας μεταδίδει το ίδιο περιεχόμενο με διαφορετικές σε ποιότητα ροές. Το SMCC είναι μια λύση πολύ κοντύτερα στις τελευταίες εξελίξεις σε ότι αφορά τη κωδικοποίηση βίντεο κατά H.264/SVC [76]. Οι τεχνικές simulcast και layered multicast έχουν συγκριθεί κατά διάφορο τρόπο, συμπεριλαμβανομένου της δρομολόγησης πολλαπλής διανομής (IP-layer multicasting) [77], και της φιλικότητας προς το TCP [78]. Πρόσφατες μελέτες σε δίκτυα IPTV [79] έδειξαν ότι σε ορισμένες περιπτώσεις η τεχνική layered multicasting είναι λιγότερο αποτελεσματική από ότι η simulcast μετάδοση, εάν για περισσότερα κανάλια χρειάζεται μόνο μια ανάλυση. Από την άλλη μεριά όμως η επανάληψη του ίδιου περιεχομένου βίντεο θεωρείται ως πλεονασμός. Επομένως είναι πολύ σημαντικό να μπορέσουμε να ισορροπήσουμε μεταξύ της κατανάλωσης του εύρους ζώνης και της ικανοποίησης του χρήστη στη τεχνική simulcast. Με τα παρακάτω πειράματα παρέχουμε μια σε βάθος έρευνα σε ότι αφορά τους περιορισμούς και τα πλεονεκτήματα των δύο λύσεων, ASSP και SMCC.

Για το σκοπό της έρευνά μας, έχουμε ενσωματώσει το πηγαίο κώδικα του SMCC [80] και του ASSP [81] στο λογισμικό ns-2 και εκτελούμε μια σειρά από προσομοιώσεις. Τα κριτήρια για την απόδοση και τη σύγκριση πρωτοκόλλων μεταφοράς περιγράφονται στην RFC 5166. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη την RFC 5166 εξετάζουμε την απόδοση του SMCC και ASSP στις παρακάτω περιοχές:

- Το επίπεδο εκμετάλλευσης των πηγών του δικτύου και τη φιλικότητα του κάθε πρωτοκόλλου προς το TCP.
- Τη φιλικότητα προς τις ροές του ιδίου πρωτοκόλλου.
- Τη καθυστέρηση και το ρυθμό απωλειών πακέτων που εισαγάγουν τα δύο πρωτόκολλα.

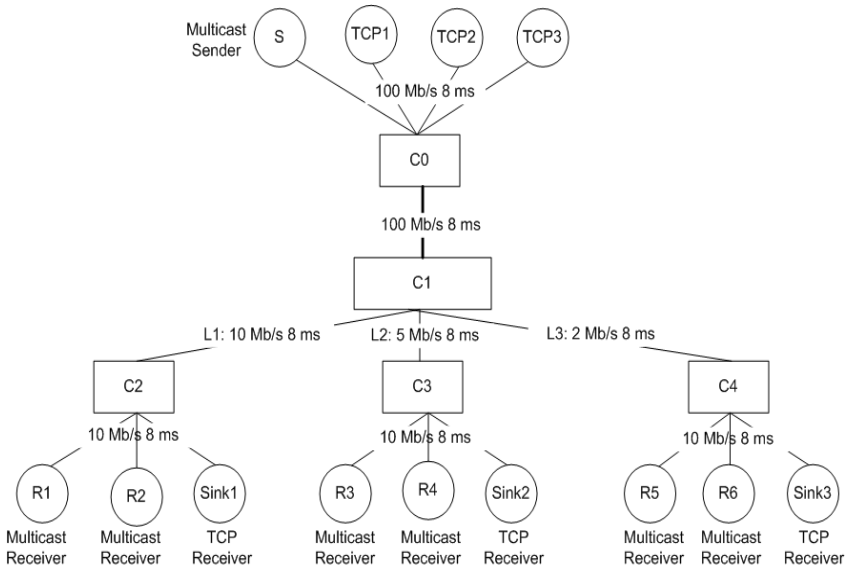
- Τη σταθερότητα κάθε πρωτοκόλλου στις αλλαγές της κατάστασης του δικτύου και ιδιαίτερα την ικανότητά του να αποτρέπουν τις απότομες αυξομειώσεις του ρυθμού εκπομπής (smoothness).

Για τα πειράματά μας, χρησιμοποιούμε τις ίδιες τοπολογίες δικτύων με τα ίδια χαρακτηριστικά έτσι ώστε να επιτύχουμε μια πλήρη σύγκριση. Ο πηγαίος κώδικας, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τα χαρακτηριστικά κάθε προσομοίωσης είναι διαθέσιμα στη διεύθυνση [81].

7.3.1 Εκμετάλλευση Πηγών Δικτύου – Φιλικότητα προς το TCP

Για να εξετάσουμε την ικανότητα των δύο πρωτοκόλλων να εκμεταλλευθούν τις πηγές του δικτύου και τη φιλικότητά τους προς το TCP χρησιμοποιούμε τη τοπολογία του δικτύου που απεικονίζεται στο Σχήμα 86. Σε αυτή τη τοπολογία θέτουμε τρεις περιοριστικούς συνδέσμους, που ο κάθε ένας έχει διαφορετική χωρητικότητα. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε κάθε περιοριστικό σύνδεσμο μοιράζεται από δύο παραλήπτες πολλαπλής διανομής και μια TCP ροή. Συμβολίζουμε με C0 έως C4 τους πέντε δρομολογητές του δικτύου. Χρησιμοποιούμε Drop Tail ουρές στους δρομολογητές του δικτύου και θέτουμε τη τιμή της μονόδρομης καθυστέρησης σε όλα τα δικτυακά μονοπάτια στα 32 ms. Επιπλέον, καθορίζουμε για όλες τις ροές το ίδιο μέγεθος πακέτων (1000 bytes) ώστε να επιτύχουμε μια δίκαιη σύγκριση.

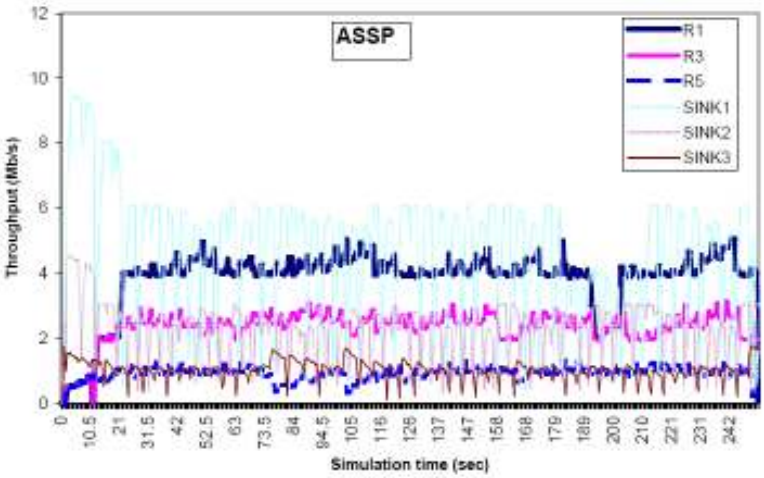
Εκτελούμε τις παρακάτω προσομοιώσεις για το ASSP και το SMCC. Στη περίπτωση του ASSP, ο αποστολέας μεταδίδει τρεις ροές με τα παρακάτω όρια: Stream1 (300 Kb/s - 2 Mb/s), Stream2 (2 Mb/s - 5 Mb/s), και Stream3 (5 Mb/s - 10 Mb/s). Κατά την έναρξη της προσομοίωσης όλοι οι ASSP παραλήπτες ακολουθούν τη ροή με τη χαμηλότερη χωρητικότητα, Stream1. Για τις προσομοιώσεις με το SMCC, θέτουμε το ρυθμό μετάδοσης του βασικού στρώματος στο 1 Mb/s.



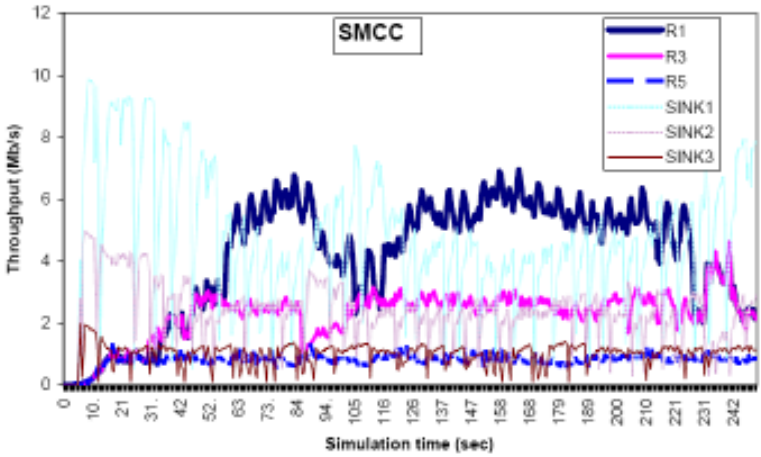
Σχήμα 86. Τοπολογία περιοριστικών συνδέσμων

Μπορούμε να διακρίνουμε (Σχήμα 87, Σχήμα 88) πώς τα δύο πρωτόκολλα προσαρμόζουν το ρυθμό εκπομπής τους, έτσι ώστε να ικανοποιήσουν την ικανότητα

λήψης των παραληπτών που βρίσκονται πίσω από τους περιοριστικούς συνδέσμους. Ο ρυθμός μετάδοσης και των δύο πρωτοκόλλων προσαρμόζεται κατά τρόπο δυναμικό, με βάση το επίπεδο της συμφόρησης που παρατηρούν στις τρεις διαφορετικές ζεύξεις. Με μια πρώτη οπτική παρατήρηση μπορούμε να δούμε ότι το ASSP παρουσιάζει ποιο σταθερή συμπεριφορά από ότι το SMCC. Θα συζητήσουμε αναλυτικότερα τη συμπεριφορά αυτή σε σχέση με τη σταθερότητα των δύο πρωτοκόλλων με προσομοιώσεις όπου θα έχουμε διαφορετικές RTT τιμές. Οι στατιστικές μετρήσεις της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο Πίνακας 9 σε συνδυασμό με τις τιμές της ρυθμοαπόδοσης.



Σχήμα 87. Ρυθμοαπόδοση των ASSP ροών



Σχήμα 88. Ρυθμοαπόδοση των SMCC ροών

Σε έναν "ιδανικό κόσμο των δικτύων", το διατιθέμενο εύρος ζώνης θα είχε μοιρασθεί ισοδύναμα μεταξύ των παραληπτών πολλαπλής διανομής και των TCP ροών και η εκμετάλλευση του εύρους ζώνης θα είχε αγγίξει το 100%. Το ASSP στις προσομοιώσεις μας παρουσιάζει χαμηλότερη απόδοση στη ζεύξη υψηλότερης χωρητικότητας (L1) ενώ το SMCC παρουσιάζει χαμηλότερη απόδοση στη ζεύξη χαμηλής χωρητικότητας (L3). Παρατηρούμε επίσης ότι, το SMCC παρουσιάζει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης από ότι το ASSP στη ζεύξη μεταξύ των δρομολογητών C0 και C1. Το SMCC υπολογίζει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης των τριών διαφορετικών στρωμάτων (ροών) με βάση το ρυθμό μετάδοσης του βασικού

στρώματος. Για το SMCC, ο μέγιστος σωρευτικός ρυθμός μετάδοσης καθορίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$B_i = 2^i \cdot B_0 \text{ for } i \geq 1$$

Εξίσωση 44. Ρυθμός μετάδοσης ροών

όπου, B_0 είναι ο ρυθμός μετάδοσης του βασικού στρώματος, και B_i είναι ο ρυθμός μετάδοσης του στρώματος i. Η απόδοση του SMCC είναι στενά συνδεδεμένη με την αρχική ρύθμιση που αφορά το ρυθμό μετάδοσης του βασικού στρώματος. Για να εξετάσουμε βαθύτερα τις συνέπειες της αρχικής τιμής του βασικού στρώματος στην απόδοση του SMCC εκτελούμε μια σειρά από προσομοιώσεις και συνοψίζουμε τα αποτελέσματα (Πίνακας 10-όλες οι τιμές σε Mb/s). Υπολογίζουμε έτσι τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης για τις τρεις διαφορετικές ροές στη ζεύξη μεταξύ των δρομολογητών C0 και C1. Οι απαιτήσεις του SMCC σε εύρος ζώνης εξαρτώνται από το ρυθμό μετάδοσης του βασικού στρώματος και κυμαίνονται από 6.49 Mb/s σε 7.4 Mb/s. Επομένως είναι πολύ σημαντική η επιλογή του ρυθμού μετάδοσης του βασικού στρώματος για το SMCC κατά την έναρξη της σύσκεψης πολλαπλής διανομής με τους παραλήπτες. Αυτή η περιοχή απαιτεί μια μεγαλύτερη σε βάθος έρευνα ώστε να καθορισθεί ο αλγόριθμος που θα πετύχει τη βέλτιστη συμπεριφορά στο SMCC.

	Average Throughput (Mb/s)		Link Utilization (%)	TCP Average Throughput (Mb/s)	BW requirements between C0 and C1 (Mb/s)
SMCC	L1	4.28	90.6	4.78	7.4
	L2	2.28	93.2	2.38	
	L3	0.84	92.5	1.01	
ASSP	L1	3.88	84.4	4.56	7.1
	L2	2.37	92.8	2.27	
	L3	0.92	97.0	1.02	

Πίνακας 9. Στατιστικά εκμετάλλευσης δικτύου

Από την άλλη μεριά, η απόδοση του ASSP εξαρτάται από τις αρχικές τιμές στα κατώτερα και ανώτερα όρια της κάθε μιας ροής. Αυτά τα όρια αντιστοιχούν στη χωρητικότητα των περιοριστικών συνδέσμων στα δικτυακά μονοπάτια μεταξύ του αποστολέα και των ομάδων των παραληπτών πολλαπλής διανομής. Αυτό φαίνεται να είναι ένα ευκολότερο προς λύση πρόβλημα εάν υποθέσουμε ότι οι παραλήπτες είναι σε θέση να πληροφορήσουν τον αποστολέα σχετικά με τις δυνατότητες λήψης τους, κατά την έναρξη της σύσκεψης. Ένας αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας όπως αυτός που παρουσιάζεται στο [82] μπορεί να καθορίσει το βέλτιστο αριθμό ροών που θα πρέπει να μεταδοθούν έτσι ώστε να μπορέσουμε να ικανοποιήσουμε τη πλειοψηφία των παραληπτών σε μια σύσκεψη. Μπορούμε να καταγράψουμε ως μελλοντική την εργασία αυτή.

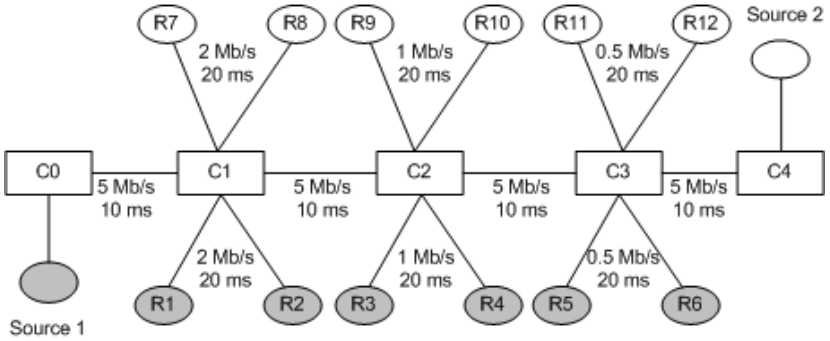
Οι μετρήσεις του δείκτη Jain's και για τα δύο πρωτόκολλα σε όλες τις ζεύξεις που αφορούν τη φιλικότητα προς το TCP καταγράφουν τιμές 0.99. Επομένως μπορούμε να πούμε με ασφάλεια ότι και τα δύο πρωτόκολλα, ASSP και SMCC, είναι φιλικά προς το TCP διότι μοιράζονται σχεδόν ισοδύναμα το διαθέσιμο εύρος ζώνης με τις TCP ροές.

Base Layer (Mb/s)	Average Throughput (Mb/s)		Link Utilization (%)	BW requirements between C0 and C1 (Mb/s)
BL=0.5	L1	3.69	73.8	6.49
	L2	1.96	78.4	
	L3	0.84	84.0	
BL=1.0	L1	4.28	90.6	7.4
	L2	2.28	93.2	
	L3	0.84	92.5	
BL=2.0	L1	4.30	86.0	6.81
	L2	1.67	66.8	
	L3	0.84	84.0	

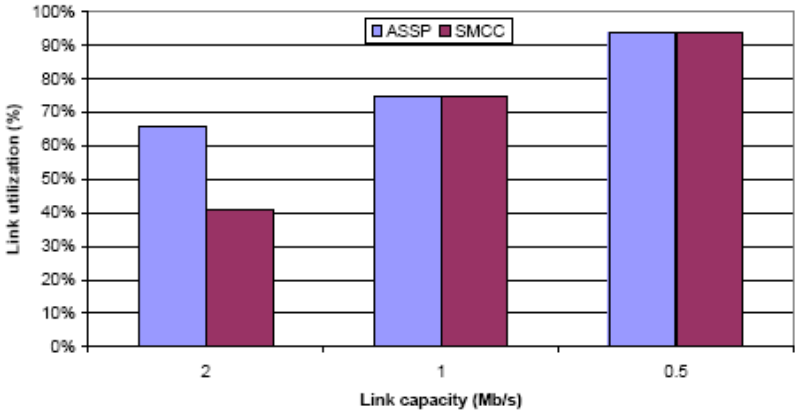
Πίνακας 10. SMCC εκμετάλλευση ζεύξης με διαφορετική ρύθμιση του ρυθμού εκπομπής βασικού στρώματος

7.3.2 Φιλικότητα προς τις Ροές του Ιδίου Πρωτοκόλλου

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης εξετάζουμε τη φιλικότητα των δύο πρωτοκόλλων ως προς τις ροές του ιδίου πρωτοκόλλου με τη χρήση της τοπολογίας που περιγράφεται στο Σχήμα 89. Σε αυτό το σενάριο δύο εξυπηρετητές μεταδίδουν προς αντίθετες κατευθύνσεις, σε διαφορετικές ομάδες παραληπτών. Θέτουμε το ρυθμό μετάδοσης του βασικού στρώματος για το SMCC στα 250 Kb/s με σκοπό να κλιμακώσουμε καλύτερα το ρυθμό μετάδοσης στα πρόσθετα στρώματα έχοντας μια ζεύξη στο δίκτυο με χωρητικότητα 0.5 Mb/s. Παρατηρούμε ότι τόσο το ASSP όσο και το SMCC παρουσιάζουν υψηλό βαθμό φιλικότητας σε ροές του ιδίου πρωτοκόλλου καθώς το διατιθέμενο εύρος ζώνης μοιράζεται ισομερώς από τους δύο εξυπηρετητές του ιδίου πρωτοκόλλου (Πίνακας 11). Ο δείκτης Jain's σε όλες τις περιπτώσεις έχει τιμές πάνω από 0.99. Παρόλα αυτά όμως, τα δύο πρωτόκολλα παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό εκμετάλλευσης του διατιθεμένου εύρους ζώνης. Το ASSP φαίνεται να εκμεταλλεύεται καλύτερα το διατιθέμενο εύρος ζώνης από ότι το SMCC στο περιοριστικό σύνδεσμο. (Σχήμα 90).



Σχήμα 89. Τοπολογία δικτύου για μετρήσεις "φιλικότητας" μεταξύ ροών του ιδίου πρωτοκόλλου



Σχήμα 90. Εκμετάλλευση ζεύξης προσομοίωσης φιλικότητας ροών του ιδίου πρωτοκόλλου

Link capacity		ASSP Average Throughput (Mb/s)	Jain's Index	SMCC Average Throughput (Mb/s)	Jain's Index
L1 (2 Mb/s)	Source 1	0.684	0.999	0.379	0.991
	Source 2	0.671		0.454	
L2 (1 Mb/s)	Source 1	0.346	0.994	0.379	1.0
	Source 2	0.403		0.379	
L3 (0.5 Mb/s)	Source 1	0.234	0.999	0.240	0.999
	Source 2	0.243		0.235	

Πίνακας 11. Στατιστικά προσομοίωσης φιλικότητας ροών του ιδίου πρωτοκόλλου

7.3.3 Μετρήσεις Καθυστέρησης και Ρυθμού Απώλειας Πακέτων – Μείωση Αυξομειώσεων του Ρυθμού Μετάδοσης

Στις παρακάτω προσομοιώσεις χρησιμοποιούμε τη τοπολογία δικτύου στο Σχήμα 86 με μεταβαλλόμενες RTT τιμές. Και τα δύο πρωτόκολλα παρουσιάζουν παρόμοια απόδοση σε σχέση με τις τιμές της μέσης τιμής της καθυστέρησης, αν και το ASSP υπερέχει του SMCC σε όλες τις περιπτώσεις (Πίνακας 12). Η υψηλότερη μέση τιμή της καθυστέρησης παρατηρείται στη περίπτωση του SMCC με τιμή RRT των 256 ms. Παρόλα αυτά όμως η καθυστέρηση αυτή μπορεί να εξισορροπηθεί με ένα κατάλληλο απομονωτή στις εφαρμογές μετάδοσης βίντεο. Η εκτίμησή μας είναι ότι και τα δύο πρωτόκολλα παρουσιάζουν υψηλή απόδοση με τιμές της καθυστέρησης να κυμαίνονται σε αποδεκτά όρια.

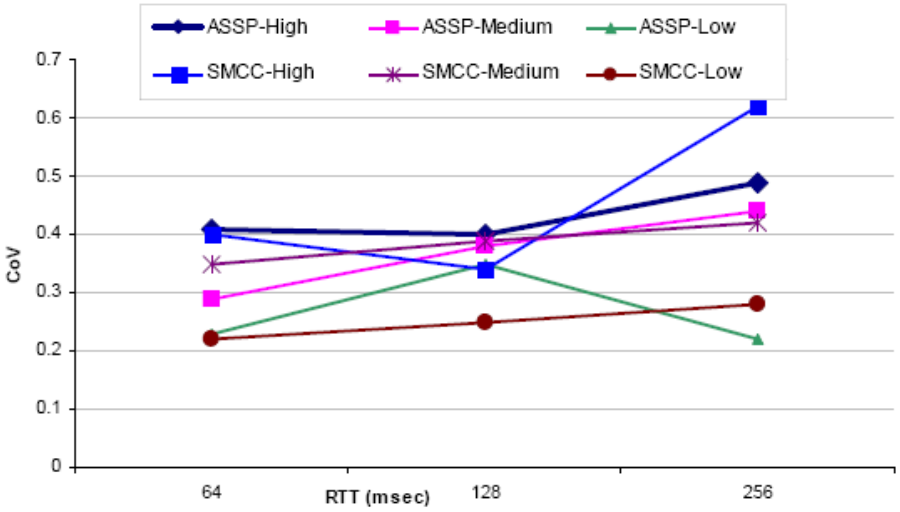
Αν και οι εφαρμογές πολυμέσων μπορεί να χαρακτηρίζονται ότι είναι ανεκτικές στις μικρές απώλειες των πακέτων, δεν μπορούμε να υποτιμήσουμε τα αποτελέσματα των απωλειών πακέτων σε κανένα είδος εφαρμογής. Επομένως με βάση τη λογική αυτή ο ρυθμός απώλειας πακέτων είναι μια σημαντική ιδιότητα στη μετάδοση πολυμέσων. Παρατηρούμε λοιπόν ότι, το ASSP παρουσιάζει υψηλότερους ρυθμούς απωλειών πακέτων σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια με διαφορετικές RTT τιμές, αν και οι τιμές είναι αρκετά χαμηλές. Ο λόγος για τη συμπεριφορά αυτή είναι η μεγάλη διάρκεια του χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών RTCP αναφορών ελέγχου. Σε ότι αφορά το πρωτόκολλο TFMCC ο αποστολέας απαιτεί μια αναφορά ελέγχου από το παραλήπτη σε κάθε RTT χρόνο, ενώ αντίθετα ο χρόνος αποστολής των αναφορών ελέγχου στο ASMP ρυθμίζεται από το πρωτόκολλο RTCP που δεν απαιτεί μια αναφορά σε κάθε χρόνο RTT.

