



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αλγόριθμος Μετάδοσης Πολυμέσων Self-Clocked Rate
Adaptation for Multimedia (SCReAM)**

Ελευθέριος Η. Ντελέζος

Επιβλέπων: Παντελής Μπαλαούρας, Μέλος ΕΔΙΠ

ΑΘΗΝΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλγόριθμος Μετάδοσης Πολυμέσων Self-Clocked Rate Adaptation for Multimedia
(SCReAM)

Ελευθέριος Η. Ντελέζος

A.M.: 1115201700109

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: Παντελής Μπαλαούρας, Μέλος ΕΔΙΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην Πτυχιακή Εργασία αυτή παρουσιάζεται μια μελέτη για τον αλγόριθμο ελέγχου συμφόρησης Self-Clocked Rate Adaptation for Multimedia (SCReAM). Αρχικά, αναλύθηκε το πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει το SCReAM καθώς και οι τεχνολογίες και πρωτόκολλα που χρησιμοποιεί για να λειτουργήσει. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα τρία στάδιά του, ο έλεγχος συμφόρησης δικτύου, ο έλεγχος μετάδοσης αποστολέα και ο έλεγχος ρυθμού πολυμέσων. Στη συνέχεια, αναλύεται σε μεγαλύτερο βάθος η λειτουργία του αλγορίθμου, τόσο από την πλευρά του αποστολέα δεδομένων, όπου και συγκεντρώνεται η περισσότερη λειτουργικότητα του αλγορίθμου, όσο και από την πλευρά του παραλήπτη. Παρατίθενται κάποια αποτελέσματα προσομοιώσεων και δοκιμών, που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, τα οποία ερευνούν το αν ο αλγόριθμος πράγματι κάνει αυτά που υπόσχεται. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια γενική περιγραφή κάποιων ανταγωνιστικών αλγορίθμων του SCReAM και παρουσιάζεται μια γενική σύγκριση μεταξύ αυτών. Επίσης, ερευνάται το αν και με ποιον τρόπο θα μπορούσε το SCReAM να ενταχθεί στην τεχνολογία 5G. Τέλος, αναφέρονται κάποιοι προβληματισμοί σχετικά με την λειτουργία του SCReAM και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την όλη μελέτη.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Δικτύωση Πολυμέσων

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: SCReAM, έλεγχος ροής πολυμέσων, έλεγχος συμφόρησης, επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, self-clocking

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα, μέλος ΕΔΙΠ Παντελή Μπαλαούρα, για τη συνεργασία, την κατανόηση και την πολύτιμη συμβολή του στην ολοκλήρωσή της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Το πρόβλημα που έχει να αντιμετωπίσει το SCReAM.....	11
1.2 Πρωτόκολλα και τεχνολογίες σχετικές με το SCReAM	12
1.2.1 Long Term Evolution (LTE)	12
1.2.2 Real-time Transport Protocol (RTP)	13
1.2.3 Transmission Control Protocol (TCP)	13
1.2.4 Low Extra Delay Background Transport (LEDBAT).....	14
1.2.5 Explicit Congestion Notification (ECN).....	14
1.2.6 Web Real-Time Communication (WebRTC).....	15
1.2.7 Low Latency Low Loss Scalable Throughput (L4S)	15
2. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ.....	16
2.1 Έλεγχος συμφόρησης δικτύου.....	17
2.2 Έλεγχος μετάδοσης αποστολέα.....	19
2.3 Έλεγχος ρυθμού πολυμέσων	19
3. ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ SCReAM	20
3.1 Αποστολέας.....	20
3.1.1 Τιμές σταθερών και παραμέτρων.....	20
3.1.2 Έλεγχος συμφόρησης δικτύου	21
3.1.3 Έλεγχος ρυθμού πολυμέσων.....	26
3.2 Παραλήπτης.....	26
3.2.1 Στοιχεία που στέλνει ο παραλήπτης	27
3.2.2 Συχνότητα αποστολής feedback.....	27
4. SCReAM ΚΑΙ ECN.....	28
5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	31

6. ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	37
6.1 Google Congestion Control (GCC)	37
6.2 Network Assisted Dynamic Adaptation (NADA)	38
6.3 FRACTaL	39
6.4 Σύγκριση των αλγορίθμων	39
7. SCREaM και 5G.....	41
8. ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	43
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	44
ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	45
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	46
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	47

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Επισκόπηση του SCReAM από την πλευρά του αποστολέα	17
Σχήμα 2: Παράδειγμα με προσαρμόσιμο όριο καθυστέρησης	18
Σχήμα 3: SCReAM χωρίς υποστήριξη ECN	28
Σχήμα 4: SCReAM με υποστήριξη ECN, Παράγοντας ECN = 0.8.....	29
Σχήμα 5: SCReAM με υποστήριξη L4S	29
Σχήμα 6: Καθυστέρηση και απώλεια πακέτων μεταξύ των δύο αλγορίθμων	31
Σχήμα 7: Μέσο bitrate των δύο αλγορίθμων.....	31
Σχήμα 8: Αποτελέσματα προσομοίωσης δικτύου LTE.....	32
Σχήμα 9: Αποτελέσματα της προσομοίωσης κατά τη διάρκεια οδήγησης	33
Σχήμα 10: Αποτελέσματα του πειράματος. Στο κάτω γράφημα το RTT είναι με πράσινο χρώμα και η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά με μπλε χρώμα.....	35
Σχήμα 11: Εστίαση στα αποτελέσματα του πειράματος για $T = 300-315$ s.....	36
Σχήμα 12: Σύγκριση ορίων καθυστέρησης	42

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ψευδοκώδικας για την περίπτωση που υπάρχουν ανταγωνιστικές ροές στο SReAM.....	24
Εικόνα 2: Παράδειγμα πακέτου ανατροφοδότησης (feedback) που στέλνει ο παραλήπτης.	27
Εικόνα 3: Η κατασκευή του πειράματος με τις τέσσερις IP κάμερες	34

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Παράμετροι προσομοίωσης LTE δικτύου	32
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά των αλγορίθμων	39

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία (Πτυχιακή 1) υλοποιήθηκε κατά τη θερινή περίοδο του ακαδημαϊκού έτους 2020-2021, στα πλαίσια του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη του αλγορίθμου ελέγχου συμφόρησης Self-Clocked Rate Adaptation for Multimedia (SCReAM), σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο.

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα, μέλος ΕΔΙΠ Παντελή Μπαλαούρα, για τη συνεργασία, την κατανόηση και την πολύτιμη συμβολή του στην ολοκλήρωση της.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου και τους φίλους μου, για την κατανόηση και συμπαράσταση που έδειξαν την περίοδο εκπόνησης της εργασίας αυτής.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το πρόβλημα που έχει να αντιμετωπίσει το SCReAM

Στο Διαδίκτυο συμβαίνει συμφόρηση όταν ο συνολικός μεταδιδόμενος ρυθμός μετάδοσης δυαδικών ψηφίων (bitrate) υπερβαίνει τον διαθέσιμο χώρο για τα δεδομένα σε ένα δοσμένο μονοπάτι μετάδοσης, με αποτέλεσμα να υπάρχουν φαινόμενα καθυστερήσεων στη μετάδοση δεδομένων, απώλειας πακέτων και μπλοκαρίσματος νέων συνδέσεων, μειώνοντας έτσι την ποιότητα υπηρεσίας στο δίκτυο. Οι εφαρμογές που επικοινωνούν μέσω του διαδικτύου είναι υποχρεωμένες να πραγματοποιούν συχνά έλεγχο συμφόρησης και να προσαρμόζουν δυναμικά το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων, ώστε να επιτυγχάνουν μια εύρωστη απόδοση αλλά και για να αποφύγουν την κατάρρευση. Ειδικότερα στις διαδραστικές εφαρμογές επικοινωνίας πραγματικού χρόνου, όπως και στις ασύρματες επικοινωνίες (κλασικό παράδειγμα οι Long Term Evolution (LTE) που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις μέρες μας) αυτό είναι ακόμα πιο σημαντικό, καθώς το διαθέσιμο εύρος ζώνης που υπάρχει στο κανάλι μετάδοσης μπορεί να ποικίλλει από στιγμή σε στιγμή. Οι αλλαγές αυτές στη διαθεσιμότητα μπορεί να συμβούν εξαιρετικά γρήγορα, δεδομένων των πολλών και απρόβλεπτων εμποδίων που υπάρχουν. Στις κινητές επικοινωνίες για παράδειγμα, αντανακλάσεις από κτήρια ή άλλα αντικείμενα μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη διαθεσιμότητα του εύρους ζώνης, συνεπώς και του ρυθμού μετάδοσης.

Ο έλεγχος συμφόρησης που πραγματοποιεί το Transmission Control Protocol (TCP) σε περιπτώσεις απώλειας πακέτων συνήθως συνεπάγεται επιπλέον μεταφορά δεδομένων, διότι τα πακέτα που χάνονται επαναμεταδίδονται, προκειμένου να υπάρχει η εγγύηση αξιοπιστίας όσο αφορά τη μεταφορά των δεδομένων. Αυτό σε συνδυασμό με τη μείωση του μεγέθους του παραθύρου συμφόρησης, επιφέρει μεγάλη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο. Η μετάδοση πολυμέσων (ήχου και βίντεο) σε πραγματικό χρόνο είναι πολύ ευαίσθητη σε χρονικές καθυστερήσεις, αλλά συνήθως μπορεί να ανεχτεί λίγες απώλειες πακέτων. Επομένως, στις μεταδόσεις πολυμέσων με τη βοήθεια του Real-Time Transport Protocol (RTP) χρησιμοποιείται συνήθως το User Datagram Protocol (UDP) και ο έλεγχος συμφόρησης υλοποιείται στο επίπεδο εφαρμογής αντί στο επίπεδο μεταφοράς, όπως συμβαίνει στο TCP.

Σήμερα το Διαδίκτυο έχει αλλάξει μορφή. Η περισσότερη κίνηση σε αυτό αφορά εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως βιντεοδιασκέψεις, gaming, web-browsing. Σύμφωνα με μελέτες [1], τα βίντεο πλέον αντιπροσωπεύουν το 70% της συνολικής κίνησης του διαδικτύου. Αν όλες αυτές οι ροές βίντεο κινούνται στο διαδίκτυο χωρίς να υπόκεινται σε κάποιον έλεγχο συμφόρησης, τότε ο ανταγωνισμός για το εύρος ζώνης θα οδηγήσει σε συμφόρηση δικτύου, άρα σε απώλειες πακέτων και μείωση της ποιότητας της υπηρεσίας και πιθανή κατάρρευση του Διαδικτύου. Αυτή η ανεύθυνη συμπεριφορά σπαταλά άδικα πόρους του διαδικτύου. Παρά το γεγονός ότι έγιναν κάποιες μελέτες [2][3] για υλοποίηση ελέγχου συμφόρησης πάνω στο UDP, καμία από αυτές δε βρήκε εφαρμογή στην πράξη.

Αν οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου δε βρουν τρόπο να προσαρμοστούν στους χαμηλότερους διαθέσιμους ρυθμούς μετάδοσης, μπορεί να έχουμε απώλεια πακέτων ή μεγάλη καθυστέρηση, κάτι που πολλές φορές μπορεί να μην είναι ανεκτό για την εύρυθμη λειτουργία τους. Έτσι, τα τελευταία χρόνια, ειδικά με την διάδοση της τεχνολογίας Web Real-Time Communication (WebRTC), η οποία ευνοεί τη διαλειτουργικότητα της επικοινωνίας πραγματικού χρόνου πάνω σε browsers δημιουργήθηκαν νέοι αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης για την κίνηση πραγματικού χρόνου στο διαδίκτυο. Ένας από αυτούς είναι και ο Self-Clocked Rate Adaptation for Multimedia (SCReAM), μια λύση που υλοποιεί τον έλεγχο συμφόρησης σε μεταδόσεις

που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο RTP. Το SCReAM δημιουργήθηκε από την Ericsson, είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο, βασίζεται στην αρχή της αυτορύθμισης (self-clocking) του TCP και χρησιμοποιεί τεχνικές παρόμοιες με τον αλγόριθμο προσαρμογής ρυθμού μετάδοσης που χρησιμοποιεί το Low Extra Delay Background Transport (LEDBAT). Μπορεί να χρησιμοποιήσει και το Explicit Congestion Notification (ECN) σε περίπτωση που υποστηρίζεται από το δίκτυο και τους χρήστες του. Παρ' όλα αυτά, κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο για τις βασικές λειτουργίες του SCReAM.

Οι ασύρματες επικοινωνίες, όπως οι LTE που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δεν εγγυώνται ένα σταθερό διαθέσιμο εύρος ζώνης, ειδικά σε περιπτώσεις που το κινητό τερματικό δε μένει σταθερό σε ένα μέρος. Ακόμα και αν το LTE μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς μεγαλύτερους από 100 Mbps, ο ρυθμός μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Αυτό μπορεί να συμβεί αν υπάρχει υψηλό φορτίο από άλλες συσκευές ή χαμηλή κάλυψη στο δίκτυο, ή σε περίπτωση μεταγωγής. Αυτές οι μικρότερες σε διάρκεια πτώσεις του ρυθμού είναι πιο δύσκολο να ξεχωρίσουν από άλλες πιο μόνιμες. Επίσης, ο χρόνος που είναι διαθέσιμος προκειμένου να προσαρμοστεί ο ρυθμός μετάδοσης σε ένα κανάλι στο μειωμένο εύρος ζώνης του, είναι κατά κανόνα πολύ μικρός. Επομένως, τα περιθώρια για να μην υπάρξει απώλεια πακέτων είναι πολύ στενά. Εάν στα κανάλια του LTE υπάρχει εγγύηση ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS), τότε μπορεί να υπάρξει κάποια προτεραιότητα για έναν ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης. Για παράδειγμα, μπορεί να είναι εφικτό να υπάρξει προτεραιότητα για ένα δοσμένο εύρος ζώνης σε μια μετάδοση ήχου με ρυθμό της τάξεως των 30 Kbps, όμως αυτό είναι λιγότερο πιθανό να συμβεί σε μια μετάδοση βίντεο με ρυθμό της τάξεως των 1500 Kbps. Συνήθως επιτυγχάνεται ένας συμβιβασμός στα 200 Kbps, έτσι ώστε να υπάρχει μια ελάχιστη ανεκτή ποιότητα στα βίντεο ακόμη και σε συνθήκες μεγάλης συμφόρησης.

1.2 Πρωτόκολλα και τεχνολογίες σχετικές με το SCReAM

Ακολουθούν σύντομες περιγραφές κάποιων πρωτοκόλλων και τεχνολογιών που εκμεταλλεύεται ο αλγόριθμος SCReAM για την εύρυθμη λειτουργία του.

1.2.1 Long Term Evolution (LTE)

3GPP Long Term Evolution, ή απλώς LTE ονομάζεται η τεχνολογία αιχμής που χρησιμοποιείται για την ασύρματη επικοινωνία και δικτύωση των κινητών συσκευών, με υψηλές ταχύτητες. Βασίζεται στα προϋπάρχοντα δίκτυα GSM/EDGE και UMTS/HSPA, αυξάνοντας τη χωρητικότητα και τη ταχύτητα του δικτύου χρησιμοποιώντας νέες τεχνικές διαμόρφωσης [4]. Χρησιμοποιείται για τηλεφωνικές κλήσεις και για πρόσβαση στο διαδίκτυο σε κινητές συσκευές.

Το κύριο έργο τους είναι η μετάβαση από τα ενοποιημένα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος και πακέτων και η απλοποίησή τους σε ένα ολοκληρωμένο δίκτυο αρχιτεκτονικής IP. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτού του δικτύου είναι τα εξής:

- Ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων στη καθοδική ζεύξη (download) έως και 299.6 Mbps και στην ανοδική (upload) έως και 75.4 Mbps, ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει ο εξοπλισμός του χρήστη.
- Χαμηλές καθυστερήσεις κατά τη μεταφορά δεδομένων (καθυστέρηση IP πακέτων κάτω από 5 ms).
- Βελτιωμένη υποστήριξη για κινητές συσκευές.
- Υποστήριξη κυψελών μεταβλητού μεγέθους από μερικές δεκάδες μέτρα έως και 100 χιλιόμετρα.

- Το LTE μπορεί να λειτουργήσει σε διάφορες συχνότητες. Στη Βόρεια Αμερική, σχεδιάζονται να χρησιμοποιηθούν οι συχνότητες των 700MHz και 1.7GHz. Στην Ευρώπη οι συχνότητες των 800MHz, 1.8 και 2.6 GHz, στην Ασία οι 1.8 και 2.6 GHz και στην Αυστραλία οι συχνότητες στα 2.6 GHz. Ως εκ τούτου, οι τηλεφωνικές συσκευές σε μια χώρα μπορεί να μη λειτουργούν σε μια άλλη. Για την πραγματοποίηση παγκόσμιας περιαγωγής είναι αναγκαία μια τηλεφωνική συσκευή που να μπορεί να συντονιστεί σε πολλαπλές μπάντες συχνοτήτων.

1.2.2 Real-time Transport Protocol (RTP)

Το Real-Time Transport Protocol (RTP) είναι ένα πρωτόκολλο που χειρίζεται κίνηση πραγματικού χρόνου (όπως ο ήχος ή το βίντεο) μέσα στο διαδίκτυο. Χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα που έχουν να κάνουν με ροή πολυμέσων, όπως τηλεφωνία, τηλεδιασκέψεις, IPTV και εφαρμογές που εκμεταλλεύονται το WebRTC.

Το RTP τρέχει πάνω από το UDP και χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το Real-Time Transport Control Protocol (RTCP). Το RTP μεταφέρει τις ροές πολυμέσων (ήχου και βίντεο), ενώ το RTCP χρησιμοποιείται για να καταγράφει στατιστικά των μεταδόσεων, να μετράει την ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) και να συντονίζει πολλαπλές ροές δεδομένων.

Σχεδιάστηκε για μεταφορά ροών πολυμέσων από άκρο σε άκρο, σε πραγματικό χρόνο. Παρέχει λειτουργίες για αντιμετώπιση της διακύμανσης καθυστέρησης (jitter) καθώς και για τον εντοπισμό απώλειας πακέτων και παράδοσης πακέτων εκτός της καθορισμένης σειράς, φαινόμενα που είναι συχνά όταν χρησιμοποιείται το UDP. Οι απαιτήσεις της μετάδοσης πολυμέσων είναι πολύ αυστηρές στον χρόνο και κάποιες απώλειες πακέτων μπορούν να γίνουν ανεκτές, αν πρόκειται ο χρήστης να παραλάβει έγκαιρα τα πολυμέσα. Για αυτόν τον λόγο, παρά το γεγονός ότι έχουν γίνει κάποιες μελέτες που προσπαθούν να συνδυάσουν το TCP με το RTP [5], επειδή το TCP δίνει περισσότερη βάση στην αξιοπιστία από ότι στην έγκαιρη άφιξη των δεδομένων, δεν προτιμάται σε σχέση με το UDP όταν έχουμε να κάνουμε με πολυμέσα.

