

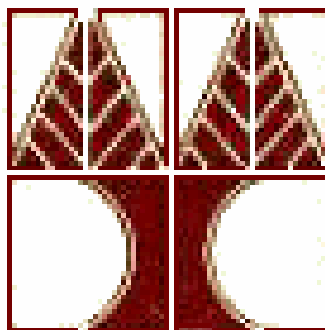
**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ
ΤΩΝ ΒΙΝΤΕΟΡΟΩΝ ΒΑΣΕΙ ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ
ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΣΤΡΩΜΑΤΑ**

Ιωακείμ Συκοπετρίτης

asykopetritis@gmail.com

Διατριβή Μάστερ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μάιος 2006

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΒΙΝΤΕΟΡΟΩΝ
ΒΑΣΕΙ ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΣΤΡΩΜΑΤΑ**

Ιωακείμ Συκοπετρίτης

Πρώτος Επιβλέπων: Ανδρέας Πιτσιλλίδης
Δεύτερος Επιβλέπων: Βάσος Βασιλείου

Η Ατομική αυτή Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού διπλώματος «Προηγμένες Τεχνολογίες Πληροφορικής» του Τμήματος Πληροφορικής, Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών, του Πανεπιστημίου Κύπρου.

Μάιος 2006

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Ανδρέα Πιτσιλλίδη και του λέκτορα κ. Βάσου Βασιλείου, τους οποίους ευχαριστώ ιδιαίτερω για την ευκαιρία που μου έδωσαν να ασχοληθώ με ένα πραγματικά ενδιαφέρον θέμα. Τους ευχαριστώ για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις και για την καθοδήγηση που μου έδωσαν τόσο στον προσδιορισμό του ακριβούς αντικειμένου αυτής της έρευνας όσο και για την ομαλή διεκπεραίωσή της.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω όλα τα παιδιά (υποψήφιους διδάκτορες και μεταπτυχιακούς φοιτητές) της ομάδας έρευνας και ανάπτυξης δικτύων του Πανεπιστημίου Κύπρου για τη συνεργασία και τις διευκολύνσεις που μου προσέφεραν σε διάφορα στάδια της έρευνας.

Τελειώνοντας, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τη σύζυγο μου Σόφη, για την κατανόηση που επέδειξαν και τη στήριξη και εμπύχωση της προσπάθειάς μου.

Περίληψη

Η μελέτη αυτή έχει ως στόχο την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου ο οποίος να μπορεί να προσαρμόζεται στις εκάστοτε μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου, ώστε να βελτιστοποιείται η αντιληπτή ποιότητα του βίντεο όταν αυτό μεταδίδεται μέσα από δίκτυα μεταγωγής πακέτων, όπως είναι το Διαδίκτυο. Για να μπορεί, όμως, ο αλγόριθμος να προσαρμόσει τις παραμέτρους του σε απρόβλεπτες και μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου πρέπει να γνωρίζει ποιες είναι αυτές. Ο τρόπος με τον οποίο γνωστοποιούνται οι συνθήκες αυτές είναι μέσω ανατροφοδότησης (feedback).

Προτού υλοποιηθεί ο πιο πάνω αλγόριθμος έγινε μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας όσο αφορά την υποδομή του Διαδικτύου, τις ιδιότητες και παραμέτρους του ψηφιακού βίντεο, τις μεθόδους συμπίεσης και τις τεχνικές μετάδοσής του μέσα από δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Έτσι, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο θέμα και περιγράφεται το πρόβλημα, καθώς και διάφορες γενικές προσεγγίσεις ως προς την προσαρμογή του bitrate. Στο δεύτερο κεφάλαιο μελετάται η ψηφιοποίηση του βίντεο, γίνεται αναφορά στις δυνατότητες και τη χρήση των κωδικοποιητών και περιγράφονται μερικοί από τους πιο γνωστούς κωδικοποιητές. Στο κεφάλαιο τρία μελετούνται οι βιντεοροές μέσω του Διαδικτύου και οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάδοσή τους, καθώς και ζητήματα που αφορούν τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν βιντεοροές. Στο τέταρτο κεφάλαιο συζητούνται τα υπέρ και τα κατά των δύο πρωτοκόλλων μεταφοράς, TCP και UDP για βιντεοροές, ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο μελετούνται οι διάφορες τεχνικές που υπάρχουν για την αξιόπιστη μεταφορά του βίντεο μέσω του Διαδικτύου. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο προσαρμοστικές τεχνικές για τις βιντεοροές μέσω του Διαδικτύου και στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια εκτεταμένη επισκόπηση των ζητημάτων μετάδοσης του βίντεο σε στρώματα (layers). Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δική μας προσέγγιση και περιγράφεται αναλυτικά ο αλγόριθμος που υλοποιήσαμε για προσαρμογή και βέλτιστη μετάδοση του βίντεο μέσω δικτύων μεταγωγής πακέτων.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	IV
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	V
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
1.1 Πού οφείλεται η φτωχή ποιότητα των εφαρμογών βιντεορών.....	4
1.2 Διάφορες προσεγγίσεις προσαρμογής του bitrate.....	6
2 ΨΗΦΙΑΚΑ ΒΙΝΤΕΟ	7
2.1 Κωδικοποιητές βίντεο και ήχου.....	7
2.2 Κωδικοποιητές βίντεο.....	7
2.2.1 H.263.....	8
2.2.2 JPEG και MJPEG.....	8
2.2.3 MPEG.....	9
2.2.4 Cinepak.....	9
2.2.5 Sorenson.....	9
2.2.6 RealVideo 8.....	9
2.2.7 Windows Media Video.....	10
2.2.8 MPEG-4.....	11
2.2.9 Fine Granularity Scalability.....	12
2.3 Κωδικοποιητές ήχου.....	13
3 ΒΙΝΤΕΟΡΟΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ	14
3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τις βιντεοροές μέσω του Διαδικτύου.....	14
3.1.1 Το πρωτόκολλο Διαδικτύου (IP) καλύτερης προσπάθειας.....	14
3.1.2 Ετερογένεια δικτύου.....	15
3.1.3 Διάφορες άλλες συνθήκες του δικτύου.....	17
3.2 Γενικά ζητήματα εφαρμογών με βιντεοροές.....	18
3.2.1 Βιντεοροές βίντεο έναντι πλήρους κατεβάσματος (downloading) του βίντεο.....	18
3.2.2 Ροές αποθηκευμένου βίντεο έναντι ροών ζωντανού (live) βίντεο.....	18
3.2.3 Βιντεοροές κωδικοποιημένες σε στρώματα.....	19
3.3 Μετάδοση βίντεο μέσα από δίκτυα καλύτερης προσπάθειας.....	20
3.3.1 Μετάδοση με Σταθερό Ρυθμό ενός μόνο επιπέδου.....	20
3.3.2 Πολλαπλά αντίγραφα βιντεορών.....	21
3.3.3 Μετάδοση ενός μόνο επιπέδου με προσαρμοστικό ρυθμό.....	21
3.3.4 Διακωδικοποίηση.....	22
3.3.5 Στρωματοποιημένο βίντεο.....	22
4 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΒΙΝΤΕΟΡΟΩΝ: TCP ENANTI UDP	24
4.1 UDP.....	24
4.2 TCP.....	24

5	Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ	26
5.1	IntServ	26
5.2	DiffServ	26
5.3	Άλλες αλλαγές	27
6	ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΒΙΝΤΕΟΡΟΕΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ	29
6.1	Βιντεοροές με προσαρμογή του δικτύου	29
6.2	Βιντεοροές με προσαρμογή του περιεχομένου του βίντεο	30
7	ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΖΗΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΒΙΝΤΕΟ ΣΕ ΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	31
7.1	Μετάδοση βίντεο σε στρώματα	31
7.2	Αντιληπτή ποιότητα του βίντεο	33
7.3	Τεχνικές κατάτμησης του βίντεο σε στρώματα με διαφορετικούς κωδικοποιητές.....	34
7.3.1	Χρονική στρωματοποίηση	35
7.3.2	Στρωματοποίηση βασισμένη σε κατάτμηση των δεδομένων	36
7.3.3	Στρωματοποίηση βάσει της αναλογίας σήματος προς θόρυβο	36
7.3.4	Χωρική στρωματοποίηση	37
7.3.5	Στρωματοποίηση περιεχομένου του βίντεο.....	38
7.4	Τεχνικές ψηφιακής συμπίεσης	39
7.4.1	Πρόβλεψη	39
7.4.2	Μετασχηματισμός.....	39
7.4.3	Κβαντοποίηση	39
7.4.4	Κωδικοποίηση εντροπίας	39
8	Η ΔΙΚΗ ΜΑΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	41
8.1	Στόχος	41
8.2	Τι χρησιμοποιήθηκε στην υλοποίησή μας.....	41
8.2.1	Πλατφόρμα	41
8.2.2	Το σύστημα Goddard Streaming Media.....	42
8.3	Η τοπολογία του δικτύου.....	43
8.4	Ο αλγόριθμος βέλτιστης προσαρμογής	44
8.4.1	Παράμετροι.....	44
8.4.2	Περιγραφή του αλγόριθμου	45
8.5	Σενάρια με τα αναμενόμενα αποτελέσματά τους.....	52
8.6	Ο αλγόριθμος «εν δράσει»	55
8.6.1	Σχολιασμός αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων:.....	59
9	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	63

ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	64
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	67

1 Εισαγωγή

Το βίντεο για πολλές δεκαετίες αποτέλεσε ένα σημαντικό πολυμέσο για τις επικοινωνίες και για την ψυχαγωγία. Αρχικά γραφόταν και μεταδιδόταν σε αναλογική μορφή. Η εμφάνιση των ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και των υπολογιστών οδήγησε στην ψηφιοποίηση του βίντεο, και το ψηφιακό βίντεο υποκίνησε μια επανάσταση στη συμπίεση και τη μετάδοσή του. Η συμπίεση βίντεο έγινε ένας σημαντικός τομέας έρευνας προς το τέλος της δεκαετίας του '80 και κατά τη δεκαετία του '90 και δημιούργησε ποικίλες εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων της αποθήκευσης βίντεο σε DVD και CD, της ευρείας τηλεοπτικής ανοικτής μετάδοσης μέσω ψηφιακού καλωδίου, της δορυφορικής και επίγειας (από αέρος) ψηφιακής τηλεόρασης (DTV), και της βιντεοτηλεδιάσκεψης. Η αύξηση και η δημοτικότητα του Διαδικτύου στα μέσα της δεκαετίας του '90 παρακίνησαν την μετάδοση βίντεο μέσα από δίκτυα πακέτων βασισμένα στην καλύτερη προσπάθεια (best-effort), όπως είναι το Διαδίκτυο. Η μετάδοση βίντεο διαμέσου των δικτύων αυτών περιπλέκεται από διάφορους παράγοντες όπως το άγνωστο και κυμαινόμενο εύρος ζώνης, η καθυστέρηση των πακέτων και οι απώλειές τους, καθώς επίσης και από πολλά πρόσθετα ζητήματα, όπως το πώς να μοιραστούν δίκαια οι πόροι του δικτύου μεταξύ των πολλών βιντεοροών και το πώς να μεταδοθεί αποτελεσματικά ένα δημοφιλές βίντεο από ένα εξυπηρετητή σε πολλούς παραλήπτες. Επίσης, ένα άλλο σημαντικό ζήτημα, το οποίο μελετάται διεξοδικά στην παρούσα μελέτη, είναι η ποιότητα του βίντεο που καταφθάνει τελικά στον παραλήπτη.