	RTT (msec)	Average end-to-end delay (msec)	Loss ratio (%)
SMCC	64	91	0.08
	128	116	0.05
	256	169	0.03
ASSP	64	86	0.2
	128	100	0.16
	256	157	0.2

Πίνακας 12. Στατιστικά προσομοίωσης φιλικότητας ροών του ιδίου πρωτοκόλλου με διαφορετικές RTT τιμές

Για να μετρήσουμε τη σταθερότητα του κάθε πρωτοκόλλου χρησιμοποιούμε τις τιμές των CoV της ρυθμοαπόδοσης σε σχέση με τις διαφορετικές τιμές του RTT και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα στο γράφημα στο Σχήμα 91. Παρατηρούμε ότι το

SMCC παρουσιάζει μεγαλύτερες αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης από ότι το ASSP όσο αυξάνονται οι τιμές του RTT.



Σχήμα 91. CoV μέσης τιμής ρυθμοαπόδοσης με διαφορετικές RTT τιμές

7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων εξάγουμε το συμπέρασμα ότι το ASSP παρουσιάζει υψηλή σταθερότητα, με ελάχιστες αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης που προκαλούνται από τις καθυστερήσεις και τη μεταβολή του διαθεσίμου εύρου ζώνης στις ζεύξεις του δικτύου. Ο σχεδιασμός του ASSP μειώνει τις αιτήσεις εγγραφής/διαγραφής από μια ροή χαμηλότερου σε μια ροή υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης και αντίστροφα. Οι χαμηλές τιμές απώλειας πακέτων επιβεβαιώνουν το σωστό σχεδιασμό του μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης που εφαρμόζει το ASSP, εφόσον ο μηχανισμός αυτός απέδειξε ότι είναι σε θέση να ανιχνεύει αποτελεσματικά την επερχόμενη συμφόρηση του δικτύου και να προσαρμόζει ανάλογα το ρυθμό μετάδοσης.

Η φιλικότητα προς άλλα πρωτόκολλα είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό σε κάθε πρωτόκολλο μεταφοράς διότι το διατιθέμενο εύρος ζώνης θα πρέπει να μοιράζεται ισομερώς ανάμεσα στις διάφορες εφαρμογές. Το ASSP απέδειξε ότι είναι ένα φιλικό πρωτόκολλο προς το TCP καθόσον οι διάφορες μετρήσεις έδειξαν ότι το διατιθέμενο εύρος ζώνης μοιράζεται ισομερώς με τις TCP ροές. Αυτό είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του ASSP καθώς το TCP αποτελεί το πρωτόκολλο μεταφοράς των ποιο γνωστών εφαρμογών στο Διαδίκτυο. Η σταθερή και ομαλή συμπεριφορά όμως του ASSP έχει ως αποτέλεσμα τη χαμηλότερη ρυθμοαπόδοση του πρωτοκόλλου σε σχέση με το TCP. Υπάρχει όμως πάντα ένας συγκερασμός μεταξύ ομαλότητας του ρυθμού μετάδοσης και υψηλών τιμών ρυθμοαπόδοσης.

Η ανεξέλεγκτη εκπομπή χωρίς τη χρήση μηχανισμών ελέγχου ροής οδηγούν σε συμφόρηση του δικτύου εμπλέκοντας τους μηχανισμούς επανάληψης της μετάδοσης πακέτων του TCP λόγω απωλειών. Αυτή είναι μια μη επιθυμητή κατάσταση διότι οδηγεί στη μείωση του ωφέλιμου εύρου ζώνης από τη πλευρά του χρήστη. Το ASSP παρουσιάζει επίσης υψηλή φιλικότητα προς τις ροές του ιδίου πρωτοκόλλου καθώς οι μετρήσεις του δείκτη Jain μας έδωσαν τιμές πολύ κοντά στο απόλυτο 1.0 που

χαρακτηρίζει την άψογη συμπεριφορά ενός πρωτοκόλλου μεταφοράς σε ότι αφορά το δίκαιο καταμερισμό του διαθέσιμου εύρου ζώνης από διαφορετικές ροές που μοιράζονται τις πηγές του δικτύου.

Ένα άμεσο αποτέλεσμα από τις απώλειες των πακέτων σε μια μετάδοση βίντεο είναι η μείωση των τιμών του PSNR. Έχουμε παρατηρήσει τη μείωση αυτή όταν το ASSP μοιράζεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης με το UDP, το οποίο δεν διαθέτει κανένα μηχανισμό ελέγχου ροής. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός απώλειας των πακέτων τόσο χαμηλότερες και οι τιμές PSNR που αντανακλούν στη παρεχόμενη ποιότητα βίντεο προς το τελικό χρήστη.

Σε ότι αφορά τη σύγκριση με το πρωτόκολλο SMCC διαπιστώσαμε ότι η απόδοση του SMCC εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αρχική ρύθμιση του ρυθμού μετάδοσης του βασικού στρώματος, ενώ αντίστοιχα για τη σωστή λειτουργία του ASSP απαιτείται η γνώση εκ των προτέρων της χωρητικότητας των ζεύξεων με τις οποίες συνδέονται οι διάφορες ομάδες πολλαπλής διανομής με τον αποστολέα. Και τα δύο πρωτόκολλα απέδειξαν ότι είναι φιλικά προς το TCP καθώς μοιράζονται ισομερώς το διαθέσιμο εύρος ζώνης με το TCP. Οι μετρήσεις του δείκτη Jain μας έδωσαν τιμές 0.99 σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης. Το ASSP παρουσίασε καλύτερη απόδοση από το SMCC σε ότι αφορά την εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης καθώς επίσης και καλύτερη κλιμάκωση στις ζεύξεις υψηλής χωρητικότητας σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης. Οι μετρήσεις της καθυστέρησης έδειξαν ότι και τα δύο πρωτόκολλα παρουσίασαν πολύ καλή απόδοση με τη διαφορά ότι το ASSP είχε υψηλότερη απόδοση από το SMCC. Αντίθετα το SMCC είναι περισσότερο αποτελεσματικό στην απόκρισή του σε ότι αφορά τη συμφόρηση του δικτύου καθώς η απόκριση του ASSP εξαρτάται από τις RTCP αναφορές ελέγχου. Αυτές οι αναφορές ελέγχου μεταδίδονται σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα από ότι οι αναφορές ελέγχου του SMCC. Οι προσομοιώσεις με διαφορετικές RTT τιμές έδειξαν ότι το ASSP είναι περισσότερο σταθερό από ότι το SMCC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ (CROSS LAYER) ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

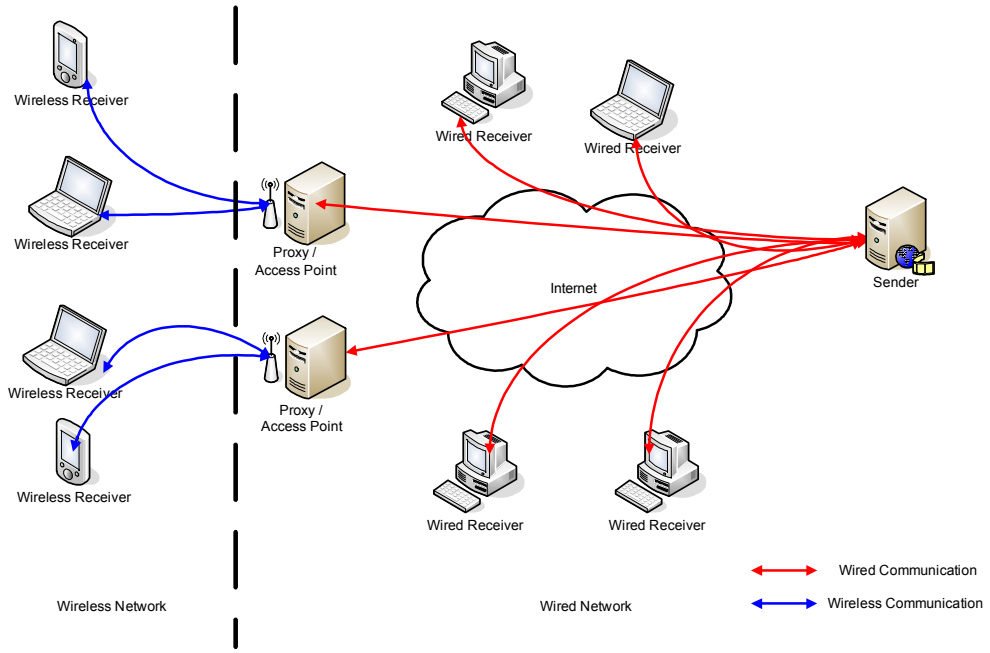
ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ (CROSS LAYER) ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε το πλαίσιο μέσα από το οποίο είναι δυνατό να πετύχουμε διαστρωματική προσαρμογή σε υβριδικά δίκτυα, όπου εξυπηρετούνται ταυτόχρονα ενσύρματοι και ασύρματοι ανταποκριτές. Το ενδιαφέρον μας εστιάζεται όχι τόσο στην ορθότητα της σχεδίασης του πλαισίου αυτού αλλά στο να αναδείξουμε ότι είναι δυνατό να πετύχουμε γενικά τη βελτίωση των παρεχομένων υπηρεσιών στο χρήστη χωρίς να απαιτείται να επενδύσουμε οικονομικά είτε στην αναβάθμιση των στοιχείων του δικτύου είτε στη αύξηση του προσφερομένου εύρου ζώνης.

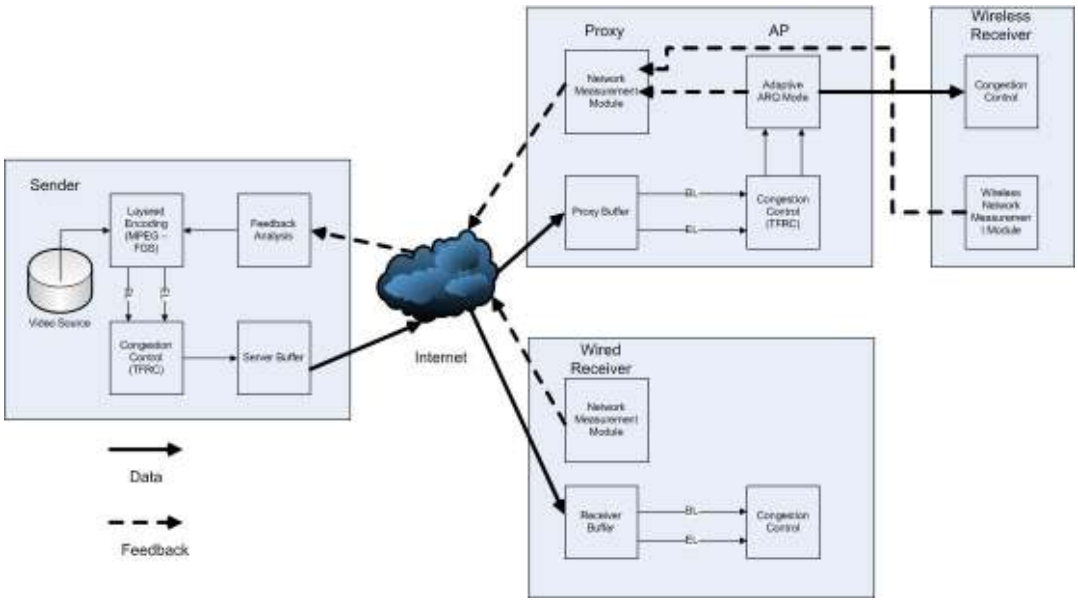
Αφού πρώτα εξηγούμε τη λογική και την εφαρμογή της σχεδίασής μας προχωρούμε και σε μια σειρά πειραμάτων με σκοπό την επαλήθευση του ορθού σχεδιασμού αλλά και στην απόδειξη ότι το πλαίσιο αυτό είναι δυνατόν να αποτελέσει μια λύση σε υπάρχοντα αλλά και μελλοντικά υβριδικά δίκτυα με στόχο την αύξηση των παρεχομένων υπηρεσιών ποιότητας (QoS) στο τελικό χρήστη.

8.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Το προτεινόμενο πλαίσιο αποτελείται από τέσσερις οντότητες (Σχήμα 92): Ο *Αποστολέας* συμβολίζει τον εξυπηρετητή εφαρμογών πολυμέσων, ο *Proxy* είναι τοποθετημένος στο άκρο του ενσύρματου δικτύου, το *Σημείο Πρόσβασης (Access Point-AP)* το οποίο μπορεί να είναι ενσωματωμένο με το Proxy και τέλος οι *ενσύρματοι* και οι *ασύρματοι* ανταποκριτές. Ο Proxy διαχωρίζει το ενσύρματο από το ασύρματο δίκτυο. Ο αποστολέας μεταδίδει τη πολυμεσική πληροφορία στο ενσύρματο δίκτυο και ο Proxy είναι υπεύθυνος για την αναμετάδοση της πληροφορίας στους ασύρματους ανταποκριτές. Για τη μετάδοση στο ενσύρματο τμήμα του δικτύου μπορούμε να επωφεληθούμε είτε από προσφερόμενες υπηρεσίες που εγγυώνται ποιότητα λήψης (IntServ/DiffServ) είτε από μηχανισμούς ελέγχου συμφόρησης, όπως έχουμε περιγράψει στα προηγούμενα κεφάλια. Ο Proxy είναι επίσης υπεύθυνος για τη συλλογή πληροφοριών από τους ασύρματους ανταποκριτές, που αφορούν κυρίως περιορισμούς του ρυθμού μετάδοσης και μεταδίδει τις πληροφορίες αυτές στον αποστολέα με σκοπό την επεξεργασία τους και την υλοποίηση της διαστρωματικής προσαρμογής. Στο Σχήμα 93 παρουσιάζουμε το μπλοκ διάγραμμα του προτεινόμενου πλαισίου. Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούμε εκτενέστερα στις λειτουργίες της κάθε οντότητας του πλαισίου.



Σχήμα 92. Σενάριο χρήσης του προτεινομένου πλαισίου διαστρωματικής προσαρμογής



Σχήμα 93. Μπλοκ διάγραμμα του προτεινομένου πλαισίου διαστρωματικής προσαρμογής

8.1.1 Αποστολέας

Στον Αποστολέα μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις κύριες λειτουργίες: Ανάλυση των αναφορών κατάστασης, κωδικοποίηση βίντεο, έλεγχος συμφόρησης και τέλος εκμετάλλευση υπηρεσιών ποιότητας εφόσον αυτές υποστηρίζονται από το δίκτυο (Diffserv ή Inteserv). Για τη κωδικοποίηση βίντεο χρησιμοποιούμε το πρότυπο

H.264/MPEG-4/AVC [83] που παρέχει πάρα πολλές δυνατότητες σε ότι αφορά τη ποιότητα του βίντεο. Μπορούμε δηλαδή να δημιουργήσουμε μια βασική ροή (ή αλλιώς ένα βασικό στρώμα, basic layer) που προσφέρει εικόνα χαμηλής ποιότητας. Η ποιότητα του βίντεο αυξάνεται όταν εμπλουτίζεται από περισσότερα στρώματα (enhancement layers) ανάλογα με τις δυνατότητες λήψης του χρήστη. Ειδικά στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιούμε μόνο ένα βασικό στρώμα και ένα ακόμη επιπρόσθετο στρώμα για λόγους ευκολίας υλοποίησης. Η λογική πίσω από την επιλογή μας είναι απλή. Οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης για το βασικό στρώμα (BL) είναι χαμηλές έτσι ώστε ο ρυθμός μετάδοσης να είναι ίσος ή μικρότερος του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Το επιπρόσθετο στρώμα (EL) καταναλώνει το υπόλοιπο αδιάθετο εύρος ζώνης.. Σε κάθε περίπτωση ο ρυθμός μετάδοσης του BL και του EL ισούται με το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Αυτό το σχήμα ταιριάζει καλά στα ασύρματα δίκτυα λόγω των αυξομειώσεων του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Έτσι όταν το εύρος ζώνης ελαττώνεται σε μια ελάχιστη τιμή έχουμε τη δυνατότητα να μεταδώσουμε μόνο το BL.

Ο αποστολέας παράγει δύο συνόδους RTP πολλαπλής εκπομπής, μία για το στρώμα BL και μια για το EL. Οι ενσύρματοι δέκτες και ο Proxy αποστέλλουν αναφορές κατάστασης στον αποστολέα που δεν είναι άλλες από τις αναφορές του πρωτοκόλλου RTCP τις οποίες έχουμε επεκτείνει ανάλογα για το σκοπό αυτό. Έτσι λοιπόν οι ενσύρματοι δέκτες και ο Proxy j περιλαμβάνουν στις αναφορές RTCP την εκτίμησή τους για ένα φιλικό προς το TCP ρυθμό μετάδοσης και για τα δύο στρώματα, $r^i_{tcp_BL}$ για το στρώμα BL και $r^i_{tcp_EL}$ για το στρώμα EL. Επιπλέον ο Proxy αναφέρει στον αποστολέα την εκτίμησή του r^j_w για το διαθέσιμο εύρος ζώνης στο τμήμα του ασυρμάτου δικτύου. Ο αποστολέας αποθηκεύει προσωρινά τις τελευταίες τιμές $r^i_{tcp_BL}$ και $r^i_{tcp_EL}$ από όλους τους ενσύρματους δέκτες και το Proxy και χρησιμοποιεί τις πληροφορίες αυτές ώστε να προσαρμόσει ανάλογα το ρυθμό μετάδοσης των στρωμάτων BL (r_{BL}) και EL (r_{EL}) σύμφωνα με το παρακάτω αλγόριθμο:

$$
\begin{aligned}
& r_{BL} \leftarrow \min(r^1_{tcp_BL}, \ldots, r^i_{tcp_BL}) \\
& r_{EL} \leftarrow \min(r^1_{tcp_EL}, \ldots, r^i_{tcp_EL}) \\
& if\,(r_{BL} < r_{EL}) \\
& \quad diff \leftarrow r_{EL} - r_{BL} \\
& \quad r_{BL} \leftarrow r_{EL} \\
& \quad r_{EL} \leftarrow diff
\end{aligned}
$$

Εξίσωση 45. Προσδιορισμός ρυθμού μετάδοσης BL και EL στρωμάτων

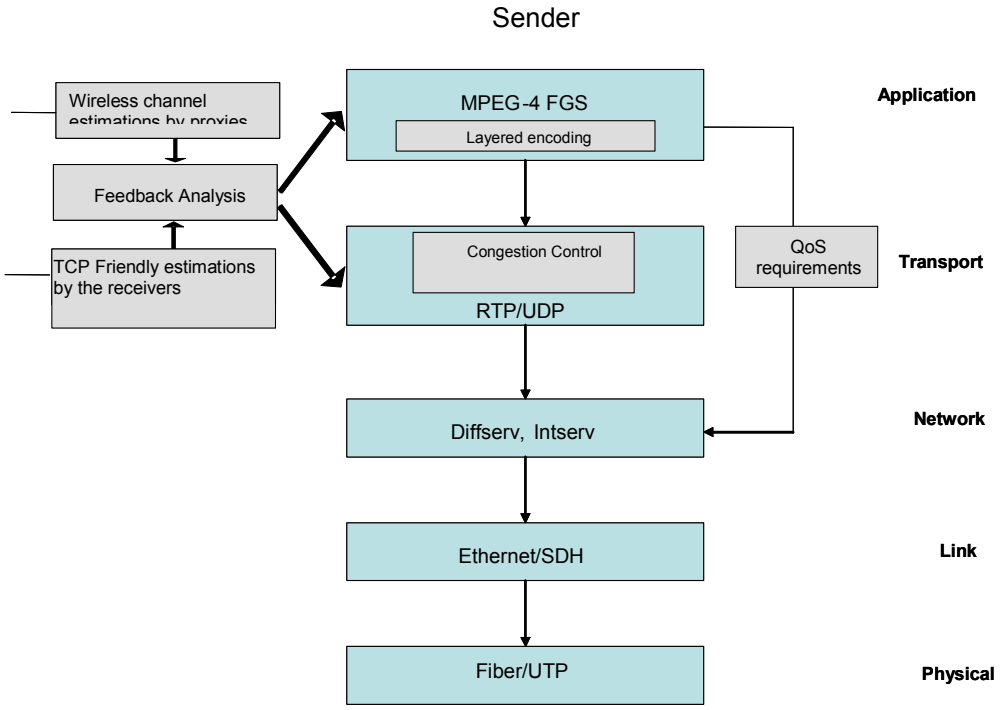
Με το παραπάνω αλγόριθμο ο αποστολέας υλοποιεί το μηχανισμό ελέγχου της συμφόρησης ώστε να αποφεύγεται η απώλεια των πακέτων.

Μια δεύτερη προσέγγιση είναι να θέσουμε μια προκαθορισμένη τιμή για το ρυθμό μετάδοσης του στρώματος BL που θα εξαρτάται από τις δυνατότητες των δεκτών αλλά και από κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας. Έτσι όταν υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης μπορούμε να μεταδώσουμε και το στρώμα EL ώστε να εκμεταλλευτούμε όλες τις πηγές του δικτύου. Η διαδικασία είναι απλή και περιγράφεται στο παρακάτω αλγόριθμο:

$$
\begin{aligned}
& set\ (\text{target_rate}) \\
& r_{BL} \leftarrow \min(r^{1}_{tcp_BL}, \ldots, r^{i}_{tcp_BL}) \\
& r_{EL} \leftarrow \min(r^{1}_{tcp_EL}, \ldots, r^{i}_{tcp_EL}) \\
& channel_capacity \leftarrow r_{BL} + r_{EL} \\
& if\,(channel_capacity >= \text{target_rate}) \\
& \quad r_{BL} \leftarrow \text{target_rate} \\
& \quad r_{EL} \leftarrow channel_capacity - r_{BL}
\end{aligned}
$$

Εξίσωση 46. Εναλλακτική λύση για το προσδιορισμό ρυθμού μετάδοσης BL και EL στρωμάτων

Ο κυριότερος σκοπός του παραπάνω αλγόριθμου είναι να μειώσουμε τις απότομες αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης του στρώματος BL ώστε να είναι δυνατό να ακολουθηθούν από το κωδικοποιητή βίντεο. Στο Σχήμα 94 παρουσιάζουμε το μπλοκ διάγραμμα του Αποστολέα.



Σχήμα 94. Μπλοκ διάγραμμα του Αποστολέα

8.1.2 Ενσύρματος Παραλήπτης

Κάθε ενσύρματος παραλήπτης υπολογίζει τα χαρακτηριστικά στο δικτυακό μονοπάτι με τον αποστολέα και τον ενημερώνει για τα αποτελέσματα με τη χρήση αναφορών RTCP. Οι παρακάτω παράμετροι υπολογίζονται και διαβιβάζονται στον αποστολέα:

- Ρυθμός απώλειας πακέτων l_i: Ο ενσύρματος παραλήπτης υπολογίζει το ρυθμό απώλειας πακέτων και για τα δύο στρώματα (BL και EL) με τη χρήση του πρωτοκόλλου RTP.
- Υπολογισμός του χρόνου RTT (t^{e-i}_{RTT}): Ο χρόνος αυτός υπολογίζεται με βάση τη χρονοσήμανση των πακέτων RTP.

Ο ενσύρματος παραλήπτης μιμείται στη συμπεριφορά ένα παραλήπτη TCP και υπολογίζει έναν επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης και για τα δύο στρώματα (BL και EL) με τη χρήση του αναλυτικού μοντέλου του TCP όπως παρακάτω:

$$r^{i}_{tcp} = \frac{P}{t^{e-i}_{RTT}\sqrt{\frac{2l_i}{3}} + 4t^{e-i}_{RTT}\min(1,3\sqrt{\frac{3l_i}{8}})l_i(1+32l_i^{2})}$$

Εξίσωση 47. Υπολογισμός φιλικού προς το TCP ρυθμού μετάδοσης

όπου P είναι το μέγεθος του πακέτου σε bytes, l ο ρυθμός απώλειας πακέτων και t_{RTT} ο χρόνος RTT. Εάν ο παραλήπτης δεν αντιμετωπίζει απώλειες πακέτων τότε αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης όπως παρακάτω:

$$r^{i}_{tcp} \leftarrow r^{i}_{tcp} + \frac{1}{t^{e-i}_{RTT}}P$$

Εξίσωση 48. Υπολογισμός φιλικού προς το TCP ρυθμού μετάδοσης χωρίς απώλειες πακέτων

Έτσι ο ενσύρματος παραλήπτης i ενημερώνει τον αποστολέα σχετικά με τη μέτρηση των τιμών $r^{i}_{tcp_BL}$ και $r^{i}_{tcp_EL}$ που αντιπροσωπεύουν την εκτίμησή του για ένα φιλικό προς το TCP ρυθμό μετάδοσης για τα στρώματα BL και EL. Το άθροισμα των τιμών αυτών αντιπροσωπεύει την εκτίμηση του ενσύρματου παραλήπτη σχετικά με το συνολικό ρυθμό μετάδοσης..