1.2.3 Transmission Control Protocol (TCP)

Το Transmission Control Protocol (TCP) είναι ένα από τα σημαντικότερα πρωτόκολλα που υπάρχουν στο διαδίκτυο. Λειτουργεί πάνω από το πρωτόκολλο IP. Οι κύριοι στόχοι του πρωτοκόλλου TCP είναι να επιβεβαιώνεται η αξιόπιστη αποστολή και λήψη δεδομένων, επίσης να μεταφέρονται τα δεδομένα χωρίς λάθη μεταξύ του στρώματος δικτύου (network layer) και του στρώματος εφαρμογής (application layer) και, φτάνοντας στο πρόγραμμα του στρώματος εφαρμογής, να έχουν σωστή σειρά.

Πριν σταλούν δεδομένα μέσω του TCP πρέπει να εγκαθιδρυθεί μια σύνδεση μεταξύ του πελάτη (client) και του εξυπηρετητή (server). Ο server πρέπει να έχει δεσμεύσει μια θύρα (port) για να μπορεί να ακούει συνδέσεις από πιθανούς clients. Για να γίνει μια σύνδεση, γίνεται μια «χειραψία» ανάμεσα στα συμμετέχοντα μέρη. Η «χειραψία» αυτή, μαζί με την αναμετάδοση σε περίπτωση απώλειας πακέτων, τον έλεγχο συμφόρησης και τον εντοπισμό σφαλμάτων, ενισχύουν την αξιοπιστία του TCP, αυξάνοντας ταυτόχρονα τις καθυστερήσεις.

Το TCP χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές για τον έλεγχο συμφόρησης. Μια από αυτές είναι ο αλγόριθμος αργής εκκίνησης (slow start). Ο αλγόριθμος εγγυάται ότι το εύρος του παραθύρου συμφόρησης (το όριο κίνησης δεδομένων που μπορεί να διαχειριστεί το δίκτυο χωρίς να υπάρχουν καθυστερήσεις και απώλειες) δεν μπορεί να το ξεπεράσει το

παράθυρο αποστολής που διαφημίζει ο δέκτης στον αποστολέα (το όριο δεδομένων που μπορεί να χειριστεί ο δέκτης).

- Προσθέτει ένα παράθυρο συμφόρησης, cwnd (Congestion Window), στην κατάσταση ανά σύνδεση.
- Κατά την εκκίνηση ή επανεκκίνηση μετά από μια απώλεια, θέτει το cwnd σε ένα πακέτο.
- Σε κάθε επιβεβαίωση (ack) για νέα δεδομένα, αυξάνει το cwnd εκθετικά. Κατά την αποστολή, στέλνει το μήκος παραθύρου που ανακοίνωσε ο παραλήπτης στον αποστολέα και το cwnd.

Κατά τη διάρκεια της αργής εκκίνησης, το παράθυρο συμφόρησης αυξάνει εκθετικά. Όταν το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο, τότε τα πακέτα (και οι επιβεβαιώσεις αυτών) φτάνουν στον προορισμό τους με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης και έτσι το παράθυρο συμφόρησης αυξάνει γραμμικά. Τότε είμαστε στην κατάσταση self-clocking. Το “self-clocking” σύστημα, [6] προσαρμόζεται αυτόματα στο εύρος ζώνης και στις παραλλαγές καθυστέρησης.

1.2.4 Low Extra Delay Background Transport (LEDBAT)

Η τεχνολογία Low Extra Delay Background Transport (LEDBAT) μας προσφέρει τη δυνατότητα να μεταφέρουμε δεδομένα στο διαδίκτυο γρήγορα, χωρίς να μπλοκάρουμε το δίκτυο. Δημιουργήθηκε από τον Stanislav Shalunov [7] και χρησιμοποιείται από το BitTorrent για τις περισσότερες από τις μεταφορές δεδομένων που πραγματοποιεί [8]. Είναι ένας αλγόριθμος ελέγχου συμφόρησης που βασίζεται στην καθυστέρηση: Μετράει την μονόδρομη καθυστέρηση (one-way delay) για να εκτιμήσει την καθυστέρηση αναμονής στην ουρά (queueing delay). Όταν η εκτιμώμενη καθυστέρηση αναμονής στην ουρά είναι κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο, το LEDBAT ενημερώνει ότι δεν υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο. Όταν όμως το όριο ξεπεραστεί, το LEDBAT μειώνει τον ρυθμό αποστολής δεδομένων για να προλάβει μια πιθανή συμφόρηση στο δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, το LEDBAT προλαβαίνει το κλασικό TCP στην ανίχνευση συμφόρησης.

1.2.5 Explicit Congestion Notification (ECN)

Το Explicit Congestion Notification (ECN) είναι μια επέκταση του Internet Protocol (IP) και του TCP που επιτρέπει σε δύο χρήστες να ειδοποιούνται από άκρο σε άκρο για το γεγονός ότι υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο, χωρίς να χάνονται πακέτα. Τοποθετείται στην IP κεφαλίδα ενός πακέτου ένα σημάδι για να ενημερωθεί ο παραλήπτης για την επερχόμενη συμφόρηση. Ο παραλήπτης του πακέτου ενημερώνει τον αποστολέα, ο οποίος ρίχνει τον ρυθμό μετάδοσής του, όπως θα έκανε αν χανόταν κάποιο πακέτο.

Το TCP υποστηρίζει το ECN βάζοντας δύο flag bits στην κεφαλίδα του. Το πρώτο, το ECN-Echo (ECE) χρησιμοποιείται για να ειδοποιηθεί ο αποστολέας ότι υπάρχει συμφόρηση και να μειώσει τον ρυθμό μετάδοσής του. Το δεύτερο, ενημερώνει ότι το ECE διαβάστηκε επιτυχώς και έχει μειωθεί το παράθυρο συμφόρησης, σαν να ανιχνεύθηκε κάποια απώλεια πακέτου (Congestion Window Reduced – CWR). Όταν έχει συμφωνηθεί ότι θα υπάρχει και το ECN πάνω σε μια TCP σύνδεση, τότε ο αποστολέας βάζει στα TCP/IP πακέτα ένα ειδικό σήμα, έτσι ώστε αν περάσουν από κάποιον δρομολογητή (router) που υποστηρίζει το ECN, αυτός να μην τα απορρίψει σε περίπτωση συμφόρησης, αλλά να ενεργοποιήσει το ECE bit. Το ECN μπορεί να λειτουργήσει και με άλλα πρωτόκολλα, όπως το Stream Control Transmission Protocol (SCTP) και το UDP.

Όπως είναι λογικό, το ECN μειώνει τον αριθμό πακέτων που απορρίπτονται σε μια TCP σύνδεση και έτσι, αφού αποφεύγονται οι αναμεταδόσεις, μειώνονται οι καθυστερήσεις.

1.2.6 Web Real-Time Communication (WebRTC)

Το Web Real-Time Communication (WebRTC) είναι ένα ελεύθερο έργο ανοιχτού κώδικα το οποίο παρέχει στους web browser και σε εφαρμογές κινητών τη δυνατότητα για επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, μέσα από διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών (Application Programming Interfaces - APIs). Επιτρέπει σε ήχο και βίντεο να λειτουργούν μέσα σε ιστοσελίδες, δίνοντας τη δυνατότητα για άμεση peer-to-peer επικοινωνία, εξαλείφοντας την ανάγκη για εγκατάσταση πρόσθετων ή για κατέβασμα επιπλέον εφαρμογών.

1.2.7 Low Latency Low Loss Scalable Throughput (L4S)

Το Low Latency Low Loss Scalable Throughput (L4S) είναι μια τεχνολογία που έχει σκοπό να κάνει την καθυστέρηση της κίνησης το διαδίκτυο πολύ χαμηλή. Η βασική του ιδέα είναι να ειδοποιεί έγκαιρα για τυχόν συμφόρηση όταν τα πακέτα που περιμένουν στην ουρά του δικτύου ξεπερνούν ένα προκαθορισμένο όριο. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό να κρατηθεί μια χαμηλή καθυστέρηση αναμονής στην ουρά και παράλληλα να επιτυγχάνεται μια σημαντική εκμετάλλευση των πόρων του δικτύου. Προς το παρόν, το L4S είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο.

Το L4S βασίζεται στο ECN και η διαδικασία του εντοπισμού συμφόρησης και της προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων είναι η εξής:

- Ο αποστολέας μέσω ενός συγκεκριμένου κωδικού bit στο πακέτο υποδηλώνει ότι αυτό υποστηρίζει το L4S.
- Έπειτα, οι κόμβοι του δικτύου αναγνωρίζουν ότι το πακέτο υποστηρίζει το L4S και όταν ανιχνεύεται συμφόρηση, αλλάζουν τα bits που είναι σχετικά με το ECN για να ενημερώσουν το υπόλοιπο δίκτυο για την συμφόρηση.
- Το πακέτο φτάνει στον παραλήπτη και αν τα bits που είναι σχετικά με το ECN δείχνουν ότι υπήρξε συμφόρηση στη διαδρομή, ο παραλήπτης ειδοποιεί τον αποστολέα σχετικά.
- Ο αποστολέας, αφού ειδοποιηθεί ότι υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο, μειώνει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

2. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

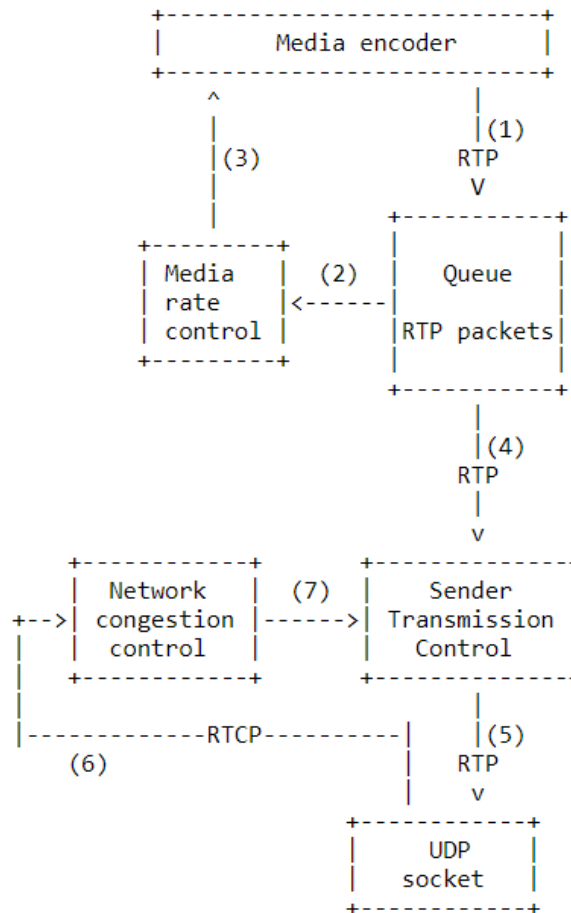
Ο SCReAM λοιπόν είναι ένας αλγόριθμος που έχει ομοιότητες με την πολιτική self-clocking που ακολουθεί το TCP και βασίζεται στην αρχή διατήρησης των πακέτων, δηλαδή προσπαθεί να μη χάνονται πακέτα. Σε αντίθεση με πολλούς άλλους αλγορίθμους ελέγχου συμφόρησης που βασίζονται στον ρυθμό μετάδοσης (δηλαδή εκτιμούν το τρέχον διαθέσιμο εύρος ζώνης και προσαρμόζουν ανάλογα τον ρυθμό μετάδοσης bit των πολυμέσων), ο SCReAM δε στέλνει περισσότερα δεδομένα σε ένα δίκτυο από όσα εξέρχονται από αυτό. Για να συμβεί αυτό, υλοποιείται ένα πρωτόκολλο ανατροφοδότησης πάνω από το Real-Time Transport Control Protocol (RTCP) που καταγράφει τα λαμβανόμενα RTP πακέτα. Πιο συγκεκριμένα, ο παραλήπτης των πολυμέσων στέλνει πίσω στον αποστολέα μια λίστα, η οποία αποτελείται από τα λαμβανόμενα RTP πακέτα, το μέγεθος αυτών και τον αριθμό ακολουθίας τους. Τη λίστα αυτή την κρατάει ο αποστολέας, για να μπορέσει να καταλάβει πόσα bytes μπορούν ακόμα να μεταδοθούν με επιτυχία στο δίκτυο. Ένα παράθυρο συμφόρησης βάζει όριο στο πόσα byte μπορούν να είναι «αιωρούμενα» στο δίκτυο, δηλαδή να έχουν μεταδοθεί αλλά να μην έχουν επιβεβαιωθεί, δηλαδή ούτε έχουν χαθεί ούτε έχει σταλεί κάποια επιβεβαίωση (ACK) για αυτά. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της καθυστέρησης αναμονής στην ουρά (queueing delay) των πακέτων. Όπως προαναφέρθηκε, η τεχνική είναι παρόμοια με τον έλεγχο συμφόρησης που γίνεται στο LEDBAT, προκειμένου να κρατιέται σε χαμηλά επίπεδα η καθυστέρηση από άκρη σε άκρη. Η διαφορά είναι ότι εδώ η πηγή είναι περιορισμένου ρυθμού και έτσι η ουρά RTP πακέτων πρέπει να διατηρείται μικρή, αν γίνεται και εντελώς άδεια. Επιπλέον, η έξοδος ενός κωδικοποιητή βίντεο σπάνια είναι σταθερού ρυθμού, και αυτός είναι άλλος ένας λόγος για τον οποίο η ουρά των RTP πακέτων πρέπει να κρατηθεί σε χαμηλά επίπεδα. Επιπροσθέτως, αν υπάρχουν ανταγωνιστικές TCP ροές, αυτές είναι ικανές να κάνουν το self-clocking του SCReAM πιο αργό, με αποτέλεσμα να μεγαλώσει η ουρά και να πέσει ο ρυθμός μετάδοσης του βίντεο.

Η βασική λειτουργία του LEDBAT στο SCReAM είναι απλή, όμως υπάρχουν κάποιες προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται για να δουλέψει αυτή η ιδέα με τα συμβατικά πολυμέσα:

- Πρώτα από όλα, πρέπει να σιγουρευτεί ότι το παράθυρο συμφόρησης περιορίζεται από τα «αιωρούμενα» bytes που υπάρχουν στο δίκτυο. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η πηγή είναι περιορισμένου ρυθμού, όπως το βίντεο. Αν αυτό δε συμβαίνει, τότε θα υπάρχει αργή αντίδραση στη συμφόρηση του δικτύου, αφού το παράθυρο συμφόρησης δε θα αντικατοπτρίζει την πραγματική κατάσταση του δικτύου. Η επιτρεπόμενη περίοδος αδράνειας είναι μεγαλύτερη από ότι σε αντίστοιχες πρακτικές του TCP [9]. Ο λόγος είναι πως επιδιώκεται να αποφευχθούν μεγάλες καθυστερήσεις σε περιπτώσεις που, για οποιονδήποτε λόγο, το διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου μειώνεται. Αντίστοιχα, τα πράγματα είναι πιο ελαστικά όταν το παράθυρο συμφόρησης πρέπει να μεγαλώσει, κάτι που είναι απαραίτητο λόγω του συνεχώς μεταβαλλόμενου ρυθμού μετάδοσης, προκειμένου να μη μένει κομμάτι του δικτύου ανεκμετάλλευτο.
- Η λειτουργία γρήγορης αύξησης ενεργοποιείται όταν δεν υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο και κάνει τον ρυθμό μετάδοσης να αυξάνεται πολύ γρήγορα, σε διάστημα 5 με 10 δευτερολέπτων. Αντίστοιχα, απενεργοποιείται όταν ανιχνεύεται συμφόρηση εντός του δικτύου. Παρ' όλα αυτά, η λειτουργία αυτή μπορεί να ενεργοποιηθεί ακόμα και όταν υπάρχει χαμηλός φόρτος δικτύου. Σε αυτήν την

περίπτωση πραγματοποιείται μια λογική αύξηση στον ρυθμό μετάδοσης στην περίπτωση που αυξηθεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

- Η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά χρησιμοποιείται για έγκαιρη ανίχνευση της συμφόρησης όταν αυτή ξεκινά. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι διακυμάνσεις καθυστέρησης (jitters) μέσα στο δίκτυο.
- Πρέπει να υπάρχει μια λειτουργία ελέγχου του ρυθμού των πολυμέσων.



Σχήμα 1: Επισκόπηση του SCReAM από την πλευρά του αποστολέα

Ο αλγόριθμος SCReAM λοιπόν αποτελείται από τρία κύρια στάδια:

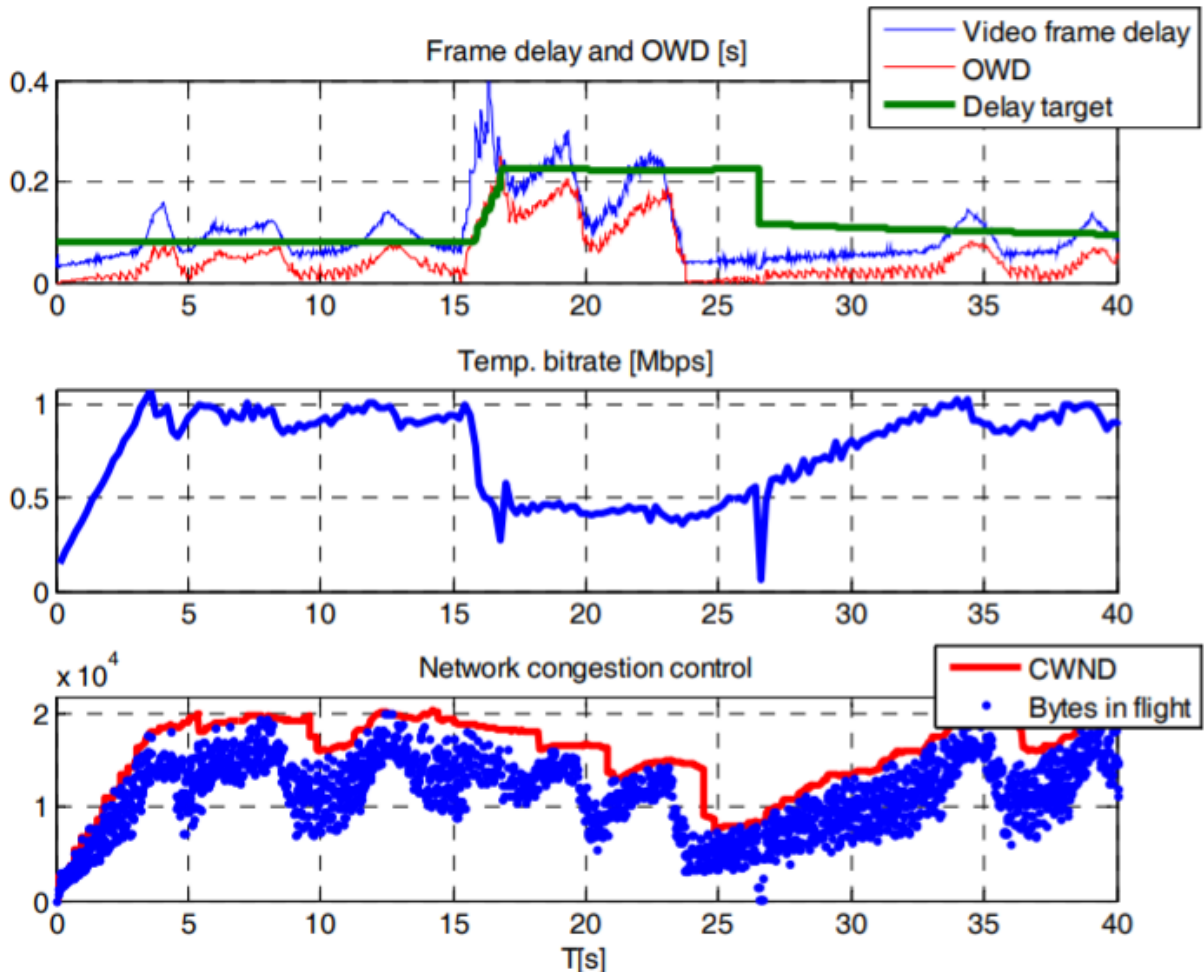
- τον έλεγχο συμφόρησης δικτύου (network congestion control),
- τον έλεγχο μετάδοσης αποστολέα (sender transmission control) και
- τον έλεγχο ρυθμού πολυμέσων (media rate control).