Μέχρι πρόσφατα, για να απολαύσουμε βίντεο στον υπολογιστή μας μέσω Internet, έπρεπε πρώτα να παραλειφθεί ολόκληρο το αρχείο και μετά να αρχίσει η αναπαραγωγή του. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορούμε να παρακολουθήσουμε βίντεο αρκετά καλής ποιότητας, ακόμα και από χαμηλής ταχύτητας συνδέσεις. Το σημαντικότερο μειονέκτημα, ωστόσο, είναι ότι ο χρήστης θα πρέπει να περιμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα την παραλαβή ολόκληρου του αρχείου. Παράλληλα, τίθενται και θέματα παραβίασης της πνευματικής ιδιοκτησίας, αφού καθίσταται δυνατή η αντιγραφή και διανομή του αρχείου αυτού.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων αναπτύχθηκε μία νέα τεχνολογία, που επιτρέπει την αποστολή συμπιεσμένου ψηφιακού βίντεο μέσω δικτύων. Οι βιντεοροές (streaming video), όπως έχουν βαφτιστεί, αποτελούν μια από τις πιο εντυπωσιακές και ταυτόχρονα ταχύτατα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες στο Internet. Παρ' όλα αυτά, οι λεπτομέρειες των βιντεοροών παραμένουν εν πολλοίς άγνωστες. Σε αυτό υπεύθυνη είναι η εμπορική εκμετάλλευσή τους, η οποία δεν βασίστηκε σε κάποιο ανοικτό πρότυπο, αλλά σε ιδιόκτητο κώδικα που αναπτύχθηκε από τις εταιρείες του χώρου. Ακόμα και ο ορισμός των ροών (streaming) παραμένει στοιχειώδης και περιγραφικός. Σε γενικές γραμμές, περιλαμβάνει την αποστολή υλικού (π.χ. ήχου και εικόνας) από κάποιον εξυπηρετητή σε κάποιο τερματικό, μέσω ενός δικτύου πακέτων, όπως το Internet. Ο εξυπηρετητής κατατέμνει το υλικό σε πακέτα, τα οποία εκπέμπονται μέσω του δικτύου προς έναν ή περισσότερους προκαθορισμένους αποδέκτες. Κατά την παραλαβή τους, τα πακέτα επανασυντίθενται και ξεκινά η αναπαραγωγή. Η αλληλουχία των πακέτων αυτών ονομάζεται «ροή» (stream) και η διαφορά ως προς την απλή μεταφορά αρχείων έγκειται στο ότι η αναπαραγωγή του υλικού αρχίζει καθώς αυτό παραλαμβάνεται από τον

υπολογιστή του χρήστη. Ενδέχεται, μάλιστα, ο τελικός αποδέκτης να μην παραλάβει ποτέ το συνολικό αρχείο, αλλά απλώς να αναπαράγει τα πακέτα καθώς αυτά καταφθάνουν.

Για το χρήστη, η ουσία της όλης διαδικασίας εστιάζει στην προσδοκία ότι το υλικό που ζήτησε θα αναπαραχθεί στον υπολογιστή του άμεσα και χωρίς διακοπές. Αυτός είναι και ο σημαντικότερος στόχος των ροών και ο λόγος για τον οποίο αναπτύχθηκε η τεχνολογία αυτή. Ποιοι είναι, όμως, οι παράγοντες που διαμορφώνουν την τελική ποιότητα; Επειδή η διαδικασία δημιουργίας και διανομής streaming media αποτελείται από αρκετά στάδια, οι παράγοντες αυτοί ποικίλλουν και επηρεάζουν με διαφορετική κάθε φορά βαρύτητα το τελικό αποτέλεσμα. Το πρώτο βήμα, λοιπόν, είναι η καταγραφή ή η δημιουργία του υλικού, είτε σε απευθείας ψηφιακή μορφή είτε σε αναλογική και κατόπιν ψηφιοποίησή της. Η διαδικασία αυτή είναι καθοριστικής σημασίας, αφού η ποιότητα του αρχικού υλικού (π.χ. μιας ταινίας) θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν καλύτερη. Παρ' όλα αυτά, το θέμα αυτό ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, αφού δεν σχετίζεται άμεσα με τις βιντεοροές. Το επόμενο στάδιο αποτελείται από τη συμπίεση του υλικού, χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους κωδικοποιητές / αποκωδικοποιητές (codecs) που έχουν αναπτυχθεί. Οι κωδικοποιητές αυτοί χρησιμοποιούνται από τις τρεις κυριότερες αρχιτεκτονικές που έχουν δημιουργήσει οι Microsoft, Apple και Real Networks. Αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία του υλικού, ακολουθεί η τοποθέτησή του σε κάποιον εξυπηρετητή και η αποστολή του προς τους τελικούς αποδέκτες μέσω των νέων πρωτοκόλλων ροών που έχουν αναπτυχθεί.

Αυτή η μελέτη εξετάζει τα ζητήματα αυτά τα οποία κάνουν δύσκολη την μετάδοση και την ταυτόχρονη αναπαραγωγή του βίντεο στον παραλήπτη, και ερευνά τους αλγόριθμους που επιτρέπουν τη ροή ζωντανού ή προ-κωδικοποιημένου βίντεο μέσα από δίκτυα πακέτων, όπως είναι το Διαδίκτυο. Τέλος, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που φτιάξαμε, ο οποίος προσπαθεί να λάβει υπόψη του όλους αυτούς τους κυμαινόμενους παράγοντες στο δίκτυο για να προσαρμόσει τη βιντεοροή με τέτοιο τρόπο, ώστε τελικά να φτάσει στον παραλήπτη με την καλύτερη δυνατή ποιότητα.

1.1 Πού οφείλεται η φτωχή ποιότητα των εφαρμογών βιντεοροών

Με την ανάπτυξη των πολυμεσικών εφαρμογών, όπως εργαλεία εξ' αποστάσεως εκπαίδευσης, βιντεοτηλεδιάσκεψης και παροχής πολυμέσων κατόπιν ζήτησης (media-on-demand), το δίκτυο που υπάρχει αυτή τη στιγμή παρέχει όχι μόνο φτωχή ποιότητα για αυτές τις εφαρμογές, αλλά επηρεάζει, επίσης, και την απόδοση άλλων εφαρμογών. Αυτό οφείλεται στο ότι οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου, γενικά, είναι λιγότερο ανεκτικές σε καθυστερήσεις και απώλεια πακέτων και απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης για να στείλουν μια ακολουθία από εικόνες υψηλής ποιότητας. Επιπλέον, τα πολυμέσα πραγματικού χρόνου μεταδίδονται κατά κάποιο ομοιόμορφο ρυθμό προς όλους τους δέκτες στο δίκτυο. Ως εκ τούτου, η πηγή πρέπει να αποστέλλει το περιεχόμενο με το ρυθμό της μικρότερης σύνδεσης για αποφυγή συμφόρησης, με συνέπεια να υποχρησιμοποιούνται οι μεγάλης χωρητικότητας συνδέσεις. Σε διαφορετική περίπτωση, θα υπερφορτωθούν τα μέρη του δικτύου που έχουν χαμηλό εύρος ζώνης [6]. Ένας τελευταίος λόγος είναι το ότι η ποιότητα των πολυμέσων είναι ευαίσθητη σε απώλειες πακέτων. Η επαναμετάδοση των χαμένων πακέτων δεν είναι μια καλή λύση, δεδομένου ότι, μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλης κλίμακας συμφόρηση. Επίσης, τα επαναμεταδιδόμενα πακέτα μπορεί να φθάσουν στην πηγή καθυστερημένα, όταν πια δεν χρειάζονται.

Τα πιο πάνω προβλήματα μελετούνται ιδιαίτερα και λαμβάνονται υπόψη για την ανάπτυξη μη δαπανηρών εργαλείων βιντεοτηλεδιάσκεψης, τα οποία χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την εξ' αποστάσεως εκπαίδευση και την υγειονομική περίθαλψη. Σε αυτές τις εφαρμογές, οι χρήστες που βρίσκονται σε γεωγραφικά απόμακρες θέσεις έχουν συνδέσεις με διαφορετικό εύρος ζώνης. Επομένως, για να είναι επιτυχείς αυτές οι εφαρμογές θα πρέπει πρώτα απ' όλα να είναι σε θέση να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των διαφορετικών χρηστών, ένας στόχος που είναι μάλλον δύσκολος με την εξάπλωση της μετάδοσης ευρείας ζώνης από τη μια πλευρά και την ευρεία χρήση των κινητών τηλεφώνων και των προσωπικών ψηφιακών βοηθών (PDAs) από την άλλη. Επιπλέον, οι εφαρμογές αυτές πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν βίντεο αξιόπιστης και καλής ποιότητας, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι χρήστες τείνουν να συγκρίνουν την ποιότητα του βίντεο με αυτή της τηλεόρασης και τέλος να είναι εύκολα διαθέσιμες και προσιτές από πλευράς κόστους.

Δεδομένου ότι αυτοί οι περιορισμοί που τίθενται για τις εφαρμογές αυτές είναι δύσκολο να ικανοποιηθούν και να γίνουν αποδεκτοί από εργαλεία βιντεοτηλεδιάσκεψης μέσω του Διαδικτύου, είναι σχετικά περιορισμένη η χρήση τους. Αυτό οφείλεται πρώτα στη φτωχή τεχνολογία και, έπειτα, στην αδυναμία των χρηστών να χρησιμοποιήσουν τα εργαλεία στη μέγιστη δυνατότητά τους. Ενώ το δεύτερο πρόβλημα μπορεί να βελτιωθεί με την εκπαίδευση και την κατάρτιση των χρηστών, το πρώτο πρέπει να επιλυθεί σε ένα πιο θεμελιώδες επίπεδο.

Προκειμένου να επιλυθούν τα προβλήματα που συνδέονται με την αξιόπιστη πολλαπλή μετάδοση του βίντεο μέσα σε ένα ετερογενές περιβάλλον, υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις. Αυτές μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες που περιγράφονται πιο κάτω.

Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται στη χρήση ενός δικτύου ικανού να κάνει προκράτηση πόρων ώστε να παρέχονται εγγυήσεις για την απόδοση. Παραδείγματα αυτής της

προσέγγισης είναι το πρωτόκολλο προκράτησης πόρων (resource reservation protocol - RSVP) και ATM. Αυτά, όμως, δεν έχουν ακόμα επεκταθεί σε μεγάλη κλίμακα επειδή, εκτός του ότι είναι δύσκολο να υπολογιστεί ακριβώς το απαιτούμενο εύρος ζώνης για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι και ψηλό το κόστος της διατήρησης του εύρους ζώνης και ως εκ τούτου μόνο ένα μέρος του βίντεο μπορεί να σταλεί με αυτό τον τρόπο, ενώ το υπόλοιπο πρέπει να σταλεί βασιζόμενο στην καλύτερη προσπάθεια (best effort).

Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται στη χρήση μεθόδων διόρθωσης που υποστηρίζουν παρεμβολή στοιχείων ή αφαίρεση περιττών στοιχείων κατά τη μετάδοση του βίντεο και η τρίτη κατηγορία αναφέρεται στη χρήση προσαρμοστικών τεχνικών ελέγχου που να μπορούν να ρυθμίσουν δυναμικά τα χαρακτηριστικά των πολυμέσων έτσι ώστε να ικανοποιούν τις τρέχουσες ανάγκες του δικτύου.

Μια καλή λύση είναι να χωριστεί το βίντεο σε στρώματα βάσης (base layers) και στρώματα βελτίωσης (enhancement layers). Τα σημαντικότερα δεδομένα στέλνονται στο στρώμα βάσης που μπορεί να γίνει αποδεκτό από όλους τους δέκτες, και τα υπόλοιπα στα στρώματα βελτίωσης. Η προσέγγιση της στρωματοποίησης σε συνδυασμό με την απόρριψη πακέτων βάσει προτεραιότητας πρέπει να είναι σε θέση να ικανοποιήσουν τους χρήστες που έχουν περιορισμούς και, επίσης, να παρέχουν όσο το δυνατό καλύτερη ποιότητα στους υπόλοιπους. Αυτή η τεχνική για να είναι πραγματικά επιτυχής και να είναι αποδεκτή από τους τελικούς χρήστες, είναι σημαντικό ο διαχωρισμός και η μετάδοση του βίντεο να μην βασίζονται μόνο στις απαιτήσεις του δικτύου, αλλά να λαμβάνουν υπόψη και τη φυσική απόδοση του οπτικού συστήματος του ανθρώπου.

1.2 Διάφορες προσεγγίσεις προσαρμογής του *bitrate*

Η μετάδοση συμπιεσμένων ψηφιακών πολυμέσων πραγματικού χρόνου μέσω των δικτύων IP πολλαπλής μετάδοσης έχει αποτελέσει το αντικείμενο σοβαρής έρευνας τα τελευταία χρόνια. Μέσα από αυτή την έρευνα κάποιος μπορεί να συνοψίσει τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις [5] όσο αφορά την προσαρμογή του *bitrate* για τη πολλαπλή μετάδοση των πολυμέσων.

Η πρώτη προσέγγιση αφορά την προσαρμογή μιας μόνο βιντεοροής (*single stream*) στην οποία μια κωδικοποιημένη τηλεοπτική ροή μεταδίδεται από τον εξυπηρετητή προς τον παραλήπτη με ανατροφοδότηση από αυτόν. Ο εξυπηρετητής χρησιμοποιεί τις πληροφορίες ανατροφοδότησης για να προσαρμόσει το ρυθμό μετάδοσης. Ένα από τα πιθανά προβλήματα αυτής της προσέγγισης είναι ότι μπορεί να καταρρεύσει το σύστημα της ανατροφοδότησης όταν πολλοί παραλήπτες προσπαθούν να στείλουν την ανατροφοδότησή τους στον εξυπηρετητή. Αυτή η προσέγγιση, ενώ είναι απλή, είναι ανίκανη να προσαρμοστεί κατάλληλα στις διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης, ένα ζήτημα το οποίο είναι γνωστό ως το πρόβλημα της ετερογένειας των παραληπτών.

Η δεύτερη προσέγγιση προσαρμογής του *bitrate* είναι αυτή των διπλότυπων πολυμεσικών ροών (*replicated media streams*) που αποτελεί μια προέκταση της πρώτης προσέγγισης η οποία, επιπλέον, είναι σε θέση να επιλύσει το πρόβλημα της ετερογένειας. Σε αυτήν την προσέγγιση η πηγή, αφού κωδικοποιήσει το βίντεο με διαφορετικές παραμέτρους συμπίεσης, στέλνει πολλαπλές ροές οι οποίες μεταφέρουν το ίδιο βίντεο σε διαφορετική ποιότητα και *bitrate*. Η κάθε ροή μεταδίδεται σε διαφορετικές ομάδες πολυμετάδοσης, και οι παραλήπτες είναι σε θέση να προσχωρήσουν στις ομάδες αυτές ή να αλλάξουν ομάδα σύμφωνα με τις εκάστοτε ικανότητές τους. Αν και αυτή η προσέγγιση μπορεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της ετερογένειας, έχει το μειονέκτημα ότι απαιτεί από το δίκτυο να μεταφέρει περιττές πληροφορίες, αυτές των διπλότυπων πολυμεσικών ροών.

Τέλος, η προσέγγιση των πολυμεσικών ροών σε στρώματα (*layered media streams*) στηρίζεται στη δυνατότητα των μεθόδων συμπίεσης του βίντεο να διαιρούν τη δυφοροή εξόδου τους σε στρώματα, ένα στρώμα βάσης και ένα ή περισσότερα στρώματα βελτίωσης. Το στρώμα βάσης μπορεί να αποκωδικοποιηθεί ανεξάρτητα παρέχοντας το βασικό επίπεδο της ποιότητας του βίντεο. Τα στρώματα βελτίωσης μπορούν να αποκωδικοποιηθούν μόνο μαζί με το στρώμα βάσης παρέχοντας περαιτέρω βελτιώσεις στην ποιότητα. Αυτή η προσέγγιση είναι, επίσης, γνωστή και ως προσέγγιση διαδοχικής βελτίωσης. Χρησιμοποιώντας αυτή την προσέγγιση, μια τηλεοπτική πηγή πολυμετάδοσης θα μπορούσε να στείλει το κάθε στρώμα σε μια διαφορετική ομάδα πολυμετάδοσης. Οι δέκτες έπειτα θα προσχωρούσαν τουλάχιστον στην ομάδα του στρώματος βάσης και σε τόσες ομάδες στρωμάτων βελτίωσης όσες τους επιτρέπουν οι δυνατότητές τους.

2 Ψηφιακά βίντεο

Δεδομένου ότι το Διαδίκτυο έχει περιορισμένες δυνατότητες μετάδοσης και το ακατέργαστο μέγεθος των ψηφιακών βίντεο είναι πολύ μεγάλο, τα βίντεο πρέπει να συμπιεστούν πριν από τη μετάδοση. Αυτό επιτυγχάνεται με την κωδικοποίηση του βίντεο (video coding). Η κωδικοποίηση του βίντεο βασίζεται στην εκμετάλλευση του «έμφυτου» πλεονασμού των βίντεο, προκειμένου να μειωθεί το μέγεθός τους. Οι πλεονασμοί στο σήμα του βίντεο μπορούν να είναι είτε χωρικοί (spatial) δηλαδή μέσα στο ίδιο το τηλεοπτικό πλαίσιο είτε χρονικοί (temporal) δηλαδή μέσα σε παρακείμενα πλαίσια. Για παράδειγμα, η πλήρης κίνηση 300 πλαισίων της ακολουθίας Foreman που χρησιμοποιείται συνήθως, κωδικοποιημένη σε MPEG-4 με υψηλή ποιότητα και ανάλυση CIF (352x288 εικονοστοιχεία), έχει μέσο bitrate τα 1,23 Mbps, έναντι 36,5 Mbps που έχει το ασυμπίεστο βίντεο [3].

2.1 Κωδικοποιητές βίντεο και ήχου

Η ύπαρξη πλήθους διαφορετικών κωδικοποιητών / αποκωδικοποιητών (codecs), συχνά προβληματίζει τον χρήστη που αναρωτιέται σε τι εξυπηρετούν. Κι όμως, οι κωδικοποιητές έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν διαφορετικές ανάγκες και ο καθένας τους παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Ως προς τη συμπίεση βίντεο, δύο είναι οι κυριότερες τεχνικές που εφαρμόζονται σήμερα: οι interframe και intraframe. Η πρώτη εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι οι περισσότερες πληροφορίες παραμένουν σταθερές από το ένα καρέ στο άλλο. Για παράδειγμα, σε ένα βίντεο που απεικονίζει κάποιον ομιλητή, το σύνολο σχεδόν του φόντου παραμένει σταθερό παρά τις εκφράσεις του προσώπου του εκφωνητή. Η δεύτερη αναλαμβάνει τη συμπίεση κάθε καρέ ξεχωριστά, με τρόπο παρόμοιο προς τη συμπίεση JPEG για εικόνες. Ο συνδυασμός των δύο τεχνικών, μπορεί να επιτρέψει τη συμπίεση του αρχικού υλικού έως και 200:1. Μια βασική κατηγοριοποίηση των κωδικοποιητών είναι σε συμμετρικούς και ασύμμετρους (symmetric / asymmetric), ανάλογα με το αν η συμπίεση διαρκεί περισσότερο από την αποσυμπίεση. Οι ασύμμετροι κωδικοποιητές απαιτούν ισχυρούς υπολογιστές για τη συμπίεση και χρησιμοποιούνται για υλικό που θα συμπιεστεί μια φορά και θα αναπαραχθεί πολλές. Οι συμμετρικοί κωδικοποιητές απ' την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως ζωντανές μεταδόσεις, όπου η συμπίεση πρέπει να γίνεται σε πραγματικό χρόνο. Επομένως κανένας κωδικοποιητής δεν μπορεί να καλύψει όλες τις ανάγκες, αλλά αντίθετα απαιτείται ο κατάλληλος συνδυασμός τους ώστε να πετύχουμε τα καλύτερα αποτελέσματα για την πλειοψηφία των περιπτώσεων.

2.2 Κωδικοποιητές βίντεο

Τα πιο πολυχρησιμοποιημένα πρότυπα κωδικοποιητών / αποκωδικοποιητών μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο υποσύνολα:

- Το πρώτο υποσύνολο αποτελείται από τα πρότυπα από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU), κυρίως τα H.261 και H.263, που τυποποιήθηκαν το

1990 και το 1995, αντίστοιχα. Αυτοί οι κωδικοποιητές είναι ειδικευμένοι στις εφαρμογές βιντεοτηλεδιάσκεψης. Το H.261 παράγει bitrates μεταξύ 64 kbps και σχεδόν 2 Mbps. Το H.263 είναι μια επέκταση του H.261 για βίντεο με χαμηλό bitrate. Μπορεί να παράγει μικρές σε διάσταση εικόνες βίντεο από 10 έως 64 kbps, επομένως είναι κατάλληλος για τη μετάδοση μέσω διαποδιαμορφωτών (modems).