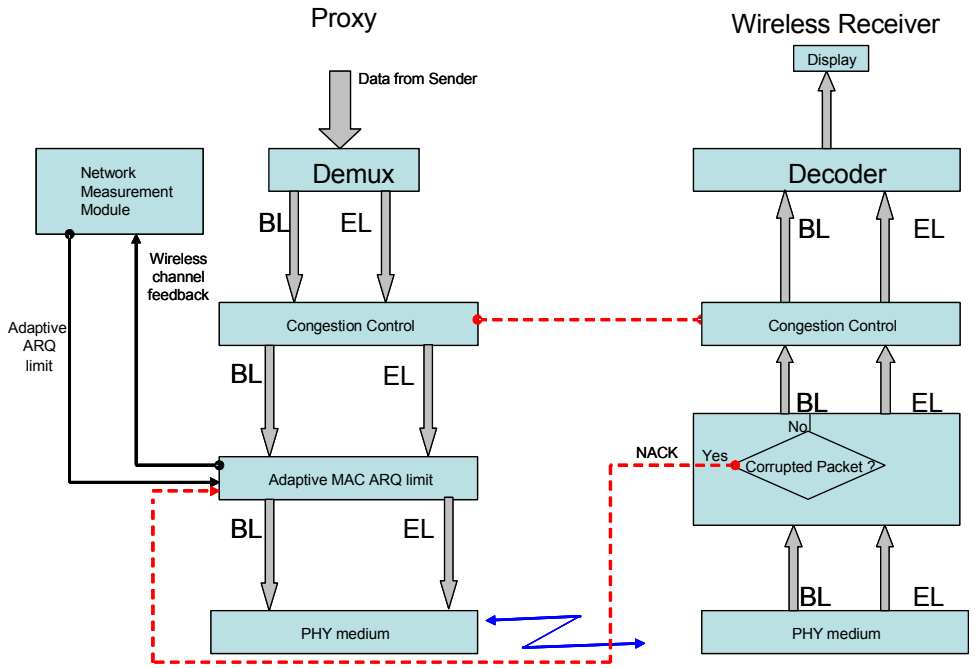
8.1.3 Proxy και Ασύρματος Παραλήπτης

Η διαστρωματική προσαρμογή στο ασύρματο τμήμα του δικτύου είναι μια εργασία που παρουσιάζει και τις μεγαλύτερες προκλήσεις. Η έλλειψη διεθνών προτύπων που εγγυώνται τη ποιότητα υπηρεσιών σε συνδυασμό με το απρόβλεπτο περιβάλλον του ελεύθερου χώρου διάδοσης δημιουργούν όμως και μεγάλες ερευνητικές ευκαιρίες. Οι μηχανισμοί ελέγχου ροής στα ενσύρματα δίκτυα με χαρακτηριστικότερους αυτούς που είναι φιλικοί προς το TCP έχουν παρουσιάσει μέχρι τώρα πολύ καλά αποτελέσματα. Είναι όμως αμφίβολη η χρησιμότητά τους στο ασύρματο περιβάλλον. Η εισαγωγή του Proxy μας προσφέρει τη δυνατότητα μιας πλάγιας προσέγγισης ώστε να αντιμετωπίσουμε αποτελεσματικότερα τα ζητήματα που αφορούν γνωστούς περιορισμούς των ασυρμάτων δικτύων. Έτσι ο Proxy πραγματεύεται δύο σημαντικά θέματα: Το πρώτο θέμα έχει να κάνει με τις απότομες μεταβολές των συνθηκών του δικτύου μεταξύ του Proxy-ασυρμάτων δεκτών αλλά και μεταξύ του Proxy-ενσύρματων δεκτών, κυρίως όμως το πρώτο. Το δεύτερο θέμα σχετίζεται με τη κατηγοριοποίηση των διαφόρων πακέτων ανάλογα με την εφαρμογή. Έτσι είναι δυνατό να ξεχωρίσουμε τα πακέτα που μεταφέρουν πολυμεσική πληροφορία από άλλα πακέτα δεδομένων οπότε ο Proxy να έχει μια ποιο "ευνοϊκή" συμπεριφορά στα πακέτα των εφαρμογών πολυμέσων. Ο Proxy και ο ασύρματος παραλήπτης σχεδιάζονται μαζί ώστε να δείξουμε καλύτερα τις αλληλοεπιδράσεις μεταξύ τους. Ειδικότερα ο Proxy αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Ένα μηχανισμό ελέγχου της συμφόρησης με φιλική προς το TCP συμπεριφορά.
- Ένα μηχανισμό ελέγχου λαθών Automatic Repeat-reQuest (ARQ) που είναι αποτέλεσμα διαστρωματικής σχεδίασης μεταξύ των επιπέδων MAC-APP.

- Ένα μηχανισμό που εκτελεί τις μετρήσεις σχετικά με τη κατάσταση του δικτύου.

Στο Σχήμα 95 παρουσιάζουμε τα μπλοκ διαγράμματα του ασύρματου παραλήπτη και του Proxy.



Σχήμα 95. Μπλοκ διάγραμμα του ενσύρματου παραλήπτη και του Proxy

Ο Proxy λαμβάνει τη πολυμεσική πληροφορία (ήχος-εικόνα) και αποθηκεύει τα δύο στρώματα BL και EL σε διαφορετικά αρχεία. Σε αυτό το σημείο ο Proxy έχει τη δυνατότητα να μεταδώσει στους ασύρματους δέκτες είτε μόνο το στρώμα BL ή και το EL ανάλογα με τη κατάσταση του δικτύου. Ποιο συγκεκριμένα ακολουθείται ο παρακάτω αλγόριθμος:

$$if\,(r_w^i > r_{BL}) \rightarrow transmit_BL\ and\ EL$$
$$if\,(r_w^i \le r_{BL}) \rightarrow transmit_BL$$

Εξίσωση 49. Αλγόριθμος απόφασης για μετάδοση των στρωμάτων BL και EL

όπου το r_w^i συμβολίζει την εκτίμηση του Proxy για το εύρος ζώνης τη παρούσα στιγμή στο ασύρματο δίκτυο. Ο μηχανισμός ελέγχου λαθών ARQ καθορίζει τον αριθμό των επιτρεπόμενων αναμεταδόσεων ενός απολεσθέντος MAC πλαισίου. Ο ανώτατος αριθμός αναμεταδόσεων καθορίζεται σε σχέση με τη κατάσταση του ασυρμάτου δικτύου και τους χρονικούς περιορισμούς της εφαρμογής.

8.1.4 Εκτίμηση της Κατάστασης του Ασυρμάτου Δικτύου

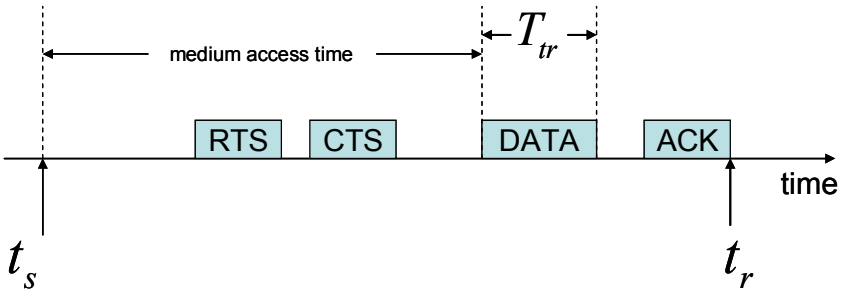
Η εκτίμηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης στο δικτυακό μονοπάτι μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη με σκοπό την εύρεση του περιοριστικού συνδέσμου

είναι μια περιοχή που έχει εκτενώς ερευνηθεί στα ενσύρματα δίκτυα. Στο προτεινόμενο όμως πλαίσιο μας ενδιαφέρει άμεσα να γνωρίζουμε σε κάθε χρονική στιγμή το διαθέσιμο εύρος ζώνης μεταξύ του Proxy και το αποστολέα. Αυτό το διαθέσιμο εύρος ζώνης καθορίζει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να επιτύχει ο Proxy στο ασύρματο δίκτυο. Αυτός όμως ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης είναι μικρότερος από την ονομαστική τιμή του πρωτοκόλλου μετάδοσης, εξαιτίας της παρουσίας των πακέτων ελέγχου σε μια ασύρματη επικοινωνία (π.χ. Request To Send/Clear To Send, RTS/CTS μηχανισμοί). Η ονομαστική τιμή του ρυθμού μετάδοσης εξαρτάται από το πρωτόκολλο 802.11x του PHY επιπέδου. Για το λόγο αυτό και επειδή δεν μας ενδιαφέρει η ονομαστική αλλά η πραγματική τιμή του ρυθμού μετάδοσης εκτελούμε το παρακάτω αλγόριθμο:

01 $send(MAC_frame)$
02 $t_s \leftarrow t_{system}$
03 $S_{sent} \leftarrow S_{MAC_frame}$
04 $t_{sample} \leftarrow t_{sample} + t_{elapsed}$
05 $if\,(ACK_received)\ then$
06 $\quad t_r \leftarrow t_{system}$
07 $\quad if\,(t_{sample} \le t_{threshold})\ then$
08 $\quad\quad t_{elapsed} \leftarrow t_r - t_s$
09 $\quad\quad S_{total} \leftarrow S_{total} + S_{MAC}$
10 $\quad\quad BW \leftarrow \dfrac{S_{total}}{t_{sample}}$
11 $\quad else$
12 $\quad\quad PRINT\ BW$
13 $\quad\quad t_{sample} \leftarrow null$
14 $\quad\quad t_{elapsed} \leftarrow t_r - t_s$
15 $\quad\quad S_{total} \leftarrow S_{MAC}$
16 $else$
17 $\quad t_{elapsed} \leftarrow t_{system} - t_s$

Εξίσωση 50. Αλγόριθμος εύρεσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης στο ασύρματο δίκτυο

Για την εκτέλεση του αλγορίθμου αυτού κάθε αποστελλόμενο MAC πλαίσιο σημαίνεται με μια χρονοσήμανση (t_s) που μας δείχνει το χρόνο αποστολής του πλαισίου. Μετά τη λήψη της επιβεβαίωσης λήψης (ACK) από το παραλήπτη ο αλγόριθμος υπολογίζει το χρονικό διάστημα μεταξύ του χρόνου αποστολής και του χρόνου λήψης της επιβεβαίωσης (t_r). Έτσι σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα ($t_{threshold}$) μπορούμε να υπολογίσουμε το διαθέσιμο εύρος ζώνης BW ως το πηλίκο των οκτάδων S που μεταδόθηκαν προς το χρόνο δειγματοληψίας $t_{sampling}$. Στο Σχήμα 96 παρουσιάζουμε την αλληλουχία μετάδοσης ενός MAC πλαισίου σύμφωνα με το πρωτόκολλο IEEE 802.11.



Σχήμα 96. Αλληλουχία μετάδοσης των πλαισίων IEEE 802.11 MAC

Το διαθέσιμο εύρος ζώνης εξάγεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$BW = \frac{S}{t_{sampling}}$$

Εξίσωση 51. Εξίσωση εύρεσης διαθέσιμου εύρου ζώνης

8.1.5 Προσαρμοστικός Μηχανισμός Ελέγχου Λαθών

Ο μηχανισμός ARQ έχει αποδειχθεί αποτελεσματικός στα ασύρματα δίκτυα καθώς μπορεί να αντιμετωπίσει σε ένα βαθμό τα προβλήματα της διάδοσης στον ελεύθερο χώρο. Παρόλα αυτά όμως ένας προκαθορισμένος αριθμός αναμεταδόσεων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητες των εφαρμογών πολυμέσων είναι πιθανό να μειώσει τη παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσιών. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η αναμετάδοση ενός πλαισίου MAC πέρα από κάποια χρονικά όρια δε βελτιώνει τη ποιότητα υπηρεσιών (π.χ. μια εφαρμογή βίντεο πραγματικού χρόνου). Ακόμη περισσότερο η αναμετάδοση ενός απολεσθέντος πλαισίου MAC που μεταφέρει εικόνα βίντεο μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια ενός νεώτερου πλαισίου που μεταφέρει και αυτό ένα τμήμα της εικόνας και περιέχει νεώτερη πληροφορία.

Για τους παραπάνω λόγους η δική μας πρόταση στηρίζεται σε δύο αρχές: α) Το πλαίσιο το οποίο είναι υπό αναμετάδοση δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τους χρονικούς περιορισμούς της εφαρμογής και β) ο αριθμός των επιτρεπόμενων αναμεταδόσεων πρέπει να σχετίζεται με την "αξία" του πλαισίου. Ειδικά στη μετάδοση βίντεο όλα τα πακέτα δεν έχουν την ίδια αξία. Έτσι τα πακέτα των στρωμάτων BL και EL πρέπει να αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο από το μηχανισμό ARQ.

Οι αρχές αυτές αντανακλώνται στο παρακάτω αλγόριθμο όπου το t_{dl} αναπαριστά το χρονικό περιορισμό ενός πλαισίου και το $ARQ_\lim$ τον αριθμό των αναμεταδόσεων για τα πλαίσια των στρωμάτων BK και EL. Η έρευνα έχει δείξει [44] ότι η καλύτερη απόδοση μπορεί να επιτευχθεί όταν $ARQ_\lim = 8$

$$
\begin{array}{ll}
01 & if\,(NACK_received)\ then \\
02 & \quad set(t_{dl}) \\
03 & \quad get(RTT) \\
04 & \quad if\,(RTT < t_{dl})\ then \\
05 & \quad\quad if\,(ARQ_\lim > 0)\ then \\
06 & \quad\quad\quad send(MAC_frame) \\
07 & \quad\quad\quad ARQ_\lim \leftarrow ARQ_\lim\ -\ 1 \\
08 & \quad else(discard)
\end{array}
$$

Εξίσωση 52. Προσαρμοστικός αλγόριθμος ARQ

8.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

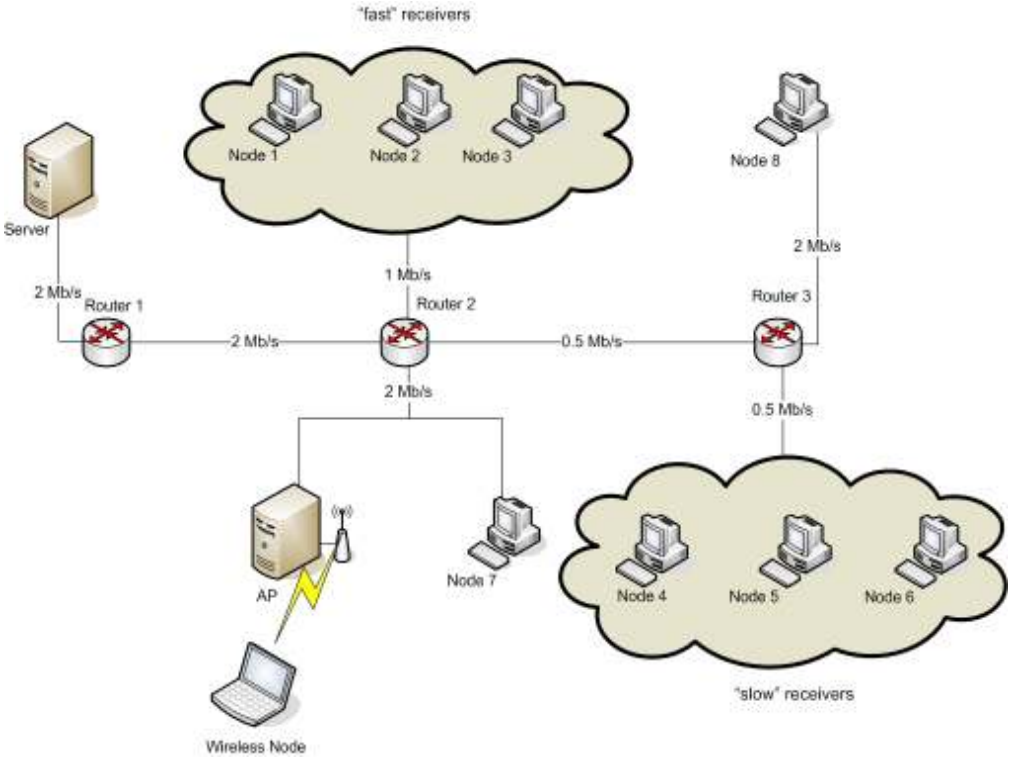
Το δίκτυο που χρησιμοποιούμε για τα πειράματά μας είναι ένα τοπικό δίκτυο LAN που αποτελείται από ένα εξυπηρετητή και έξι ετερογενείς δέκτες (Σχήμα 97). Οι δέκτες είναι ετερογενείς διότι συνδέονται με ζεύξεις διαφορετικής χωρητικότητας. Επομένως οι δέκτες έχουν και διαφορετικές δυνατότητες λήψης. Για να δημιουργήσουμε δύο διαφορετικές ομάδες δεκτών έχουμε θέσει ένα περιοριστικό σύνδεσμο μεταξύ των εξυπηρετητών 2 και 3. Η πρώτη ομάδα των δεκτών (δέκτες 1,2 και 3 "γρήγοροι δέκτες") έχουν μεγαλύτερες δυνατότητες λήψης από ότι η δεύτερη ομάδα των δεκτών (δέκτες 4,5 και 6 "αργοί δέκτες"). Έχουμε τοποθετήσει επιπλέον έναν ασύρματο παραλήπτη για να μελετήσουμε τις επιπτώσεις από τη μετάδοση στον ελεύθερο χώρο. Ο ασύρματος παραλήπτης είναι εφοδιασμένος με μια κάρτα δικτύου και επικοινωνεί με βάση το πρωτόκολλο IEEE 802.11 με ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 2 Mb/s. Ο εξυπηρετητής μεταδίδει δύο διαφορετικά αρχεία βίντεο που κωδικοποιούνται κατά MPEG-4 FGS. Όλοι οι δέκτες αρχικά λαμβάνουν και τα δυο στρώματα BL και EL. Εκτελούμε έτσι τα παρακάτω διαφορετικά σενάρια προσομοιώσεων ώστε να μελετήσουμε:

- Τη συμπεριφορά του μηχανισμού μετάδοσης σε ότι αφορά τη μετάδοση των στρωμάτων BL και EL.
- Τη συμπεριφορά του μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης σε ένα περιβάλλον με ανταγωνιστική TCP και UDP κίνηση.
- Τα αποτελέσματα στη μετάδοση του βίντεο από τη παρουσία του ασύρματου παραλήπτη και τέλος
- Τη σύγκριση μεταξύ του μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης με το μηχανισμό TFRC.

8.2.1 Μετάδοση Στρωμάτων BL και EL χωρίς Συντονισμό

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης ο εξυπηρετητής μεταδίδει τα στρώματα BL και EL με αρχικό ρυθμό 256 Kb/s και 128 Kb/s, αντίστοιχα. Εδώ δε εφαρμόζουμε καμία πολιτική ελέγχου εκτός από το μηχανισμό ελέγχου της συμφόρησης και για τα δύο στρώματα. Τα δύο στρώματα μεταδίδονται σε δύο διαφορετικές ροές και ο ρυθμός μετάδοσης τους προσαρμόζεται με βάση τις αναφορές ελέγχου από τους δέκτες. Στο Σχήμα 98 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δύο δεκτών από τις

διαφορετικές ομάδες (Παραλήπτης 1, "γρήγορος" παραλήπτης και Παραλήπτης 4, "αργός" παραλήπτης). Στο γράφημα έχουμε προσθέσει τις τιμές της ρυθμοαπόδοσης και για τα δύο στρώματα (BL και EL).

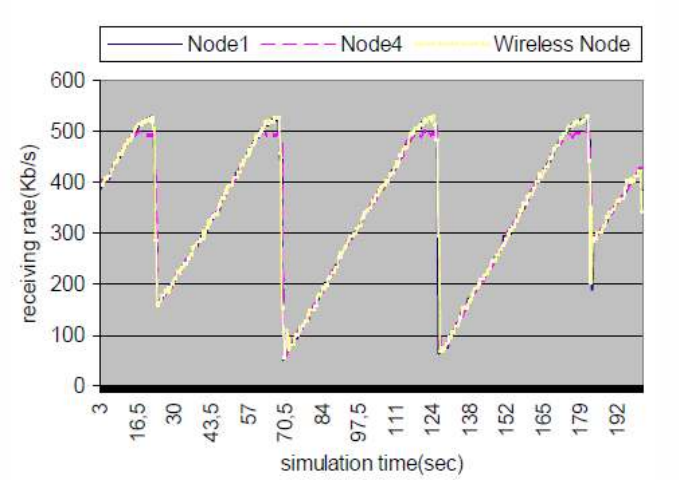


Σχήμα 97. Τοπολογία δικτύου για προσομοιώσεις διαστρωματικής προσαρμογής

Μια πρώτη παρατήρηση που κάνουμε είναι ότι ο ασύρματος παραλήπτης απολαμβάνει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που είναι παρόμοιοι με αυτούς των αργών δεκτών. Μια δεύτερη παρατήρηση σχετίζεται με τις αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης. Αυτό είναι το άμεσο αποτέλεσμα του μηχανισμού ελέγχου της συμφόρησης που εφαρμόζεται για κάθε στρώμα ξεχωριστά αλλά και της έλλειψης συντονισμού για τη παράλληλη μετάδοση και των δύο στρωμάτων. Οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης του ενός στρώματος έχουν ως αποτέλεσμα την εξάλειψη του άλλου στρώματος. Περιμέναμε τα αποτελέσματα αυτά καθόσον όπως είπαμε δεν έχουμε θέσει κανένα μηχανισμό ο οποίος θα συντονίζει τη μετάδοση των δύο στρωμάτων και επιπλέον δεν χρησιμοποιούμε κανένα μοντέλο που να αξιολογεί τη βαρύτητα του κάθε πακέτου RTP. Ένα δεύτερο αίτιο για τις αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης είναι ότι ο μηχανισμός ελέγχου της συμφόρησης λαμβάνει υπόψη τις RTCP αναφορές κατάστασης του αργότερου παραλήπτη και προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης και για τα δύο στρώματα. Οι δέκτες μεταφράζουν τις απώλειες των πακέτων και την αύξηση του χρόνου RTT ως ένδειξη συμφόρησης και υπολογίζουν ένα φιλικό προς το TCP ρυθμό μετάδοσης. Όταν ο εξυπηρετητής λάβει τις αναφορές κατάστασης από τους δέκτες τότε προσαρμόζει ανάλογα το ρυθμό μετάδοσης των δύο στρωμάτων. Πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι δεν χρησιμοποιούμε κανένα μηχανισμό δίκαιης κατανομής του εύρους ζώνης ανάμεσα στους δέκτες. Έτσι αν και υπάρχουν δέκτες με μεγαλύτερες δυνατότητες λήψης αυτοί λαμβάνουν σε ρυθμούς που καθορίζονται από τον αργότερο παραλήπτη στην ομάδα. Η πολιτική μας όμως είναι να μεταδώσουμε ένα αρχείο βίντεο με αποδεκτό ρυθμό ώστε να ικανοποιήσουμε ακόμα και τους ποιο αργούς δέκτες στην ομάδα. Μια διαφορετική λύση θα ήταν να διατηρήσουμε ένα

σταθερό και χαμηλό ρυθμό μετάδοσης για το στρώμα BL και να διαιρέσουμε το στρώμα EL σε μικρότερα υποστρώματα τα οποία θα μεταδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες. Έτσι κάθε παραλήπτης θα μπορούσε να λάβει επιπλέον υποστρώματα που αυξάνουν τη ποιότητα του βίντεο ανάλογα με τις δυνατότητες λήψης του.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα εξάγουμε το συμπέρασμα ότι όταν έχουμε τα δύο στρώματα BL και EL να μεταδίδονται ανεξάρτητα αυτό θα δημιουργήσει αυξομειώσεις στο ρυθμό μετάδοσης. Αυτή όμως δεν είναι η συμπεριφορά που επιθυμούμε καθόσον το BL θα πρέπει να μεταδίδεται με ρυθμό μετάδοσης ίσο ή και μικρότερο από το επιτρεπόμενο όριο που καθορίζεται από το παραλήπτη με τη μικρότερη δυνατότητα λήψης στην ομάδα. Οι δέκτες με μεγαλύτερους ρυθμούς λήψης θα πρέπει να λαμβάνουν και το στρώμα EL ώστε να απολαμβάνουν καλύτερης ποιότητας βίντεο. Στο επόμενο σενάριο προσομοίωσης θα δούμε πως μπορούμε να το πετύχουμε αυτό με την εφαρμογή του αλγορίθμου που περιγράφεται στην Εξίσωση 45.