Όλα αυτά τα στάδια ανήκουν στην πλευρά του αποστολέα. Το Σχήμα 1 δείχνει την επισκόπηση του SCReAM από την πλευρά του αποστολέα. Ο αλγόριθμος από την πλευρά του παραλήπτη είναι πολύ πιο απλός, καθώς απλά δημιουργείται μια ανατροφοδότηση η οποία περιέχει επιβεβαιώσεις (ACKs) από λαμβανόμενα RTP πακέτα και έναν μετρητή για το ECN.

2.1 Έλεγχος συμφόρησης δικτύου

Στο πρώτο στάδιο, ο έλεγχος συμφόρησης δικτύου θέτει ένα άνω όριο σχετικά με το πόσα δεδομένα μπορούν να υπάρχουν στο δίκτυο («αιωρούμενα» bytes). Αυτό το όριο ονομάζεται παράθυρο συμφόρησης (congestion window – CWND) και χρησιμοποιείται στον έλεγχο μετάδοσης αποστολέα. Το παράθυρο συμφόρησης επιτρέπεται να

μεγαλώσει εάν η μονόδρομη καθυστέρηση (One Way Delay – OWD) του δικτύου είναι κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο, διαφορετικά το παράθυρο συμφόρησης θα μικρύνει. Ένα συνηθισμένο όριο καθυστέρησης είναι γύρω στα 50-100 milli-seconds. Εάν χαθούν πακέτα, αυτόματα το παράθυρο συμφόρησης μικραίνει. Σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει στο LEDBAT, όπου η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά μένει κοντά στο όριο, διότι μεταφέρονται αρχεία, με το SCReAM η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά μένει συνήθως κάτω από το όριο, καθώς το bitrate των πολυμέσων πραγματικού χρόνου μεταβάλλεται συνεχώς.



Σχήμα 2: Παράδειγμα με προσαρμόσιμο όριο καθυστέρησης

Στο παραπάνω Σχήμα 2 βλέπουμε ένα παράδειγμα όπου ένα βίντεο και ένα αρχείο μεγέθους 500 kByte μέσω File Transfer Protocol (FTP) (TCP ροή) να ανταγωνίζονται για το εύρος ζώνης σε ένα δίκτυο με σημείο συμφόρησης (bottleneck) στο 1 Mbps. Η μεταφορά αρχείου ξεκινάει όταν $T=16$ και ολοκληρώνεται όταν $T=23$. Όταν αρχίζει να μεταφέρεται το αρχείο, μέσω TCP, το όριο καθυστέρησης (delay target, πρώτο διάγραμμα – πράσινο χρώμα) και η καθυστέρηση μετάδοσης του βίντεο (video frame delay, πρώτο διάγραμμα – μπλε χρώμα) αυξάνεται σαν αποτέλεσμα της αύξησης της μονόδρομης καθυστέρησης (OWD). Έπειτα αρχίζει σιγά σιγά να πέφτει και όταν γίνεται μια παύση στο βίντεο ($T=26,5$) τότε πέφτει απότομα, αφού μειώνεται ο ανταγωνισμός για το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

2.2 Έλεγχος μετάδοσης αποστολέα

Ο έλεγχος μετάδοσης αποστολέα περιορίζει την αποστολή των δεδομένων, βασιζόμενος στη σχέση των «αιωρούμενων» bytes που βρίσκονται στο δίκτυο και του παραθύρου συμφόρησης. Αν χαθούν πακέτα, ο SCReAM δεν τα επαναμεταδίδει. Μεταδίδει όσο λαμβάνει ανατροφοδότηση (feedback) από τον παραλήπτη. Υπάρχουν δύο προσθήκες άξιες αναφοράς:

- Οι αλγόριθμοι self-clocking συχνά τείνουν να μεταδίδουν πακέτα πολύ γρήγορα. Αυτό σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει απώλεια πακέτων, διακυμάνσεις στο διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου και γενικότερα μια ασταθή συμπεριφορά. Η λύση είναι η προσθήκη ενός μετρητή που θα χρησιμοποιείται για να μεταδίδονται τα πακέτα σε ταχύτητα όχι υψηλότερη από την εκτιμώμενη ρυθμικόδοση. Η τιμή του μετρητή αυτού καθορίζεται από το παράθυρο συμφόρησης και τον εκτιμώμενο χρόνο μετάδοσης μετ' επιστροφής (Round Trip Time – RTT) των πακέτων στο δίκτυο.
- Τα «αιωρούμενα» bytes του δικτύου επιτρέπεται να ξεπερνούν το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης αν η μονόδρομη καθυστέρηση είναι χαμηλή. Ο αριθμός των επιπλέον «αιωρούμενων» bytes που επιτρέπεται να υπάρχουν εξαρτάται από τη σχέση της μονόδρομης καθυστέρησης και του ορίου καθυστέρησης που έχουμε θέσει. Αυτό μπορεί να βελτιώσει την απόδοση, ειδικά όταν μεταδίδουμε βίντεο εναλλασσόμενου ρυθμού μετάδοσης (Variable BitRate – VBR), όμως μπορεί να προκαλέσει και καθυστερήσεις ή απώλεια πακέτων αν υπάρχει μεγάλος φόρτος κίνησης στο δίκτυο.

2.3 Έλεγχος ρυθμού πολυμέσων

Ο έλεγχος ρυθμού πολυμέσων στοχεύει στο να κάνει τον ρυθμό μετάδοσης των πολυμέσων να αυξάνεται γρήγορα όταν αυξάνεται το εύρος ζώνης του δικτύου, προκειμένου να εκμεταλλευτούν τις μέγιστες δυνατότητες του δικτύου που μπορούν.

Η αντίδραση σε ενδεχόμενη μείωση του εύρους ζώνης πρέπει να είναι πολύ γρήγορη, προκειμένου να μη γεμίσουν οι ουρές RTP πακέτων του αποστολέα. Η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά μετρείται συνεχώς και αν ξεπεράσει το καθορισμένο κατώφλι, ο ρυθμός μετάδοσης των πολυμέσων μειώνεται. Ο ρυθμός μετάδοσης πολυμέσων μπορεί να μειωθεί και στην περίπτωση που χαθούν πακέτα ή η μονόδρομη καθυστέρηση υπερβεί το καθορισμένο όριο καθυστέρησης.

3. ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ SCReAM

3.1 Αποστολέας

Όπως προαναφέρθηκε, το SCReAM από την πλευρά του αποστολέα χωρίζεται στον έλεγχο συμφόρησης δικτύου, στον έλεγχο μετάδοσης αποστολέα και στον έλεγχο ρυθμού πολυμέσων. Ο έλεγχος συμφόρησης δικτύου και ο έλεγχος ρυθμού πολυμέσων ουσιαστικά συνεργάζονται προκειμένου να μετριαστεί ο κίνδυνος των μεγάλων καθυστερήσεων και της απώλειας πακέτων. Ο έλεγχος συμφόρησης δικτύου στοχεύει στο να αποφευχθεί η υπερφόρτωση του δικτύου ενώ ο έλεγχος ρυθμού πολυμέσων στο να μη παράγουν οι πηγές περισσότερα δεδομένα από αυτά που μπορεί το δίκτυο να χειριστεί με επιτυχία.

Ο αποστολέας υλοποιεί τον έλεγχο ρυθμού πολυμέσων και μια ουρά RTP πακέτων για κάθε τύπο πολυμέσων, στις οποίες ουρές αποθηκεύονται προσωρινά ως κωδικοποιημένα πλαίσια (frames) πολυμέσων που είναι προορισμένα για μετάδοση. Ένας ρυθμιστής μετάδοσης προστίθεται όταν έχουμε παραπάνω από μία πηγές. Μπορεί να δώσει διαφορετικές προτεραιότητες στην μετάδοση μεταξύ των πηγών και να λειτουργήσει σαν ένας άτυπος ελεγκτής συμφόρησης μεταξύ των ροών δεδομένων.

Αρχικά τα πλαίσια πολυμέσων κωδικοποιούνται και προωθούνται στην ουρά RTP. Στη συνέχεια αναφέρεται το μήκος της RTP ουράς στο κομμάτι που είναι αρμόδιο για τον έλεγχο ρυθμού πολυμέσων, προκειμένου να αναφερθούν στις πηγές οι ρυθμοί (bit-rates) με τους οποίους πρέπει να γίνει η κωδικοποίηση. Στη συνέχεια τα RTP πακέτα διαλέγονται από την RTP ουρά. Σε περίπτωση πολλαπλών ροών διαλέγονται με κάποια συγκεκριμένη προτεραιότητα ή με τυχαίο τρόπο, από το κομμάτι του ελέγχου μετάδοσης αποστολέα. Έπειτα, ο έλεγχος μετάδοσης αποστολέα (ή ο ρυθμιστής μετάδοσης σε περίπτωση που έχουμε πολλαπλές πηγές) προωθεί τα RTP πακέτα σε ένα User Datagram Protocol (UDP) socket, πάντα σύμφωνα με τις δυνατότητες που προσφέρονται στο δίκτυο από το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης. Τα RTP πακέτα λαμβάνονται από τον παραλήπτη και στη συνέχεια οι πληροφορίες σχετικά με το πλήθος των «αιωρούμενων» bytes του δικτύου και του μεγέθους του παραθύρου συμφόρησης ανταλλάσσονται μεταξύ των τμημάτων του ελέγχου συμφόρησης δικτύου και του ελέγχου μετάδοσης αποστολέα.

3.1.1 Τιμές σταθερών και παραμέτρων

Εδώ θα παρουσιαστούν κάποιες ενδεικτικές τιμές (όχι όλες), άλλες σταθερές, άλλες αλλάζουν ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου. Οι προτεινόμενες τιμές που βρίσκονται μέσα στις παρενθέσεις έχουν προκύψει μέσα από πειράματα.

3.1.1.1 Σταθερές

- **Κάτω όριο καθυστέρησης αναμονής στην ουρά (0,1 s)**
- **Άνω όριο καθυστέρησης αναμονής στην ουρά (0,4 s):** Αυτή η τιμή δίνει ένα άνω όριο στο πόσο μπορεί να αυξηθεί η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά (queue delay) προκειμένου να μπορούν να αντιμετωπιστούν ενδεχόμενες απώλειες ροών δεδομένων. Όμως δεν είναι απαραίτητο να τεθεί τόσο υψηλή τιμή σε αυτήν την μεταβλητή, καθώς μπορεί να αυξηθεί η καθυστέρηση από άκρη σε άκρη και να δυσκολέψει ο έλεγχος ρυθμού και ο έλεγχος συμφόρησης.
- **Όριο καθυστέρησης αναμονής στην ουρά με συμφόρηση (0,2 s):** Η τιμή αυτή δίνεται σε περίπτωση ανίχνευσης συμφόρησης στο δίκτυο.
- **Ελάχιστο μέγεθος παραθύρου συμφόρησης (3000 bytes)**
- **Μέγιστο όριο «αιωρούμενων» bytes**

- **Παράγοντας απώλειας (0,8):** Με αυτήν την τιμή πολλαπλασιάζεται το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης σε περίπτωση που υπάρχει απώλεια πακέτων.
- **Παράγοντας ECN (0,9):** Με αυτήν την τιμή πολλαπλασιάζεται το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης σε περίπτωση που ενεργοποιηθεί το πρωτόκολλο ECN.
- **Μέγιστο μέγεθος RTP πακέτων (1000 bytes)**
- **Ελάχιστο όριο ρυθμού μετάδοσης πολυμέσων (σε bits ανά δευτερόλεπτο)**
- **Μέγιστο όριο ρυθμού μετάδοσης πολυμέσων (σε bits ανά δευτερόλεπτο)**

3.1.1.2 Μεταβλητές Κατάστασης

Οι τιμές μέσα στις παρενθέσεις υποδεικνύουν τις αρχικές τιμές των μεταβλητών.

- **Καθυστέρηση αναμονής στην ουρά (Κάτω όριο καθυστέρησης αναμονής στην ουρά):** Αυτή η τιμή υπάρχει για τις περιπτώσεις όπου μια σταθερή τιμή κατανομής στην ουρά δημιουργεί προβλήματα στο δίκτυο, όπως για παράδειγμα όταν μεταφέρεται ταυτόχρονα ένα αρχείο. Κυμαίνεται μεταξύ του κάτω και του άνω ορίου καθυστέρησης αναμονής στην ουρά.
- **Μέσος όρος καθυστέρησης αναμονής στην ουρά (0)**
- **Παράθυρο συμφόρησης (Ελάχιστο μέγεθος παραθύρου συμφόρησης)**
- **Πρόσφατα επιβεβαιωμένα bytes (0):** Ο αριθμός των bytes που έχουν ληφθεί επιτυχώς από την τελευταία ενημέρωση του παραθύρου συμφόρησης.
- **Μέγιστο όριο «αιωρούμενων» bytes στο δίκτυο (0)**
- **Μέγιστο όριο bytes που μπορούν να σταλούν (0)**
- **Υποστηριζόμενος ρυθμός πολυμέσων (0)**
- **Τελευταίος μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός πολυμέσων (1 bps):** Χρησιμοποιείται για να μην αυξάνεται πολύ ο ρυθμός μετάδοσης των πολυμέσων έτσι ώστε να αποφευχθεί η συμφόρηση.
- **Ρυθμός μετάδοσης δικτύου (0 bps)**
- **Ρυθμαπόδοση δικτύου (0 bps):** Μετρημένη με βάση τις λαμβανόμενες επιβεβαιώσεις πακέτων (ACKs).
- **Μέγεθος RTP ουράς πακέτων (0 bits)**
- **Χρόνος μετάδοσης μετ' επιστροφής (RTT) (0 s)**
- **Μέγεθος του τελευταίου RTP πακέτου που μεταδόθηκε (0 bits)**

3.1.2 Έλεγχος συμφόρησης δικτύου

Εδώ θα γίνει η περιγραφή του ελέγχου συμφόρησης δικτύων, ο οποίος εκτελεί δύο κύριες λειτουργίες:

- Υπολογίζει το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης στον αποστολέα, δημιουργώντας έτσι το όριο των «αιωρούμενων» bytes στο δίκτυο.
- Υπολογίζει το παράθυρο αποστολής στον αποστολέα. Τα RTP πακέτα μεταδίδονται μόνο αν το επιτρέπει η σχέση μεταξύ των «αιωρούμενων» bytes του δικτύου και του παραθύρου συμφόρησης. Αυτό ελέγχεται από το παράθυρο αποστολής.

Επειδή το SCReAM είναι ένα πρωτόκολλο που βασίζεται στο μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης και στο πόσα bytes μεταδίδονται, το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος των RTP πακέτων που έχουν ήδη μεταδοθεί, πρέπει οπωσδήποτε να κρατείται μια λίστα με τα RTP πακέτα που έχουν ήδη μεταδοθεί, καθώς και τους χρόνους μετάδοσής τους.

Ο αριθμός των «αιωρούμενων» bytes του δικτύου υπολογίζεται ως το άθροισμα όλων των RTP πακέτων από αυτό που έχει μεταδοθεί πιο πρόσφατα μέχρι το επιβεβαιωμένο πακέτο με τον υψηλότερο αριθμό ακολουθίας (χωρίς αυτό να συμπεριλαμβάνεται). Για παράδειγμα, αν ένας αριθμός πακέτου με αριθμό ακολουθίας N έχει μεταδοθεί και η τελευταία επιβεβαίωση που έχει ληφθεί αφορά το πακέτο με αριθμό ακολουθίας $N-5$, τότε ο αριθμός των «αιωρούμενων» bytes υπολογίζεται από το άθροισμα των μεγεθών των RTP πακέτων με αριθμούς ακολουθίας N , $N-1$, $N-2$, $N-3$ και $N-4$. Δεν έχει σημασία αν, για παράδειγμα, το πακέτο με αριθμό ακολουθίας $N-2$ έχει χαθεί, το μέγεθος του θα συμπεριληφθεί κανονικά στον υπολογισμό των «αιωρούμενων» bytes.

Επιπλέον, κρατείται μια μεταβλητή η οποία αποθηκεύει τα πρόσφατα επιβεβαιωμένα bytes, δηλαδή το πόσο ο υψηλότερος αριθμός ακολουθίας έχει αυξηθεί σε σχέση με την τελευταία ανατροφοδότηση που ήρθε από τον παραλήπτη. Για παράδειγμα, αν η τελευταία επιβεβαίωση υπέδειξε ως υψηλότερο αριθμό ακολουθίας τον N και η τωρινή υπέδειξε ως υψηλότερο αριθμό ακολουθίας τον $N+3$, τότε η μεταβλητή αυτή παίρνει σαν τιμή το άθροισμα των μεγεθών των RTP πακέτων με αριθμούς ακολουθίας $N+1$, $N+2$ και $N+3$. Δεν έχει σημασία αν, για παράδειγμα, το πακέτο με αριθμό ακολουθίας $N+2$ έχει χαθεί, το μέγεθος του θα συμπεριληφθεί κανονικά στον υπολογισμό της τιμής της μεταβλητής. Η τιμή γίνεται πάλι μηδέν όταν ενημερώνεται το παράθυρο συμφόρησης.