- Το άλλο υποσύνολο αποτελείται από τα πρότυπα από την Ομάδα Εμπειρογνομώνων Κινούμενων Εικόνων (MPEG – Motion Picture Expert Group). Οι κωδικοποιητές MPEG είναι ειδικευμένοι στις εφαρμογές αποθήκευσης και ανοικτής μετάδοσης (broadcast). Το MPEG–1 τυποποιήθηκε αρχικά το 1992, ακολουθούμενο από το MPEG–2 το 1995 και το MPEG–4 το 1999. Το MPEG–1 εστιάζει την προσοχή του στην ψηφιακή αποθήκευση των βίντεο με ποιότητα εικόνας VCR, σε αποθηκευτικά μέσα με bitrates από 1 μέχρι 1.5 Mbps. Είναι κατάλληλο για αποθήκευση σε CD–ROM, το οποίο έχει ρυθμό εξόδου πληροφοριών τουλάχιστον τα 1.2 Mbps. Το MPEG–2 σχεδιάστηκε ώστε να ταιριάζει σε μια ευρύτερη ποικιλία εφαρμογών, και ειδικότερα στις εφαρμογές Τηλεόρασης Υψηλής Ευκρίνειας (HDTV – High Definition Television), σε ψηλά bitrates από 4 έως 9 Mbps. Τέλος, το πρόσφατο πρότυπο MPEG–4 εισάγει την έννοια της κωδικοποίησης αντικειμένων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια ευρύτερη γκάμα από bitrates στόχου, από 5 kbps μέχρι 10 Mbps. Είναι κατάλληλο για τις απαιτήσεις σχεδόν όλων των εφαρμογών, όπως η ανοικτή μετάδοση (broadcast), η αποθήκευση και η ανάκτηση βίντεο που βασίζεται σε αντικείμενα, τα πολυμέσα σε κινητά και οι βιντεοροές μέσω του Διαδικτύου.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σε συντομία οι κυριότεροι κωδικοποιητές / αποκωδικοποιητές βίντεο που χρησιμοποιούνται σήμερα [10].

2.2.1 H.263

Ο κωδικοποιητής αυτός αναπτύχθηκε από το ITU το 1994 και αποτελεί την εξέλιξη του H.261. Προορίζεται για βιντεοτηλέφωνα και διεξαγωγή βιντεοτηλεδιασκέψεων μέσω ISDN αλλά και διαποδιαμορφωτών (modem), στις περιπτώσεις όπου η εικόνα δεν περιλαμβάνει πολλή κίνηση. Κυριότερη βελτίωση έναντι του προκατόχου του είναι η υποστήριξη για ακόμα χαμηλότερα bitrate, ενώ περιλαμβάνεται και ένας μηχανισμός που επιτρέπει την καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης. Ο μηχανισμός λειτουργεί ισορροπώντας μεταξύ της ποιότητας της εικόνας και της κίνησης, με αποτέλεσμα οι εικόνες που περιλαμβάνουν έντονη κίνηση να είναι χαμηλότερης ποιότητας από τις στατικές.

2.2.2 JPEG και MJPEG

Τα αρχικά JPEG προκύπτουν από τις λέξεις Joint Photographic Experts Group. Πρόκειται για έναν φορέα που ανέλαβε την ανάπτυξη ενός αλγόριθμου συμπίεσης για φωτογραφίες των 24-δυφίων (true-color). Η συμπίεση οδηγεί σε απώλεια ποιότητας (lossy) και μπορεί να συμπίεσει από 2 έως και 30 φορές το αρχικό υλικό, ανάλογα με τις ρυθμίσεις. Το MJPEG (Motion JPEG), είναι απλά μια ακολουθία JPEG εικόνων που αποτελούν το βίντεο.

2.2.3 MPEG

Ο διεθνής οργανισμός προτύπων (ISO), έχει υιοθετήσει μια σειρά από πρότυπα για κωδικοποιητές βίντεο που αναπτύχθηκαν από το Moving Pictures Experts Group (MPEG). Η σειρά περιλαμβάνει τους MPEG-1, MPEG-2 και MPEG-4, με το τελευταίο να αποτελεί και το σημαντικότερο. Το πρότυπο MPEG-4 σχεδιάστηκε για τη διανομή αλληλεπιδραστικού πολυμεσικού υλικού μέσω δικτύων. Επομένως δεν πρόκειται για έναν απλό κωδικοποιητή, αλλά περιλαμβάνει προδιαγραφές για ήχο, βίντεο και δυνατότητες αλληλεπίδρασης. Λειτουργεί αφαιρώντας πλεονάζουσες πληροφορίες μεταξύ των πλαισίων, αλλά και συμπιέζοντας ταυτόχρονα τα ίδια τα πλαίσια με μία τεχνική παρόμοια του JPEG. Υποστηρίζει δύο τρόπους κωδικοποίησης, με μεταβλητό ή σταθερό ρυθμό μετάδοσης (VBR / CBR), προσφέροντας υψηλής ποιότητας αναπαραγωγή και μικρό μέγεθος αρχείων.

2.2.4 Cinepak

Ο κωδικοποιητής αυτός αναπτύχθηκε το 1990 με σκοπό την αναπαραγωγή ταινιών σε υπολογιστές 386 από CD-ROM μονής ταχύτητας. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά του λοιπόν, είναι ότι απαιτεί ελάχιστη υπολογιστική ισχύ. Καθώς, όμως, η διαθέσιμη επεξεργαστική ισχύς αυξήθηκε, οι δημιουργοί του Cinepak βελτίωσαν τους αλγόριθμους που χρησιμοποιεί ώστε να υποστηρίζει υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Αν και όταν πρωτοπαρουσιάστηκε προσέφερε καταπληκτική ποιότητα, δεν μπορεί πλέον να ανταγωνιστεί τους νεότερους κωδικοποιητές.

2.2.5 Sorenson

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του κωδικοποιητή Sorenson, είναι η υποστήριξη κωδικοποίησης μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης (VBR). Η τεχνική αυτή λειτουργεί αναλύοντας πρώτα ολόκληρη την ταινία, με σκοπό να εντοπίσει τα δύσκολα σημεία. Σε δεύτερο στάδιο αναλαμβάνει την κωδικοποίησή της, χρησιμοποιώντας περισσότερα δεδομένα για την κωδικοποίηση των σημείων που εντοπίστηκαν. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται κωδικοποίηση δύο σαρώσεων (two-pass encoding) και προκαλεί καθυστέρηση στην κωδικοποίηση που μπορεί να διαρκέσει έως και τριπλάσιο χρόνο. Ο κωδικοποιητής μπορεί να απορρίψει πλαίσια ή να μειώσει την ποιότητα αναπαραγωγής, όταν η ισχύς της ΚΜΕ δεν επαρκεί. Αποτελεί τον κύριο κωδικοποιητή βίντεο για το QuickTime από την έκδοση 3 και μετά, ενώ η ποιότητα που προσφέρει είναι πολύ υψηλότερη από του Cinepak σε χαμηλότερους μάλιστα ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων.

2.2.6 RealVideo 8

Η αρχιτεκτονική RealSystem βασίζεται στον Real Video 8 με τεχνολογία στρωματοποιημένου βίντεο. Όπως υποδηλώνει και το όνομά του, ο κωδικοποιητής αυτός έχει την ικανότητα να ρυθμίζει την ποιότητα αναπαραγωγής, ανάλογα με την ταχύτητα σύνδεσης. Πιο συγκεκριμένα, όταν ανιχνεύει ότι υπάρχει πρόβλημα με το διαθέσιμο εύρος

ζώνης, αντί να απορρίπτει ολόκληρα πλαίσια σταματά να αποστέλλει τις λιγότερο χρήσιμες πληροφορίες. Μέσω της τεχνικής αυτής, επιτυγχάνει σημαντικά μικρότερη αλλοίωση της απεικόνισης. Φυσικά υποστηρίζει κωδικοποίηση VBR, ενώ μειονέκτημα αποτελεί ότι σε υψηλά εύρη ζώνης απαιτείται ισχυρός υπολογιστής.

2.2.7 Windows Media Video

Ο κωδικοποιητής αυτός αποτελεί το βασικό συστατικό της αρχιτεκτονικής της Microsoft και προέρχεται από το γνωστό MPEG-4. Με την ενσωμάτωση νέων τεχνικών, η εταιρία κατάφερε να αυξήσει τις ήδη πολύ καλές επιδόσεις του αλγορίθμου, δημιουργώντας έναν από τους καλύτερους – αν όχι τον καλύτερο – κωδικοποιητή βίντεο σήμερα.

Ο πιο κάτω πίνακας [3] συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των τηλεοπτικών προτύπων των διαφόρων κωδικοποιητών-αποκωδικοποιητών που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

Πρότυπο	Target bitrate	Target applications	Χρόνος τυποποίησης
H.261	$p * 64$ kbps, όπου $1 \leq p \leq 30$	Βιντεοτηλεδιάσκεψη	1990
MPEG-1	[1 – 1.5] Mbps	Αποθήκευση	1992
MPEG-2	[4 – 9] Mbps	Ευρεία εφαρμογή	1995
H.263	[10 – 64] kbps	Βιντεοτηλεδιάσκεψη	1995
MPEG-4	[5 kbps – 10 Mbps]	Ευρεία εφαρμογή	1999

Χαρακτηριστικά των τηλεοπτικών προτύπων

Όσο αφορά τα πρότυπα MPEG, στα κωδικοποιημένα βίντεο με βάση τα πρότυπα αυτά, οι εικόνες ομαδοποιούνται σε ομάδες (GoP – Group of Pictures). Σε ένα δεδομένο GoP, τα πλαίσια μπορούν να είναι 3 τύπων:

- **Πλαίσια-I** (I-frames – Intra-coded frames): κωδικοποιούνται ανεξάρτητα, χωρίς οποιαδήποτε χρονική πρόβλεψη ή εξάρτηση από άλλα πλαίσια.
- **Πλαίσια-P** (P-frames – Predicted frames): προβλέπονται από το προηγούμενο πλαίσιο-I του τρέχοντος GoP.
- **Πλαίσια-B** (B-frames – Bi-directional predicted frames): προβλέπονται και από το προηγούμενο και από το επόμενο πλαίσιο-I ή πλαίσιο-P του τρέχοντος GoP.