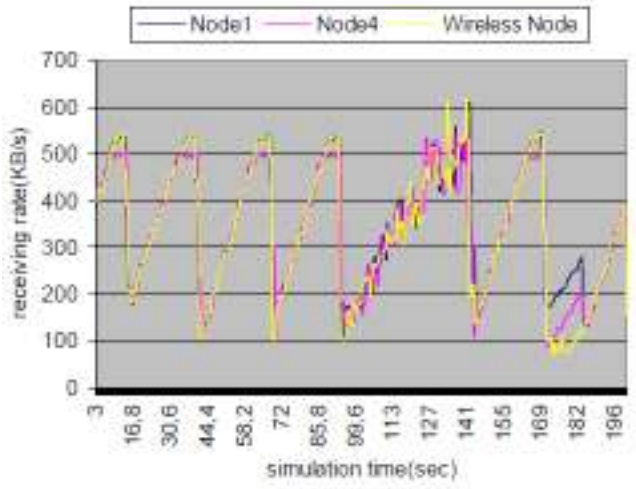


Σχήμα 98. Μετάδοση BL και EL χωρίς κανένα συντονισμό

8.2.2 Μετάδοση Στρωμάτων BL και EL με Συντονισμό

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης κάνουμε χρήση του αλγόριθμου που περιγράφεται στην Εξίσωση 45. Η τοπολογία και τα χαρακτηριστικά του δικτύου παραμένουν τα ίδια όπως στο προηγούμενο σενάριο έτσι ώστε να έχουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα. Σε αυτό το σενάριο το στρώμα BL απολαμβάνει πάντα μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης από ότι το EL. Στο EL δεν επιτρέπεται τώρα να έχει ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους από ότι το BL. Με αυτό το τρόπο έχουμε αυξήσει το επίπεδο συνεργασίας μεταξύ των δύο στρωμάτων και κάνουμε σίγουρο ότι τουλάχιστο το στρώμα BL μεταδίδεται σε όλους τους δέκτες. Παρατηρούμε στα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Σχήμα 99 ότι οι πολλές μεγάλες αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης έχουν τώρα ελαττωθεί. Υπάρχουν συγκεκριμένες χρονικές περίοδοι (από το 100 έως το 149 δευτερόλεπτο της προσομοίωσης) όπου το EL έχει χαμηλότερους ρυθμούς εκπομπής από ότι το BL. Σε αυτές τις περιοχές τα δύο στρώματα ανταγωνίζονται μεταξύ τους όπως και στο προηγούμενο σενάριο προσομοίωσης. Το πρόβλημα με τις μεγάλες αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης είναι ότι ίσως να μην μπορούν να ακολουθηθούν από το κωδικοποιητή του βίντεο. Επομένως θα πρέπει να

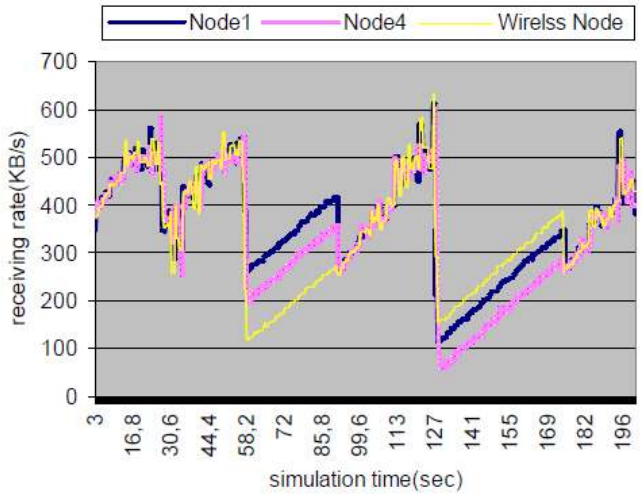
καθορίσουμε ένα άνω και κάτω όριο στο ρυθμό μετάδοσης του βασικού στρώματος BL, έτσι ώστε να μειώσουμε περαιτέρω τις αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης.



Σχήμα 99. Μετάδοση BL και EL με συντονισμό

8.2.3 Μετάδοση Στρωμάτων με Καθορισμένο Ρυθμό για το BL

Σε αυτό το σενάριο καθορίζουμε το ρυθμό μετάδοσης να είναι το λιγότερο 256 Kb/s για το BL. Αυτό είναι και το κατώτατο όριο για το στρώμα αυτό. Παρατηρούμε στα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχήμα 100) ότι οι δέκτες έχουν καλύτερους ρυθμούς λήψης.



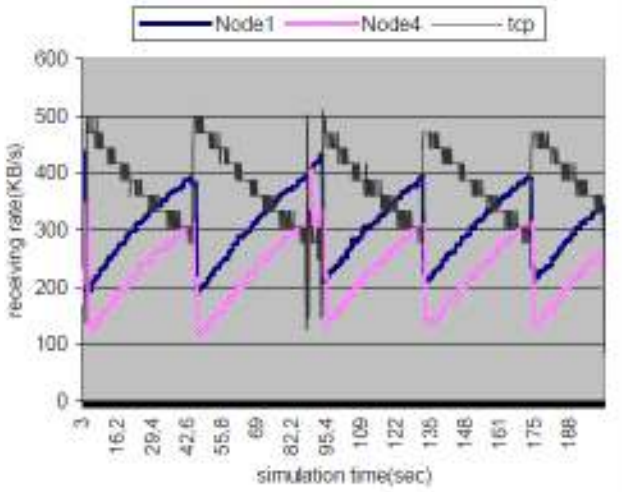
Σχήμα 100. Μετάδοση BL με καθορισμένο ρυθμό

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο ρυθμός λήψης κυμαίνεται μεταξύ 200 και 400 Kb/s. Επίσης οι μετρήσεις του ρυθμού απώλειας των πακέτων μας έχουν δώσει χαμηλές τιμές γεγονός που μας δίνει την αίσθηση ότι η λύση μας ανταποκρίνεται πολύ καλά σε ένα περιβάλλον όπου προσπαθούμε να επιτύχουμε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, μειώνοντας παράλληλα τις απώλειες των πακέτων λόγω της συμφόρησης. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφέρουμε ότι ο μηχανισμός ελέγχου της συμφόρησης είναι

βασισμένος στις αναφορές κατάστασης του πρωτοκόλλου RTCP. Το μειονέκτημα είναι ότι ο χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών RTCP αναφορών είναι μεγαλύτερος του χρόνου RTT με αποτέλεσμα τη μειωμένη απόκριση στις απότομες μεταβολές του δικτύου. Αυτό βέβαια γίνεται ώστε να αυξήσουμε το διαθέσιμο εύρος ζώνης για τη χρήση του από τους δέκτες και όχι από το μηχανισμό ελέγχου της συμφόρησης. Παρατηρούμε επίσης ότι οι δέκτες έχουν χαμηλή απόκριση όταν θα πρέπει να ανακτήσουν το ρυθμό λήψης από χαμηλούς ρυθμούς. Αυτό είναι το αποτέλεσμα των ομαλών ρυθμών εκπομπής που έχουμε συζητήσει στα προηγούμενα κεφάλαια που είναι και οι επιθυμητοί ρυθμοί σε εφαρμογές βίντεο ώστε να αποφεύγουμε τις απότομες μεταβολές που μειώνουν τη ποιότητα υπηρεσιών.

8.2.4 Μελέτη της Φιλικότητας προς το TCP

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης μελετάμε τη φιλικότητα προς το TCP. Έτσι ο παραλήπτης 7 αρχίζει τη μετάδοση μιας TCP ροής προς το παραλήπτη 8 διαμέσου του περιοριστικού συνδέσμου μεταξύ των εξυπηρετητών 2 και 3. Παρατηρούμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχήμα 101) ότι ο εξυπηρετητής μειώνει το ρυθμό μετάδοσης συνέπεια της TCP κίνησης με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέψει τη TCP κίνηση στο δίκτυο. Η λύση μας είναι ξεκάθαρα φιλική προς το TCP αλλά όμως περισσότερο φιλική από ότι θα έπρεπε να είναι. Ο λόγος είναι ότι το TCP διατηρεί υψηλότερη απόκριση στις αλλαγές του δικτύου από ότι η δική μας εφαρμογή για τους λόγους που έχουμε εξηγήσει παραπάνω.

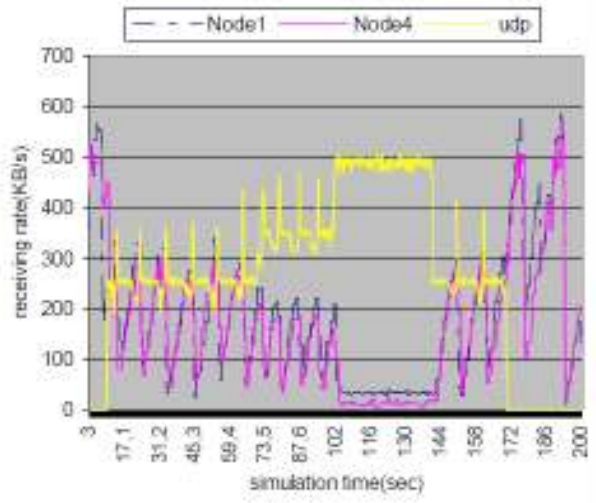


Σχήμα 101. Φιλικότητα προς το TCP

Παρόλα αυτά όμως επιβεβαιώνουμε την ικανότητα της εφαρμογής μας να μεταφέρει τα στρώματα BL και EL σε όλους τους δέκτες και μάλιστα σε ρυθμούς μετάδοσης που μας δίνουν αποδεκτή ποιότητα. Παρατηρούμε επίσης ότι ο γρήγοροι δέκτες απολαμβάνουν και υψηλότερους ρυθμούς λήψης από ότι οι αργοί δέκτες. Επομένως μπορούμε να πούμε ότι η λύση μας η οποία βασίζεται στα πρωτόκολλα RTP/RTCP είναι μια αποδεκτή λύση για τη μετάδοση βίντεο σε ομάδες πολλαπλής εκπομπής σε σχέση με τη φιλικότητα προς το TCP και με αποδεκτούς ρυθμούς εκπομπής.

8.2.5 Απόκριση σε UDP Κίνηση

Σε αυτό το σενάριο εξετάζουμε τη συμπεριφορά και την απόκριση του μηχανισμού ελέγχου της συμφόρησης σε ένα περιβάλλον με UDP κίνηση. Αυτό το σενάριο καθώς και οι συνθήκες του δικτύου είναι περισσότερο απαιτητικές από ότι το προηγούμενο σενάριο με τη TCP κίνηση και αυτό γιατί το πρωτόκολλο UDP δεν διαθέτει κανένα μηχανισμό ελέγχου της συμφόρησης όπως το TCP. Κατά την έναρξη της προσομοίωσης ο παραλήπτης 7 ξεκινά τη μετάδοση της UDP προς το παραλήπτη 8 με ρυθμό 256 Kb/s. Όπως μπορούμε να δούμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχήμα 102) ο εξυπηρετητής ελαττώνει το ρυθμό μετάδοσης εξαιτίας της συμφόρησης που παρατηρείται ανάμεσα στους δρομολογητές 2 και 3. Παρόλα αυτά όμως οι ρυθμοί λήψης κυμαίνονται από 100 έως 200 Kb/s στους δέκτες 1 και 4. Επομένως για να δημιουργήσουμε ένα ακόμη ποιο δύσκολο περιβάλλον για τη κίνηση των δύο στρωμάτων BL και EL αυξάνουμε στο 70κοστό δευτερόλεπτο της προσομοίωσης το ρυθμό του UDP στα 350 Kb/s. Ο εξυπηρετητής ελαττώνει ακόμη περισσότερο το ρυθμό εκπομπής καθώς οι δέκτες αντιλαμβάνονται αύξηση του χρόνου RTT και του ρυθμού απώλειας των πακέτων και αναφέρουν ανάλογα στον εξυπηρετητή τα αποτελέσματα των μετρήσεών τους. Παρόλα αυτά οι δέκτες εξακολουθούν να λαμβάνουν το αρχείο βίντεο σε ρυθμούς λίγο χαμηλότερους από τα 100 Kb/s. Στο 100κοστό δευτερόλεπτο της προσομοίωσης αυξάνουμε ακόμη περισσότερο το ρυθμό μετάδοσης του UDP στα 512 Kb/s και το αποτέλεσμα τώρα στη μετάδοση του βίντεο είναι καταστροφικό. Το UDP καταλαμβάνει σχεδόν όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης και αναγκάζει τον εξυπηρετητή να μειώσει δραστικά το ρυθμό μετάδοσης σε πολύ χαμηλές τιμές. Στο 140κοστό δευτερόλεπτο της προσομοίωσης μειώνουμε το ρυθμό του UDP στα 256 Kb/s και παρατηρούμε ότι οι δέκτες αυξάνουν σταδιακά το ρυθμό λήψης. Η μετάδοση του βίντεο καλύπτει σχεδόν όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Το συμπέρασμά μας από τη προσομοίωση αυτή είναι ότι η εφαρμογή μας είναι σε θέση να αντιμετωπίσει τη UDP κίνηση με πολύ καλά αποτελέσματα εφόσον οι ρυθμοί μετάδοσης του UDP δεν είναι απαγορευτικοί.

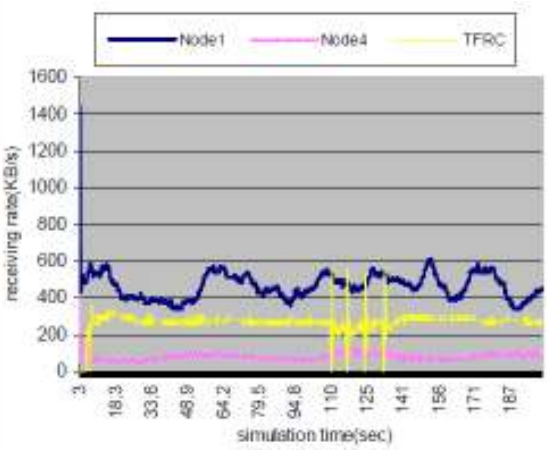


Σχήμα 102. Απόκριση στη UDP κίνηση

8.2.6 Σύγκριση με το TFRC

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης συγκρίνουμε τη πρότασή μας με το μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης TFRC. Το σενάριο της προσομοίωσης έχει ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά με τις προηγούμενες προσομοιώσεις ώστε να έχουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα. Σε αυτή τη περίπτωση τα δύο στρώματα BL και EL μεταδίδονται όπως και προηγουμένως αλλά ο έλεγχος της συμφόρησης γίνεται από το TFRC. Μεταδίδουμε επίσης και μια TCP ροή από το παραλήπτη 7 στο παραλήπτη 8.

Παρατηρούμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχήμα 103) ότι το TFRC παρουσιάζει ομαλότερες διακυμάνσεις από ότι ο δικός μας μηχανισμός ελέγχου της συμφόρησης που είναι ασφαλώς μια επιθυμητή συμπεριφορά για μια εφαρμογή βίντεο. Η συμπεριφορά του TCP είναι και αυτή σταθερή εκτός από ορισμένες περιπτώσεις όπου ο ρυθμός μετάδοσης έχει μηδενικές τιμές. Στη δική μας εφαρμογή το TCP απολάμβανε πάντα υψηλούς ρυθμούς εκπομπής. Παρατηρούμε επίσης ότι ο παραλήπτης 4 (αργός παραλήπτης) έχει πολύ χαμηλούς ρυθμούς λήψης σε αντίθεση με το παραλήπτη 1 (γρήγορος παραλήπτης) που απολαμβάνει πολύ υψηλούς ρυθμούς λήψης. Μια τελευταία παρατήρηση είναι ότι η εφαρμογή μας που είναι βασισμένη στα πρωτόκολλα RTP/RTCP παρουσιάζει γενικά πολύ καλά αποτελέσματα σε ένα περιβάλλον όπου έχουμε να μεταδώσουμε περισσότερες της μίας ροές βίντεο με περιοριστικούς συνδέσμους που πιθανότατα προκαλούν συμφόρηση στο δίκτυο.



Σχήμα 103. Σύγκριση με το TFRC

8.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο έχουμε παρουσιάζει ένα προτεινόμενο πλαίσιο για διαστρωματική προσαρμογή σε υβριδικά δίκτυα που περιλαμβάνουν ενσύρματους και ασύρματους δέκτες για τη μετάδοση πολυμεσικής πληροφορίας και συγκεκριμένα για τη μετάδοση αρχείων βίντεο MPEG-4 FGS. Η κυρίαρχη λογική στη σχεδίασή μας έχει να κάνει με μια "ολιστική" προσέγγιση όπου όλα τα επίπεδα του μοντέλου του OSI συμμετέχουν στη διαδικασία της προσαρμογής. Η σηματοδοσία και η ανταλλαγή των πληροφοριών γίνεται με τα πακέτα και τις αναφορές ελέγχου του πρωτοκόλλου RTP/RTCP. Τα αρχεία βίντεο έχουν κωδικοποιηθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται δύο ροές (στρώματα) που το κάθε ένα μεταφέρει διαφορετική πληροφορία. Το βασικό στρώμα BL μεταφέρει κυρίως το περιεχόμενο του βίντεο και

το στρώμα EL περισσότερες λεπτομέρειες έτσι ώστε η σύζευξη των δύο αυτών στρωμάτων να παρέχουν εικόνα βίντεο με πολύ καλή ποιότητα.

Εξετάσαμε τη συμπεριφορά του πλαισίου σε ένα δικτυακό περιβάλλον με ετερογενείς δέκτες όπου για την υποστήριξη των ενσύρματων δεκτών χρησιμοποιούνται εκτιμήσεις βασισμένοι στο αναλυτικό μοντέλο του TCP. Για την υποστήριξη των ασύρματων δεκτών χρησιμοποιούμε διαστρωματική σχεδίαση.

Εξετάσαμε την απόδοση του πλαισίου με μια σειρά προσομοιώσεων σε μια ομάδα από ετερογενείς ενσύρματους και ασύρματους δέκτες. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδεικνύουν ότι το μοντέλο μας μπορεί να αποτελέσει μια λύση για τη μετάδοση βίντεο το οποίο είναι βασισμένο στο πρότυπο MPEG-4 FGS.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι εφαρμογές πολυμέσων και ιδιαίτερα η μετάδοση αρχείων βίντεο αποσπούν όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον των χρηστών του Διαδικτύου και είναι ενδεχόμενο τα επόμενα χρόνια η αύξηση της κυκλοφορίας των πολυμεσικών πληροφοριών να καλύψει το μεγαλύτερο τμήμα του συνολικού όγκου της πληροφορίας που μεταδίδεται τόσο στο Διαδίκτυο όσο και στα ασύρματα δίκτυα. Η τάση αυτή δημιουργεί αυτόματα και την ανάγκη για τον έλεγχο της ροής της πληροφορίας των εφαρμογών πολυμέσων που μεταδίδονται στο Διαδίκτυο ώστε να αντιμετωπισθούν κυρίως δύο θέματα. Το πρώτο θέμα έχει να κάνει με τη φιλική συμπεριφορά των εφαρμογών πολυμέσων προς τις εφαρμογές που είναι βασισμένες στο πρωτόκολλο TCP. Η σοβαρότητα του θέματος έγκειται στο γεγονός ότι το πρωτόκολλο TCP είναι το βασικό πρωτόκολλο μεταφοράς πολλών δημοφιλών εφαρμογών στο Διαδίκτυο. Επομένως η όποια ανεξέλεγκτη εκπομπή πολυμεσικής πληροφορίας στο Διαδίκτυο εγκυμονεί κινδύνους για τις εφαρμογές που είναι βασισμένες στο πρωτόκολλο TCP. Έτσι θα πρέπει να χρησιμοποιούμε μηχανισμούς ελέγχου ροής / συμφόρησης αντίστοιχους με τους μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται από το TCP ώστε να αντιμετωπίζεται η πιθανή συμφόρηση του δικτύου. Ένα δεύτερο ζητούμενο το οποίο δεν έχει ακόμα επιλυθεί είναι η παροχή ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service, QoS) από άκρο σε άκρο για τις εφαρμογές πολυμέσων αν και αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας τα τελευταία χρόνια. Η παροχή ποιότητας υπηρεσιών έχει μεγάλη συνάφεια με τη χρήση μηχανισμών έλεγχου συμφόρησης καθόσον οι απώλειες και οι καθυστερήσεις στη μετάδοση των πακέτων συνέπεια της συμφόρησης του δικτύου επιδρούν αρνητικά στη ποιότητα που προσφέρεται στο τελικό χρήστη.

Έτσι λοιπόν η μελέτη για τη σχεδίαση και την υλοποίηση μηχανισμών ελέγχου της συμφόρησης για την μετάδοση των πληροφοριών πολυμέσων έχει κερδίσει τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας. Τα πρωτόκολλα TFRC, TFMCC, PGMCC και SMCC είναι τα περισσότερα γνωστά στο χώρο αυτό αν και μόνο το TFRC έχει χαρακτηρισθεί ως διεθνές πρότυπο από την IETF. Επομένως η περιοχή αυτής της έρευνας είναι ακόμη ανοικτή σε νέες και αποτελεσματικότερες προτάσεις.

Προς τη κατεύθυνση αυτή στη παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήσαμε καταρχήν τις προτεινόμενες λύσεις στη βιβλιογραφία που είναι το αποτέλεσμα των ερευνών τα τελευταία χρόνια σε αυτή τη περιοχή έρευνας. Η μελέτη κυρίως των μειονεκτημάτων των προτάσεων αυτών μας οδήγησε στη σχεδίαση νέων μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης σε δύο διαφορετικές τεχνικές δρομολόγησης όπως παρακάτω:

- Δρομολόγηση πολλαπλής διανομής μιας ροής (single-rate multicasting)

Στη περιοχή αυτή σχεδιάσαμε ένα νέο πρωτόκολλο μεταφοράς πρωτόκολλο με την ονομασία Adaptive Smooth Multicast Protocol (ASMP) με το οποίο μπορούμε να προσαρμόζουμε το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων με βάση τις εκάστοτε συνθήκες του δικτύου. Κατά το ASMP ο υπολογισμός ενός φιλικού προς το TCP ρυθμού μετάδοσης δεν περιορίζεται μόνο στις μετρήσεις του χρόνου RTT και των τιμών του ρυθμού απώλειας πακέτων. Το ASMP “φιλτράρει” τη τιμή του ρυθμού μετάδοσης με βάση στατιστικές μετρήσεις της καθυστέρησης της διακύμανσης (delay jitter). Οι μηχανισμοί των αναφορών ελέγχου της κατάστασης του δικτύου είναι δομημένοι πάνω στο πρωτόκολλο RTP/RTCP. Έτσι η χρησιμοποίηση των μηχανισμών του

RTCP εξαλείφει την ανάγκη της δημιουργίας νέων μηχανισμών αναφορών ελέγχου, που θα απαιτούσαν την αποστολή επιπρόσθετων πακέτων, καταλαμβάνοντας έτσι ένα τμήμα από το ωφέλιμο εύρος ζώνης του χρήστη.

Το ASMP επεκτείνει τη λειτουργικότητα των πρωτοκόλλων RTP/RTCP με βάση την RFC 3550. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδεικνύουν ότι το ASMP παρουσιάζει πολύ καλή απόδοση κάτω από δύσκολες συνθήκες του δικτύου όπου παρατηρούνται υψηλοί ρυθμοί απώλειας πακέτων λόγω της ύπαρξης άλλων ανταγωνιστικών πηγών. Η επεκτασιμότητα του ASMP εξασφαλίζεται από το πρωτόκολλα RTCP και επιπρόσθετους μηχανισμούς καταστολής των αναφορών ελέγχου.

Συγκρίναμε στη συνέχεια την απόδοση του ASMP με δύο γνωστούς μηχανισμούς ελέγχου της συμφόρησης, το TFMCC και το PGMCC. Κατά τη σύγκριση αυτή παρατηρήσαμε ότι το ASMP παρουσίασε πολύ καλή απόδοση όταν ανταγωνίζεται για τις πηγές του δικτύου με άλλες TCP ροές ενώ το TFMCC φαίνεται λιγότερο φιλικό προς το TCP. Η φιλικότητα του PGMCC προς το TCP είναι σχεδόν παρόμοια με αυτή του ASMP.