Η ανατροφοδότηση που στέλνεται από τον παραλήπτη αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Μια λίστα με τους αριθμούς ακολουθίας των RTP πακέτων που έχουν παραληφθεί.
- Την χρονοσφραγίδα του RTP πακέτου με τον υψηλότερο αριθμό ακολουθίας.
- Τον αριθμό των πακέτων που υποστηρίζουν το ECN και έχουν υποστεί συμφόρηση.

Όταν ο αποστολέας λαμβάνει το feedback από τον παραλήπτη, τότε υπολογίζεται η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά. Αυτό γίνεται κάθε φορά που λαμβάνεται επιβεβαίωση. Στη συνέχεια, ενημερώνονται κάποιες μεταβλητές από αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ο μέσος όρος καθυστέρησης αναμονής στην ουρά μετριέται κάθε 50 milli-seconds και οι τελευταίες 20 τιμές του αποθηκεύονται σε ένα διάνυσμα. Το διάνυσμα αυτό χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί το επίπεδο συμφόρησης στο δίκτυο. Η δειγματοληψία ανά 50 milli-seconds μπορεί να οδηγήσει στην λήψη της ίδιας τιμής καθυστέρησης αναμονής στην ουρά πάνω από μία φορές. Αυτό δεν είναι πρόβλημα, καθώς γίνεται απλά για να δούμε εάν η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά αυξάνεται ή μειώνεται, έτσι ώστε να εντοπιστεί έγκαιρα η συμφόρηση και να βγούμε αν χρειαστεί από την λειτουργία γρήγορης αύξησης.

3.1.2.1 Αντίδραση σε απώλεια πακέτων

Λέμε ότι υπάρχει απώλεια πακέτων όταν δεν έρθει επιβεβαίωση για ένα ή περισσότερα πακέτα. Όταν ανιχνευθεί μια απώλεια, τα πακέτα που χάθηκαν πρέπει να αγνοηθούν για χρόνο ίσο με ένα RTT, προκειμένου να προληφθεί μια γρήγορη μείωση του παραθύρου συμφόρησης.

Η μείωση του παραθύρου συμφόρησης στο SCReAM είναι μικρότερη από ότι σε άλλες περιπτώσεις, σε σύγκριση για παράδειγμα με το TCP. Αυτό συμβαίνει γιατί πολλές φορές το TCP μεταδίδει ολόκληρα αρχεία, άρα δεν υπάρχει άνω όριο στον ρυθμό μετάδοσης, σε αντίθεση με το SCReAM που ο ρυθμός μετάδοσής του έχει μια μέγιστη τιμή. Έτσι λοιπόν, συνιστάται η μείωση που γίνεται στο παράθυρο συμφόρησης να είναι σχετικά μικρή.

Αν ο μετρητής ECN αυξηθεί σε σχέση με το προηγούμενο feedback που είχε ληφθεί, τότε αυτός αγνοείται για χρόνο ίσο με ένα RTT, προκειμένου να προληφθεί μια γρήγορη μείωση του παραθύρου συμφόρησης. Η σμίκρυνση του παραθύρου συμφόρησης λόγω ενός συμβάντος ECN ίσως είναι μικρότερη από την σμίκρυνση λόγω απώλειας πακέτων.

3.1.2.2 Ενημέρωση παραθύρου συμφόρησης

Η ενημέρωση του παραθύρου συμφόρησης εξαρτάται από το αν υπάρχει συμβάν ECN, απώλειας πακέτων ή κανένα από τα δύο.

Αν έχουμε συμβάν απώλειας, το παράθυρο συμφόρησης παίρνει τιμή ίση με τη μέγιστη τιμή μεταξύ του ελάχιστου μεγέθους παραθύρου συμφόρησης και της τρέχουσας τιμής του παραθύρου συμφόρησης, πολλαπλασιασμένη με τον παράγοντα απώλειας. Αν έχουμε συμβάν ECN, το παράθυρο συμφόρησης παίρνει τιμή ίση με τη μέγιστη τιμή μεταξύ του ελάχιστου μεγέθους παραθύρου συμφόρησης και της τρέχουσας τιμής του παραθύρου συμφόρησης, πολλαπλασιασμένη με τον παράγοντα ECN. Αν δεν υπάρχει κάποιο συμβάν, τότε το παράθυρο συμφόρησης ενημερώνεται ανάλογα με την καθυστέρηση αναμονής στην ουρά (αν ο έλεγχος συμφόρησης δε βρίσκεται στη λειτουργία γρήγορης αύξησης) και τα bytes που επιβεβαιώθηκαν πρόσφατα (αν ο έλεγχος συμφόρησης βρίσκεται στη λειτουργία γρήγορης αύξησης).

Επιπλέον, το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης περιορίζεται από τα μέγιστα επιτρεπόμενα «αιωρούμενα» bytes στο δίκτυο και από το ελάχιστο μέγεθός του. Ο περιορισμός με βάση τα μέγιστα επιτρεπόμενα «αιωρούμενα» bytes τα τελευταία 5 δευτερόλεπτα γίνεται για να αποφευχθεί πιθανή υπερεκτίμηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε περίπτωση που υπάρξει κάποια περίοδος αδράνειας.

3.1.2.3 Ανταγωνιστικές ροές

Είναι πολύ πιθανό μια ροή δεδομένων που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο SCReAM να αναγκαστεί να συνυπάρξει στο ίδιο δίκτυο με ροές που χρησιμοποιούν πιο «επιθετικό» έλεγχο συμφόρησης (όπως για παράδειγμα οι ροές FTP).

```

<CODE BEGINS>
adjust_qdelay_target(qdelay)
  qdelay_norm_t = qdelay / QDELAY_TARGET_LOW
  update_qdelay_norm_history(qdelay_norm_t)
  # Compute variance
  qdelay_norm_var_t = VARIANCE(qdelay_norm_history(200))
  # Compensation for competing traffic
  # Compute average
  qdelay_norm_avg_t = AVERAGE(qdelay_norm_history(50))
  # Compute upper limit to target delay
  new_target_t = qdelay_norm_avg_t + sqrt(qdelay_norm_var_t)
  new_target_t *= QDELAY_TARGET_LO
  if (loss_event_rate > 0.002)
    # Packet losses detected
    qdelay_target = 1.5 * new_target_t
  else
    if (qdelay_norm_var_t < 0.2)
      # Reasonably safe to set target qdelay
      qdelay_target = new_target_t
    else
      # Check if target delay can be reduced; this helps prevent
      # the target delay from being locked to high values forever
      if (new_target_t < QDELAY_TARGET_LO)
        # Decrease target delay quickly, as measured queuing
        # delay is lower than target
        qdelay_target = max(qdelay_target * 0.5, new_target_t)
      else
        # Decrease target delay slowly
        qdelay_target *= 0.9
      end
    end
  end
end

# Apply limits
qdelay_target = min(QDELAY_TARGET_HI, qdelay_target)
qdelay_target = max(QDELAY_TARGET_LO, qdelay_target)
<CODE ENDS>

```

Εικόνα 1: Ψευδοκώδικας για την περίπτωση που υπάρχουν ανταγωνιστικές ροές στο SCReAM

Βλέπουμε ότι εισάγονται δύο νέες μεταβλητές, ο **μακροχρόνιος μέσος όρος καθυστέρησης αναμονής στην ουρά** ($qdelay_norm_avg_t$) και η **μακροχρόνια διακύμανση της καθυστέρησης αναμονής στην ουρά** ($qdelay_norm_var_t$). Αν η διακύμανση ($qdelay_norm_var_t$) είναι υψηλή, τότε η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά ($qdelay$) αλλάζει, κάτι που μπορεί να είναι ένδειξη για το ότι το διαθέσιμο εύρος ζώνης μειώθηκε ή μια ανταγωνιστική ροή μόλις μπήκε στο δίκτυο. Επομένως, δε συνίσταται να αλλάξει το όριο καθυστέρησης αναμονής στην ουρά.

Αν η διακύμανση ($qdelay_norm_var_t$) είναι χαμηλή, τότε η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά ($qdelay$) είναι σχετικά σταθερή. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά είναι μικρή ή ότι κάποια ανταγωνιστική ροή δημιουργεί απώλεια πακέτων, με αποτέλεσμα η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά να είναι υψηλή για πολλή ώρα.

Το όριο καθυστέρησης αναμονής στην ουρά ($qdelay_target$) αυξάνεται αν υπάρχουν πολλές απώλειες ή αν η μακροχρόνια διακύμανση της καθυστέρησης αναμονής στην ουρά είναι χαμηλή. Αυτές οι δύο συνθήκες μπορεί να υποδεικνύουν ότι υπάρχει μια ανταγωνιστική ροή στο δίκτυο. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, το όριο καθυστέρησης αναμονής στην ουρά μειώνεται.

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος συνήθως λειτουργεί καλά για δίκτυα LTE και για περιπτώσεις όπου υπάρχουν ανταγωνιστικές FTP ροές στο δίκτυο. Παρ' όλα αυτά,

υπάρχουν και περιπτώσεις όπου η συμφόρηση μπορεί λανθασμένα να αντιμετωπιστεί σαν ανταγωνιστική ροή, με αποτέλεσμα να αυξηθεί το όριο καθυστέρησης αναμονής στην ουρά και η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο να αυξηθεί δραματικά.

3.1.2.4 Ανίχνευση απώλειας πακέτου

Η ανίχνευση απώλειας πακέτου γίνεται με τη βοήθεια της λίστας αριθμών ακολουθίας που λαμβάνεται. Αν στη λίστα των RTP πακέτων που λαμβάνεται υπάρχει κάποιο πακέτο που χάθηκε, τότε απλά στέλνεται μια ένδειξη ότι αυτό το πακέτο είναι αγνοούμενο. Αν αργότερα αυτό το πακέτο παραληφθεί, τότε κρατάμε τη διαφορά μεταξύ του χρόνου που ενημερωθήκαμε για την απώλεια και του χρόνου που το πακέτο έφτασε τελικά. Αυτή η διαφορά χρησιμοποιείται για να ενημερώσουμε το δίκτυο πως, σε περίπτωση που κάποιο αγνοούμενο πακέτο δεν έχει φτάσει στον προορισμό του εντός αυτού του χρονικού διαστήματος, θεωρείται χαμένο.

3.1.2.5 Υπολογισμός παραθύρου αποστολής

Ο βασικός κανόνας της μετάδοσης δεδομένων με το SCReAM είναι να επιτρέπεται η μετάδοση μόνο εάν τα «αιωρούμενα» bytes του δικτύου είναι λιγότερα από το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης. Υπάρχουν όμως δύο λόγοι για τους οποίους αυτό δε δουλεύει πάντα με τον καλύτερο τρόπο:

- **Μεταβλητός ρυθμός μετάδοσης bit:** Οι πηγές πολυμέσων συνήθως κωδικοποιούν τα δεδομένα με διαφορετικό τρόπο ανάλογα τις ανάγκες που υπάρχουν, με αποτέλεσμα το μέγεθός τους να ποικίλλει. Έχει αναφερθεί πως η ουρά RTP πακέτων πρέπει να είναι όσο μικρότερη γίνεται, για να προληφθεί η αύξηση της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο στο δίκτυο. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, ο έλεγχος ρυθμού πολυμέσων λαμβάνει υπόψιν του το μήκος της RTP ουράς όταν υπολογίζεται το bitrate των πολυμέσων. Έτσι, αν το παράθυρο αποστολής είναι μικρό, θα μεγαλώσει η RTP ουρά και το bitrate των πολυμέσων αναγκαστικά θα πέσει. Κατά συνέπεια, δε θα μεγαλώσει το παράθυρο συμφόρησης, γιατί δε θα υπάρχουν πολλά «αιωρούμενα» bytes στο δίκτυο, κάτι που θα οδηγήσει στο να μη μεγαλώσει ούτε το bitrate των πολυμέσων.
- **Καθυστέρηση στην αποστολή feedback:** Αν υπάρχουν πολλά αποθηκευμένα πακέτα στο δίκτυο, τότε υπάρχει η πιθανότητα να καθυστερήσει η αποστολή επιβεβαιώσεων (ACKs) από τον παραλήπτη. Κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε γενικότερη συμφόρηση, ακόμα και αν από την πλευρά του αποστολέα δεν υπάρχει κάποια καθυστέρηση.

Το παράθυρο αποστολής προσαρμόζεται ανάλογα με την καθυστέρηση αναμονής στην ουρά, το όριο αυτής και τη σχέση μεταξύ των «αιωρούμενων» bytes του δικτύου και του παραθύρου συμφόρησης. Όταν η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά είναι μικρότερη από το όριο, τότε το bitrate των πολυμέσων μπορεί να αυξηθεί γρήγορα αν δεν υπάρχει συμφόρηση.

3.1.2.6 Προτεραιοποίηση μεταξύ ροών

Ο αλγόριθμος SCReAM κάνει μια καλή διάκριση μεταξύ του ελέγχου συμφόρησης δικτύου και του ελέγχου ρυθμού πολυμέσων. Αυτό μπορεί να επεκταθεί σε πολλαπλές ροές δεδομένων. Για παράδειγμα, μια υλοποίηση του SCReAM [10] χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό δέσμευσης, κατά τον οποίο μια ουρά όταν θέλει να εξυπηρετηθεί, λέει στις υπόλοιπες να δεσμεύσουν όσο χώρο αυτή χρειάζεται. Δηλαδή αν μια RTP ουρά μπορεί

να μεταδώσει 500 bytes, τότε θα δεσμευτεί χώρος ίσος με 500 bytes και στις υπόλοιπες ουρές.

3.1.3 Έλεγχος ρυθμού πολυμέσων

Ο αλγόριθμος του ελέγχου ρυθμού πολυμέσων εκτελείται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, εκτός αν προκληθεί κάποιο συμβάν απώλειας. Εξαρτάται από το μέγεθος της RTP ουράς των πακέτων που στέλνονται από τις απώλειες και από το όριο καθυστέρησης αναμονής στην ουρά.

Ο ρόλος του ελέγχου ρυθμού πολυμέσων είναι να πετύχει μια ισορροπία μεταξύ μιας μικρής αναμονής στην ουρά των RTP πακέτων και σε έναν ικανοποιητικό ρυθμό αποστολής δεδομένων, προκειμένου να κρατείται απασχολημένο το δικτυακό μονοπάτι. Αν έχουμε πολύ χαμηλό ρυθμό, τότε υπάρχει ο κίνδυνος να μείνουν πόροι του δικτύου ανεκμετάλλετοι και να τους καταλάβει τελικά κάποια άλλη ροή με πιο υψηλές απαιτήσεις. Αν έχουμε πολύ υψηλό ρυθμό, μπορεί να οδηγηθούμε σε υψηλή διακύμανση καθυστέρησης (jitter).

Το bitrate που θέλουμε να επιτύχουμε εξαρτάται από την κατάσταση συμφόρησης του δικτύου και κυμαίνεται ανάμεσα σε ένα ελάχιστο και σε ένα μέγιστο καθορισμένο όριο. Το ελάχιστο όριο πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην κάνει τα RTP πακέτα να μπαίνουν στην ουρά όταν μειώνεται το εύρος ζώνης του δικτύου. Ο αποστολέας πρέπει να διαθέτει έναν μηχανισμό με τον οποίο θα ξεφορτώνεται τα πακέτα όταν το εύρος ζώνης είναι πολύ χαμηλό και υπάρχει σημαντική καθυστέρηση.

Υπολογίζονται δύο βοηθητικές τιμές, ο ρυθμός μεταδιδόμενου bitrate και ο ρυθμός επιβεβαιωμένου (ACKed) bitrate. Οι τιμές αυτές αναβαθμίζονται κάθε 200 milli-seconds. ρυθμός επιβεβαιωμένου bitrate χρησιμοποιείται γιατί ο ρυθμός μεταδιδόμενου bitrate επηρεάζεται και από την ποσότητα δεδομένων που μεταδίδονται, με αποτέλεσμα μια έλλειψη δεδομένων προς μετάδοση να υπάρχει κίνδυνος να ερμηνευτεί ως χαμηλό εύρος ζώνης του δικτύου.

Όταν υπάρχει συμβάν απώλειας ή ECN, τότε μειώνεται ο ρυθμός των πολυμέσων προκειμένου να μην μπουν πακέτα στην ουρά εξαιτίας της μείωσης του ρυθμού μετάδοσης που συμβαίνει λόγω της συμφόρησης του δικτύου. Η συχνότητα ενημέρωσης του ρυθμού είναι συγκεκριμένα ορισμένη (βασισμένα σε κάποια πειραματικά δεδομένα), εκτός αν υπάρξει συμβάν απώλειας.

Όταν είναι ενεργοποιημένη η λειτουργία γρήγορης αύξησης, η αύξηση του bitrate δίνεται από μια συγκεκριμένη τιμή που ονομάζεται ταχύτητα αύξησης. Μια υψηλή τιμή ταχύτητας αύξησης (πχ 2000 Kbps) μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε υψηλής ποιότητας πολυμέσα σε μικρό χρόνο, με το ρίσκο όμως να υπάρξουν διακυμάνσεις καθυστέρησης. Αν η λειτουργία γρήγορης αύξησης δεν είναι ενεργοποιημένη, τότε η αύξηση του bitrate εξαρτάται από το τρέχον bitrate, από την ουρά RTP πακέτων, το όριο καθυστέρησης αναμονής στην ουρά και φυσικά το παράθυρο συμφόρησης.

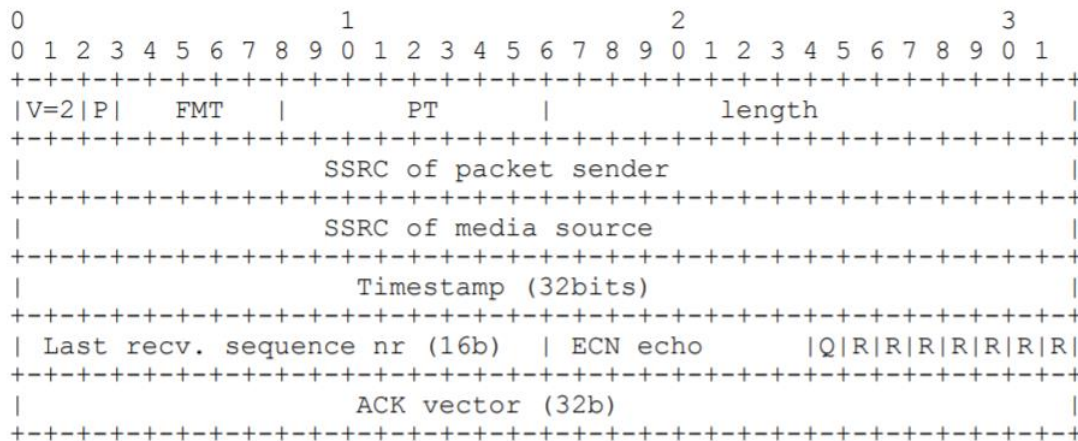
3.2 Παραλήπτης

Η δουλειά του παραλήπτη στο SCReAM είναι απλή: πρέπει να ανατροφοδοτεί τον αποστολέα με επιβεβαιώσεις για τα RTP πακέτα που έχει λάβει, με την ώρα παραλαβής του RTP πακέτου με τον υψηλότερο αριθμό ακολουθίας και με έναν μετρητή ECN. Η συχνότητα αποστολής των παραπάνω πληροφοριών εξαρτάται από το διαθέσιμο εύρος ζώνης RTCP.