Στο ψηφιακό βίντεο κάθε εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύεται από μια τιμή φωτεινότητας (luminance) και δύο τιμές χρωματικής πληροφορίας (chrominance). Στη συμβατική κωδικοποίηση MPEG, τα εικονοστοιχεία ομαδοποιούνται σε τετράγωνα (blocks) των 8x8 εικονοστοιχείων. Οι 64 τιμές φωτεινότητας στο κάθε τετράγωνο μετασχηματίζονται χρησιμοποιώντας το Διακριτό Μετασχηματισμό Συνημιτόνου (DCT – Discrete Cosine Transform) παράγοντας, έτσι, ένα τετράγωνο από 8x8 συντελεστές DCT. Οι συντελεστές DCT σαρώνονται με τη μέθοδο zig-zag και έπειτα συμπιέζονται σε κωδικοποίηση επιπέδου εκτέλεσης (run-level coding). Τα σύμβολα του επιπέδου εκτέλεσης, έπειτα, κωδικοποιούνται με μεταβλητό μήκος (VLC – variable-length coding). Οι τιμές χρωματικής πληροφορίας υποβάλλονται σε παρόμοια επεξεργασία.

Τα βίντεο μπορούν να κωδικοποιηθούν είτε σε μεταβλητό bitrate (VBR – Variable BitRate) είτε σε σταθερό bitrate (CBR – Constant BitRate). Στην κωδικοποίηση VBR, οι

κβαντοποιητές (quantizers) που χρησιμοποιούνται για κάθε τύπο εικόνας (I, P, B) είναι σταθεροί σε όλο το βίντεο. Ο στόχος της κωδικοποίησης VBR είναι να επιτευχθεί μια, κατά προσέγγιση, σταθερή ποιότητα για όλες τις εικόνες του βίντεο. Το bitrate μιας συμπιεσμένης δυαδιοροής (bitstream) ποικίλλει συναρτήσσει της οπτικής πολυπλοκότητας των αρχικών εικόνων. Αντίθετα, τα βίντεο που είναι κωδικοποιημένα με CBR πρέπει να «σέβονται» το μέσο bitrate του στόχου. Αυτό επιτυγχάνεται με έναν αλγόριθμο ελέγχου του ρυθμού που καθορίζει το κατάλληλο βήμα κβαντοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί για κάθε εικόνα. Ο περιορισμός του bitrate εξόδου συνοδεύεται από μερικές υποβαθμίσεις στην ποιότητα εν συγκρίσει με την κωδικοποίηση VBR.

Τέλος, να σημειώσουμε ότι τα βίντεο έχουν πολύ αυστηρούς περιορισμούς πραγματικού χρόνου κατά τη διάρκεια της αναπαραγωγής: κάθε εικόνα πρέπει να αποκωδικοποιηθεί και να παρουσιαστεί στο χρήστη σε σταθερά χρονικά διαστήματα. Αυτό το διάστημα αντιστοιχεί στο ρυθμό πλαισίων (frame rate) του βίντεο. Ο χρόνος στον οποίο ένα τηλεοπτικό πακέτο πρέπει να αποκωδικοποιηθεί καλείται ως *η προθεσμία αποκωδικοποίησής του* (decoding deadline).

2.2.8 MPEG-4

Οι επίσημες προδιαγραφές του MPEG-4 είναι το ISO/IEC 14496. Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο τμήμα (ενότητα 2.2), το MPEG-4 είναι ένας πρόσφατος κωδικοποιητής που έχει σχεδιαστεί για μια ευρεία σειρά εφαρμογών, όπως οι βιντεοροές. Ένας από τους κύριους στόχους του προτύπου είναι ο ευέλικτος χειρισμός των οπτικοακουστικών αντικειμένων. Το MPEG-4 εισάγει την έννοια μιας οπτικοακουστικής σκηνής, η οποία αποτελείται από ένα ή πολλά οπτικοακουστικά αντικείμενα. Αυτά τα οπτικοακουστικά αντικείμενα μπορεί να είναι ακίνητες εικόνες, τηλεοπτικά ή ακουστικά αντικείμενα.

Όσο αφορά την αρχιτεκτονική ενός τερματικού MPEG-4, στο στρώμα συμπίεσης, η σύνθεση των πολυμεσικών αντικειμένων στη σκηνή καθορίζεται από μια συγκεκριμένη γλώσσα που περιγράφει τη σκηνή: το BIFS (Binary Format for Scene description – δυαδική μορφή για την περιγραφή της σκηνής). Κάθε αντικείμενο περιγράφεται από έναν *περιγραφέα αντικειμένου* (OD – Object Descriptor), ο οποίος περιέχει χρήσιμες πληροφορίες για το αντικείμενο, όπως οι πληροφορίες που απαιτούνται για την αποκωδικοποίησή του, οι απαιτήσεις σε QoS που έχει το αντικείμενο, ή οι λεκτικές περιγραφές για το περιεχόμενο (λέξεις κλειδιά). Ένα αντικείμενο αποτελείται από μια ή περισσότερες *στοιχειώδεις ροές* (ES – Elementary Streams). Οι περιγραφείς των αντικειμένων (OD) και οι πληροφορίες περιγραφής της σκηνής μεταφέρονται από αυτές τις στοιχειώδεις ροές.

Η *μονάδα πρόσβασης* (AU – Access Unit) ορίζεται ως το μικρότερο στοιχείο που μπορεί να αποδοθεί στη μονάδα χρόνου. Μια χαρακτηριστική μονάδα πρόσβασης είναι το τηλεοπτικό πλαίσιο ολόκληρο. Το SyncLayer βάζει σε πακέτα τις μονάδες πρόσβασης με επιπρόσθετες πληροφορίες, όπως ο συγχρονισμός. Ο συγχρονισμός των μονάδων πρόσβασης γίνεται με βάση το χρόνο που απαιτείται για την αποκωδικοποίηση και τη σύνθεσή τους.

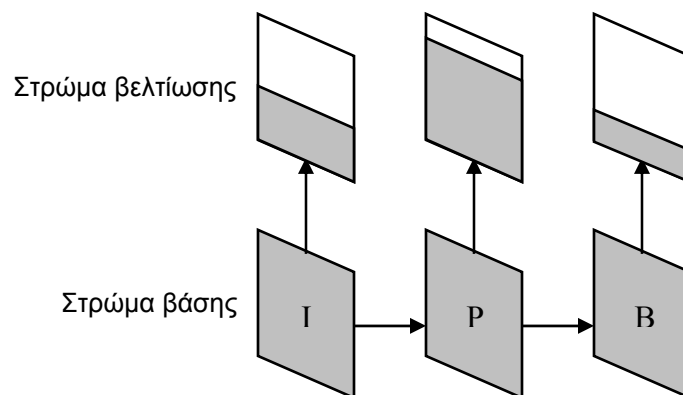
Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για να κωδικοποιήσουν τηλεοπτικά αντικείμενα καθορίζονται στο ISO/IEC 14496-2. Ένα *τηλεοπτικό αντικείμενο* (VO – Video Object)

μπορεί να είναι ένα ορθογώνιο πλαίσιο ή ένα αυθαίρετα διαμορφωμένο σχήμα, που αντιστοιχεί σε ένα ευδιάκριτο αντικείμενο ή στο υπόβαθρο της σκηνής. Κάθε φορά που κωδικοποιείται ένα τηλεοπτικό αντικείμενο, το δείγμα του καλείται ως *Video Object Plane* (VOP). Το πρότυπο MPEG-4 δεν διευκρινίζει πώς να κομματιαστούν τα τηλεοπτικά αντικείμενα από μια σκηνή. Επομένως, τα περισσότερα κωδικοποιημένα βίντεο με το MPEG-4 απλώς περιλαμβάνουν μόνο ένα τηλεοπτικό αντικείμενο, το οποίο είναι το ίδιο το ορθογώνιο διαμορφωμένο βίντεο. Σε αυτήν την περίπτωση, το VOP απλώς δείχνει ένα τηλεοπτικό πλαίσιο ή εικόνα.

Η αρχιτεκτονική των συστημάτων MPEG-4 έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι ανεξάρτητη από τη μεταφορά του. Το στρώμα παράδοσης (delivery layer) καθιστά δυνατή την πρόσβαση στο περιεχόμενο του MPEG-4 μέσα από ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών παράδοσης. Οι τεχνολογίες παράδοσης ομαδοποιούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες: διαλογικές τεχνολογίες δικτύων (Διαδίκτυο, ATM), τεχνολογίες ανοικτής (broadcast) μετάδοσης (μέσω καλωδίου, μέσω δορυφόρου) και τεχνολογίες οπτικών δίσκων (CD, DVD).

2.2.9 Fine Granularity Scalability

Το Fine Granularity Scalability (FGS) είναι ένας νέος τύπος στρωματοποιημένης κωδικοποίησης που εισάχθηκε στο πρότυπο του MPEG-4 ειδικά για τη μετάδοση του βίντεο μέσω του Διαδικτύου. Η ιδιαιτερότητα της κωδικοποίησης FGS σε σχέση με τις άλλες μεθόδους στρωματοποίησης είναι ότι η δυφιороή του στρώματος βελτίωσης μπορεί να περικοπεί οπουδήποτε κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, χωρίς να επηρεάζεται η αποκωδικοποίηση του υπόλοιπου μέρους του στρώματος. Η δυνατότητα περικοπής του στρώματος βελτίωσης FGS για κάθε πλαίσιο πριν από τη μετάδοση επιτρέπει στον εξυπηρετητή να προσαρμόσει το ρυθμό μετάδοσής του στο μεταβαλλόμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης της σύνδεσης. Από την πλευρά του παραλήπτη, ο αποκωδικοποιητής μπορεί να χρησιμοποιήσει όσο από το στρώμα βελτίωσης στάλθηκε για να βελτιώσει την ποιότητα της ροής του στρώματος βάσης. Το πιο κάτω σχήμα παρουσιάζει μια σχηματική αναπαράσταση για τον τρόπο λειτουργίας του FGS.



2.3 Κωδικοποιητές ήχου

Η ευρύτατη απήχηση του προτύπου MP3, μαρτυράει από μόνη της την σημαντικότητα των κωδικοποιητών και στον ήχο. Ίσως ο σημαντικότερος από αυτούς είναι το MPEG Layer 3 (περισσότερο γνωστό ως MP3) που είναι ένα εξαιρετικά δημοφιλές πρότυπο για τη διανομή μουσικής από το Διαδίκτυο. Παράγει ήχο πολύ υψηλής ποιότητας που απαιτεί εξίσου υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, της τάξης των 128kbits. Για το λόγο αυτό, τα αρχεία MP3 δεν προσφέρονται συνήθως σε μορφή streaming, αλλά αποθηκεύονται στον υπολογιστή του χρήστη για αναπαραγωγή σε δεύτερο στάδιο.