Το TFMCC παρουσίασε μεγάλες διαταραχές στο ρυθμό μετάδοσης σε αντίθεση με το ASMP το οποίο διατηρεί ομαλές μεταβολές του ρυθμού μετάδοσης σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης. Η απόδοση του PGMCC ομοιάζει με αυτή του ASMP σε ότι αφορά το κριτήριο της ομαλότητας του ρυθμού μετάδοσης σε συνθήκες δικτύου με μικρό αριθμό ανταποκριτών και μικρές τιμές του ρυθμού απώλειας πακέτων.

Το ASMP παρουσίασε υψηλή απόκριση στις απώλειες των πακέτων και έδειξε ότι προσαρμόζεται πολύ εύκολα στις συνθήκες του δικτύου, αν και ο χρόνος που απαιτείται για τη προσαρμογή αυτή είναι μεγαλύτερος συγκριτικά με το TFMCC και το PGMCC.

Η επεκτασιμότητα του ASMP ελέγχεται από το πρωτόκολλο RTCP όπου σύμφωνα με αυτό μόνο ένα 5% από το συνολικό εύρος ζώνης μπορεί να χρησιμοποιείτε για τη κυκλοφορία των αναφορών ελέγχου της κατάστασης του δικτύου. Σε μεγάλες ομάδες δεκτών η διαφορά χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών RTCP αναφορών αυξάνει, οπότε απαιτούνται επιπλέον μηχανισμοί καταστολής των αναφορών κατάστασης. Σε αντίθεση το TFMCC διαθέτει ενδογενείς μηχανισμούς ελέγχου των αναφορών κατάστασης με την εκλογή του αντιπροσώπου της ομάδας (CLR). Η επεκτασιμότητα του PGMCC εξαρτάται από τη βοήθεια των υπολοίπων στοιχείων του δικτύου (δρομολογητές). Σε κάθε περίπτωση το PGMCC απαιτεί από όλους τους δέκτες να αποστέλλουν αναφορές NACs έτσι ώστε να είναι δυνατή η εκλογή του αντιπροσώπου της ομάδας (*acker*).

Κατά τη διάρκεια της μελέτης για την απόδοση του ASMP και τη σύγκρισή του με άλλες πιθανές λύσεις διαπιστώσαμε ότι οι μέχρι τώρα έρευνες είχαν επικεντρωθεί σε μετρήσεις των "κλασικών" μετρικών δικτύων όπως η ρυθμοαπόδοση, ο ρυθμός απώλειας πακέτων, η καθυστέρηση μετάδοσης και άλλα. Αυτό που πραγματικά δημιουργούσε όμως ένα κενό ήταν η έλλειψη μετρικών ποιότητας που είναι άμεσα συνδεδεμένα με τη ποιότητα υπηρεσιών των εφαρμογών πολυμέσων και ιδιαίτερα των εφαρμογών μετάδοσης βίντεο για δύο κυρίως λόγους:

- Με τη χρησιμοποίηση των μετρικών δικτύων ως κριτηρίων για την εκτίμηση της καταλληλότητας ενός μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης σε μια εφαρμογή πολυμέσων και ιδιαίτερα σε μια εφαρμογή μετάδοσης αρχείων βίντεο δεν

λαμβάνεται υπόψη η αντίληψη του χρήστη σε αυτό που εκείνος θεωρεί καλή ή κακή ποιότητα.

- Είναι πάρα πολύ δύσκολο να μετατρέψει κανείς ή και να συσχετίσει τα μετρικά δικτύων σε μετρικά που έχουν σχέση με τη ποιότητα υπηρεσίας στο τελικό χρήστη, αυτό που διεθνώς ονομάζεται Ποιότητα Εμπειρίας (Quality of Experience-QoE).

Έτσι λοιπόν οι επισημάνσεις αυτές μας οδήγησαν στη μελέτη των μεθόδων μέσα από τις οποίες είναι δυνατόν να εκτιμήσουμε τη Ποιότητα Εμπειρίας του τελικού χρήστη που είναι άμεσα συνδεδεμένη με την απόδοση του μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης. Σε αυτή τη κατεύθυνση έπρεπε να επιλύσουμε δύο κυρίως θέματα. Το πρώτο θέμα είχε να κάνει με το καθορισμό των κριτηρίων μέσω των οποίων θα μπορούσαμε να εκτιμήσουμε την απόδοση του μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης. Κύριο οδηγό μας αποτέλεσαν οι συστάσεις της ITU-T στο θέμα αυτό καθώς και η υπάρχουσα βιβλιογραφία αν και ήταν πολύ περιορισμένη στο θέμα αυτό. Το δεύτερο θέμα ήταν η υλοποίηση καθώς έπρεπε να εκτελέσουμε μια σειρά από τροποποιήσεις στο λογισμικό προσομοίωσης ns-2 και να ενσωματώσουμε μια σειρά από νέα εργαλεία τα οποία θα επέτρεπαν τις μετρήσεις που είναι σχετικές με τη Ποιότητα Εμπειρίας του χρήστη. Το αποτέλεσμα της προσπάθειάς μας απέδωσε ένα νέο περιβάλλον προσομοιώσεων μέσα από το οποίο δίνονται οι παραπάνω δυνατότητες.

Έτσι λοιπόν εξετάσαμε την απόδοση του ASMP μέσα από το νέο αυτό περιβάλλον προσομοίωσης και συγκρίναμε την απόδοσή του με το TFMCC χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά μετρικά ποιότητας βίντεο. Στις νέες μετρήσεις μας διαπιστώσαμε ότι το TFMCC είναι ποιο αποτελεσματική λύση όταν η εκμετάλλευση του διατιθέμενου εύρου ζώνης και οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης είναι το κύριο ενδιαφέρον σε μια εφαρμογή. Το μειονέκτημα του TFMCC είναι όμως οι απότομες αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης λόγω της ομοιότητάς του προς το πρωτόκολλο TCP. Αυτές όμως οι αυξομειώσεις οδηγούν στην αύξηση του επιπέδου συμφόρησης και στην απώλεια πακέτων με άμεση συνέπεια τις χαμηλές PSNR τιμές. Το ASMP από την άλλη μεριά απέδειξε ότι είναι ένα πρωτόκολλο που προσφέρει καλύτερης ποιότητας βίντεο στο τελικό χρήστη με υψηλές τιμές της κλίμακας MOS. Η ομαλή συμπεριφορά του μειώνει τις απώλειες πακέτων αλλά όχι όμως και την απόκρισή του στις μεταβολές του δικτύου λόγω της παρουσίας άλλων ανταγωνιστικών πηγών.

Οι απώλειες πακέτων έχουν αρνητικό αποτέλεσμα στη ποιότητα του βίντεο διότι μειώνουν τις τιμές PSNR. Επομένως, πιστεύουμε ότι ρυθμοί μετάδοσης που δεν είναι ιδιαίτερα υψηλοί αλλά που ικανοποιούν τις απαιτήσεις μιας εφαρμογής βίντεο με μικρό αριθμό απώλειας πακέτων είναι η επιθυμητή συμπεριφορά από τις εφαρμογές αυτές. Σε αντίθετη περίπτωση, θα πρέπει να εφαρμοσθούν μηχανισμοί διόρθωσης λαθών τουλάχιστο για την επανάκτηση των I πλαισίων στο παραλήπτη που έχουν και τη μεγαλύτερη αξία από πλευράς πληροφορίας.

Διαπιστώσαμε επίσης ότι η "επιθετικότητα" ενός πρωτοκόλλου μεταφοράς πρέπει να σχεδιάζεται πολύ προσεκτικά έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ισορροπία μεταξύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης, μικρής απώλειας πακέτων και αποφυγής υψηλών αυξομειώσεων στο ρυθμό μετάδοσης. Ιδιαίτερα οι αυξομειώσεις αυτές έχουν αρνητική επίδραση στη ποιότητα του βίντεο στο τελικό χρήστη. Το ASMP απέδειξε την ικανότητά του να μεταφέρει MPEG-4 βίντεο αρχεία με υψηλή ποιότητα. Οι χαμηλές τιμές της σωρευτικής διακύμανσης μειώνουν τη τιμή της χρονικής διάρκειας του απομονωτή και κατά συνέπεια το νεκρό χρόνο πριν να αρχίσει η αναπαραγωγή του βίντεο στο τερματικό του χρήστη.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με ανταγωνιστικές UDP πηγές πληροφορίας απέδειξαν ότι το ASMP είναι σε θέση να προσαρμόζει το ρυθμό εκπομπής ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες του δικτύου. Το TFMCC έχει όμως υψηλότερο ρυθμό απόκρισης και επομένως ανταποκρίνεται καλύτερα στις απότομες αλλαγές της κατάστασης του δικτύου.

Η μετάδοση βίντεο χωρίς κανένα έλεγχο ή περιορισμό σε ότι αφορά το ρυθμό μετάδοσης οδηγεί σε απώλειες πακέτων και κατά συνέπεια στη μείωση της ποιότητας του βίντεο. Παρόλα αυτά η εφαρμογή μόνο μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης δεν αποτελεί πανάκεια για την επίλυση του προβλήματος. Ποιο αποτελεσματικοί μέθοδοι κωδικοποίησης σε συνεργασία με μηχανισμούς ελέγχου και διόρθωσης λαθών και σε ένα περιβάλλον με συνδέσεις υψηλής ταχύτητας αποτελούν τα κλειδιά ώστε να αυξήσουμε τη ποιότητα υπηρεσίας στο τελικό χρήστη.

Τέλος η σύγκριση του TFMCC και του ASMP με μετρικά ποιότητας βίντεο έδειξε ότι η μελέτη της απόδοσης μηχανισμών ή πρωτοκόλλων μεταφοράς που στοχεύουν στη μετάδοση βίντεο δεν είναι πλήρης όταν λαμβάνονται υπόψη μόνο "κλασικά" μετρικά δικτύων. Έτσι λοιπόν θα πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνονται υπόψη μετρικά που έχουν άμεση σχέση με τη ποιότητα του βίντεο όπως την αντιλαμβάνεται αυτή ο τελικός χρήστης.

- Τεχνική μετάδοσης simulcast

Στη περιοχή αυτή της έρευνας σχεδιάσαμε ένα νέο πρωτόκολλο με την ονομασία Adaptive Smooth Simulcast Protocol (ASSP) το οποίο συνιστά τη πρότασή μας σε ότι αφορά τη μετάδοση πολλαπλής ροής με τη τεχνική simulcast σε δικτυακά περιβάλλοντα στα οποία δεν παρέχεται καμία εγγύηση υπηρεσιών, όπως το Διαδίκτυο. Κατά τη μελέτη των υπαρχόντων μηχανισμών μετάδοσης στη βιβλιογραφία με τη τεχνική simulcast διαπιστώσαμε κυρίως δύο μειονεκτήματα τα οποία έχουν αρνητική επίδραση στην απόδοση των μηχανισμών αυτών. Το πρώτο μειονέκτημα είναι ότι ο ρυθμός μετάδοσης της κάθε ροής είναι προκαθορισμένος, χωρίς να υπάρχει καμία δυνατότητα προσαρμογής όταν αλλάζουν οι συνθήκες του δικτύου. Το δεύτερο μειονέκτημα σχετίζεται με τη χρήση του πρωτοκόλλου Internet Group Management Protocol (IGMP) όταν ο χρήστης διαγράφεται από μια σύσκεψη ώστε να κάνει εγγραφή σε μια νέα σύσκεψη, όπου ο ρυθμός μετάδοσης είναι πλησιέστερα στις δυνατότητες λήψης του ανταποκριτή αυτού. Ο χρόνος για να ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως "*καθυστέρηση απομάκρυνσης*" (leave latency). Η μεγάλη χρονική διάρκεια της διαδικασίας αυτής που σχετίζεται άμεσα με το σχεδιασμό του πρωτοκόλλου IGMP και τους δρομολογητές του δικτύου δημιουργεί συμφόρηση στο δίκτυο. Εάν το πρωτόκολλο μεταφοράς αντιδρά πολύ γρήγορα στις στιγμιαίες και απότομες αλλαγές του δικτύου τότε θα αυξάνονται οι εγγραφές/διαγραφές από μια σύσκεψη σε μια άλλη. Αυτή η κατάσταση θα δημιουργεί συμφόρηση στο δίκτυο. Έτσι λοιπόν το ASSP σχεδιάσθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιμετωπίζει τα παραπάνω δύο προβλήματα.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι το ASSP παρουσιάζει υψηλή σταθερότητα, με ελάχιστες αυξομειώσεις του ρυθμού μετάδοσης που προκαλούνται από τις καθυστερήσεις και τη μεταβολή του διαθεσίμου εύρου ζώνης στις ζεύξεις του δικτύου. Ο σχεδιασμός του ASSP μειώνει τις αιτήσεις εγγραφής/διαγραφής από μια ροή χαμηλότερου σε μια ροή υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης και αντίστροφα. Οι χαμηλές τιμές απώλειας πακέτων επιβεβαιώνουν το σωστό σχεδιασμό του μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης που εφαρμόζει το ASSP, εφόσον ο μηχανισμός αυτός απέδειξε ότι είναι σε θέση να ανιχνεύει αποτελεσματικά την επερχόμενη

συμφόρηση του δικτύου και να προσαρμόζει ανάλογα το ρυθμό μετάδοσης.

Σε ότι αφορά τη φιλικότητα προς το TCP είμαστε απόλυτα ικανοποιημένοι διότι τα πειράματα έδειξαν ότι το ASSP μοιράζεται ισομερώς το διατιθέμενο εύρος ζώνης με τις TCP ροές. Το ASSP παρουσίασε επίσης υψηλή φιλικότητα προς τις ροές του ιδίου πρωτοκόλλου καθώς οι μετρήσεις του δείκτη Jain μας έδωσαν τιμές πολύ κοντά στο απόλυτο 1.0 που χαρακτηρίζει την άψογη συμπεριφορά ενός πρωτοκόλλου μεταφοράς σε ότι αφορά το δίκαιο καταμερισμό του διαθέσιμου εύρου ζώνης από διαφορετικές ροές που μοιράζονται τις πηγές του δικτύου.

Ένα άμεσο αποτέλεσμα από τις απώλειες των πακέτων σε μια μετάδοση βίντεο είναι η μείωση των τιμών του PSNR. Έχουμε παρατηρήσει τη μείωση αυτή όταν το ASSP μοιράζεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης με το UDP, το οποίο δεν διαθέτει κανένα μηχανισμό ελέγχου ροής. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός απώλειας των πακέτων τόσο χαμηλότερες και οι τιμές PSNR που αντανακλούν στη παρεχόμενη ποιότητα βίντεο προς το τελικό χρήστη.

Συγκρίναμε επίσης ASSP με το Smooth Multi-rate Congestion Control (SMCC) το οποίο αποτελεί μια άλλη πρόταση στη περιοχή των μηχανισμών ελέγχου της συμφόρησης σε σχήματα πολλαπλών ροών πολλαπλής διανομής. Συγκεκριμένα το SMCC είναι ένας μηχανισμός ελέγχου ροής/συμφόρησης που απευθύνεται σε μετάδοση που χρησιμοποιούνται τεχνικές κωδικοποίησης των δεδομένων σε στρώματα (layered encoded). Έτσι διαπιστώσαμε ότι η απόδοση του SMCC εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αρχική ρύθμιση του ρυθμού μετάδοσης του βασικού στρώματος, ενώ αντίστοιχα για τη σωστή λειτουργία του ASSP απαιτείται η γνώση εκ των προτέρων της χωρητικότητας των ζεύξεων με τις οποίες συνδέονται οι διάφορες ομάδες πολλαπλής διανομής με τον αποστολέα. Και τα δύο πρωτόκολλα απέδειξαν ότι είναι φιλικά προς το TCP καθώς μοιράζονται ισομερώς το διαθέσιμο εύρος ζώνης με το TCP. Οι μετρήσεις του δείκτη Jain μας έδωσαν τιμές 0.99 σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης. Το ASSP παρουσίασε καλύτερη απόδοση από το SMCC σε ότι αφορά την εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης καθώς επίσης και καλύτερη κλιμάκωση στις ζεύξεις υψηλής χωρητικότητας σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης. Οι μετρήσεις της καθυστέρησης έδειξαν ότι και τα δύο πρωτόκολλα παρουσίασαν πολύ καλή απόδοση με τη διαφορά ότι το ASSP είχε υψηλότερη απόδοση από το SMCC. Αντίθετα το SMCC είναι περισσότερο αποτελεσματικό στην απόκρισή του σε ότι αφορά τη συμφόρηση του δικτύου καθώς η απόκριση του ASSP εξαρτάται από τις RTCP αναφορές ελέγχου. Αυτές οι αναφορές ελέγχου μεταδίδονται σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα από ότι οι αναφορές ελέγχου του SMCC. Οι προσομοιώσεις με διαφορετικές RTT τιμές έδειξαν ότι το ASSP είναι περισσότερο σταθερό από ότι το SMCC.

Σε ότι αφορά τη διαστρωματική προσαρμογή διαπιστώσαμε από τη μέχρι τώρα προσέγγιση της ερευνητικής κοινότητας ότι η προσαρμογή λαμβάνει υπόψη μόνο ένα υποσύνολο των επιπέδων του μοντέλου του OSI. Αυτό που διαφοροποιεί τη δική μας σχεδίαση είναι ότι η κυρίαρχη λογική έχει να κάνει με μια "ολιστική" προσέγγιση όπου όλα τα επίπεδα του μοντέλου του OSI συμμετέχουν στη διαδικασία προσαρμογής. Επιπλέον στη σχεδίασή μας έχουμε συμπεριλάβει το σενάριο όπου η ανταλλαγή της πληροφορίας γίνεται ταυτόχρονα μεταξύ ενσύρματων και ασύρματων ανταποκριτών παρέχοντας έτσι μια ποιο ολοκληρωμένη προσέγγιση καθόσον η πλειοψηφία των δικτύων σήμερα αποτελείται τόσο από ασύρματους όσο και από ενσύρματους ανταποκριτές.

Η πρότασή μας είναι ποιο ολοκληρωμένη σε σχέση με προηγούμενες προτάσεις που

εμφανίζονται στη βιβλιογραφία για τους παρακάτω λόγους: Πρώτα από όλα τα αίτια της απώλειας των πακέτων είναι διαφορετικά στα ασύρματα από ότι στα ενσύρματα δίκτυα. Έτσι λοιπόν δημιουργείται η ανάγκη για διαφορετικούς μηχανισμούς διόρθωσης λαθών και ελέγχου της συμφόρησης. Δεύτερον, στο ενσύρματο τμήμα του προτεινόμενου πλαισίου μπορούμε εύκολα να υλοποιήσουμε μηχανισμούς ελέγχου της συμφόρησης με τη χρήση νέων πρωτοκόλλων τα οποία έχουν σχεδιασθεί για τη μετάδοση της πολυμεσικής πληροφορίας. Τρίτον, με το προτεινόμενο πλαίσιο μειώνουμε την "απόσταση", στην ουσία τον αριθμό των ενδιαμέσων κόμβων για τη μετάδοση της πληροφορίας από τον αποστολέα στους ασύρματους ανταποκριτές. Έτσι είναι δυνατόν να πετύχουμε τοπική αναμετάδοση RTP πακέτων στους ασύρματους ανταποκριτές ικανοποιώντας παράλληλα τους περιορισμούς της εφαρμογής που έχουν σχέση με τις μέγιστες τιμές της καθυστέρησης των πακέτων.

Η πειραματική αξιολόγηση του προτεινόμενου πλαισίου έδειξε ότι η εφαρμογή του είναι δυνατόν να αποτελέσει μια λύση σε υπάρχοντα αλλά και μελλοντικά υβριδικά δίκτυα με στόχο την αύξηση των παρεχομένων υπηρεσιών ποιότητας (QoS) στο τελικό χρήστη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η μελλοντική εργασία η οποία μπορεί να επιτελεστεί έχοντας σαν βάση τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής θα μπορούσε να κινηθεί στους παρακάτω άξονες:

- Βελτιστοποίηση της απόδοσης του πρωτοκόλλου Adaptive Smooth Multicast Protocol (ASMP).
- Βελτιστοποίηση της απόδοσης του πρωτοκόλλου Adaptive Smooth Simulcast Protocol (ASSP).
- Επεκτάσεις στο περιβάλλον προσομοίωσης
- Βελτιστοποίηση της απόδοσης του πλαισίου για τη διαστρωματική προσαρμογή.

Σε ότι αφορά το πρωτόκολλο ASMP η βελτιστοποίησή του μπορεί να επιτευχθεί όπως παρακάτω:

Τιμές μεταβλητής γ

Οι τιμές της μεταβλητής γ (Εξίσωση 27) έχουν σημασία στην αποδοτική λειτουργία του αλγόριθμου αποφυγής της συμφόρησης γιατί οι χαμηλές τιμές κάνουν γενικά τον αλγόριθμο αποφυγής της συμφόρησης λιγότερο ευαίσθητο στις αλλαγές της κατάστασης του δικτύου. Στη διατριβή αυτή χρησιμοποιήθηκαν καθορισμένες τιμές της παραμέτρου γ (Εξίσωση 31) με βάση αποτελέσματα προσομοιώσεων όπου εξετάσαμε την απόδοση του ASMP με διαφορετικές τιμές του γ σε όλο το πεδίο ορισμού των τιμών του. Οι τιμές αυτές όμως είναι σταθερές ανεξάρτητα από το περιβάλλον όπου λειτουργεί το ASMP. Για παράδειγμα όταν χρησιμοποιούμε το ASMP σε ενσύρματα δίκτυα αναμένουμε πολύ λιγότερες διακυμάνσεις στη κατάσταση του δικτύου από ότι σε ένα περιβάλλον ελεύθερης διάδοσης όπως στα ασύρματα δίκτυα. Εκεί λοιπόν θα πρέπει η τιμή αναφοράς του φίλτρου γ να είναι διαφορετική έτσι ώστε το ASMP να είναι σε θέση να προσαρμόζεται ταχύτερα στις απότομες μεταβολές του δικτύου.

Χρήση του πρωτοκόλλου RTCP για την υλοποίηση του μηχανισμού αποστολής και λήψης αναφορών ελέγχου.

Η χρήση του πρωτοκόλλου RTCP παρέχει σαφώς αρκετά πλεονεκτήματα μόνο και μόνο από το γεγονός ότι το RTCP αποτελεί το πρωτόκολλο ελέγχου του RTP και παρέχει πολλές δυνατότητες ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μηχανισμός ελέγχου από μια εφαρμογή. Το μεγάλο μειονέκτημα όμως με τη χρήση του RTCP είναι ότι καταλαμβάνει μόνο ένα συγκεκριμένο ποσοστό (5%) από το διαθέσιμο εύρος ζώνης για την αποστολή αναφορών κατάστασης ελέγχου, ανεξάρτητα από τον αριθμό των ανταποκριτών. Έτσι όταν ο αριθμός των ανταποκριτών αυξάνει τόσο αυξάνει και το διάστημα χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών αναφορών ελέγχου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χαμηλή απόκριση του ASMP στις αλλαγές του δικτύου η οποία επηρεάζει ασφαλώς και την απόδοσή του. Επομένως θα πρέπει καταρχήν να εξετασθεί η απόδοση του ASMP με ένα μεγάλο αριθμό ανταποκριτών της τάξεως των μερικών χιλιάδων για να δούμε τη συμπεριφορά του

και να αυξήσουμε ανάλογα το ποσοστό του εύρους ζώνης που διατίθεται για την αποστολή των αναφορών ελέγχου. Το ποσοστό αυτό δεν θα πρέπει να είναι καθορισμένο κατά την έναρξη του ASMP αλλά θα πρέπει να ρυθμίζεται δυναμικά ανάλογα με τον αριθμό των ανταποκριτών που λαμβάνουν μέρος στη σύσκεψη πολλαπλής διανομής.