3.2.1 Στοιχεία που στέλνει ο παραλήπτης

Τα παρακάτω στοιχεία απαιτείται να σταλούν από τον παραλήπτη, προκειμένου να λειτουργήσει ορθά ο αλγόριθμος SCReAM:

- **Μια λίστα με τα λαμβανόμενα RTP πακέτα.** Θα πρέπει να έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να μπορεί να χωρέσει απροβλημάτιστα όλα τα RTP πακέτα που έχουν παραληφθεί.
- **Μια χρονοσφραγίδα για το RTP πακέτο με τον υψηλότερο αριθμό ακολουθίας που έχει ληφθεί.** Θα χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά.
- **Έναν μετρητή ECN.** Υποδεικνύει για ποια πακέτα έχει χρησιμοποιηθεί το πρωτόκολλο ECN.
- **Ένα bit (Q) με το οποίο γίνεται αίτημα στον αποστολέα να μειώσει το παράθυρο συμφόρησης.** Αυτό είναι χρήσιμο σε περίπτωση που υπάρχουν πάνω από μία πηγές και πρέπει να επιτευχθεί μια ισορροπία στις μεταδόσεις τους.



Εικόνα 2: Παράδειγμα πακέτου ανατροφοδότησης (feedback) που στέλνει ο παραλήπτης.

3.2.2 Συχνότητα αποστολής feedback

Το SCReAM χρειάζεται σχετικά συχνό feedback. Η συχνότητα με την οποία αυτό θα αποστέλλεται εξαρτάται από το bitrate των πολυμέσων. Για χαμηλό bitrate, συνιστάται μια συχνότητα αποστολής μεταξύ 100 και 400 milli-seconds, ενώ για υψηλό bitrate ένα διάστημα κοντά στα 20 milli-seconds, ίσως και πιο μικρό, είναι προτιμότερο. Μια ένδειξη ότι το feedback αποστέλλεται αραιά είναι ότι δεν φτάνουμε ποτέ σε υψηλό bitrate, ακόμα κι αν το δίκτυο δεν έχει συμφόρηση.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν τύπο για να υπολογίσουμε τον χρονικό διάστημα που θα μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο feedbacks:

$$fb_int = 1.0 / \min(50, \max(2.5, rate_media/10000))$$

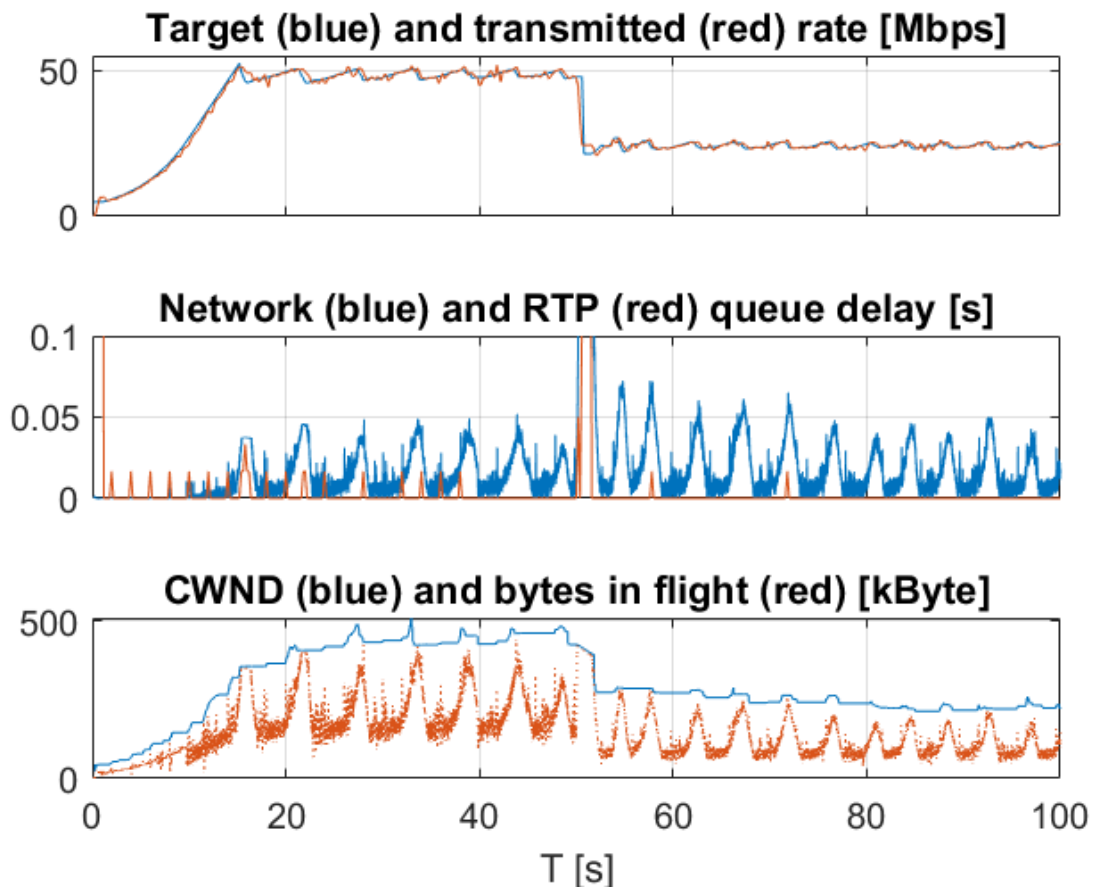
Η μεταβλητή *rate_media* αναπαριστά το bitrate των RTP πολυμέσων, εκφρασμένο σε bits ανά δευτερόλεπτο. Το *fb_int* είναι χρονικό διάστημα που θα μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο feedbacks.

4. SCReAM ΚΑΙ ECN

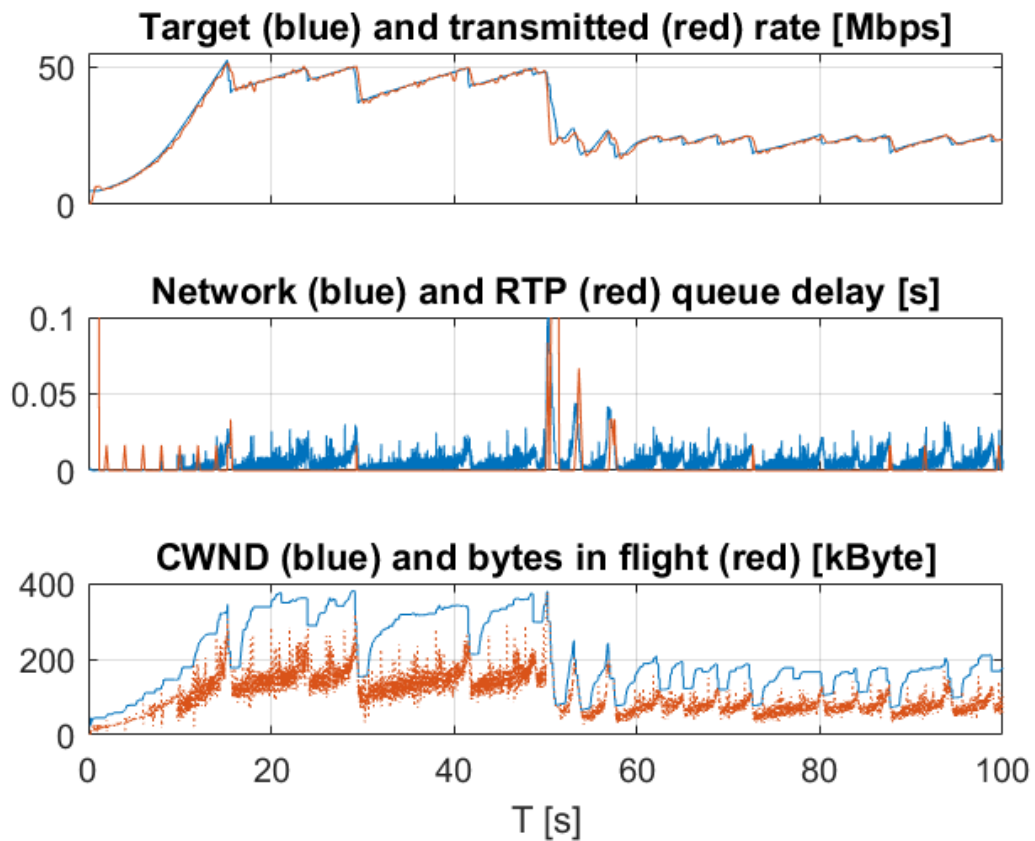
Όπως προαναφέρθηκε, το SCReAM μπορεί να υποστηρίξει το ECN. Το ECN είναι μια επέκταση του Internet Protocol (IP) και του TCP που επιτρέπει σε δύο χρήστες να ειδοποιούνται από άκρο σε άκρο για το γεγονός ότι υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο, χωρίς να χάνονται πακέτα. Αντί να χαθεί το πακέτο, θα τοποθετηθεί στην IP κεφαλίδα του ένα σημάδι για να ενημερωθεί ο παραλήπτης για την επερχόμενη συμφόρηση. Ο παραλήπτης του πακέτου ενημερώνει τον αποστολέα, ο οποίος ρίχνει τον ρυθμό μετάδοσής του, όπως θα έκανε αν χανόταν κάποιο πακέτο. Το SCReAM υποστηρίζει αυτόν τον κλασικό τρόπο λειτουργίας του ECN.

Επίσης, υποστηρίζει την τεχνολογία χαμηλής αδράνειας, χαμηλών απωλειών και κλιμακούμενης ρυθμαπόδοσης (Low Latency Low Loss Scalable Throughput – L4S) [11], που σημαίνει ότι ο ρυθμός αποστολής δεδομένων μειώνεται αναλογικά με το ποσοστό των RTP πακέτων που υποστηρίζουν ECN και έχουν υποστεί συμφόρηση. Αυτό βοηθά στο να επιτευχθεί χαμηλότερη καθυστέρηση αναμονής στην ουρά.

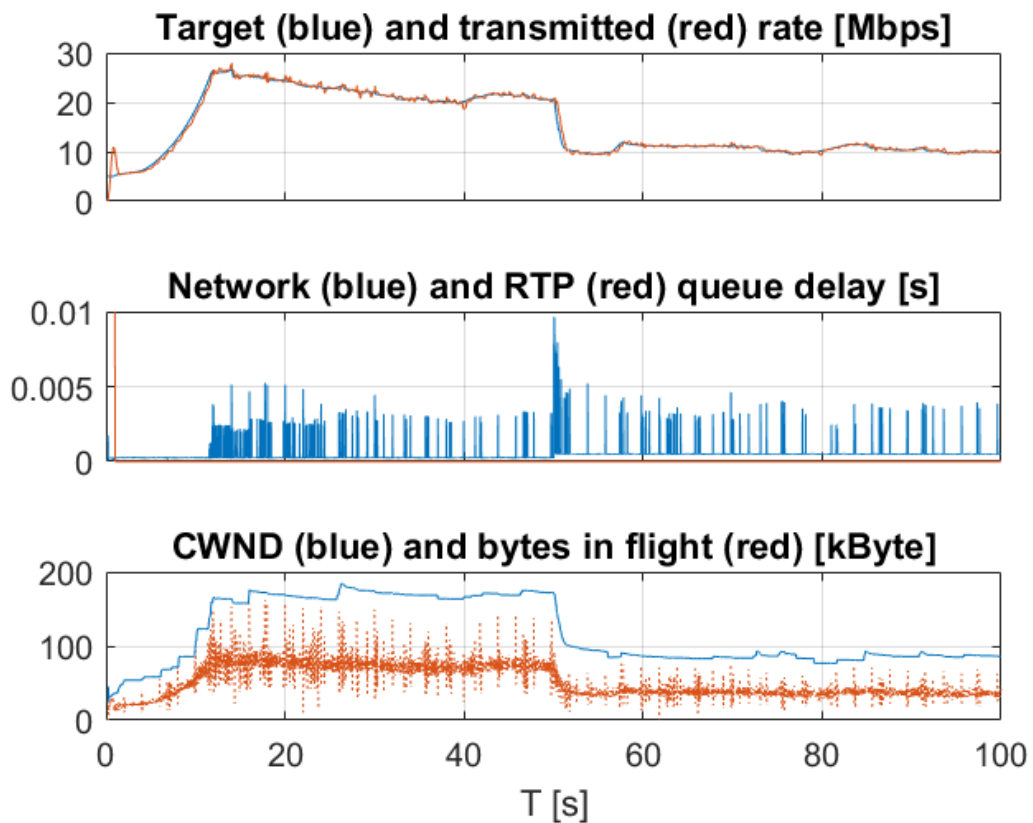
Παρακάτω παρουσιάζονται τρία παραδείγματα προσομοιώσεων με όριο συμφόρησης (bottleneck) στα 50 Mbps, το οποίο αλλάζει στα 25 Mbps μετά από 50 δευτερόλεπτα, με το ελάχιστο RTT να ορίζεται στα 20 δευτερόλεπτα.



Σχήμα 3: SCReAM χωρίς υποστήριξη ECN



Σχήμα 4: SCReAM με υποστήριξη ECN, Παράγοντας ECN = 0.8



Σχήμα 5: SCReAM με υποστήριξη L4S

Παρατηρούμε στα γραφήματα ότι το ECN βελτιώνει την καθυστέρηση από άκρη σε άκρη στο δίκτυο (σύγκριση Σχήματος 3 και Σχήματος 4), ενώ το L4S τη μειώνει ακόμα περισσότερο (Σχήμα 5).

Το L4S δίνει χαμηλότερο ρυθμό πολυμέσων, καθώς προστίθεται μεγαλύτερο headroom για να διασφαλιστεί η μικρότερη καθυστέρηση, αφού το bitrate του βίντεο ποικίλει.

Στη συνέχεια παρατίθενται δύο σύνδεσμοι για βίντεο που δείχνουν ένα απλό πείραμα με όριο συμφόρησης δικτύου στα 3 Mbps. Στο πρώτο βίντεο δεν είναι ενεργοποιημένο το ECN στον αποστολέα, ενώ στο δεύτερο είναι.

[Χωρίς ECN](#)

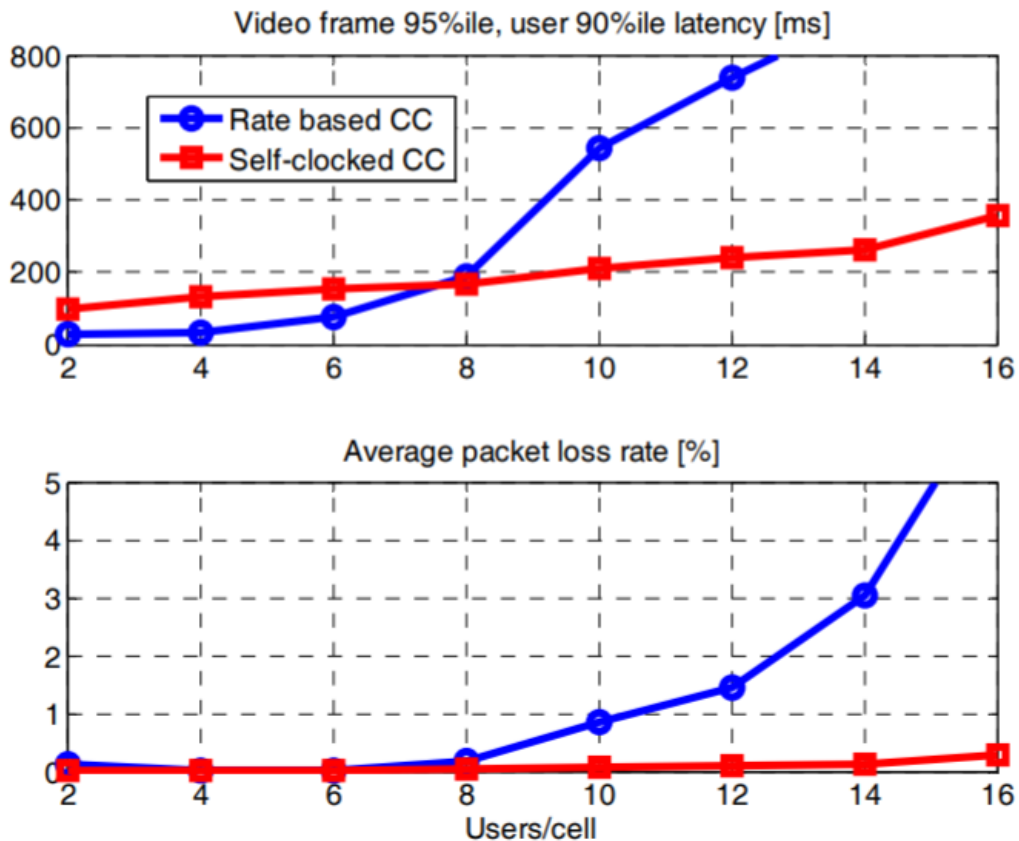
[Με ECN](#)

Παρατηρούμε ότι στο δεύτερο βίντεο εμφανίζονται λιγότερα πράσινα πλαίσια από ότι στο πρώτο, κάτι που σημαίνει ότι έχουμε μικρότερη απώλεια πακέτων, όπως θα περιμέναμε.

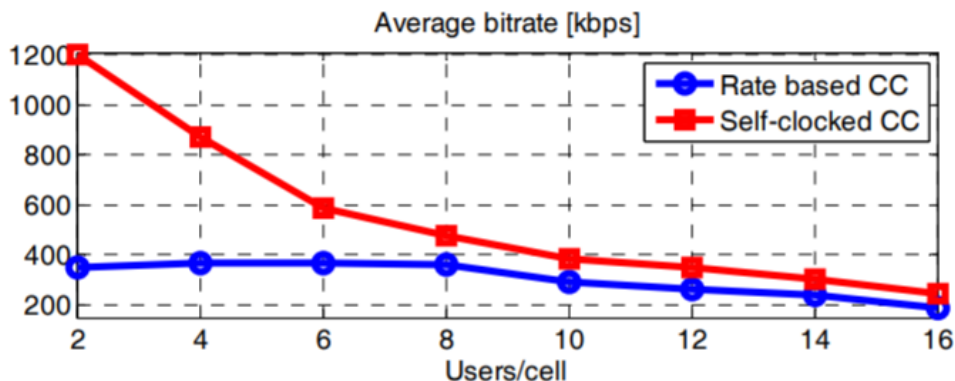
5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν προσομοιώσεις και πειράματα, βασισμένα στη βιβλιογραφία, που κάνουν πιο κατανοητή τη λειτουργία του SCReAM.