3 Βιντεοροές και Διαδίκτυο

Μια από τις βασικές τεχνολογίες που λαμβάνουν μέρος στη μετάδοση βιντεοροών μέσω του Διαδικτύου είναι και η τεχνολογία που αποτελεί αυτό το ίδιο το Διαδίκτυο. Το Διαδίκτυο αναπτύχθηκε για να συνδέσει ένα ετερογενές μίγμα δικτύων που υιοθετούν διαφορετικές τεχνολογίες μεταγωγής πακέτων. Ενώ κάθε δίκτυο έχει έναν πρωτογενή μηχανισμό επικοινωνίας, το Διαδίκτυο επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ των δικτύων με την παροχή ενός ομοιόμορφου μηχανισμού για δρομολόγηση και μετάφραση των πακέτων. Κάθε υπολογιστής στο Διαδίκτυο έχει μια μοναδική Διαδικτυακή διεύθυνση, η οποία επιτρέπει στους υπολογιστές από διαφορετικά δίκτυα να αναγνωρίσουν ο ένας τον άλλον. Το σύστημα δρομολόγησης του Διαδικτύου, από την άλλη, παρέχει το μηχανισμό για να επιτρέψει στα πακέτα να κινηθούν από μια Διαδικτυακή διεύθυνση σε μίαν άλλη, διαμέσου πολλών διαφορετικών υποδικτύων που είναι συνδεδεμένα σε φυσικές συνδέσεις με διαφορετικές δυνατότητες. Οι δρομολογητές του Διαδικτύου αποθηκεύουν τα εισερχόμενα πακέτα σε ουρές drop-tail και στη συνέχεια τα προωθούν προς μια έξοδο αφού παρθεί η απόφαση δρομολόγησης με βάση τη διεύθυνση προορισμού τους. Οι περισσότεροι δρομολογητές Διαδικτύου που υπάρχουν εφαρμόζουν την πολιτική FIFO, δηλ. απορρίπτουν όλα τα εισερχόμενα πακέτα όταν η ουρά εισερχομένων είναι πλήρης. Τέλος, το πρωτόκολλο Διαδικτύου (Internet Protocol – IP) χρησιμεύει ως μια «κοινή γλώσσα» που επιτρέπει τη συνεπή και ομοιόμορφη μετάφραση των πακέτων στα δίκτυα. Άλλωστε, με βάση αυτό προκύπτει και ο κοινός ορισμός του Διαδικτύου ότι είναι το σύνολο των δικτύων που συνδέονται μέσω IP. Το επόμενο μέρος αρχίζει με την επισκόπηση των παραγόντων που επηρεάζουν τις βιντεοροές μέσω του Διαδικτύου και παρουσιάζονται γενικά ζητήματα που αφορούν τις βιντεοροές αυτές. Έπειτα γίνεται προσπάθεια να ταξινομηθούν οι υπάρχουσες προσεγγίσεις για μετάδοση βιντεοροών μέσα από δίκτυα καλύτερης προσπάθειας.

3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τις βιντεοροές μέσω του Διαδικτύου

3.1.1 Το πρωτόκολλο Διαδικτύου (IP) καλύτερης προσπάθειας

Ένα σημαντικό ζήτημα στο σχεδιασμό του Διαδικτύου είναι το εάν είναι απαραίτητο για το IP να παρέχει εγγυήσεις στην παράδοση των πακέτων [3]. Ιστορικά, το πρωτόκολλο που προτάθηκε αρχικά για το Διαδίκτυο προοριζόταν στο να παρέχει και αξιόπιστες και αναξιόπιστες υπηρεσίες παράδοσης πακέτων. Εντούτοις, οι πρόωρες εφαρμογές του πρωτοκόλλου παρείχαν μόνο αξιόπιστες υπηρεσίες. Στην αρχή της δεκαετίας του '80 καθιερώθηκε η υπάρχουσα αναξιόπιστη υπηρεσία ή η υπηρεσία καλύτερης προσπάθειας (best-effort). Αυτό σημαίνει ότι δεν εξασφαλίζει οποιαδήποτε ποιότητα υπηρεσιών (QoS) στις εφαρμογές. Υπάρχουν δύο κίνητρα όσο αφορά το σχεδιασμό του Διαδικτύου με βάση την υπηρεσία καλύτερης προσπάθειας. Κατ' αρχή, το Διαδίκτυο έχει ως σκοπό να συνδέσει τα υπάρχοντα δίκτυα. Κατά συνέπεια, μια από τις σημαντικότερες κατευθυντήριες αρχές στο σχεδιασμό του είναι να μπορεί να περιλάβει μια ευρεία ποικιλία των υπαρχόντων δικτύων χωρίς να απαιτούνται αλλαγές στην εσωτερική λειτουργία τους. Για να επιτύχουν αυτόν τον στόχο, ελάχιστες απαιτήσεις πρέπει να εφαρμοσθούν στα μεμονωμένα δίκτυα. Δεύτερον, οι ερευνητικές προσπάθειες για μετάδοση των πακέτων κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '70 είχαν προτείνει ότι η απώλεια των πακέτων πρέπει μερικές φορές να αντιμετωπιστεί άμεσα από την εφαρμογή παρά από το δίκτυο [18].

Για τις εφαρμογές όπως η μεταφορά αρχείων και το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, η απώλεια πακέτων δεν είναι αποδεκτή. Έτσι, σε ένα δίκτυο που βασίζεται στην υπηρεσία καλύτερης προσπάθειας, η αξιοπιστία που θέλουμε να υπάρχει πρέπει να ελέγχεται στα άκρα της σύνδεσης (end-to-end). Για αυτόν τον λόγο, είναι αναγκαία τα πρωτόκολλα μεταφοράς τα οποία χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες του IP και παρέχουν αξιοπιστία μέσω της επαναμετάδοσης από άκρο σε άκρο. Το πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης (TCP), ειδικότερα, παρέχει μια δημοφιλή πλατφόρμα για την οικοδόμηση αξιόπιστων εφαρμογών που να λειτουργούν μέσα στο αναξιόπιστο Διαδίκτυο. Σήμερα, η περισσότερη κυκλοφορία στο Διαδίκτυο, όπως η επίσκεψη σε ιστοσελίδες και η μεταφορά ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, γίνονται χρησιμοποιώντας το TCP.

Το TCP παρέχει αξιόπιστη μεταφορά αφού αναμεταδίδει τα πακέτα που χάνονται στο δίκτυο. Η αναμετάδοση, όμως, έχει ως συνέπεια μια σχετική αύξηση στην καθυστέρηση και το delay jitter. Για τις εφαρμογές δεδομένων, η καθυστέρηση δεν λαμβάνεται υπόψη αφού έχει πολύ μεγαλύτερη σημασία η αξιοπιστία από την καθυστέρηση ή το delay jitter. Εντούτοις, για τη μεταφορά των συνεχών μέσων όπως οι ακουστικές ή οι τηλεοπτικές ροές, μια αύξηση είτε στην καθυστέρηση είτε στο delay jitter μπορεί να έχει ιδιαίτερα ψηλό κόστος στην εφαρμογή. Για αυτόν τον λόγο, το TCP δεν χρησιμοποιείται για τις εφαρμογές πολυμέσων. Αντί αυτού, προτιμάται συχνά το UDP καλύτερης-προσπάθειας. Το UDP είναι απλώς η διεπαφή (interface) του χρήστη στην υπηρεσία IP καλύτερης-προσπάθειας. Το UDP παρέχει, επίσης, έλεγχο αθροίσματος (checksum) των πακέτων για να ελέγξει την ακεραιότητα των στοιχείων, και μια τεχνική αρίθμησης για την αποσυμφόρηση της κυκλοφορίας που στέλνεται στον ίδιο προορισμό. Οι δύο σημαντικές λειτουργίες (α) του ελέγχου λάθους και της αντιμετώπισης της απώλειας πακέτων, και (β) του ελέγχου του ποσοστού μετάδοσης, επαφίενται στην εφαρμογή.

3.1.2 Ετερογένεια δικτύου

Η ετερογένεια του δικτύου προέρχεται από την ποικιλομορφία της τοπολογίας του Διαδικτύου και την ποικιλομορφία στο υλικό που χρησιμοποιείται σε όλο το δίκτυο, όπως οι φυσικές συνδέσεις. Οι σημερινές συνηθισμένες συνδέσεις πρόσβασης στο Διαδίκτυο έχουν διαφορετικές δυνατότητες εύρους ζώνης, γεγονός το οποίο συμβάλλει στην ετερογένεια του δικτύου. Η ποικιλομορφία στις τεχνολογίες πρόσβασης στο Διαδίκτυο είναι μόνο μερικώς υπεύθυνη για την ετερογένεια του δικτύου. Συγκεκριμένα, η ετερογένεια που παρουσιάζεται στο μέσο RTT (Round Trip Time) μιας σύνδεσης οφείλεται και στις φυσικές θέσεις του επικοινωνούντος πελάτη και εξυπηρετητή. Επίσης, λόγω της παρουσίας ουρών tail-drop μέσα στους δρομολογητές και του αλγορίθμου ελέγχου συμφόρησης του TCP, οι συνδέσεις με μεγάλο RTT τείνουν να έχουν ένα μικρότερο μερίδιο του εύρους ζώνης από ότι οι συνδέσεις με μικρό RTT. Τέλος, το μέσο ποσοστό απώλειας πακέτων μιας σύνδεσης είναι συνήθως μεταξύ 1% και 5%. Εντούτοις, τα ποσοστά απώλειας μεγαλύτερα από 30% είναι, επίσης, δυνατό να συμβούν.

Τα δίκτυα πρόσβασης στο Διαδίκτυο μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες [3]:

- **Residential access networks:** συνδέουν έναν πελάτη στο Διαδίκτυο από το σπίτι του. Οι σημερινές πιο πολυχρησιμοποιημένες τεχνολογίες πρόσβασης είναι οι διαποδιαμορφωτές (modem), το Ψηφιακό Δίκτυο Ενοποιημένων Υπηρεσιών (ISDN), η Ασύμμετρη Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή (ADSL), και

το Υβριδικό Ομοαξονικό Καλώδιο Οπτικών Ινών (HFC – Hybrid Fiber Coaxial cable). Οι ταχύτητες των διαποδιαμορφωτών δεν υπερβαίνουν τα 56 kbps, ενώ οι τηλεφωνικές γραμμές ISDN παρέχουν στο χρήστη ψηφιακή μεταφορά δεδομένων σε ρυθμούς μέχρι 274,1 kbps, έχοντας ως βασική υπηρεσία τα 128 kbps. Η ADSL είναι μια τεχνολογία που γίνεται όλο και περισσότερο δημοφιλής, η οποία χρησιμοποιεί ειδικούς διαποδιαμορφωτές (modems) πάνω από τις υπάρχουσες τηλεφωνικές γραμμές συνεστραμμένου ζεύγους καλωδίων. Οι διαθέσιμοι ρυθμοί πρόσβασης μπορούν να ποικίλουν συναρτήσει διάφορων παραμέτρων, όπως η απόσταση μεταξύ του διαποδιαμορφωτή στο σπίτι και του διαποδιαμορφωτή των κεντρικών γραφείων, ή ο βαθμός της ηλεκτρικής παρεμβολής στις γραμμές. Για μια υψηλής ποιότητας γραμμή, μπορεί να επιτευχθεί downstream ρυθμός μετάδοσης μέχρι τα 8 Mbps εάν η απόσταση μεταξύ των δύο διαποδιαμορφωτών είναι μικρότερη από 3 χλμ. Το HFC είναι μια παράλληλη τεχνολογία με το ADSL για την ευρυζωνική (broadband) πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για τις συνδέσεις μεταξύ των περιοχών, και τα ομοαξονικά καλώδια συνδέουν το κέντρο της περιοχής με τα σπίτια των χρηστών. Οι ρυθμοί μετάδοσης μπορούν να ανεβούν μέχρι και τα 10 Mbps αλλά, όπως και με το Ethernet, το HFC είναι ένα διαμοιραζόμενο μέσο ευρείας μετάδοσης, έτσι το εύρος ζώνης μοιράζεται μεταξύ των χρηστών που συνδέονται στην ίδια σύνδεση περιοχής.