Σε ότι αφορά το πρωτόκολλο ASSP η βελτιστοποίησή του μπορεί να επιτευχθεί όπως παρακάτω:

Τιμές μεταβλητών πρωτοκόλλου

Οι τιμές των μεταβλητών του πρωτοκόλλου έχουν εξαχθεί μετά από μια σειρά προσομοιώσεων όπου εξετάσαμε τη λειτουργία του ASSP κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Οι τιμές αυτές είναι σταθερές και δεν μπορούν να λάβουν υπόψη όλα τα πιθανά σενάρια χρήσης του ASSP. Αν και η σχεδίαση του ASSP απευθύνεται για τη χρήση του στα ενσύρματα δίκτυα αυτό το δεν αποκλείει τη χρήση του και σε ασύρματα δίκτυα. Η συμπεριφορά του πρωτοκόλλου όμως θα είναι διαφορετική με τις παρούσες τιμές των μεταβλητών γιατί έχουν σχέση με τη ταχύτητα απόκρισής του στις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου, όπου η εναλλαγή των συνθηκών αυτών θα είναι πολύ συχνότερη για τους ασύρματους ανταποκριτές. Αλλά ακόμη και στα ενσύρματα δίκτυα θα είχαμε καλύτερη συμπεριφορά του ASSP εάν οι μεταβλητές αυτές ελάμβαναν υπόψη τις συνθήκες του δικτύου ώστε οι τιμές τους να ορίζονται δυναμικά.

Αριθμός ροών στη simulcast μετάδοση

Όπως σχεδιάσαμε το πρωτόκολλο ASSP χρησιμοποιήσαμε μόνο τρεις διαφορετικές ροές, όπως γίνεται κυρίως σήμερα με τη τεχνική της simulcast μετάδοσης (χαμηλή, μέση, υψηλή ποιότητα). Οι δέκτες ακολουθούν τη ροή εκείνη που βρίσκεται πλησιέστερα στις δυνατότητες λήψης τους. Εάν υποθέσουμε ότι όλοι οι χρήστες μπορούν να καταταχθούν σε μια από τις τρεις κατηγόριες λήψης τότε η σχεδίασή μας ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες. Αυτό όμως δεν είναι απόλυτα βέβαιο ούτε και σωστό καθώς οι χρήστες σήμερα του διαδικτύου παρουσιάζουν μια μεγαλύτερη ποικιλομορφία σε ότι αφορά τους ρυθμούς πρόσβασης. Επομένως θα πρέπει να γίνει μια επέκταση του ASSP όπου ο αριθμός των διαφορετικών ροών δεν θα είναι σταθερός αλλά θα μεταβάλλεται ανάλογα με τις δυνατότητες των χρηστών σε ότι αφορά τη ταχύτητα πρόσβασής τους.

Επιλογή πεδίου τιμών για το ρυθμό μετάδοσης κάθε μιας ροής

Η επιλογή μας για το ρυθμό μετάδοσης δεν ήταν αποτέλεσμα κάποιας μελέτης αλλά βασίστηκε κυρίως στους ρυθμούς μετάδοσης των ADSL συνδρομητών στη χώρα μας που βρίσκονται κυρίως στη περιοχή από 256 Kb/s έως 2048 Kb/s. Σε μια πραγματική εφαρμογή θα μπορούσαμε ίσως να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τη ταχύτητα πρόσβασης των χρηστών κατά την έναρξη της εφαρμογής τους. Όταν αυτό γίνεται γνωστό τότε θα μπορούσαμε να ρυθμίσουμε έτσι το ASSP ώστε να προσαρμόσει δυναμικά το άνω και κάτω όριο σε κάθε μια διαφορετική ροή και σε συνδυασμό τον αριθμό των ροών να είναι σε θέση να εξυπηρετήσει κατά το καλύτερο ένα μεγάλο αριθμό χρηστών.

Επιλογή κωδικοποίησης αρχείων βίντεο.

Κατά τις προσομοιώσεις μας χρησιμοποιήσαμε κωδικοποίηση MPEG-4 Part 2 (Advanced Simple Profile (ASP) όπου υποστηρίζει τη κωδικοποίηση B πλαισίων. Η κωδικοποίηση κατά H.264/SVC προσφέρει μεγαλύτερες δυνατότητες επιλογής

περισσοτέρων της μιας ροής χωρίς να απαιτείται η κωδικοποίηση του αρχείου βίντεο ξεχωριστά για κάθε μια ροή. Επομένως η μελέτη της απόδοσης του ASSP με κωδικοποίηση H.264/SVC θα πρόσφερε χρήσιμα συμπεράσματα για τη περαιτέρω βελτίωσή του.

Σε ότι αφορά το περιβάλλον προσομοίωσης μπορούν να γίνουν οι παρακάτω επεκτάσεις:

Δυνατότητα χρήσης αρχείων βίντεο με κωδικοποίηση H.264/SVC.

Η κωδικοποίηση H.264/SVC προσφέρει μεγάλες δυνατότητες προσαρμογής και μόνο αυτό το γεγονός τη καθιστά πολύ ελκυστική λύση σε κάθε προσπάθεια σχεδίασης πρωτοκόλλων με δυνατότητες προσαρμογής σε πραγματικό χρόνο.

Επέκταση της multicast μετάδοσης και σε ασύρματους ανταποκριτές

Οι βιβλιοθήκες του λογισμικού προσομοίωσης δεν υποστηρίζουν μετάδοση multicast σε ασύρματους δέκτες. Εάν λοιπόν επιθυμούμε να επεκτείνουμε την έρευνά μας σε ασύρματα δίκτυα τότε θα πρέπει να γίνουν και οι ανάλογες προσθήκες στο λογισμικό προσομοίωσης.

Δυσκολία χρήσης του λογισμικού προσομοίωσης

Το λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε για την εκτέλεση των προσομοιώσεων έχει πολύ υψηλή ακρίβεια για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων αλλά όμως είναι αρκετά πολύπλοκο στη χρησιμοποίηση του και απαιτεί πολύ χρόνο εκμάθησης ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πειράματα ειδικά με αρχεία βίντεο. Η ανάπτυξη ίσως ενός Graphical User Interface (GUI) θα απλοποιούσε τη χρήση του.

Τέλος σε ότι αφορά τη διαστρωματική προσαρμογή είναι δυνατόν να γίνουν οι παρακάτω βελτιώσεις / προσθήκες, όπως παρακάτω:

Προσδιορισμός ρυθμού μετάδοσης βασικού στρώματος (BL)

Ο προσδιορισμός του ρυθμού μετάδοσης του στρώματος BL είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί αφού πρώτα ενημερωθεί ο αποστολέας για τις δυνατότητες λήψης κυρίως των ασυρμάτων δεκτών. Έτσι με τη χρήση κάποιου αλγόριθμου που θα λαμβάνει υπόψη τα στοιχεία αυτά είναι δυνατόν είτε να καθορίσουμε ένα προκαθορισμένο ρυθμό μετάδοσης για το στρώμα BL που θα προσφέρει την ελάχιστη δυνατή ποιότητα στο μεγαλύτερο μέρος του συνόλου των δεκτών. Πιθανότατα να υπάρξουν και χρήστες με απαγορευτικούς ρυθμούς λήψης αρχείων βίντεο λόγω πολύ χαμηλής ταχύτητας.

Αριθμός επιπλέον στρωμάτων (EL)

Στο προτεινόμενο πλαίσιο έχουμε χρησιμοποιήσει μόνο ένα επιπλέον στρώμα EL όπου η πρόσθεσή του στο βασικό στρώμα BL αυξάνει τη ποιότητα του βίντεο. Με τη χρήση κωδικοποίησης H.264/AVC ή H.264/SVC θα είμαστε σε θέση να προσφέρουμε μεγαλύτερο αριθμό στρωμάτων πλέον του ενός όπου ο κάθε χρήστης θα λαμβάνει τόσα επιπλέον στρώματα EL όσο του επιτρέπει ο ρυθμός λήψης του. Αυτή η σχεδίαση θα επιτρέψει μια δικαιότερη αντιμετώπιση στους χρήστες που έχουν και μεγαλύτερες δυνατότητες λήψης.

Χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο IEEE 802.11x

Στη σχεδίασή μας δεν αναφερθήκαμε ιδιαίτερα στο χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων γιατί αποτελεί ένα ξεχωριστό πεδίο έρευνας εκτός του σκοπού της διατριβής αυτής. Παρόλα αυτά όμως πιστεύουμε ότι η

χρήση του πρωτοκόλλου IEEE 802.11e που έχει σχεδιασθεί εδικά για παροχή ποιότητας υπηρεσίας προσφέρει μεγαλύτερες δυνατότητες προσαρμογής καθώς θα μπορούσαμε για παράδειγμα να χρησιμοποιήσουμε διαφορετική προτεραιότητα μετάδοσης για τη κάθε ροή. Έτσι θα μπορούσαμε να καθορίσουμε ότι το βασικό στρώμα BL θα απολαμβάνει πάντα την υψηλότερη προτεραιότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα στρώματα που και αυτά με τη σειρά τους θα έχουν διαφορετική αντιμετώπιση με βάση την "αξία" τους.

Συνολικά σε ότι αφορά όλες τις παραπάνω προτάσεις θα ήταν ίσως πολύ ενδιαφέρον να αναπτυχθούν πρωτότυπα και να εξετασθεί η απόδοσή τους σε ένα περιβάλλον πραγματικών δικτύων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ NETWORK SIMULATOR (NS-2)

ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ NETWORK SIMULATOR (NS-2)

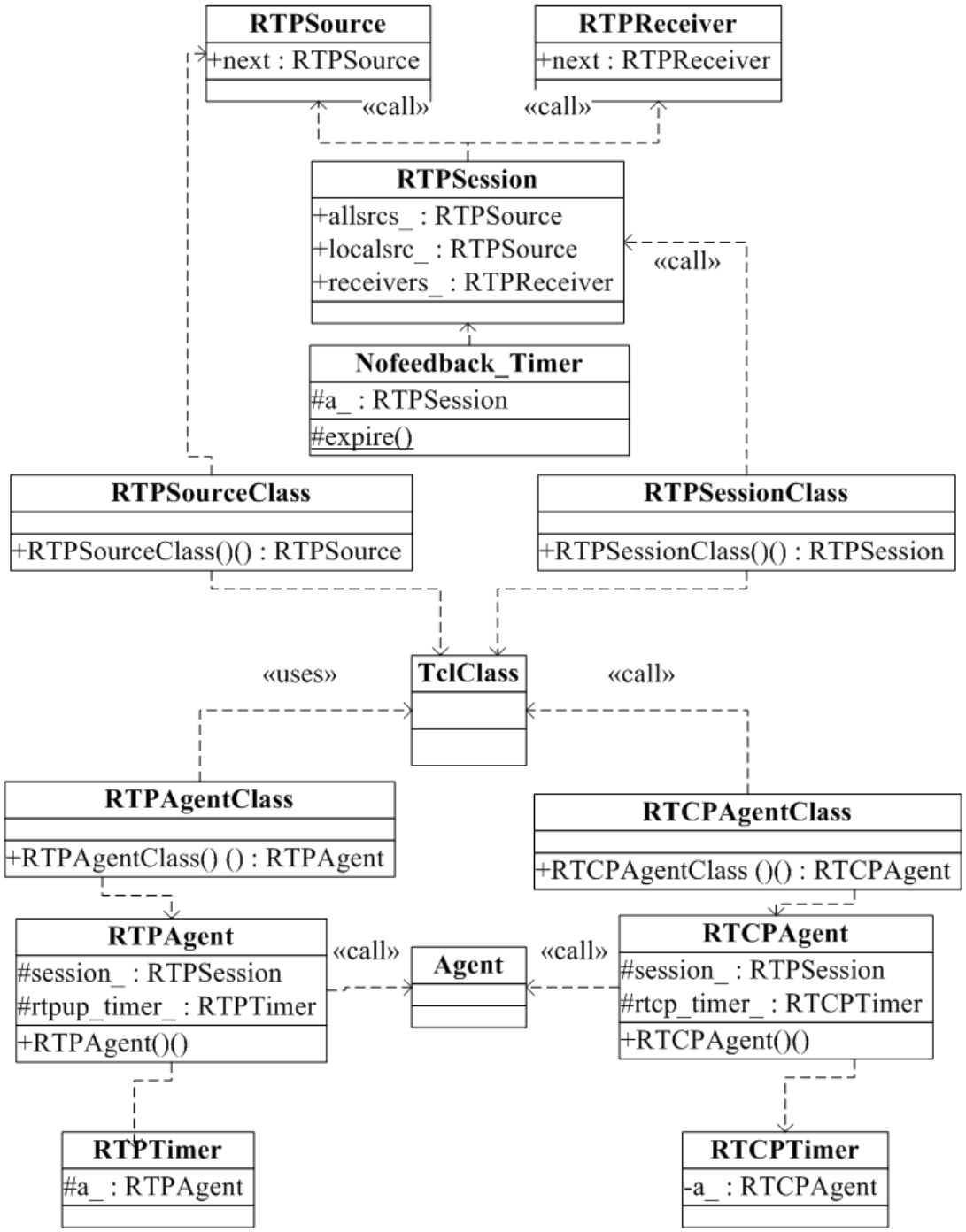
Το λογισμικό προσομοίωσης ns-2 [10] είναι ένα εργαλείο έρευνας ευρέως διαδεδομένο και αποδεκτό από την Ερευνητική και Ακαδημαϊκή κοινότητα. Το ns-2 έχει τις ρίζες του σε ένα παλαιότερο λογισμικό προσομοίωσης με την ονομασία REAL network simulator [53], το οποίο αναπτύχθηκε περί τα τέλη της δεκαετίας του 80. Το ns-2 έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού C++ ενώ τα σενάριο της προσομοίωσης αναπτύσσονται στη γλώσσα Object Tool Common Language (OTCL). Για να πραγματοποιήσει ο χρήστης μία προσομοίωση στο ns-2 θα πρέπει να γράψει το δικό του σενάριο προσομοίωσης σε γλώσσα OTCL και να λάβει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από διάφορα αρχεία δεδομένων τα οποία είτε παρέχονται από το ίδιο το ns-2, είτε δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης με κατάλληλο προγραμματισμό από τον ίδιο το χρήστη.

Για την υποστήριξη της δικής μας έρευνας έχουμε επεκτείνει τις βιβλιοθήκες του ns-2 διότι η χρησιμότητα των πρωτοκόλλων RTP/RTCP ως μέρος του ns-2, στην επίσημή του έκδοσή του, είναι πολύ περιορισμένη.

Ποιο συγκεκριμένα οι επεκτάσεις μας στο ns-2 περιλαμβάνουν:

- Αλλαγές στις επικεφαλίδες των RTP και RTCP πακέτων ώστε να περιέχουν χρήσιμα στοιχεία για το μηχανισμό προσαρμογής.
- Επιπλέον λειτουργικότητα για τη παραγωγή και αποστολή των RTCP αναφορών ελέγχου.
- Τον αλγόριθμο για τον υπολογισμό του ρυθμού μετάδοσης φιλικού προς το TCP.
- Υπολογισμούς σχετικούς με το ρυθμό απώλειας πακέτων.
- Υπολογισμούς σχετικούς με το χρόνο RTT, και τέλος
- Υπολογισμούς που αφορούν τη διακύμανση της καθυστέρησης (jitter delay)

Στο Σχήμα 104 παρουσιάζουμε το UML διάγραμμα του νέου κώδικα ο οποίος έχει παρουσιασθεί στην εργασία [54].



Σχήμα 104. UML διάγραμμα του RTP/RTCP κώδικα

Εδώ καθορίζουμε δύο νέες δομές δεδομένων, *server_report* και *receiver_report* για να αποθηκεύσουμε τα διάφορα πεδία στις RTCP αναφορές ελέγχου αποστολέα και παραλήπτη. Μια νέα κλάση *RTPReceiver* αποθηκεύει τα πεδία τα οποία χρησιμοποιούνται από τους δέκτες για QoS μετρήσεις. Κάθε νέο αντικείμενο της κλάσης *RTPSession* δημιουργεί με τη σειρά του δύο αντικείμενα της κλάσης *RTPSource* και ένα αντικείμενο της κλάσης *RTPReceiver.* Η κλάση *RTPSessionClass* καλείται από το αρχείο προσομοίωσης που με τη σειρά της δημιουργεί δύο νέους Agents (*RTPAgent* and *RTCPAgent*) σε κάθε συμμετέχοντα στη σύσκεψη. Ο Agent

RTPAgent έχει ως κύριο έργο την αποστολή των RTP πακέτων πληροφορίας, ενώ ο Agent *RTCPAgent* είναι υπεύθυνος για την αποστολή και λήψη των RTCP αναφορών ελέγχου. Σε αυτή την εφαρμογή μας έχουμε αναπτύξει ένα σχήμα ένας-προς-πολλούς (one-to-many) του πρωτοκόλλου RTP/RTCP, κατά την οποία ένας εξυπηρετητής μεταδίδει πολυμεσική πληροφορία με multicast μετάδοση σε ένα αριθμό δεκτών. Παρόλα αυτά είναι εύκολη η επέκταση του κώδικα έτσι ώστε ο κάθε κόμβος να μπορεί να είναι ταυτόχρονα παραλήπτης και αποστολέας όπως αυτό συμβαίνει σε εφαρμογές VoIP.

Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε καλύτερα τη λειτουργικότητα του κώδικα με το παρακάτω παράδειγμα προσομοίωσης σε γλώσσα TCL:

```
set s0 [new Session/RTPUP]
$ns at 0.1 "$s0 join-group $group"
$ns at 1.0 "$s0 transmit 256kb/s"
$s0 enable-control 1
```

Όταν δημιουργούμε μια νέα σύσκεψη σε ένα σενάριο προσομοίωσης τότε κατασκευάζουμε ένα νέο αντικείμενο από τη κλάση *RTPSession.* Ο constructor της κλάσης *RTPSession* αρχικοποιεί δύο νέα αντικείμενα (*localsrc_* και *allsrcs_*) ενώ η κλάση *RTPReceiver* αρχικοποιεί το νέο αντικείμενο με την ονομασία *receivers_*. Το αντικείμενο *localsrc_* είναι ο δημιουργός των πακέτων RTP και RTCP. Η παρακάτω εντολή καλεί ενεργοποιεί όλες τις παραπάνω λειτουργίες:

```
set s0 [new Session/RTPUP]
```

Τα πακέτα RTCP δημιουργούνται από όλους τους συμμετέχοντες στη σύσκεψη πολλαπλής διανομής. Η δημιουργία των πακέτων RTP και RTCP πραγματοποιείται όταν κληθούν οι κλάσεις *RTPUPAgent* και *RTCPUPAgent*, αντίστοιχα. Τα αντικείμενα από τις δύο αυτές κλάσεις δημιουργούνται κατά την αρχικοποίηση της TCL κλάσης *RTPSession*. Οι δύο Agents δεν είναι ενεργοί μέχρι τη στιγμή που η νέα σύσκεψη `s0` ακολουθήσει την ομάδα πολλαπλής διανομής. Με την επόμενη εντολή καλούμε τη σύσκεψη `s0` να ακολουθήσει τη νέα ομάδα πολλαπλής διανομής στη χρονική στιγμή 0.1 second:

```
$ns at 0.1 "$s0 join-group $group"
```

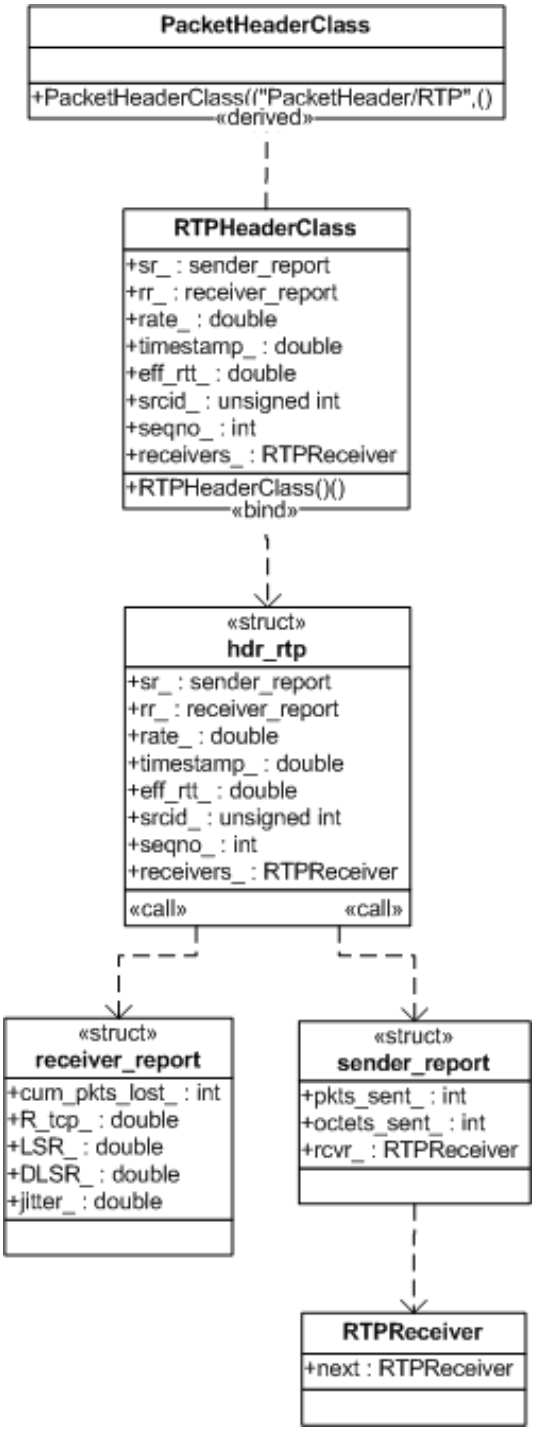
όπου η μεταβλητή *group* συμβολίζει την IP διεύθυνση της ομάδας. Μέχρι αυτή τη στιγμή όμως δεν έχουμε δώσει καμία εντολή για τη μετάδοση RTP και RTCP πακέτων διότι απλά έχουμε μόνο δηλώσει τη σύσκεψη `s0` η οποία ακολουθεί μια νέα ομάδα πολλαπλής διανομής. Έτσι πρέπει να καλέσουμε τη ρουτίνα *start* για τη σύσκεψη `s0` ώστε να ενεργοποιήσουμε την εκπομπή RTCP πακέτων κατά τη χρονική στιγμή 0.1 second:

```
$ns at 0.1 "$s0 start"
```

Το ποιο σημαντικό πεδίο των πακέτων RTCP είναι η μεταβλητή *srcid_* η οποία αποτελεί και τον αριθμό ταυτότητας της σύσκεψης. Η μετάδοση των πακέτων RTP αρχίζει όταν καλούμε τη ρουτίνα *transmit*:

```
$ns at 1.0 "$s0 transmit 256kb/s"
```

Η παραπάνω ρουτίνα παρέχει το "πράσινο φως" στη κλάση *RTPUPAgent* ώστε να ξεκινήσει η μετάδοση των RTP πακέτων.



Σχήμα 105. UML διάγραμμα των RTP/RTCP πακέτων

Στη εφαρμογή μας έχουμε καθορίσει μια νέα ρουτίνα στη TCL κλάση με την ονομασία *RTPAgent* ώστε να καθορίσουμε μια συμπεριφορά μετάδοσης που είναι φιλική προς το TCP πρωτόκολλο. Η δήλωση της φιλικής αυτής συμπεριφοράς γίνεται με τη παρακάτω εντολή:

```
$s0 enable-control 1
```

Η προκαθορισμένη τιμή της μεταβλητής `enable-control` είναι μηδέν που σημαίνει ότι ο μηχανισμός ελέγχου της συμφόρησης είναι αρχικά ανενεργός. Στο Σχήμα 105 παρουσιάζουμε την εξάρτηση των κλάσεων για τη δημιουργία των RTP και RTCP πακέτων. Μπορούμε να δούμε στο UML διάγραμμα τα νέα πεδία που έχουμε προσθέσει για μετρήσεις σχετικές με τη ποιότητα υπηρεσιών (QoS) καθώς και όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τη λειτουργία του μηχανισμού ελέγχου της συμφόρησης. Νέες *inline* ρουτίνες παρέχουν τη πρόσβαση προς όλα αυτά τα πεδία. Στις επόμενες παραγράφους θα περιγράψουμε πως γίνεται η συλλογή των πληροφοριών και η εμπλοκή του μηχανισμού ελέγχου της συμφόρησης.

Ρουτίνες *Send* και *Receive* RTP πακέτων

Τα πακέτα RTP δημιουργούνται με την εκπνοή του χρόνου `timeout` του ωρολογίου χρονισμού *RTPTimer*. Έτσι ο Agent RTP δημιουργεί ένα RTP πακέτο καλώντας τη παρακάτω ρουτίνα:

```
void RTPUPAgent::sendpkt(){}
```

Η ρουτίνα *send* καλεί τη ρουτίνα *makepkt* η οποία προσθέτει τα παρακάτω πεδία στην επικεφαλίδα του πακέτου:

```
void RTPUPAgent::makepkt(Packet* p){}
```

- τον αριθμό του RTP πακέτου.