Αρχικά, συγκρίνουμε το SCReAM με έναν αλγόριθμο συμφόρησης της Google [12], βασισμένο στον ρυθμό μετάδοσης. Το φορτίο του δικτύου ποικίλει από 2 έως 16 χρήστες ανά κυψέλη. Το σχήμα 6 δείχνει τα επίπεδα της καθυστέρησης. Είναι φανερό πως το SCReAM μπορεί να διαχειριστεί καλύτερα τα μεγάλα φορτία σε σχέση με τον «αντίπαλο» αλγόριθμο. Το Σχήμα 7 δείχνει πως, ενώ ο αλγόριθμος που βασίζεται στον ρυθμό μετάδοσης (Rate based Congestion Control) δίνει χαμηλότερο bitrate στα πολυμέσα, η αντίδρασή του στη συμφόρηση δεν είναι ικανοποιητική ή έγκαιρη έτσι ώστε να αποφευχθούν οι καθυστερήσεις. Το συμπέρασμα είναι πως το SCReAM αποδίδει καλύτερα σε σχέση με τον αλγόριθμο που βασίζεται στον ρυθμό.



Σχήμα 6: Καθυστέρηση και απώλεια πακέτων μεταξύ των δύο αλγορίθμων

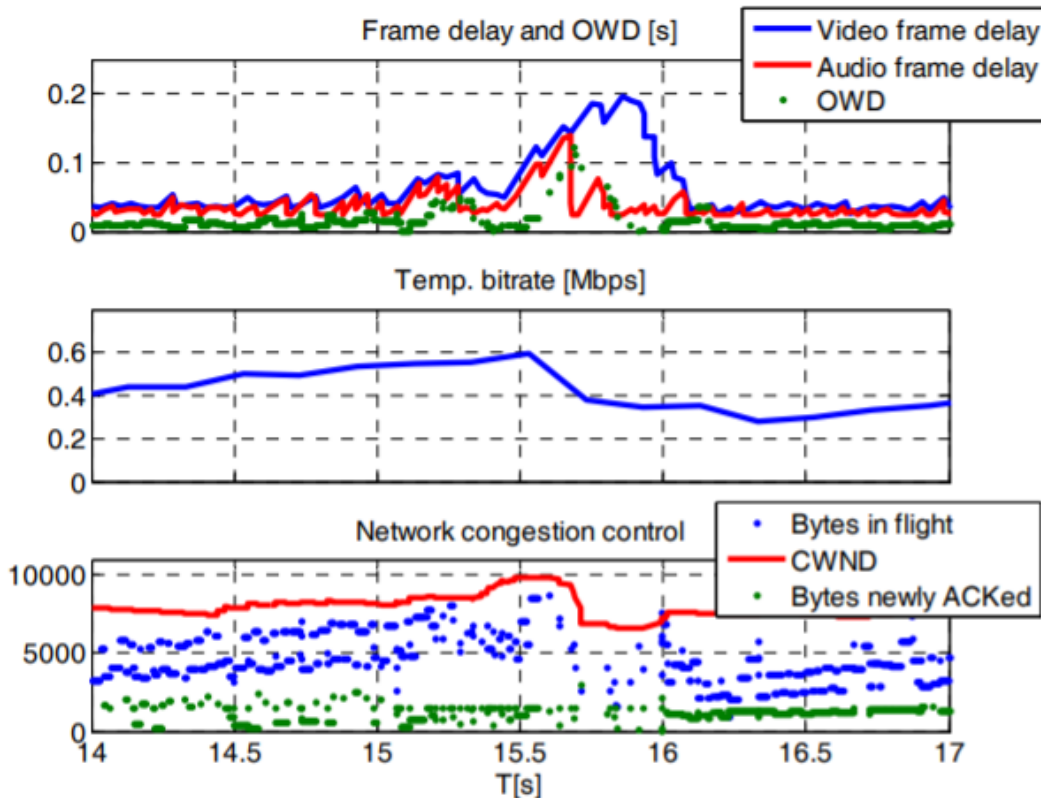


Σχήμα 7: Μέσο bitrate των δύο αλγορίθμων

Έπειτα, παρουσιάζεται μια προσομοίωση δικτύου LTE. Οι παράμετροι του δικτύου απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1: Παράμετροι προσομοίωσης LTE δικτύου

Παράμετροι	Τιμή
Τοπολογία κυψελών	21 κυψέλες, 7 σταθμοί βάσης
Παράμετροι συστήματος	Εύρος ζώνης (bandwidth) 10 MHz, Συχνότητα φέροντος 2GHz, Ισχύς μετάδοσης eNB 40W
Κανάλι	Τυπικό αστικό
Μοντέλο διάδοσης	Okumura-Hata
Άφιξη νέων χρηστών	Με βάση την κατανομή Poisson
Κινητικότητα	Οι χρήστες κινούνται προς τυχαία κατεύθυνση με ταχύτητα 3 χιλιόμετρα/ώρα. Οι μεταπομπές γίνονται με ιδανικό τρόπο
Σενάριο κίνησης στο δίκτυο	Βίντεο: Κωδικοποίηση H.264, Bitrate 150-1500 Mbps, RTCP Bandwith 75 Kbps Ήχος: Μήκος πλαισίου 20 ms, Bitrate 20 Kbps FTP: Συγκεκριμένος αριθμός χρηστών, μέσο φορτίο σε κάθε κυψέλη 4 Mbps, TCP



Σχήμα 8: Αποτελέσματα προσομοίωσης δικτύου LTE

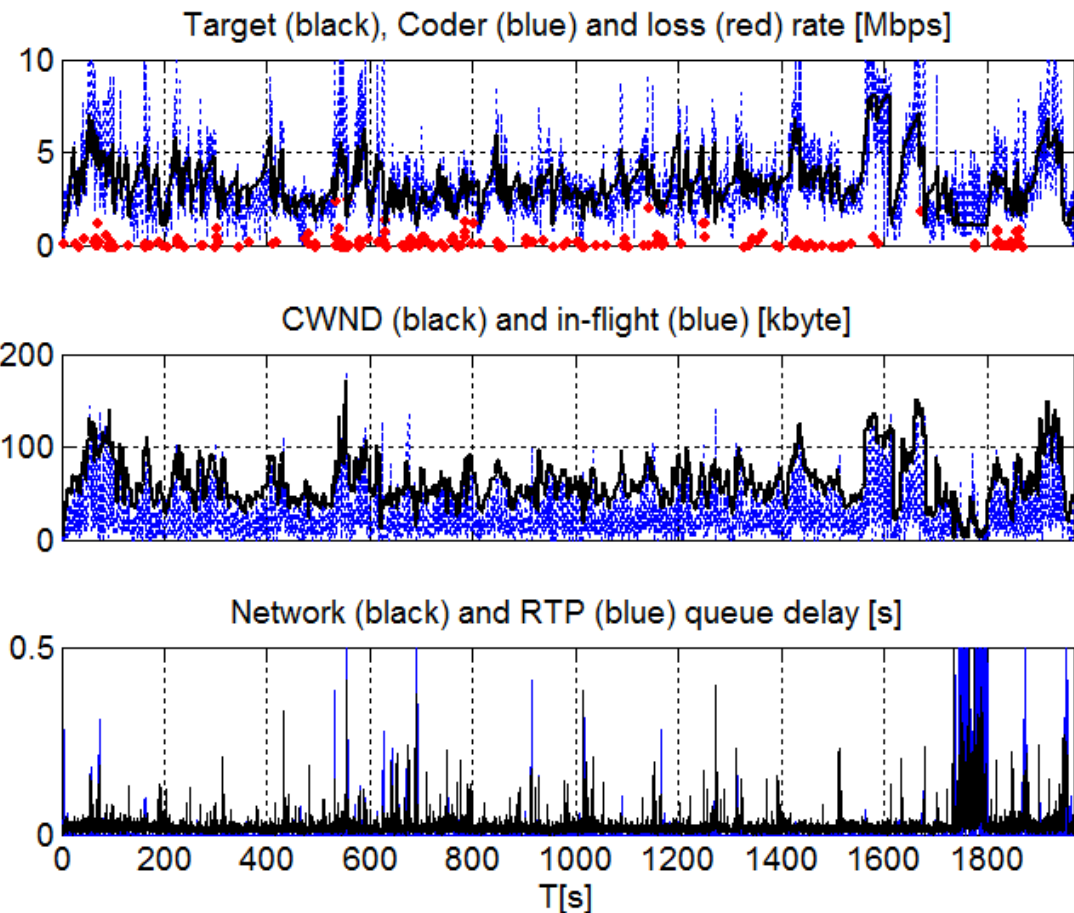
Στο σχήμα 8 βλέπουμε κάποιες μετρήσεις για έναν χρήστη. Παρατηρούμε μια αξιόλογη συμφόρηση την χρονική στιγμή $T=15,6$ s, όπου είναι εμφανές πως τα πρόσφατα επιβεβαιωμένα bytes είναι πιο αραιά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η μετάδοση βίντεο από

τον αποστολέα να καθυστερεί. Ο κωδικοποιητής βίντεο καταλαβαίνει ότι η ουρά που αφορά το βίντεο μεγαλώνει και με τη σειρά του μειώνει το bitrate. Επίσης, αυξάνεται η μονόδρομη καθυστέρηση, κάνοντας το παράθυρο συμφόρησης να μειωθεί. Η μετάδοση του ήχου δεν καθυστερεί τόσο (δεν ξεπερνάει τα 130 ms) ενώ η καθυστέρηση μετάδοσης του βίντεο είναι υψηλότερη. Η μικρή διαφορά στην καθυστέρηση βίντεο και ήχου (με εξαίρεση το διάστημα 15,6-16,1 s) υποδεικνύει ότι η ουρά RTP πακέτων του αποστολέα είναι σχεδόν άδεια.

Κάποιος θα μπορούσε να πει πως οι αυξομειώσεις στο bitrate θα πρέπει να αποφεύγονται και πως θα έπρεπε να προσφέρεται ένα χαμηλότερο, αλλά πιο σταθερό bitrate. Το πρόβλημα είναι ότι μια εφαρμογή για να μάθει το πλήθος δεδομένων που μπορεί να αντέξει ένα δίκτυο, πρέπει να δοκιμάσει να στείλει δεδομένα σε αυτό. Έτσι λοιπόν, είναι δύσκολη η προσπάθεια να βρεθεί ένα χαμηλότερο αλλά σταθερότερο bitrate καθώς η καθυστέρηση αυξάνεται μόνο όταν το bitrate είναι κοντά στο όριο συμφόρησης.

Στη συνέχεια, ας δούμε μια δοκιμή πραγματικού χρόνου σε ένα αυτοκίνητο [13]. Χρησιμοποιείται ένας κωδικοποιητής βίντεο με εύρος κωδικοποίησης 1000-8000 kbps. Σαν αποστολέας του SCReAM λειτουργεί ένα laptop, που έχει πρόσβαση στο internet με τη βοήθεια ενός κινητού τηλεφώνου, επομένως χρησιμοποιείται η τεχνολογία LTE. Ο παραλήπτης SCReAM βρίσκεται σε ένα γραφείο.

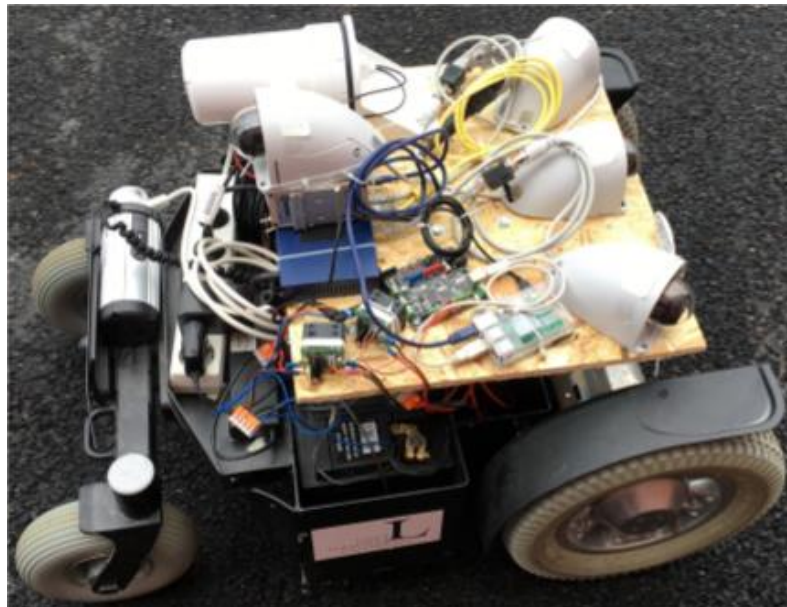
Παρακάτω είναι το γράφημα που δείχνει το παράθυρο συμφόρησης, το bitrate και την καθυστέρηση αναμονής στην ουρά.



Σχήμα 9: Αποτελέσματα της προσομοίωσης κατά τη διάρκεια οδήγησης

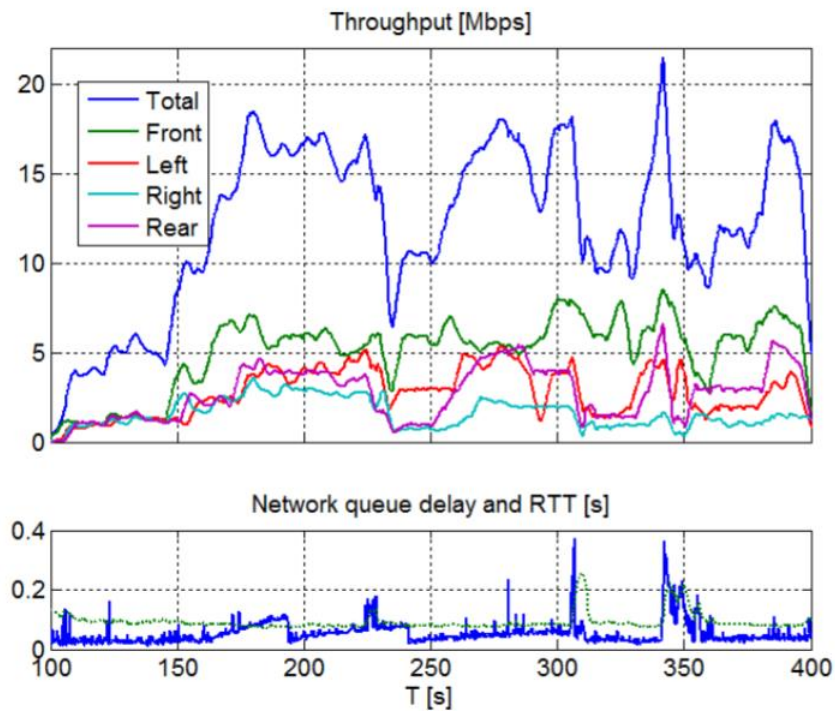
Το γράφημα δείχνει ότι το SCReAM επιτυγχάνει μετάδοση βίντεο υψηλού bitrate παρά το γεγονός ότι η ρυθμαπόδοση αλλάζει συνεχώς, λόγω της μετακίνησης, και παρά το εναλλασσόμενο bitrate από τον κωδικοποιητή βίντεο. Παρατηρούμε συχνές απώλειες πακέτων, πιθανότατα λόγω των μεταπομπών (handovers) που συμβαίνουν στα κινητά δίκτυα. Στο διάστημα μεταξύ 1730ου και 1800ου δευτερολέπτου βλέπουμε ότι η καθυστέρηση αυξάνεται, διότι η ρυθμαπόδοση ήταν χαμηλότερη από το μικρότερο διαθέσιμο bitrate του κωδικοποιητή βίντεο.

Ας δούμε ένα άλλο πείραμα στο οποίο τέσσερις IP κάμερες επικοινωνούν με μια εφαρμογή που χρησιμοποιεί το SCReAM για έλεγχο συμφόρησης, υλοποιημένη πάνω σε Raspberry Pi [14]. Η επικοινωνία γίνεται μέσω LTE, η απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης και της τοποθεσίας του πειράματος είναι περίπου 400 μέτρα και ο σταθμός βάσης προσφέρει εύρος ζώνης 20 MHz και διαθέσιμο bitrate της τάξεως των 50 Mbps. Η μπροστινή κάμερα έχει συντελεστή προτεραιότητας 1.0, η οπίσθια συντελεστή προτεραιότητας 0.3 και η αριστερή και η δεξιά συντελεστή προτεραιότητας 0.1. Αυτό σημαίνει ότι η μπροστινή κάμερα καταλαμβάνει το μεγαλύτερο εύρος ζώνης όταν υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο. Η κατασκευή στην οποία γίνεται το πείραμα βρίσκεται συνεχώς σε κίνηση.