- **Δίκτυα πρόσβασης επιχειρήσεων:** όλα τα τερματικά διασυνδέονται σε έναν δρομολογητή μέσω του τοπικού δικτύου (LAN). Ο δρομολογητής είναι η πύλη πρόσβασης στο Διαδίκτυο για την επιχείρηση. Η πλέον χρησιμοποιούμενη τεχνολογία είναι σήμερα το Ethernet με διαμοιραζόμενους ρυθμούς μετάδοσης από 10 Mbps μέχρι αρκετά Gbps.
- **Κινητά δίκτυα πρόσβασης (Mobile access networks):** τα κινητά τερματικά (π.χ., τα κυψελοειδή τηλέφωνα, οι κινητοί υπολογιστές (laptops), ή τα PDAs) έχουν πρόσβαση στο Διαδίκτυο με τη χρήση του ραδιοφάσματος για να συνδεθούν με ένα σταθμό βάσης (Base Station - BS). Υπάρχουν δύο τύποι κινητών δικτύων πρόσβασης. Το ασύρματο τοπικό δίκτυο (wireless LAN) είναι μια όλο και περισσότερο δημοφιλής τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιείται για το διαμοιρασμό της πρόσβασης στο Διαδίκτυο μέσα σε μια πολύ μικρή περιοχή (μερικές δεκάδες μέτρα), συνήθως εντός των επιχειρήσεων, των πανεπιστημίων, των ξενοδοχείων, των καφετεριών, κλπ. Το πρότυπο IEEE 802.11 καθορίζει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι τα 11 Mbps (802.11b) και μέχρι τα 54 Mbps (802.11a). Τα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης ευρείας περιοχής έχουν εύρος λήψης παρόμοιο με τη σημερινή κινητή τηλεφωνική υπηρεσία, δηλ. ο σταθμός βάσης μπορεί να είναι χιλιόμετρα μακριά από τους πελάτες. Τα πρότυπα μετάδοσης πακέτων όπως το GPRS (General Packet Radio Service) μπορούν να φθάσουν σε ρυθμούς μετάδοσης των 115 Kbps ενώ το επερχόμενο Καθολικό Κινητό Σύστημα Επικοινωνιών (UMTS – Universal Mobile Telecommunications System) υπόσχεται να παρέχει ρυθμούς πρόσβασης μέχρι τα 2 Mbps.

3.1.3 Διάφορες άλλες συνθήκες του δικτύου

Εκτός από την ετερογένεια, μια συγκεκριμένη σύνδεση με το Διαδίκτυο επηρεάζεται, επίσης, από διάφορους βραχυπρόθεσμους ή μακροπρόθεσμους παράγοντες κατά τη διάρκεια της ύπαρξής της, όπως τα κυμαινόμενα ποσοστά απώλειας και οι καθυστερήσεις των πακέτων, ή η διακύμανση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Αυτές οι παραλλαγές οφείλονται κυρίως στην ανταγωνιστική κυκλοφορία μέσα στους δρομολογητές των δικτύων και στις αλλαγές διαδρομών των πακέτων. Οι αλλαγές διαδρομών εξαρτώνται από το αν έχει υπάρξει αύξηση του φορτίου στους δρομολογητές, οπότε και θα λάβουν τις αποφάσεις νέων δρομολογήσεων.

Η ετερογένεια του δικτύου καθώς, επίσης, και η μεταβλητότητα στο διαθέσιμο εύρος ζώνης, η καθυστέρηση και τα ποσοστά απώλειας καθιστούν δύσκολη την προσομοίωση του best-effort Διαδικτύου όπως, επίσης, και δύσκολη την πρόβλεψή του. Αυτό εξηγεί τη δυσκολία στο σχεδιασμό Διαδικτυακών εφαρμογών που να είναι ευαίσθητες στην ποιότητα (QoS-sensitive), όπως οι αλληλεπιδραστικές βιντεοροές ή η τηλεφωνία μέσω του Διαδικτύου.

3.2 Γενικά ζητήματα εφαρμογών με βιντεοροές

3.2.1 Βιντεοροές βίντεο έναντι πλήρους κατεβάσματος (downloading) του βίντεο

Η μετάδοση αποθηκευμένου βίντεο καλείται ως βίντεο κατόπιν αίτησης (Video on Demand – VoD). Σε μια τέτοια εφαρμογή, ολόκληρο το βίντεο κωδικοποιείται offline και αποθηκεύεται ως αρχείο δεδομένων, που βρίσκεται σε ένα εξυπηρετητή (server) ή σε ένα ενδιάμεσο εξυπηρετητή (proxy). Το βίντεο παραδίδεται, έπειτα, στο χρήστη κατόπιν αίτησης. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι να δει κάποιος το αποθηκευμένο βίντεο στο Διαδίκτυο: με κατέβασμα του βίντεο (downloading) ή με βιντεοροή (streaming).

Το κατέβασμα ενός βίντεο είναι παρόμοιο με το κατέβασμα ενός αρχείου δεδομένων: ο χρήστης μπορεί να αρχίσει να βλέπει το βίντεο μόνο αφού έχει λάβει το πλήρες αρχείο. Με τη βιντεοροή, ο χρήστης μπορεί να αρχίσει να βλέπει το βίντεο αμέσως μόλις η μετάδοση του βιντεοαρχείου αρχίσει. Ο χρήστης βλέπει τα μέρη του βίντεο που έχουν παραληφθεί, ενώ ο εξυπηρετητής μεταδίδει τα μέρη του βίντεο που θα ακολουθήσουν.

Όταν ο χρήστης κατεβάζει ένα βίντεο, υπόκειται σε μια μεγάλη αρχική καθυστέρηση (start-up delay), η οποία αντιστοιχεί στο χρόνο μετάδοσης του βιντεοαρχείου. Αυτή η καθυστέρηση εξαρτάται από το μέγεθος του βιντεοαρχείου και από τα τρέχοντα χαρακτηριστικά της σύνδεσης με το Διαδίκτυο. Το μέγεθος του βιντεοαρχείου, στη συνέχεια, έχει σχέση με τα χαρακτηριστικά του βίντεο (διάρκεια, πολυπλοκότητα εικόνας), καθώς, επίσης, και με το συγκεκριμένο κωδικοποιητή του βίντεο που χρησιμοποιήθηκε και την ποιότητα (ανάλυση) της εικόνας. Αυτή η αρχική καθυστέρηση είναι σαφώς περιοριστική έναντι της σημερινής υπηρεσίας που προσφέρει η τηλεόραση. Επίσης, αυτό καθιστά την εναλλαγή μεταξύ των διαφορετικών τηλεοπτικών προγραμμάτων κουραστική: κάθε φορά που ο χρήστης θέλει να παρακολουθήσει ένα νέο πρόγραμμα, πρέπει να περιμένει όσο η καθυστέρηση μετάδοσης ολόκληρου του προγράμματος.

Ο κύριος στόχος των βιντεοροών είναι να μειωθεί αυτή η αρχική καθυστέρηση, επιτρέποντας στο χρήστη να αρχίσει να βλέπει το βίντεο πριν από την πλήρη λήψη του βιντεοαρχείου. Εντούτοις, επειδή, το τρέχον Διαδίκτυο δεν παρέχει οποιαδήποτε ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS) στις εφαρμογές (βλέπε ενότητα 3.3.1), δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι ο χρήστης θα είναι σε θέση να δει το πλήρες βίντεο χωρίς διακοπή. Επομένως, οι εφαρμογές βιντεοροών απαιτούν συγκεκριμένες προσαρμοστικές τεχνικές του δικτύου προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η τηλεοπτική ποιότητα.

3.2.2 Ροές αποθηκευμένου βίντεο έναντι ρών ζωντανού (live) βίντεο

Αντίθετα από τις εφαρμογές αποθηκευμένου βίντεο που κωδικοποιούν πλήρως το βίντεο πριν από τη μετάδοσή του, η μετάδοση ζωντανού βίντεο απαιτεί όπως τα πλαίσια του βίντεο (video frames) να δημιουργούνται, να κωδικοποιούνται και να μεταδίδονται σχεδόν συγχρόνως. Επομένως, η μετάδοση ζωντανού βίντεο είναι δυνατή μόνο με βιντεοροές (streaming). Το ζωντανό βίντεο μπορεί να είναι είτε αλληλεπιδραστικό, όπως στις εφαρμογές βιντεοηλεκτρονικής, είτε μη-αλληλεπιδραστικό, όπως στις ζωντανές τηλεοπτικές μεταδόσεις (αθλητικά ή άλλα τηλεοπτικά προγράμματα). Οι ζωντανές εφαρμογές βιντεοροών έχουν συνήθως αυστηρότερες απαιτήσεις για την καθυστέρηση από

ότι οι αποθηκευμένες εφαρμογές βιντεορών. Όταν η εικόνα παράγεται στο απομακρυσμένο σημείο, πρέπει να είναι διαθέσιμη στον πελάτη με μια μικρή καθυστέρηση. Για παράδειγμα, οι εφαρμογές βιντεοτηλεδιάσκεψης, συνήθως, απαιτούν ο συνολικός χρόνος μετάδοσης των τηλεοπτικών και ακουστικών σημάτων να είναι μικρότερος από τα 150 ms, προκειμένου να παρέχεται μια αδιάκοπη τηλεπικοινωνιακή υπηρεσία, ενώ οι καθυστερήσεις που είναι μεγαλύτερες από 400 ms δίνουν συνήθως κακή ποιότητα. Για τα μη-αλληλεπιδραστικά ζωντανά γεγονότα, οι καθυστερήσεις μπορούν να είναι λίγο μεγαλύτερες, ανάλογα με το περιεχόμενο.