  `rh->seqno() = seqno_++;`

- τη ταυτότητα του αποστολέα

  `rh->srcid() = session_->srcid();`

- τη χρονοσήμανση

  `rh->timestamp()= timestamp_;`

- τους παραλήπτες που εξυπηρετεί ο αποστολέας

  `rh->receivers_= session_->receivers_;`

Όταν ένας παραλήπτης λάβει ένα πακέτο RTP καλεί πρώτα τη ρουτίνα *lookup* με ώστε να ελέγξει εάν ο αποστολέας του πακέτου είναι ήδη γνωστός. Εάν ο αποστολέας δεν είναι μια γνωστή πηγή πληροφορίας τότε ο παραλήπτης προσθέτει τη ταυτότητα του αποστολέα καλώντας τη ρουτίνα *new-source* της TCL κλάσης *Session/RTP*. Εν συνεχεία ακολουθεί η επεξεργασία του νέου πακέτου RTP. Το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας περιλαμβάνει τη εξαγωγή του χρόνου effective RTT Με την εκτέλεση του παρακάτω κώδικα:

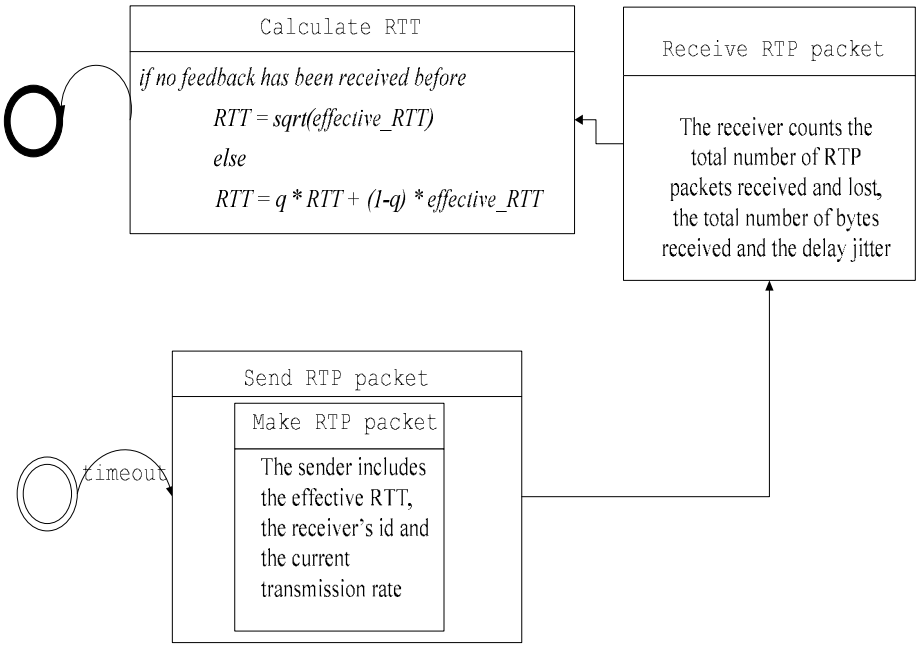
```
for (RTPUPReceiver* p = rh->receivers_;
p != 0; p = p->next) {
 if(p->srcid() == localsrc_->srcid()) {
   eff_rtt = p->eff_rtt();
  }
}
if(eff_rtt != 0 ) {
 calculate_RTT(eff_rtt);
}
```

Εάν ο αποστολέας και ο παραλήπτης δεν έχουν ανταλλάξει ακόμη καμία αναφορά ελέγχου SR ή RR τότε υποθέτουμε για αυτή τη πρώτη φορά συμμετρικές συνδέσεις όπου ο χρόνος RTT έχει απλά διπλάσια τιμή του χρόνου μονής διαδρομής. Εάν η τιμή του χρόνου *eff_rtt* δεν είναι μηδενική τότε ο παραλήπτης υπολογίζει το χρόνο RTT σύμφωνα με την Εξίσωση 21.

Εν συνεχεία υπολογίζουμε τη τιμή του *delay jitter* χρησιμοποιώντας το τμήμα του κώδικα που περιέχεται στη RFC 3550:

```
double transit=arrival -rh->timestamp();
double d = transit - s->transit();
s->transit(transit);
 if (d < 0) d = -d;
s->jitter( s->jitter() + (1./16.) *
(d - s->jitter()));
```

όπου *transit* είναι ο χρόνος διέλευσης του πακέτου RTP που μόλις έχει ληφθεί, *d* είναι η διαφορά χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών RTP πακέτων και *s->jitter()* το πεδίο που αναγράφεται η προηγούμενη τιμή του jitter delay.



Σχήμα 106. Διάγραμμα ροής των send και receive ρουτινών

Τελικά ο παραλήπτης προσθέτει τα παρακάτω πεδία στο αντικείμενο `RTPUPSource s`:

```
//count received RTPUP packets
s->np(1);
// count lost RTPUP packets
s->cum_pkts_lost(pkts_lost);
//get the extended highest number
s->ehsr(rh->seqno());
// count the number of received bytes
```

```
s->nbytes(mh->size());
// the packet size in bytes
s->ps(mh->size());
```

Στο Σχήμα 106 παρουσιάζουμε το διάγραμμα ροής από όλες τις ρουτίνες που περιγράψαμε παραπάνω.

Δημιουργία αναφορών ελέγχου

Η ρουτίνα *build* καλείται από τη κλάση *RTCPUPAgent* όταν εκπνεύσει το ρολόι χρονισμού *RTCPUPTimer*. Τότε ο αποστολέας δημιουργεί μια νέα αναφορά *SR* εφόσον έχει μεταδώσει RTP πακέτα από τη προηγούμενη αναφορά *SR*. Εφόσον έχει γίνει αυτό τότε το πεδίο *we_sent* έχει τιμή 1 και το παρακάτω τμήμα του κώδικα δημιουργεί τη νέα SR αναφορά:

```
//add sender report
sender_report* sr;
//fill in the report
sr = new sender_report;
//assign the sender's id
sr->sender_srcid()= localsrc_->srcid();
//assign the RTPUP packets sent
sr->pkts_sent() = localsrc_->np();
//assign the total bytes sent
sr->octets_sent() = localsrc_->nbytes();
//include the receivers served
sr->rcvr_ = receivers_;
//store the report
rh_->sr_ = sr;
```

Ο αποστολέας περιλαμβάνει το συνολικό αριθμό των πακέτων που έχει αποστείλει από την έναρξη της σύσκεψης, το συνολικό αριθμό των οκτάδων, καθώς και το πεδίο *receivers* τη χρήση του οποίου θα εξηγήσουμε παρακάτω

Ο παραλήπτης πριν να αποστείλει μια αναφορά ελέγχου υπολογίζει την εκτίμησή του για ένα φιλικό προς το πρωτόκολλο TCP ρυθμό λήψης. Για να επιτευχθεί αυτό ο παραλήπτης υπολογίζει το ποσοστό απώλειας πακέτων από τη προηγούμενη αναφορά ελέγχου RR. Για τους υπολογισμού αυτούς χρησιμοποιούμε το τμήμα του κώδικα που περιγράφεται στην RTC 3550 όπως παρακάτω:

```
//calculate loss fraction since previous report
int expected_interval = sp->ehsr() - last_ehsr_;
last_ehsr_ = sp->ehsr();
int lost_interval = expected_interval - received;
if (lost_interval <= 0|| expected_interval == 0 ) {
fraction = 0;}
else fraction = ((double)lost_interval /
(double)expected_interval);
// Update the R_tcp according to fraction value
if( sp->np() >= 1) {// I have already received RTPUP
packets from the source
if(fraction == 0) {
increase_rate(sp->ps());
```

```
}
else {
     measure_smooth_loss(fraction);
     calculateR_tcp(sp->ps());
     }
}
```

Εάν δεν υπάρχουν απώλειες πακέτων κατά τη λήψη και η τιμή του ποσοστού απωλειών είναι μηδενική τότε ο παραλήπτης υπολογίζει μια νέα τιμή λήψης σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση:

```
tx_rate_+=(double)ps/RTT_;
```

όπου, `ps` είναι το μέγεθος του RTP πακέτου, *RTT_* είναι η εκτίμηση του παραλήπτη σχετικά με το χρόνο RTT και *tx_rate_* είναι η προηγούμενη τιμή που αφορά την εκτίμηση του παραλήπτη για ένα φιλικό προς το TCP ρυθμό μετάδοσης.

Όταν όμως υπάρχουν απώλειες πακέτων τότε ο παραλήπτης υπολογίζει το ρυθμό απώλειας πακέτων χρησιμοποιώντας τη ρουτίνα *measure_smooth_loss(fraction)* όπως παρακάτω:

```
double smooth_values = 0;
for (int i=0; i<7; i++) {
pkt_loss_history[i+1]= pkt_loss_history[i];
}
pkt_loss_history[0] = fraction;

double temp =0;
  for(int i=0; i<8; i++) {
  temp += weight[i];
  }

  for (int i =0; i<8; i++) {
  smooth_values += weight[i] * pkt_loss_history[i];
  }

  smooth_loss_= smooth_values / temp;
```

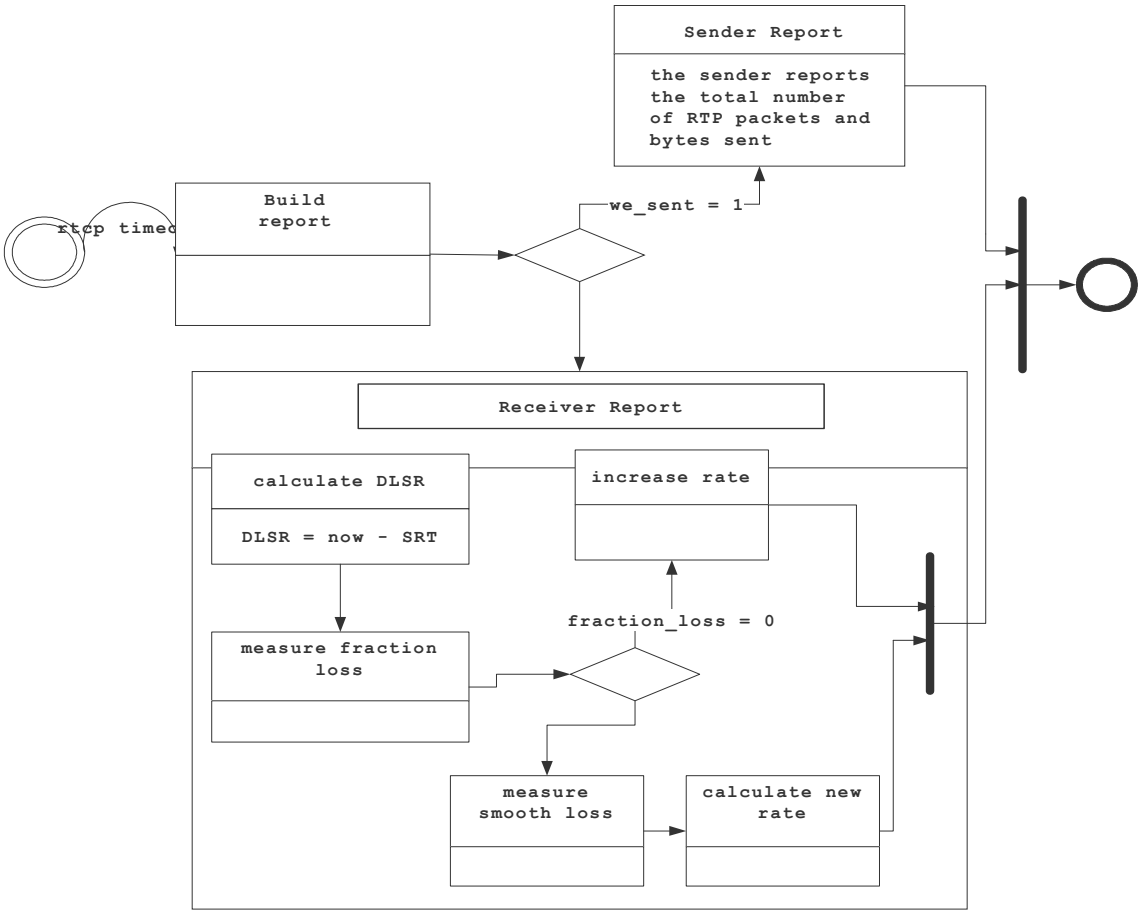
Ο αποστολέας έχει τώρα τη τιμή του ρυθμού απώλειας πακέτων που είναι το αποτέλεσμα του υπολογισμού από τις προηγούμενες επτά τιμές σύμφωνα με την Εξίσωση 14. Η δομή δεδομένων *pkt_loss_history* αποθηκεύει όλες τις προηγούμενες μετρήσεις ενώ το `weight` περιέχει στατικές τιμές. Στο επόμενο βήμα ο παραλήπτης υπολογίζει ένα φιλικό προς το TCP ρυθμό μετάδοσης με τη παρακάτω ρουτίνα:

```
calculateR_tcp(sp->ps());
```

όπου *ps()* είναι μια *inline* ρουτίνα που επιστρέφει όταν καλείται το μέγεθος του πακέτου RTP. Ο παραλήπτης συνθέτει την αναφορά ελέγχου RR μετά από τον υπολογισμό όλων των απαραιτήτων στοιχείων που απαιτούνται για την συμπλήρωση της αναφοράς με τη χρήση του παρακάτω τμήματος του κώδικα:

```
//add receiver report
receiver_report* rr;
rr = new receiver_report;
```

```
//fill the report
// cumulative packets lost
rr->cum_pkts_lost()=sp->cum_pkts_lost();
// add TCP friendly rate
rr->R_tcp() = tx_rate_;
// last time sender report
rr->LSR() = sp->LSR();
// delay since receiving the SR
rr->DLSR()= now - sp->SRT();
//add jitter delay
rr->jitter() = sp->jitter();
//add RR to the RTCPUP packet
rh_->rr_ = rr;
```



Σχήμα 107. Διάγραμμα ροής της ρουτίνας build report

Ρουτίνα Receive Control

Έχουμε δει μέχρι τώρα τη πρόσβαση του αποστολέα στα πακέτα RTP και πως αποστολέας και παραλήπτης συνθέτουν τις αναφορές ελέγχου SR και RR. Έχουμε εξηγήσει επίσης πως εκτελεί ο παραλήπτης τους υπολογισμούς των διαφόρων μεταβλητών ώστε να δώσει στον αποστολέα τα απαραίτητα στοιχεία που αφορούν τη ποιότητα εκπομπής. Σε αυτή τη παράγραφο θα περιγράψουμε τις ρουτίνες του αποστολέα με σκοπό να προσαρμόσει το ρυθμό προσαρμογής με βάση τις τρέχουσες

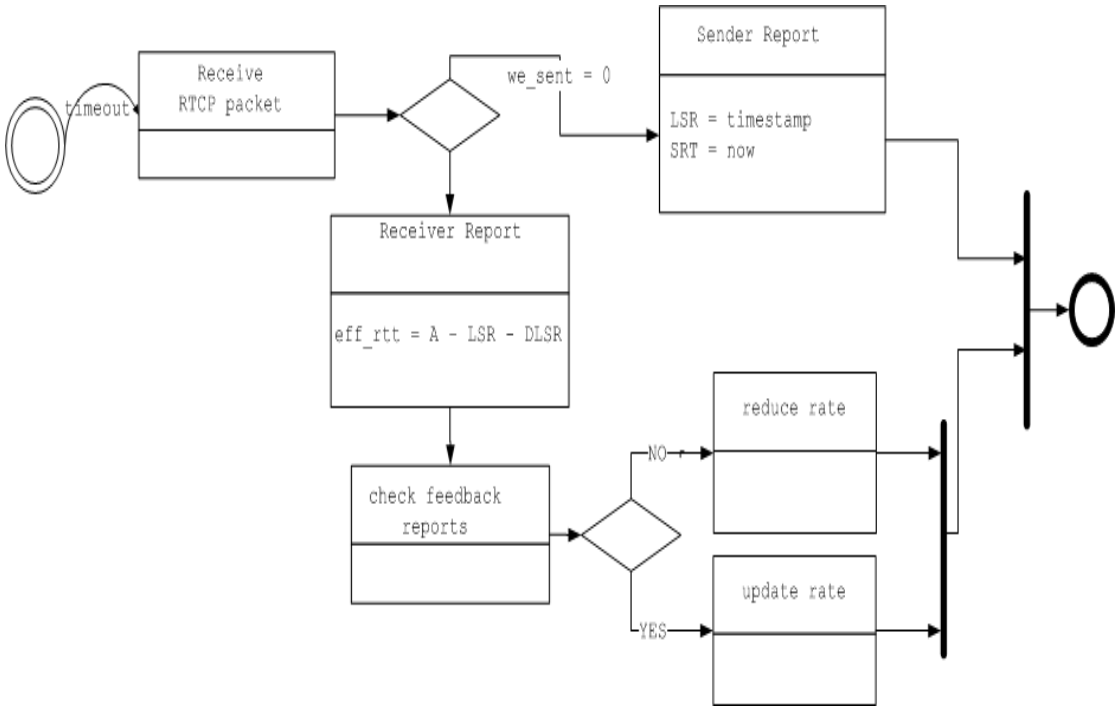
συνθήκες του δικτύου. Επομένως η ρουτίνα *receive control* αποτελεί τη συγχώνευση όλων των αποτελεσμάτων του προγράμματος όπου λαμβάνουν χώρα οι αποφάσεις.

Όταν ο αποστολέας λάβει μια αναφορά ελέγχου RR με ένα πακέτο RTCP εκτελεί μια σειρά ενεργειών. Ο αποστολέας πρώτα από όλα εξετάζει εάν ο συνθέτης του πακέτου RTCP είναι μια γνωστή πηγή. Για να γίνει ο έλεγχος αυτός αλλά και για να αποθηκεύσουμε τους παραλήπτες τους οποίους εξυπηρετεί ο αποστολέας έχουμε δημιουργήσει μια νέα κλάση με την ονομασία *RTUPReceiver*. Επομένως ο αποστολέας προσθέτει το νέο παραλήπτη στη λίστα αυτή όπως παρακάτω:

```
enter_rcv(RTPUPReceiver* s)
```

Η επεξεργασία τις αναφοράς ελέγχου RR και ο υπολογισμός της τιμής effective RTT ενεργείται όπως παρακάτω σύμφωνα με την Εξίσωση 21 :

```
eff_rtt = alpha - rh->rr_->LSR() -
rh->rr_->DLSR();
```



Σχήμα 108. Διάγραμμα ροής της ρουτίνας receive control

Εν συνεχεία ο αποστολέας καθορίζει τη τιμή του νέου ρυθμού εκπομπής σύμφωνα με την Εξίσωση 13. Στο επόμενο βήμα ο αποστολέας καλώντας τη ρουτίνα *transmit* της TCL κλάσης *Session/RTPUP* ενημερώνει το πεδίο τιμών του ρυθμού εκπομπής.

Από τη πλευρά του παραλήπτη εκτελούνται ανάλογες ενέργειες όταν αυτός λάβει ένα πακέτο RTCP που περιέχει μια αναφορά ελέγχου SR. Πρώτα από όλα ο παραλήπτης ενημερώνει τη μεταβλητή *SRT* με τη τιμή της τρέχουσας χρονικής στιγμής. Το ακρώνυμα *SRT* αναφέρεται στη τιμή της μεταβλητής *Sender Report Time* και η τιμή αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μεταβλητής *DLSR* :

```
source->LSR(rh->timestamp());
source->SRT(now);
```

Στο Σχήμα 108 παρουσιάζουμε το διάγραμμα ροής της ρουτίνας *receive control*.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

[1] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis**, "*Adaptive smooth multicast protocol for multimedia transmission: Implementation details and performance evaluation*", International Journal Of Communication Systems Int. J. Commun. Syst. (2009) Published online in Wiley InterScience, DOI: 10.1002/dac.1059. 2009; 23(3): 299 - 333.

[2] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Adaptive Smooth Simulcast Protocol (ASSP) for Video Applications: Description and Performance Evaluation*" International Journal of Network and Systems Management, Published online in Springer, DOI: 10.1007/s10922-010-9159-8, 2010.

ΚΕΦΑΛΑΙΑ ΣΕ ΒΙΒΛΙΑ

[1] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Cross Layer Design for Multimedia Transmission over Wireless Networks*", Handbook of Research on Next Generation Networks and Ubiquitous Computing, Information Science Reference, 2010.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

[1] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Performance Evaluation of MPEG-4 Video Transmission with the Adaptive Smooth Multicast Protocol (ASMP)*", the Fifteenth IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'10), Riccione, Italy, June 22-25 2010.

[2] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis**, "*Performance Evaluation of Simulcast vs. Layered Multicasting over Best-effort Networks*", The 17th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM 2009), Split Croatia, September 24 – 26, 2009.

[3] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Simulcast Transmission for Video Applications: Performance Evaluation with an Integrated Simulation Environmen*t", 2009 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS 2009), Istanbul, Turkey, July 13 - 16 2009.

[4] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Adaptive Smooth Simulcast Protocol for Multimedia Transmission*", the Fourteenth IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'09), Sousse, Tunisia, July 5 - 8 2009.

[5] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Evaluation of Single Rate Multicast Congestion Control Schemes for MPEG-4 Video Transmission*", 5th EURO - NGI Conference on Next Generation Internet Networks (NGI 2009), Aveiro, Portugal, July 1 - 3 2009.

[6] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Challenges in Cross Layer Design for Multimedia Transmission over Wireless Networks*", WWRF– 21st Meeting WG3 – Future Architecture, Stockholm, Sweden, 13 - 15 October 2008.

[7] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Performance Evaluation of Cross Layer Adaptive Multimedia Transmission: The case of Wired Networks*", NETWORKS 2008 13th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, Budapest, Hungary, 28 September- 2 October 2008.

[8] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Comparison of Single-Rate Multicast Congestion Control Protocols vs. ASMP*", 16th Annual Meeting of the IEEE International Symposium on Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS 2008), Sept 8-10, 2008, Baltimore, MD. USA.

[9] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Adaptive Smooth Multicast Protocol for Multimedia Data Transmission*", 2008 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems – SPECTS 2008, Edinburgh, UK, 16 - 18 June 2008.

[10] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Smooth Multicast Congestion Control for Adaptive Multimedia Transmission*",, 4th Euro-NGI Conference on Next Generation Internet Networks, 28-30 April 2008, Krakow, Poland.

[11] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Extending the Functionality of RTP/RTCP Implementation in Network Simulator (NS-2) to support TCP friendly congestion control*", First International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems (SIMUTools 2008), March 3-7, 2008, Marseille, France.

[12] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Challenges in cross layer adaptation for multimedia transmission*",, IADIS International Conference Wireless Applications and Computing 2007, Lisbon, Portugal, 3 - 8 July 2007, pp. 129 – 133.

[13] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*A Framework for Cross Layer Adaptation for Multimedia Transmission over Wired and Wireless Networks*", The 2007 International Conference on Internet Computing (ICOMP'07), Las Vegas, Nevada, USA,, 25 - 28 June 2007.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΑΠΟ ΑΛΛΟΥΣ ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ

[1] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Extending the Functionality of RTP/RTCP Implementation in Network Simulator (NS-2) to support TCP friendly congestion control*", First International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems (SIMUTools 2008),, March 3-7, 2008, Marseille, France.

1. "Adaptive MPEG-4 Video Streaming Over IP Networks", 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2008), Ru Zhou,, Sik Jang, July 6-9 2008, Japan.
2. "An End-to-End Congestion Control Approach Based-on Content-Aware", International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, H. Yang, X. Chen, and R. Hu, Vol. 4, No. 2, April, 2009.
3. "PIW: A QoS Provisioning Scheme for Efficient Real Time Data Transmission in Hybrid Wireless Networks", International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol: 10 No: 01, Wajahat Abbas, Adeel Akram, Asim Shahzad.
4. "Investigation of Packet Loss Patterns in Audio/Video Content Distribution over RTP in Wireless Networks", International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS Vol: 10 No: 01, Wajahat Abbas, Adeel Akram, Asim Shahzad.

[2] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Comparison of Single-Rate Multicast Congestion Control Protocols vs. ASMP*", 16th Annual Meeting of the IEEE International Symposium on Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS 2008), Sept 8-10, 2008, Baltimore, MD. USA.

5. "ECN-capable TCP-friendly Layered Multicast Multimedia Delivery," UKSim 2009: 11th International Conference on Computer Modelling and Simulation, 2009, R. Chodorek, A. Chodorek, Cambridge, England, 25 – 27 March 2009.