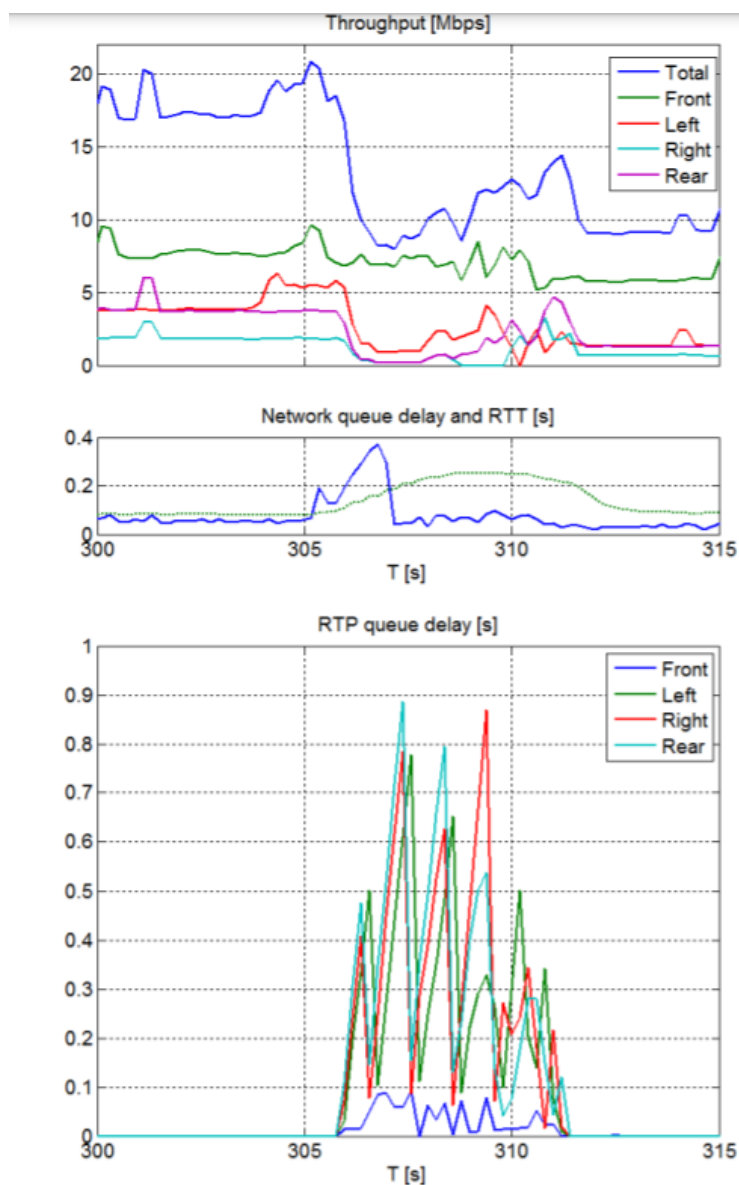
Εικόνα 3: Η κατασκευή του πειράματος με τις τέσσερις IP κάμερες

Το σχήμα 10 δείχνει στην πράξη την προσπάθεια προτεραιοποίησης μεταξύ πολλαπλών ροών στο SCReAM. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης ποικίλλει συνεχώς και το SCReAM προσπαθεί να αποτρέψει τις μεγάλες καθυστερήσεις στο δίκτυο, όταν το εύρος ζώνης είναι χαμηλό. Βλέπουμε ότι το καταφέρνει, εκτός από λίγες περιπτώσεις όπου το εύρος ζώνης πέφτει πολύ απότομα. Επίσης βλέπουμε ότι η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά αυξάνεται σιγά σιγά, εκτός από κάποιες χρονικές στιγμές που πέφτει απότομα, εξαιτίας του Raspberry Pi. Το SCReAM όμως μπορεί και το διορθώνει αυτό.



Σχήμα 10: Αποτελέσματα του πειράματος. Στο κάτω γράφημα το RTT είναι με πράσινο χρώμα και η καθυστέρηση αναμονής στην ουρά με μπλε χρώμα.

Η προτεραιοποίηση λειτουργεί αρκετά καλά, καθώς η μπροστινή κάμερα έχει πάντα το μεγαλύτερο μερίδιο της ρυθμαπόδοσης. Όμως η οπίσθια κάμερα δεν έχει πάντα μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση από την αριστερή, παρά το γεγονός ότι έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα. Αυτό συμβαίνει διότι οι IP κάμερες δεν πιάνουν πάντα το bitrate που έχει οριστεί σαν στόχος από το SCReAM, καθώς παίζει ρόλο η εικόνα που δείχνουν. Για παράδειγμα, μια στατική εικόνα παράγει σχεδόν μηδενικό bitrate. Σε συνδυασμό με την συνεχώς εναλλασσόμενη ρυθμαπόδοση του δικτύου, αυτό καθιστά την επίτευξη της τέλει προτεραιοποίησης δύσκολη.



Σχήμα 11: Εστίαση στα αποτελέσματα του πειράματος για $T = 300-315$ s..

Στο σχήμα 11 βλέπουμε πως τη χρονική στιγμή $T=305$ s η συνολική ρυθμαπόδοση πέφτει από τα 20 στα 10 Mbps σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο. Είναι εμφανές ότι η μπροστινή κάμερα επηρεάζεται πολύ λιγότερο σε σχέση με τις υπόλοιπες. Το τελευταίο γράφημα του σχήματος 10 δείχνει την καθυστέρηση αναμονής στην ουρά για κάθε μια από τις κάμερες. Για την μπροστινή κάμερα η ανώτατη τιμή της καθυστέρησης αυτής είναι 8 με 9 φορές μικρότερη από ότι στις άλλες κάμερες. Οι απότομες πτώσεις στις καθυστερήσεις γίνονται επειδή μετά από κάποιο χρονικό διάστημα τα πακέτα αποβάλλονται από το δίκτυο, όταν καθυστερούν υπερβολικά.

Θα μπορούσαν να γίνουν κι άλλοι πειραματισμοί για να μελετηθεί καλύτερα η λειτουργία του SCReAM. Μερικοί από αυτούς είναι:

- Δοκιμές με διαφορετικά είδη πολυμέσων (πχ ήχος και βίντεο).
- Πειραματισμός με τις παραμέτρους του αλγορίθμου.
- Αναζήτηση για πιθανές βελτιώσεις στον υπολογισμό του παραθύρου συμφόρησης και του ρυθμού των πολυμέσων.

6. ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

Όπως έχει ήδη εξηγηθεί, ο στόχος για έναν αλγόριθμο ελέγχου συμφόρησης όταν έχει να κάνει με κίνηση πραγματικού χρόνου στο διαδίκτυο, είναι να παράγει έναν ρυθμό αποστολής δεδομένων όσο πιο κοντά γίνεται στο διαθέσιμο εύρος ζώνης, διατηρώντας παράλληλα την χωρητικότητα της ουράς των πακέτων σε όσο πιο χαμηλά επίπεδα γίνεται. Επίσης, ο φόρτος πρέπει να μοιράζεται με δίκαιο και λειτουργικό τρόπο με άλλες ανταγωνιστικές ροές δεδομένων που υπάρχουν στο δίκτυο.

Οι προσεγγίσεις που συνήθως ακολουθούνται στους αλγορίθμους ελέγχου συμφόρησης σε τέτοιες περιπτώσεις είναι οι εξής:

- **Αλγόριθμοι βασισμένοι στις απώλειες**, οι οποίοι ανιχνεύουν την συμφόρηση στο δίκτυο με βάση τα συμβάντα απώλειας πακέτων.
- **Αλγόριθμοι βασισμένοι στην καθυστέρηση**, οι οποίοι ανιχνεύουν την συμφόρηση στο δίκτυο με βάση τις μετρήσεις καθυστερήσεων που γίνονται σε αυτό.

Συνήθως προτιμώνται οι αλγόριθμοι που βασίζονται στην καθυστέρηση, επειδή μπορούν να ανιχνεύσουν γρηγορότερα την συμφόρηση και επειδή οι αλγόριθμοι οι οποίοι βασίζονται στις απώλειες συνήθως επιβαρύνουν το δίκτυο, προσπαθώντας να καταλάβουν αν πράγματι υπάρχει συμβάν απώλειας πακέτου.

Άλλοι δύο αλγόριθμοι, εκτός του SCReAM, που σχεδιάστηκαν για μετάδοση πολυμέσων σε πραγματικό χρόνο στο διαδίκτυο είναι ο Google Congestion Control (GCC) της Google, ο οποίος αναφέρθηκε στην ενότητα 5, ο Network Assisted Dynamic Adaptation (NADA) της Cisco και ο FRACTaL. Παρακάτω γίνεται μια συνοπτική περιγραφή τους.

6.1 Google Congestion Control (GCC)

Ο αλγόριθμος αυτός προσαρμόζει τον ρυθμό αποστολής δεδομένων στην τρέχουσα κατάσταση συμφόρησης του δικτύου, την οποία για να εκτιμήσει συγκρίνει διαρκώς την διακύμανση της μονόδρομης καθυστέρησης με ένα δυναμικό όριο. Αν το ξεπερνά, τότε ο ρυθμός αποστολής δεδομένων μειώνεται, ειδικά ο ρυθμός αποστολής δεδομένων αυξάνεται. Το δυναμικά ορισμένο όριο για την μονόδρομη καθυστέρηση βοηθά στο να αποφεύγονται φαινόμενα «υποσιτισμού» (starvation) στο δίκτυο όταν ροές GCC μοιράζονται την κίνηση με ροές TCP.

6.1.1 Έλεγχος συμφόρησης στην πλευρά του αποστολέα

Ο ελεγκτής συμφόρησης του αποστολέα βασίζεται στις απώλειες και δρα κάθε χρονική στιγμή t_k που το k -οστό RTCP feedback του παραλήπτη φτάνει στον αποστολέα. Τα RTCP μηνύματα περιλαμβάνουν και το ποσοστό απώλειας πακέτων $f(t_k)$. Ο αποστολέας χρησιμοποιεί το $f(t_k)$ για να υπολογίσει τον ρυθμό αποστολής δεδομένων $A_S(t_k)$, μετρημένο σε kbps, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$A_S(t_k) = \begin{cases} A_S(t_{k-1})(1 - 0,5f(t_k)), & f(t_k) > 0,1 \\ 1,05A_S(t_{k-1}) + 1kbps, & f(t_k) < 0,02 \\ A_S(t_{k-1}), & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Το σκεπτικό είναι απλό: Όταν το ποσοστό απωλειών είναι μεγάλο ($f(t_k) > 0,1$) ο ρυθμός αποστολής μειώνεται, όταν το ποσοστό απωλειών είναι αμελητέο ($f(t_k) < 0,02$) ο ρυθμός

αποστολής αυξάνεται, ενώ όταν το ποσοστό απωλειών είναι σχετικά μικρό ($0,02 < f(t_k) < 0,1$) τότε ο ρυθμός αποστολής μένει σταθερός.

6.1.2 Έλεγχος συμφόρησης στην πλευρά του παραλήπτη

Ο έλεγχος συμφόρησης του παραλήπτη βασίζεται στην καθυστέρηση και υπολογίζει τον ρυθμό αποστολής του feedback, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$A_r(t_i) = \begin{cases} 1,05 * A_r(t_{i-1}), & \text{αύξηση} \\ 0,85 * R_r(t_{i-1}), & \text{μείωση} \\ A_r(t_{i-1}), & \text{σταθερός} \end{cases}$$

Όπου t_i η χρονική στιγμή που το i -οστό πλαίσιο βίντεο έχει παραλειφθεί και R_r ο ρυθμός παραλαβής δεδομένων που μετρήθηκε τα τελευταία 500 milli-seconds.

6.2 Network Assisted Dynamic Adaptation (NADA)

Ο NADA [15] υπολογίζει την συμφόρηση του δικτύου με βάση σήματα που προέρχονται από το δίκτυο και υποδηλώνουν ότι υπάρχει συμφόρηση (πχ τον αριθμό πακέτων με ένδειξη ECN) αλλά και με βάση την μονόδρομη καθυστέρηση και το ποσοστό απωλειών πακέτων. Η λεγόμενη αθροιστική συμφόρηση υπολογίζεται με βάση αυτές τις τρεις ενδείξεις, με την κάθε μία όμως να έχει διαφορετική βαρύτητα. Όταν δεν παρέχεται καμία βοήθεια από το δίκτυο, ο NADA λαμβάνει υπόψιν του μόνο την μονόδρομη καθυστέρηση. Για να αποφευχθούν φαινόμενα υποσιτισμού, η εκτιμώμενη καθυστέρηση περνά μέσα από μια μη γραμμική συνάρτηση, η οποία την μειώνει όταν αυτή ξεπερνά ένα προκαθορισμένο όριο.

Ο αποστολέας μόλις παραλάβει το RTCP feedback από τον παραλήπτη, υπολογίζει την αθροιστική συμφόρηση με βάση τα στοιχεία που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Στη συνέχεια προσαρμόζει το bitrate για τον κωδικοποιητή βίντεο και καθορίζει τον ρυθμό αποστολής δεδομένων, βασιζόμενος στην αθροιστική συμφόρηση. Η συμπεριφορά του αποστολέα στο NADA είναι ίδια σε όλα τα συμβάντα που υποδηλώνουν συμφόρηση (καθυστέρηση, απώλεια πακέτων, «μαρκάρισμα» πακέτων ECN).

6.3 FRACtaL

Ο FRACtaL [16] χρησιμοποιεί την τεχνική της ευθείας διόρθωσης σφαλμάτων (Forward Error Correction, FEC) για τον έλεγχο συμφόρησης. Η γενική ιδέα είναι πως, προκειμένου να μην υπάρχει απώλεια δεδομένων όταν πρόκειται να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσής τους, αρχικά στέλνονται κάποια «κενά» πακέτα, προκειμένου να δεσμευτεί από την εφαρμογή κι άλλος χώρος στο δίκτυο, χωρίς το ρίσκο των απωλειών. Αν τα πακέτα αυτά ληφθούν επιτυχώς, ο παραλήπτης θα ειδοποιήσει τον αποστολέα και εκείνος θα αρχίσει να στέλνει περισσότερα πακέτα με πολυμέσα. Βασίζεται κυρίως στις ενέργειες του αποστολέα, όπως και ο SCReAM, και για να υπολογίσει τη συμφόρηση χρησιμοποιεί το ποσοστό απώλειας πακέτων, τα «αιωρούμενα» bytes στο δίκτυο και τη μονόδρομη καθυστέρηση.

Ο FRACtaL εκτελείται κάθε φορά που ο αποστολέας λαμβάνει RTCP feedback με τα στοιχεία που βοηθούν στην εκτίμηση της συμφόρησης του δικτύου, όπως τα «αιωρούμενα» bytes του δικτύου, το ποσοστό απώλειας πακέτων και την μονόδρομη καθυστέρηση. Αν δε ληφθεί RTCP feedback για χρονικό διάστημα $\max(500 \text{ ms}, 3 \cdot \text{RTT})$ τότε ο αλγόριθμος υποθέτει ότι ίσως υπάρχει συμφόρηση και μπαίνει στην κατάσταση KEEP, στην οποία αν μετά από δύο συνεχόμενες μετρήσεις καταλάβει ότι πράγματι υπάρχει συμφόρηση μειώνει (REDUCE) τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Αν ο αλγόριθμος δεν ανιχνεύσει συμφόρηση ενόσω βρίσκεται στην κατάσταση KEEP, μπαίνει στην κατάσταση PROBE αρχίζοντας να στέλνει πακέτα FEC. Αν τα FEC πακέτα δεν προκαλέσουν συμφόρηση, ο αλγόριθμος μπαίνει στην κατάσταση INCREASE, αυξάνοντας τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ειδάλλως μπαίνει στην κατάσταση REDUCE.

6.4 Σύγκριση των αλγορίθμων

Στον παρακάτω πίνακα [17] παρατίθεται μια επισκόπηση των κύριων χαρακτηριστικών του κάθε αλγορίθμου.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά των αλγορίθμων

Χαρακτηριστικό	GCC	NADA	FRACtaL	SCReAM
Μετρικές για υπολογισμό συμφόρησης	Διακύμανση μονόδρομης καθυστέρησης, ποσοστό απωλειών	Μονόδρομη καθυστέρηση, ποσοστό απωλειών	Μονόδρομη καθυστέρηση, ποσοστό απωλειών	Μονόδρομη καθυστέρηση, ποσοστό απωλειών
Αρχιτεκτονική	Βασισμένη στον αποστολέα ή υβριδική	Βασισμένη στον αποστολέα	Βασισμένη στον αποστολέα	Βασισμένη στον αποστολέα
Μηχανισμός συμφόρησης	Βασισμένος στον ρυθμό μετάδοσης	Βασισμένος στον ρυθμό μετάδοσης	Βασισμένος στο FEC	Βασισμένος στο παράθυρο συμφόρησης
Στάδιο υλοποίησης και χρήση	Google Chrome	Προσομοιωτές Ns-2 και Ns-3	OpenWebRTC και προσομοιωτές	OpenWebRTC και προσομοιωτές

Παρατηρούμε ότι ο NADA, ο SCReAM και ο FRACtaL για τον υπολογισμό της συμφόρησης λαμβάνουν υπόψιν τους τη μονόδρομη καθυστέρηση, ενώ ο GCC τη διακύμανση αυτής. Επίσης, ο NADA, ο SCReAM και ο FRACtaL υλοποιούν τη λογική

του ελέγχου συμφόρησης στην πλευρά του αποστολέα, ενώ ο παραλήπτης το μόνο που έχει να κάνει είναι να στέλνει RTCP feedbacks στον αποστολέα, με κάποιες μετρήσεις. Ο GCC αρχικά θεωρούνταν ένας υβριδικός αλγόριθμος συμφόρησης βασισμένος και στον παραλήπτη και στον αποστολέα, όμως πρόσφατα ανασχεδιάστηκε προκειμένου να υποστηρίζει μια αρχιτεκτονική που βασίζεται αποκλειστικά στον αποστολέα. Σχετικά με τον μηχανισμό συμφόρησης, ο NADA και ο GCC βασίζονται στον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων στο δίκτυο, σε αντίθεση με τους FRACtaL και SCReAM οι οποίοι βασίζονται στο FEC και στο μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης αντίστοιχα. Για βοήθεια στον έλεγχο συμφόρησης, ο SCReAM και ο NADA υποστηρίζουν το ECN. Όλοι οι αλγόριθμοι βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Ο NADA έχει υλοποιηθεί στους προσομοιωτές Ns-2 και Ns-3, ο SCReAM και ο FRACtaL έχουν υλοποιηθεί στο OpenWebRTC, ενώ ο GCC περιλαμβάνεται στην επίσημη έκδοση του Google Chrome και στις εφαρμογές Google Hangouts και Google Duo, όντας ο μόνος αλγόριθμος που συμπεριλαμβάνεται σε έναν ευρέως διαδεδομένο browser.

Λόγω των διαφορετικών σταδίων υλοποίησης που βρίσκονται οι αλγόριθμοι, είναι δύσκολο να γίνει ποιοτική σύγκριση μεταξύ τους. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν κάποια αποτελέσματα με βάση πειραματικά δεδομένα.

Έχουν γίνει διάφορες δοκιμές για την σύγκριση της απόδοσης των GCC, NADA και SCReAM. Σε μία από αυτές δοκιμάστηκε η ικανότητά τους να ανταποκρίνονται σε ξαφνικές αυξομειώσεις του εύρους ζώνης, όταν υπάρχουν μία οι περισσότερες ροές δεδομένων στο δίκτυο. Ο NADA είχε καλά αποτελέσματα μόνο όταν η κωδικοποίηση των πολυμέσων ήταν ιδανική, ο SCReAM παρουσίαζε δυσκολίες όταν το RTT στο δίκτυο ήταν μεγάλο και έχει να ανταγωνιστεί ροές δεδομένων πάνω σε TCP, ενώ ο GCC ανταποκρινόταν με καλό τρόπο στις περισσότερες περιπτώσεις.

Σε μια άλλη δοκιμή, όπου υπήρχαν περισσότερες από μία ανταγωνιστικές μεταξύ τους ροές πολυμέσων, ο NADA προσαρμόζει γρήγορα τον ρυθμό μετάδοσης των πολυμέσων όταν η κωδικοποίηση των πολυμέσων είναι ιδανική. Ο SCReAM και ο GCC προσαρμόζουν πιο αργά τον ρυθμό μετάδοσης των πολυμέσων από τον NADA, όμως δίνουν μικρότερες καθυστερήσεις αναμονής στην ουρά. Οι τρεις αλγόριθμοι κατάφεραν να αποτρέψουν τις υψηλές απώλειες πακέτων σε αυτήν την δοκιμή.