[3] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*Cross Layer Design for Multimedia Transmission over Wireless Networks*", Handbook of Research on Next Generation Networks and Ubiquitous Computing, Information Science Reference,, 2009.

6. "Architectural Framework for Application Level QoS Adaptation in Next Generation Networks," 2009 Fifth International Conference on Networking and Services, 2009 ICNS, G. Gardaševic, Z. Bojkovic, Valencia, Spain, April 20-25, 2009.

[4] C. Bouras, A. Gkamas, G. **Kioumourtzis,** "*A framework for cross layer adaptation for multimedia transmission over wired and wireless networks*",, Proceedings of the 2007 International Conference on Internet Computing Jun. 25-28, Monte Carlo Resort, Las Vegas, Nevada, USA.

7. "Error Resistant Real-Time Transport Control Protocol", American Journal of Engineering and Applied Sciences, S. Shahbazi, K. Jumari and M. Ismail, 2009.

8. "PIW: A QoS Provisioning Scheme for Efficient Real Time Data Transmission in Hybrid Wireless Networks", International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol: 10 No: 01, Wajahat Abbas, Adeel Akram, Asim Shahzad.

9. "Investigation of Packet Loss Patterns in Audio/Video Content Distribution over RTP in Wireless Networks", International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS Vol: 10 No: 01, Wajahat Abbas, Adeel Akram, Asim Shahzad.

[5] C. Bouras, A. Gkamas, G. Kioumourtzis, "*Adaptive smooth multicast protocol for multimedia transmission: Implementation details and performance evaluation*", International Journal Of Communication Systems Int. J. Commun. Syst. (2009) Published online in Wiley InterScience, DOI: 10.1002/dac.1059. 2009; 23(3): 299 - 333.

10. ECN-capable TCP-friendly layered multicast multimedia delivery, Chodorek, R.R., Chodorek, A., 11th International Conference on Computer Modelling and Simulation, UKSim 2009

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] RFC 4654, *"On TCP-friendly Multicast Congestion Control (TFMCC)"*, J. Widmer, M. Handley, August 2006.

[2] RFC 3448, M. Handley, S. Floyd, J. Padhye, J. Widmer, *"TCP Friendly Rate Control (TFRC)"*, Network Working Group, January 2003.

[3] L. Rizzo, *"pgmcc: A TCP-friendly single-rate multicast congestion control scheme"*, in Proc. of ACM SIGCOMM '00, 2000.

[4] X. Li, M. Ammar, and S. Paul, *"Video Multicast over the Interne,"*, IEEE Network Magazine, vol. 13, no.2, Apr. 1999, pp. 46-60.

[5] G.-I. Kwon, J. Byers, *"Smooth multirate multicast congestion control,"* in: Proceedings of IEEE INFOCOM, San Francisco USA, 30 March – 1 April, 2003.

[6] RFC 3550, *RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications*, H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, V. Jacobson, July 2003.

[7] ITU-T Recommendation H.323: Packet-based multimedia communications systems. December (2009).

[8] RFC 1633, R. Braden, D. Clark, S. Shenker, *"Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview"*, IETF.

[9] RFC 2474, K. Nichols, S. Blake, F. Baker, D. Black, *"Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers"*, IETF.

[10] The UCB/LBNL network simulator, software online: http://www.isi.edu/nsnam/ns/

[11] RFC 768, J. Postel, "*User Datagram Protocol*", IETF.

[12] RFC 2208, *Resource ReSerVation Protocol (RSVP) -- Version 1 App*, F. Baker et.al, September 1997.

[13] RFC 1305, David L. Mills, "*Network Time Protocol (Version 3) Specification*", 1992, IETF.

[14] RFC 2460, D. R. Hinden, *"Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification"*, IETF.

[15] A. Tanenbaum, *"Computer Networks, 4th Edition"*, Publisher: Prentice Hall, ISBN: 0-13-066102-3, 2003.

[16] RFC 1305, D. Mills, *"Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation"*, IETF.

[17] Global Positioning System - GPS, http://www.gpsworld.com/

[18] Padhye, J., Firoiu, V., Towsley, D. and J. Kurose, *"Modeling TCP Throughput: A Simple Model and its Empirical Validation"*, Proc. ACM SIGCOMM 1998.

[19] RFC 3208, *"PGM Reliable Transport Protocol Specification"*, T. Speakman, et. al., December 2001.

[20] Choudhury, S. & Gibson, J. (2006), *"Joint PHY/MAC Based Link Adaptation for Wireless LANs with Multipath Fading"*, IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006, Vol2, On pages 757-762.

[21] Verikouris, C., Alonso, L. & Giamalis, T., (2005*). "Cross-layer optimization for wireless systems: A European research key challenge"*, Global Communications Newsletter.

[22] Hwang, J., Huang, C. & Chang, C. (2008). *"Cross-Layer End-to-End QoS for Scalable Video over Mobile WiMAX",* In Chen, K., Roberto, J., & Marca, B., Mobile WiMAX, John Wiley & Sons, Ltd, ISBN: 9780470519417.

[23] RFC 792, *"Internet Control Message Protocol"*, IETF, September 1981.

[24] RFC 2357: A. Mankin, A. Romanow, S. Bradner, V. Paxson, *"IETF Criteria for Evaluating Reliable Multicast Transport and Application Protocols"*, June 1998.

[25] Smith, H., Mutka, M., Rover, D. *"A Feedback based Rate Control Algorithm for Multicast Transmitted Video Conferencing"*, Accepted for publication in the Journal of High Speed Networks.

[26] Sisalem D., Wolisz A., *"LDA + TCP - Friendly Adaptation: A Measurement and Comparison Study,"* in Proceedings the 10th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV'2000), June 25 - 28, 2000, Chapel Hill,NC, USA.

[27] J. Macker, R. Adamson, *"A tcp friendly, rate-based mechanism for nack-oriented reliable multicast congestion control"*, in Proceedings of IEEE GLOBECOM, 2001.

[28] L. Jiang, M.Yuksel, S. Kalyanaraman, *"Explicit rate multicast congestion control"*, Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, Volume 50, Issue 15, (October 2006), Pages: 2614 – 2640, 2006.

[29] S. McCanne, V. Jacobson, M. Vetterli*, "Receiver-driven layered multicast"*, in Proceedings of ACM SIGCOMM, 1996.

[30] RFC 2236, W. Fenner, *"Internet Group management Protocol, version 2"*, Network Working Group, November 1997.

[31] A. Legout, E. Biersack, *"PLM: fast convergence for cumulative layered multicast transmission schemes"*, in Proceedings of ACM SIGMETRICS, 2000.

[32] L. Vicisiano, L. Rizzo, J. Crowcroft, *"TCP - like congestion control for layered multicast data transfer"*, in IEEE INFOCOM, March 1998, pp. 996 - 1003.

[33] J.W. Byers et al., *"FLID-DL congestion control for layered multicast"*, in Proceedings of NGC, 2000.

[34] Byers, J; Luby, M.; Mitzenmacher, M.,*" Fine-grained layered multicast"* in Proceedings of INFOCOM 2001, Volume 2, Issue, 2001 Page(s):1143 – 1151.

[35] J. Byers, G. Kwon, *"STAIR: Practical aimd multirate multicast congestion control"*, in: Proceedings of NGC, 2001.

[36] J. Li, S. Kalyanaraman, *"Generalized multicast congestion control,"* in: Proceedings of 5th COST 264 International Workshop on Network Group Communications (NGC 2003) and ICQT, 2003.

[37] C. Bouras, A. Gkamas, G. Kioumourtzis, *"Smooth Multicast Congestion Control for Adaptive Multimedia Transmission"*, NGI 2008, Krakow, Poland, 28030 April 2008.

[38] Pandhye J, Kurose J, Towsley D, Koodli R. "*A model based TCP-friendly rate control protocol*", Proceedings of the International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV), Basking Ridge, NJ, June 1999.

[39] T. Jiang, E. W. Zegura, and M. H. Ammar, *"Inter-receiver fair multicast communication over the Internet,"* in Proc. NOSSDAV'99, AT&T Learning Center, Basking Ridge NJ, USA, 23-25 June 1999.

[40] C. Bouras, A. Gkamas, *"SRAMT-S: A hybrid sender and receiver-based adaptation scheme for TCP friendly multicast transmission using simulcast approach"*, 1st IFIP Workshop on Internet Technologies, Applications and Social Impact (WITASI-02), Wroclaw, Poland, 10 - 11 October 2002, pp. 105 – 122.

[41] C. Bouras, A. Gkamas, G. Kioumourtzis, *"Adaptive Smooth Simulcast Protocol for Multimedia Transmission"*, the Fourteenth IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC09), Sousse, Tunisia,, July 5 - 8 2009.

[42] M. van der Schaar, D. Sai Shankar N, *"Cross-layer wireless multimedia transmission: Challenges, principles and new paradigms"*, IEEE wireless Communications, August 2005

[43] Shakkottai, S. Rappaport, T.S. Karlsson, P.C. *"Cross-layer design for wireless Networks"*, IEEE Communication magazine, Volume: 41, Issue: 10, Oct 2003.

[44] M. van der Schaar, S. Krishnamachari, S. Choi *"Adaptive Cross-Layer Protection Strategies for Robust Scalable Video Transmission Over 802.11 WLANs"*, IEEE Journal on selected areas in communications, vol 21, no.10 December 2003.

[45] Qi Wang; Abu-Rgheff, M.A., *"Cross-Layer Signalling for Next-Generation. Wireless Systems"*, IEEE WCNC 2003, vol. 2, Mar. 2003, pp. 1084–89.

[46] Jie Chen, Tiejun Lv and Haitao Zheng. *"Cross-layer design for QoS wireless communications"*, Proceedings of the 2004 International Symposium on Circuits and Systems, 2004. ISCAS '04, Volume: 2, On page(s): II- 217-20 Vol.2, May 2004.

[47] Carneiro, G. Ruela, J. Ricardo, M, *"Cross-layer design in 4G wireless terminals"*, IEEE Wireless Communications, Volume: 11, Issue: 2, page(s): 7- 13, Apr 2004.

[48] C. Bouras, A. Gkamas, G. Kioumourtzis**,** "*Adaptive smooth multicast protocol for multimedia transmission: Implementation details and performance evaluation*", International Journal Of Communication Systems Int. J. Commun. Syst. (2009) Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/dac.1059. 2009; 23(3): 299 - 333.

[49] Gharai, L., *"RTP with TCP Friendly Rate Control"*, draft-ietf-avt-tfrc-profile-07 (work in progress), March 2007.

[50] C. Bouras, A. Gkamas, *"Streaming multimedia data with adaptive QoS characteristics"*, 5th International Conference on Protocols for Multimedia Systems-PROMS 2000, Cracow, Poland, 22 - 25 October 2000, pp. 129 – 139.

[51] F. Hamto and H. Sirisena, *"Cumulative Inter-ADU Jitter Concept and Its Applications"*, in Pmc. of IEEE ICCCN, Scottdale, AZ, October 2001. pp. 531-534.

[52] J. Nonnenmacher and Ernst W. Biersack, *"Optimal multicast feedback,"* in Proceedings of the Conference on Computer Communications (IEEE Infocom), San Francisco, USA, Mar. 1998.

[53] REAL:On-line http://www.google.com/search?client=gmail&rls=gm&q=REAL%20network%20simulator

[54] C. Bouras, A. Gkamas, G. Kioumourtzis, *"Extending the Functionality of RTP/RTCP Implementation in Network Simulator (NS-2) to support TCP friendly congestion control"*, First International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems (SIMUTools 2008), March 3-7, 2008, Marseille, France.

[55] RFC 5166, *"Metrics for the Evaluation of Congestion Control Mechanisms"*, S.Floyd, March 2008.

[56] Installation instructions for TFMCC. Available on-line: http://www.informatik.uni-mannheim.de/pi4/projects/congctrl/tfmcc/installation.html

[57] Research Academic Computer Technology Institute-Research Unit 6. Available on-line: http://ru6.cti.gr/ru6/ns_rtp_home.php

[58] Feng Xie, Gang Feng, Chee Kheong Siew, *"Study on nominee selection for multicast congestion control"*, Computer Communications, Volume 29, Issue 9, 31 May 2006, Pages 1458-1469.

[59] Hualiang Chen, Zhongxin Liu, Zengqiang Chen, Zhuzhi Yuan, *"Extending TCP congestion control to multicast"*, Computer Networks, Volume 51, Issue 11, 8 August 2007, Pages 3090-3109.

[60] Haiyuan Ma, Xiangru Meng, Li Zhou, Huan Li, Xiaomin Zhang, *"Fuzzy-Logic-Based Rate Adaption Scheme for TFMCC"*, vol. 1, pp.238-241, 2009 International Conference on Networking and Digital Society, 2009.

[61] Wafa Kammoun & Habib Youssef, *"Equation-based end-to-end single-rate multicast congestion control"*, Institut TELECOM and Springer-Verlag 2010, Published online: 16 February 2010, DOI 10.1007/s12243-010-0159-1.

[62] J. Klaue, B. Rathke and A. Wolisz, *"EvalVid – A Framework for Video Transmission and Quality Evaluation"*, Proceedings of the 13th International Conference on Modeling, Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation, Urbana, Illinois, 2003.

[63] Lie A., Klaue J., *"Evalvid-RA: Trace Driven Simulation of Rate Adaptive MPEG-4 VBR Video"*, ACM/Springer Multimedia Systems Journal autumn 2007.

[64] ASMP and Evalvid-RA multicast extension. Available on-line: http://ru6.cti.gr/ru6/ns_rtp_asmp_ra.php

[65] ITU-T Recommendation G.100/P.10 Amendment 1: New appendix. I—*Definition of quality of experience (QoE)*. Jan (2007).

[66] ITU-T Recommendation P.910: *Subjective video quality assessment methods for multimedia applications*. April (2008).

[67] Rohaly M., et al., *"Video Quality Experts Group: Current Results and Future Directions"*, In: SPIE Visual Communications and Image Processing, Perth, Australia, June 21-23, 2000, Vol. 4067, p.742-753.

[68] ITU-T Recommendation G.1080: *Quality of experience requirements for IPTV services*. Dec (2008).

[69] J. Cavers, *"Mobile Channel Characteristics"*, Kluwer Academic, 2000.

[70] S. Winkler, *"Digital Video Quality – Vision Models and Metrics"*. John Wiley & Sons, 2005.

[71] FFmpeg audio/video conversion tool (information available online)., http://sourceforge.net/projects/ffmpeg/

[72] "ISO/IEC 14496-2, Information technology – Coding of audio-visual objects – Part 2: Visual," 1999.

[73] Available from http://www.tkn.tu-berlin.de/research/evalvid/

[74] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, *"A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Systems"*, DEC Research Report TR-301, Tech. Rep., Sept 1984.

[75] L. Tionardi and F. Hartanto, *"The Use of Cumulative Inter-Frame for Adapting Video Transmission Rate"*, Proceedings of TENCON, Bangalore, India, 2003.

[76] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 and ITU-T SG16 Q.6, "Joint Draft 11: Scalable Video Coding" Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG&ITU-T VCEG, Document JVT-X201, Geneva, Switzerland, July 2007.

[77] T. Kim and M. H. Ammar, *"A comparison of layering and stream replication video multicast schemes,"* in Proc. NOSSDAV'01, Port Jefferson, New York USA, June 25-26, 2001.

[78] P. de Cuetos, D. Saparilla, and K.W. Ross, *"Adaptive streaming of stored video in a TCP-friendly context: multiple versions or multiple layers,"* in Proc. Packet Video Workshop, Apr. 2001.

[79] Avramova, Z. et al, *"Comparison of Simulcast and Scalable Video Coding in Terms of the Required Capacity in an IPTV Network"*, in Proceedings of PV 2007, Lausanne, Switzerland, November 2007.

[80] Smooth Multirate Multicast Congestion Control, (information available online – visited 08/2009), on line: http://cs-people.bu.edu/guin/smcc.html

[81] Research Unit 6//Research Academic Computer Technology Institute activities on multimedia transmission (information available online – visited 08/2009), on line: http://ru6.cti.gr/ru6/ns_rtp_home.php

[82] Jiangchuan Liu Bo Li, *"Optimal stream replication for video simulcasting"*, 10th IEEE International Conference on Network Protocols, Paris, France, November 12-15, 2002.

[83] ITU-T Recommendation H.264: *Advanced video coding for generic audiovisual services*. March 2008.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV: ΑΚΡΩΝΥΜΑ

ΑΚΡΩΝΥΜΑ

ABR	Available Bit Rate
AIMD	Additive Increase Multiplicative Decrease
API	Application Programmable Interface
APP	Application specific Part
APQ	Automatic Repeat Request
CBR	Constant Bit Rate
CNAME	Canonical Names
CSRC	Contributing Source
DiffServ	Differentiated Service
DNS	Domain Naming Service
DSG	Destination Set Grouping
DVI	Digital Video Interface
ECN	Early Congestion Notification
FEC	Forward Error Correction
FIFO	First In First Out
FTP	File Transfer Protocol
HDTV	High Definition Television
HTTP	HyperText Transmission Protocol
IANA	Internet Assigned Numbers Authority
ICMP	Internet Control Message Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IGMP	Internet Group Membership Protocol
IntServ	Integrated Service
IP	Internet Protocol
IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6

IS	Integrated Services
ISO	International Standard Organization
ITU - T	Telecommunication Standardization Sector of the International Telecommunications Union
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LAN	Local Area Networks
LBA	Loss Based Adjustment algorithm
LBA+	Enhanced Loss - Delay Based Adaptation algorithm
MLDA	Multicast enhanced Loss - Delay based Adaptation algorithm
MMCC	Multimedia Conference Control
MPEG	Moving Picture Experts Group
NS - 2	Network Simulator 2
NTSC	National Television Standards Committee
OSI	Open System Interconnect
PAL	Phase Alternation Line
PGM	Single Rate Multicast Congestion Control Scheme
PLM	Packet pair receiver - driven Layered Multicast
PT	Packet Type
QoS	Quality of Service
QoE	Quality of Experience
RAP	Rate Adaptation Protocol
RED	Random Early Detection
RFC	Request For Comments
RGB	Red Green Blue
RIP	Routing Information Protocol
RLC	Receiver - driven, Layered Congestion control algorithm
RR	Receiver Report
RSVP	Resource Reservation Setup Protocol
RTCP	Real - time Transport Control Protocol

RTP	Real - time Transport Protocol
RTT	Round Trip Time
SDES	Source Description
SDR	Session Directory Tool
SLA	Service Level Agreement
SR	Sender Report
SSRC	Synchronization Source
TBRC	Target Bandwidth Rate Control
TCP	Transmission Control Protocol
TFMCC	TCP - Friendly Multicast Congestion Control
TFRCP	TCP - Friendly Rate Control Protocol
TOS	Type Of Service
UDP	User Datagram Protocol
VAT	Visual Audio Tool
VBR	Variable Bit Rate
VC	Virtual Circuit
VIC	Videoconferencing Tool
VoD	Video on Demand
WAN	Wide Area Networks
WWW	World Wide Web

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V: ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

Bandwidth: A bit rate measure of available or consumed data communication resources expressed in bits/second or multiples of it (kilobits/s, megabits/s etc).

Congestion control: Congestion control concerns controlling traffic entry into a telecommunications network, so as to avoid congestive collapse by attempting to avoid oversubscription of any of the processing or link capabilities of the intermediate nodes and networks and taking resource reducing steps, such as reducing the rate of sending packets. It should not be confused with flow control, which prevents the sender from overwhelming the receiver.

Cross-layer optimization-adaptation: Cross-layer optimization is an escape from the pure waterfall-like concept of the OSI communications model with virtually strict boundaries between layers. The cross layer approach transports feedback dynamically via the layer boundaries to enable the compensation for e.g. overload, latency or other mismatch of requirements and resources by any control input to another layer but that layer directly affected by the detected deficiency

Content Distribution Networks: A content delivery network or content distribution network (CDN) is a system of computers containing copies of data, placed at various points in a network so as to maximize bandwidth for access to the data from clients throughout the network. A client accesses a copy of the data near to the client, as opposed to all clients accessing the same central server, so as to avoid bottleneck near that server.

Delay: The delay of a network specifies how long it takes for a bit of data to travel across the network from one node or endpoint to another. It is typically measured in multiples or fractions of seconds.

Differentiated Services: Differentiated Services or DiffServ is a computer networking architecture that specifies a simple, scalable and coarse-grained mechanism for classifying, managing network traffic and providing Quality of Service (QoS) guarantees on modern IP networks

Forward Error Correction: Forward error correction is a system of error control for data transmission, whereby the sender adds redundant data to its messages, which allows the receiver to detect and correct errors without the need to ask the sender for additional data.

FIFO: FIFO is an acronym for First In, First Out, an abstraction in ways of organizing and manipulation of data relative to time and prioritization. This expression describes the principle of a queue processing technique or servicing conflicting demands by ordering process by first-come, first-served (FCFS) behavior:

Internet Service Provider: An Internet service provider (ISP), also sometimes referred to as an Internet access provider (IAP), is a company that offers its customers access to the Internet.

Integrated services: IntServ or integrated services is an architecture that specifies the elements to guarantee quality of service (QoS) on networks. IntServ can for example be used to allow video and sound to reach the receiver without interruption.

Internet Engineering Task Force (IETF): The Internet Engineering Task Force (IETF) develops and promotes Internet standards, cooperating closely with the W3C and ISO/IEC standards bodies and dealing in particular with standards of the TCP/IP and Internet protocol suite.

Internet draft: Internet Drafts (or I-Ds) is a series of working documents published by the IETF.

Multimedia data: Multimedia data refers to data that consist of various media types like text, audio, Video and animation

Multicast: Multicast addressing is a network technology for the delivery of information to a group of destinations simultaneously using the most efficient strategy to deliver the messages over each link of the network only once, creating copies only when the links to the multiple destinations split.

Packet loss rate: Packet loss rate is defined as the fraction of the total transmitted packets that did not arrive at the receiver

Packet loss ratio: The fraction of the total received packets over the number of the total transmitted packets

Quality of Service (QoS): The ability to provide specific guarantees to traffic flows.

Delay jitter: Delay jitter is defined to be the mean deviation (smoothed absolute value) of the difference in packet spacing at the receiver compared to the sender for a pair of packetsregarding the network characteristics such as packet loss, delay and jitter experienced by the flows.

RTP/RTCP: Protocol which is used for the transmission of multimedia data. The RTP (Real-time Transport Protocol) performs the actual transmission and the RTCP (Real-time Transport Control Protocol) is the control and monitoring transmission.

RTSP: The Real-Time Streaming Protocol (RTSP) allows control multimedia streams. Control includes absolute positioning within the media stream, recording and possibly device control.

Random early detection (RED): Is an active queue management algorithm, also known as random early discard or random early drop. It is also a congestion avoidance algorithm.

Request for Comments (RFC): Is a memorandum published by the Internet Engineering Task Force (IETF) describing methods, behaviors, research, or innovations applicable to the working of the Internet and Internet-connected systems.

Service Level Agreement: A service level agreement (frequently abbreviated as SLA) is a part of a service contract where the level of service is formally defined.

SIP: Session Initiation Protocol (SIP) is an application-layer control (signaling) protocol for creating, modifying, and terminating sessions with one or more participants.

Signal to Noise Ratio: Signal-to-noise ratio is an electrical engineering concept, defined as the ratio of a signal power to the noise power corrupting the signal.

Simulcast: Simulcast, shorthand for "simultaneous broadcast", refers to programs or events broadcast across more than one medium, or more than one service on the same medium, at the same time.

Transmission Control Protocol (TCP): The Transmission Control Protocol (TCP) is one of the core protocols of the Internet Protocol Suite. TCP is one of the two original components of the suite, complementing the Internet Protocol (IP) and therefore the entire suite is commonly referred to as TCP/IP. TCP provides the service of exchanging data reliably directly between two network hosts, whereas IP handles addressing and routing message across one or more networks.

TCP Friendly Rate Control (TFRC): TCP-Friendly Rate Control (TFRC) is a congestion control mechanism designed for unicast flows operating in an Internet environment and competing with TCP traffic. The goal is to compete fairly with TCP traffic on medium timescales, but to be much less variable than TCP on short timescales.

Unicast: In computer networking, unicast transmission is the sending of messages to a single network destination host on a packet switching network.

Voice over IP: Voice over Internet Protocol (VoIP, Voice over IP) is a general term for a family of methodologies, communication protocols, and transmission technologies for delivery of voice communications and multimedia sessions over Internet Protocol (IP) networks, such as the Internet.

Videoconference: A videoconference or video conference is a set of interactive telecommunication technologies which allow two or more locations to interact via two-way video and audio transmissions simultaneously.