Σε ένα άλλο σενάριο, όπου μια ροή πολυμέσων ανταγωνίζεται με μια ροή δεδομένων πάνω σε TCP, ο GCC και ο NADA καταφέρνουν να αποτρέψουν τα φαινόμενα υποσιτισμού στο δίκτυο, σε αντίθεση με τον SCReAM.

Ο FRACtaL μπορεί να συγκριθεί πιο εύκολα με τον SCReAM, διότι και οι δύο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές που εκμεταλλεύονται το OpenWebRTC. Δοκιμές που έχουν γίνει έχουν δείξει ότι ο FRACtaL παράγει καλύτερο ποσοστό απωλειών, χαμηλότερη καθυστέρηση αναμονής στην ουρά. Επιπλέον, φαίνεται ότι ο FRACtaL ανταποκρίνεται καλά όταν έχει να ανταγωνιστεί μικρές ή μεγάλες ροές δεδομένων πάνω σε TCP, σε αντίθεση με τον SCReAM.

7. SCReAM και 5G

Έχουν γίνει κάποιες μελέτες για ένταξη του L4S και του SCReAM στα κυψελωτά δίκτυα LTE γενικότερα, και στα δίκτυα 5G ειδικότερα, για υλοποίηση εφαρμογών επαυξημένης πραγματικότητας [11]. Η γενική ιδέα της στρατηγικής είναι η εξής: ένα πακέτο αν έχει υποστεί συμφόρηση «μαρκάρεται», αυτό συμβαίνει με μια πιθανότητα $pMark$. Η πιθανότητα «μαρκαρίσματος» εξαρτάται από 4 παραμέτρους. Η πρώτη είναι το κατώτατο όριο **L4SLowTh**, που αναπαριστά το κατώτατο όριο καθυστέρησης, κάτω από το οποίο ένα πακέτο δεν πρέπει ποτέ να «μαρκάρεται» για συμφόρηση. Η δεύτερη είναι το ανώτατο όριο **L4SHighTh**, πάνω από το οποίο ένα πακέτο πρέπει πάντα να «μαρκάρεται» για συμφόρηση. Η τρίτη είναι η παράμετρος α , η οποία βοηθά την εφαρμογή να ενημερώνει την πιθανότητα μαρκαρίσματος και βρίσκεται μεταξύ του 0 και του 1. Η τέταρτη είναι η **qdelay(t)**, η οποία αναπαριστά την καθυστέρηση αναμονής στην ουρά για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή t .

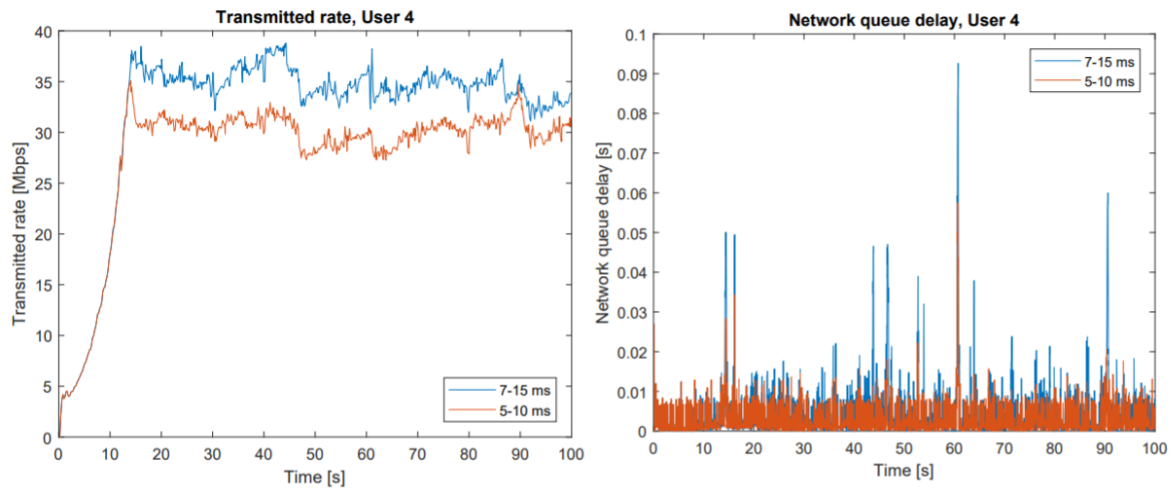
Η φόρμουλα υπολογισμού της πιθανότητας μαρκαρίσματος για μια χρονική στιγμή t , αποτελείται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$tmp(t) = \frac{qdelay(t) - L4SLowTh}{L4SHighTh - L4SLowTh} \quad (7.1)$$

$$pMark(t) = \alpha * tmp(t) + (1 - \alpha) * pMark(t - dT) \quad (7.2)$$

Η μεταβλητή tmp είναι η στιγμιαία πιθανότητα «μαρκαρίσματος» πακέτου για την χρονική στιγμή t και χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η πιθανότητα $pMark$. Η πιθανότητα $pMark(t-dT)$ είναι η τελευταία υπολογισμένη πιθανότητα $pMark$, με το dT να είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών ενημερώσεων.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια προσομοίωση στην οποία υπάρχουν 4 παίκτες video games που χρησιμοποιούν το SCReAM, σε δίκτυο 5G με 3 σταθμούς βάσης, 9 κυψέλες και κίνηση FTP στο παρασκήνιο. Τα ανώτατα και κατώτατα όρια καθυστέρησης $L4SLowTh$ και $L4SHighTh$ που μελετώνται είναι 5 και 10 ms, και 7 και 15 ms αντίστοιχα. Η παρασκηνιακή κίνηση του δικτύου αφορά κάποιους χρήστες που κατεβάζουν ένα αρχείο μεγέθους 1 MB και κάποιους άλλους που κατεβάζουν ένα αρχείο μεγέθους 100 KB. Ο ρυθμός αύξησης αυτών των χρηστών είναι 2 χρήστες ανά δευτερόλεπτο για το αρχείο μεγέθους 1 MB και 20 χρήστες ανά δευτερόλεπτο για το αρχείο μεγέθους 100 KB. Η συχνότητα φέροντος είναι στα 600 MHz, ενώ το εύρος ζώνης φέροντος στα 9 MHz. Βλέπουμε το γράφημα που αναπαριστά τα δεδομένα (ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και καθυστέρηση αναμονής στην ουρά συναρτήσει του χρόνου) για έναν μόνο παίκτη video game (όλοι οι παίκτες έχουν την ίδια συμπεριφορά σαν χρήστες του δικτύου).



Σχήμα 12: Σύγκριση ορίων καθυστέρησης

Παρατηρούμε ότι το χαμηλότερο διάστημα ορίων καθυστέρησης για συμφόρηση (5-10 ms) παράγει χαμηλότερη καθυστέρηση αναμονής στην ουρά (δεξί διάγραμμα), όμως παράγει και χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (αριστερό διάγραμμα).

8. ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Όσα παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες δύο ενότητες δείχνουν ότι είναι δυνατή η εύρυθμη λειτουργία υπηρεσιών βίντεο σε δίκτυα LTE. Επίσης, είδαμε ότι ο SCReAM αποδίδει καλύτερα συγκριτικά με έναν αλγόριθμο βασισμένο στον ρυθμό μετάδοσης. Η αιτία που συμβαίνει αυτό βρίσκεται στον τρόπο λειτουργίας των δύο αλγορίθμων. Το SCReAM έχει πολλά στάδια ελέγχου συμφόρησης:

1. Η αύξηση της καθυστέρησης μειώνει το παράθυρο συμφόρησης, αλλά το bitrate των πολυμέσων δε μειώνεται άμεσα.
2. Οι καθυστερημένες επιβεβαιώσεις επιβραδύνουν τη μετάδοση πακέτων, καθώς ο αριθμός των «αιωρούμενων» bytes στο δίκτυο δεν μπορεί να ξεπεράσει το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης, παρ' όλα αυτά το bitrate των πολυμέσων δε μειώνεται άμεσα.
3. Η αύξηση της ουράς RTP πακέτων στον αποστολέα τελικά οδηγεί στη μείωση του bitrate των πολυμέσων

Ο αλγόριθμος που βασίζεται στον ρυθμό μετάδοσης έχει απλά μια προϋπόθεση: αν αυξηθεί η καθυστέρηση, θα μειωθεί άμεσα το bitrate των πολυμέσων. Τα πολλά στάδια ελέγχου συμφόρησης του SCReAM δίνουν τη δυνατότητα για υψηλή χρήση της ζεύξης και για άμεση αντίδραση σε ενδεχόμενη συμφόρηση.

Παρά τα πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα του SCReAM, υπάρχουν κάποιες ανησυχίες άξιες αναφοράς.

- **Υπερβολική αντίδραση σε μεταπομπές:** Το SCReAM δεν μπορεί εύκολα να ξεχωρίσει τη διαφορά μεταξύ συμφόρησης και μιας στιγμιαίας καθυστέρησης που μπορεί να συμβεί όταν η μετάδοση πακέτων μπει σε αναμονή εξαιτίας μιας μεταπομπής. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αχρείαστες μειώσεις του ρυθμού μετάδοσης κατά τη διάρκεια των μεταπομπών και ενδεχομένως να είναι πρόβλημα σε περιπτώσεις που υπάρχει υψηλή κινητικότητα.
- **Υπερβολική αντίδραση σε συμβάντα συμφόρησης:** Επειδή συνήθως δεν είναι γνωστό στον αλγόριθμο το μέγεθος του μονοπατιού μετάδοσης, το bitrate μειώνεται πολλές φορές περισσότερο από όσο χρειάζεται στην πραγματικότητα.
- **Συχνές και μεγάλες αλλαγές του bitrate:** Όταν ανιχνεύεται συμφόρηση, το bitrate πρέπει να μειώνεται για να συνεχίζεται απρόσκοπτα η μετάδοση και αυτό για κάποιους χρήστες ίσως είναι ενοχλητικό.
- **Μετάδοση VBR βίντεο:** Όταν το bitrate είναι εναλλασσόμενο, αυξάνεται ο κίνδυνος καθυστερήσεων και απωλειών πακέτων, γιατί είναι πιο δύσκολο για τον αλγόριθμο να το διαχειριστεί.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από όλα όσα μελετήθηκαν προκύπτει ότι είναι εφικτό να υλοποιηθεί μετάδοση πολυμέσων σε ασύρματα δίκτυα, όπως είναι για παράδειγμα τα LTE, ακόμα και αν υπάρχει υψηλό φορτίο κίνησης σε αυτά. Τα ταχέως εναλλασσόμενα χαρακτηριστικά των καναλιών όμως προσδίδουν επιπλέον απαιτήσεις στη λύση που θα βρεθεί. Ο στόχος είναι να υπάρχουν οι λιγότερες δυνατές απώλειες, παράλληλα με τις μικρότερες δυνατές καθυστερήσεις, προκειμένου τα πολυμέσα να μεταδίδονται απρόσκοπτα, χωρίς διακοπές ή κολλήματα.

Το SCReAM έχει τον μηχανισμό να εντοπίζει εγκαίρως τη συμφόρηση στο δίκτυο και να προσαρμόζει το bitrate των πολυμέσων που στέλνονται, προσφέροντας παράλληλα έλεγχο συμφόρησης χωρίς την ανάγκη επιβεβαίωσης κάθε πακέτου που λαμβάνεται. Είναι ένας καινοτόμος αλγόριθμος ελέγχου συμφόρησης που εναρμονίζεται με την αρχή διατήρησης των πακέτων του δικτύου και αξιοποιεί πρόσφατες έρευνες που έχουν γίνει πάνω στο TCP, καθορίζοντας το bitrate των πολυμέσων μέσα από την καθυστέρηση αναμονής στην ουρά του αποστολέα και τα δοσμένα όρια καθυστέρησης. Επιπλέον, μπορεί να υποστηρίξει και προτεραιοποίηση ροών δεδομένων. Αν το εύρος ζώνης του δικτύου μειωθεί, μπορεί να δοθεί προτεραιότητα στην μετάδοση της πιο σημαντικής ροής δεδομένων, προκειμένου να υπάρξει το μικρότερο δυνατό πρόβλημα. Είδαμε ότι αυτό λειτουργεί σωστά τις περισσότερες φορές. Επίσης, μπορεί να υποστηριχθεί η αλλαγή προτεραιότητας κατά την εκτέλεση, όμως αυτό το χαρακτηριστικό χρειάζεται περισσότερη μελέτη προκειμένου να διαπιστωθεί αν λειτουργεί με τον σωστό τρόπο.

Όλα αυτά φαίνεται πως πετυχαίνουν τον στόχο της υψηλής εκμετάλλευσης των ζεύξεων του δικτύου και της έγκαιρης αντίδρασης σε ενδεχόμενη συμφόρηση. Η υλοποίηση του SCReAM γίνεται με τη βοήθεια του RTCP.

Είδαμε πως το ECN και ένα πρόσθετο χαρακτηριστικό του, το L4S, μπορούν να βοηθήσουν στο να υπάρξουν ακόμα χαμηλότερες καθυστερήσεις αναμονής στην ουρά για τα πακέτα του δικτύου. Το L4S θα μπορούσε επίσης να βοηθήσει στην ένταξη του SCReAM στην τεχνολογία 5G.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Bitrate	Ρυθμός μετάδοσης δυαδικών ψηφίων
Browser	Φυλλομετρητής
Self-Clocking	Αυτορυθμιζόμενο
Download	Καθοδική ζεύξη
Upload	Ανοδική ζεύξη
Jitter	Διακύμανση καθυστέρησης
Network Layer	Επίπεδο δικτύου
Application Layer	Επίπεδο εφαρμογής
Client	Πελάτης
Server	Εξυπηρετητής
Slow start	Αργή εκκίνηση
Congestion Window	Παράθυρο συμφόρησης
Bottleneck rate	Ρυθμός συμφόρησης
One-way delay	Μονόδρομη καθυστέρηση
Queueing delay	Καθυστέρηση αναμονής στην ουρά
Router	Δρομολογητής
Throughput	Ρυθμαπόδοση
Network congestion control	Έλεγχος συμφόρησης δικτύου
Sender transmission control	Έλεγχος μετάδοσης αποστολέα
Media rate control	Έλεγχος ρυθμού πολυμέσων
Feedback	Ανατροφοδότηση
Frame	Πλαίσιο
Bandwidth	Εύρος ζώνης
Handover	Μεταπομπή
Starvation	Υποσιτισμός

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

LTE	Long Term Evolution
TCP	Transmission Control Protocol
RTP	Real-Time Transport Protocol
UDP	User Datagram Protocol
WebRTC	Web Real-Time Communication
SCReAM	Self-Clocked Rate Adaptation for Multimedia
LEDBAT	Low Extra Delay Background Transport
ECN	Explicit Congestion Notification
QoS	Quality of Service
GSM	Global System for Mobile Communications
EDGE	Enhanced Data for Global Evolution
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
HSPA	High Speed Packet Access
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
RTCP	Real-Time Transport Control Protocol
ECE	Explicit Congestion Notification-Echo
CWR	Congestion Window Reduced
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
APIs	Application Programming Interfaces
ACK	Acknowledgement
CWND	Congestion Window
OWD	One Way Delay
FTP	File Transfer Protocol
RTT	Round Trip Time
VBR	Variable BitRate
L4S	Low Latency Low Loss Scalable Throughput
Mbps	MegaBit per second
Kbps	KiloBit per second
eNB	E-UTRAN Node B
GCC	Google Congestion Control
NADA	Network Assisted Dynamic Adaptation

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Cisco. Cisco visual networking index: Forecast and methodology 2013-2018
- [2] Jorg Widmer, Robert Denda, and Martin Mauve. A survey on tcp-friendly congestion control. IEEE network, 15(3):28–37, 2001.
- [3] Jitendra Padhye, Jim Kurose, Don Towsley, and Rajeev Koodli. A model based tcp-friendly rate control protocol. In Proceedings of NOSSDAV, 1999
- [4] "An Introduction to LTE". 3GPP LTE Encyclopedia. <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia>
- [5] J. Lazzaro, "Framing Real-time Transport Protocol (RTP) and RTP Control Protocol (RTCP) Packets over Connection-Oriented Transport, July 2006. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4571>
- [6] V. Jacobson, Congestion avoidance and control, in: SIGCOMM, 1988, pp. 314–329.
- [7] Mirja, Kuehlewind; Greg, Hazel; Stanislav, Shalunov; Janardhan, Iyengar. "Low Extra Delay Background Transport (LEDBAT)", <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6817>
- [8] This Is How Your BitTorrent Downloads Move So Fast, July 29, 2013, <https://www.fastcompany.com/3014951/why-your-bittorrent-downloads-move-so-fast>
- [9] Fairhurst, G., Sathiseelan, A., and R. Secchi "Updating TCP to Support Rate-Limited Traffic", October 2015; <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7661>
- [10] Sarker, Z. and I. Johansson, "Updates on SCReAM: An implementation experience", November 2015, <<https://www.ietf.org/proceedings/94/slides/slides-94-rmcat-8.pdf>>
- [11] Davide Brunello, "L4S in 5G Networks", <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1484466/FULLTEXT01.pdf>
- [12] Alvestrand et. al "A Google Congestion Control Algorithm for Real-Time Communication", work in progress, <https://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2013/papers/fhmn/p21.pdf>
- [13] Ingemaar Johansson, Siddharth Dadhich, Ulf Bodin, Tomas Jönsson "Adaptive Video with SCReAM over LTE for Remote-Operated Working Machines" <https://downloads.hindawi.com/journals/wcmc/2018/3142496.pdf>
- [14] SCReAM live demo, <https://youtu.be/YYaox26WhKo>
- [15] X. Zhu, R. Pan, S. Mena, P. Jones, J. Fu, and S. D'Aronco. NADA: A unified congestion control scheme for real-time media. Internet-Draft draft-ietf-rmcat-nada-04, March 2017
- [16] Balazs Kreith, Varun Singh, Jorg Ott, "FRACTaL: FEC-based Rate Control for RTP", October 23-27, 2017, <http://www.netlab.tkk.fi/~jo/papers/2017-acmmm-fractal.pdf>
- [17] Luca De Cicco, Gaetano Carlucci, Saverio Mascolo "Congestion Control for WebRTC: Standardization Status and Open Issues", https://www.researchgate.net/profile/Luca-De-Cicco/publication/317620792_Congestion_Control_for_WebRTC_Standardization_Status_and_Open_Issues/links/5a967571aca272140569694e/Congestion-Control-for-WebRTC-Standardization-Status-and-Open-Issues.pdf