3.2.3 Βιντεοροές κωδικοποιημένες σε στρώματα

Η ετερογένεια των δικτύων και οι ποικίλες συνθήκες που υπάρχουν μέσα σ' αυτά αντιμετωπίζονται, συνήθως, με τη χρησιμοποίηση κατάλληλων τεχνικών κωδικοποίησης του τηλεοπτικού σήματος. Για χρήση βιντεορών στα πιο πάνω δίκτυα υπάρχουν τέσσερις δημοφιλείς τεχνικές: κωδικοποίηση on-the-fly, εναλλαγές μεταξύ διαφορετικών κωδικοποιημένων εκδόσεων του βίντεο, προσθαφαίρεση στρωμάτων και προσθαφαίρεση περιγραφών.

Στην κωδικοποίηση on-the-fly το βίντεο κωδικοποιείται συγχρόνως καθώς διαβιβάζεται στον πελάτη. Αυτή είναι η εξ' ορισμού τεχνική για τις ζωντανές τηλεοπτικές εφαρμογές. Αυτή η τεχνική επιτρέπει τη ρύθμιση των παραμέτρων κωδικοποίησης, προκειμένου να ταιριάξει ο τηλεοπτικός ρυθμός παραγόμενου βίντεο με το τρέχον διαθέσιμο εύρος ζώνης της σύνδεσης. Ωστόσο, η κωδικοποίηση απαιτεί τεράστιο όγκο εργασίας από την ΚΜΕ και έτσι, γενικά, θεωρείται ακατάλληλη για τους κεντρικούς υπολογιστές που στέλνουν μεγάλο αριθμό βιντεορών ταυτόχρονα.

Η εναλλαγή μεταξύ πολλαπλών κωδικοποιημένων εκδόσεων χρησιμοποιείται ευρέως στις διάφορες εφαρμογές. Αυτή η τεχνική συνίσταται στην κωδικοποίηση του βίντεο σε διαφορετικούς ρυθμούς bitrate, που αντιστοιχούν σε διαφορετικά ποιοτικά επίπεδα. Κάθε έκδοση αποθηκεύεται και είναι διαθέσιμη στον κεντρικό υπολογιστή. Ο κεντρικός υπολογιστής κάνει εναλλαγές μεταξύ των εκδόσεων για να προσαρμόσει το ρυθμό μετάδοσης (και ως εκ τούτου και το ποιοτικό επίπεδο) στο διαθέσιμο εύρος ζώνης της σύνδεσης.

Μια εναλλακτική τεχνική χρησιμοποιεί την κωδικοποίηση βίντεο σε στρώματα (βλέπε ενότητα 7.1). Τα τηλεοπτικά στρώματα μπορούν προστεθούν ή να αφαιρεθούν από μια τηλεοπτική μετάδοση με βάση τις μεταβαλλόμενες συνθήκες στο δίκτυο.

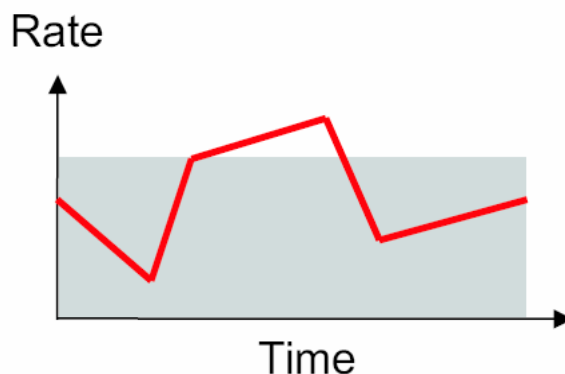
Τέλος, μια άλλη τεχνική χρησιμοποιεί κωδικοποίηση πολλαπλής περιγραφής (Multiple Description Coding – MDC). Αυτό συνίσταται στην κωδικοποίηση του βίντεο σε διάφορες περιγραφές, έχοντας η κάθε μια ίδια σπουδαιότητα. Αυτό είναι διαφορετικό από την κλιμακωτή κωδικοποίηση που παράγει τα ιεραρχικά στρώματα (δηλαδή τα υψηλότερα στρώματα χρειάζονται τα χαμηλότερα στρώματα για να αποκωδικοποιηθούν). Η χρησιμοποίηση των MDCs είναι πιο ευέλικτη τεχνική από τη χρησιμοποίηση του κλιμακωτού βίντεο, εντούτοις αυτή η ευελιξία έχει κόστος στο bitrate.

3.3 Μετάδοση βίντεο μέσα από δίκτυα καλύτερης προσπάθειας

Σε αυτή την παράγραφο, γίνεται προσπάθεια για ταξινόμηση των υπάρχουσων προσεγγίσεων για μετάδοση τηλεοπτικού σήματος μέσα από δίκτυα πακέτων καλύτερης προσπάθειας και για σύγκριση των σχετικών πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους. Ειδικότερα, εστιάζουμε στη δυνατότητα της κάθε μιας προσέγγισης στο να επιτύχει έλεγχο του ρυθμού μετάδοσης με βάση το (μεταβαλλόμενο) διαθέσιμο εύρος ζώνης και έλεγχο λαθών.

3.3.1 Μετάδοση με Σταθερό Ρυθμό ενός μόνο επιπέδου

Ενώ και τα δύο τηλεοπτικά πρότυπα συμπίεσης MPEG και H.263 έχουν δυνατότητες για μετάδοση βιντεοροών σε στρώματα με διαφορετικό ρυθμό, η πλειοψηφία των βίντεο δεν κωδικοποιούνται με αυτό τον τρόπο. Συνήθως υιοθετούνται τεχνικές συμπίεσης με σταθερό ρυθμό, καθιστώντας έτσι αδύνατη την αλλαγή του ρυθμού επικοινωνίας αφότου ολοκληρωθεί η συμπίεση και μετά. Η ανικανότητα να ρυθμιστεί ο ρυθμός επικοινωνίας προκαλεί (α) την υποεκμετάλλευση των πόρων του δικτύου όταν ο ρυθμός κωδικοποίησης είναι χαμηλότερος από το διαθέσιμο εύρος ζώνης, και (β) τη συμφόρηση όταν ο ρυθμός κωδικοποίησης είναι ψηλότερος. Αυτό το πρόβλημα φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα [2], όπου η γραμμή παρουσιάζει τη διακύμανση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και η γκριζα περιοχή παρουσιάζει το ρυθμό κωδικοποίησης του βίντεο.

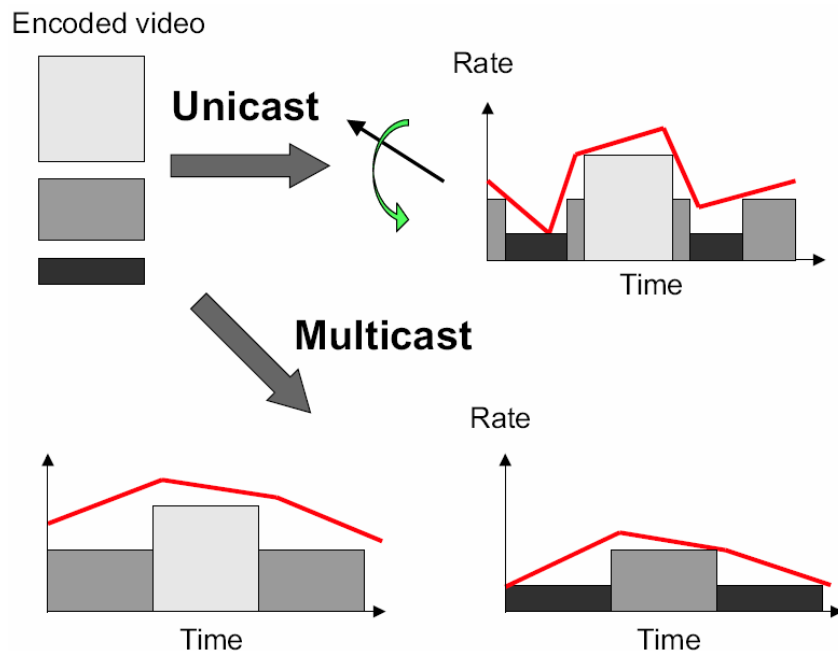


Ένα πλεονέκτημα των τεχνικών συμπίεσης που δεν χρησιμοποιούν στρώματα είναι οι δυνατότητες που έχουν στο να πετύχουν υψηλή συμπίεση. Εντούτοις, λόγω του χαμηλού ρυθμού επικοινωνίας που μπορεί να πετύχουν, αμφισβητείται το κατά πόσο επιτυγχάνεται καλύτερη τηλεοπτική ποιότητα στην από άκρο σε άκρο μετάδοση. Επιπλέον, η πρόσθετη καθυστέρηση λόγω της χρήσης ενταμιευτών έχει αποτρέψει τη χρήση τέτοιων τεχνικών σε ένα αλληλεπιδραστικό περιβάλλον, όπου είναι εξαιρετικά σημαντικό να έχουμε μικρή καθυστέρηση.

Σε ένα περιβάλλον πολλαπλής μετάδοσης, ακόμα και όταν δεν αλλάζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης, αυτή η προσέγγιση (με ένα μόνο στρώμα – επίπεδο), παραμένει μη αποδοτική εξαιτίας της ετερογένειας που έχει το εύρος ζώνης μεταξύ των διαφορετικών παραληπτών.

3.3.2 Πολλαπλά αντίγραφα βιντεορών

Μια πιθανή βελτίωση για καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης με χρήση συμπίεσης χωρίς στρώματα, είναι η παροχή πολλαπλών αντιγράφων (stream replication) του ίδιου βίντεο σε διαφορετικούς ρυθμούς και εναλλαγή μεταξύ τους όποτε χρειάζεται. Αυτή η προσέγγιση για unicast μετάδοση φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα. Αν και η δημιουργία πολλαπλών αντιγράφων των βιντεορών παρέχει καλύτερη προσαρμοστικότητα στις διακυμάνσεις του εύρους ζώνης, απαιτείται, ταυτόχρονα, και υψηλότερο κόστος αποθήκευσης λόγω της ανάγκης να αποθηκευτούν πολλαπλά αντίγραφα του ίδιου βίντεο.



Η προσέγγιση των βιντεορών σε πολλαπλά αντίγραφα έχει εφαρμοστεί, επίσης, και στην πολλαπλή μετάδοση με την ονομασία Ομαδοποίηση Συνόλου Προορισμού (DSG – Destination Set Grouping) [17]. Με το DSG, οι παραλήπτες χωρίζονται σε ομάδες παρόμοιας απαίτησης εύρους ζώνης, και η κάθε ομάδα εξυπηρετείται από μια ξεχωριστή βιντεοροή. Επιπλέον, μέσα σε κάθε ομάδα είναι δυνατή η προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης. Στο πιο πάνω σχήμα, φαίνονται δύο ομάδες που τροφοδοτούν παραλήπτες με διαφορετικό εύρος ζώνης, το οποίο δεν έχει πολλές διακυμάνσεις. Δεδομένου ότι οι βιντεοροές πρέπει να μεταδοθούν ταυτόχρονα προς όλες τις ομάδες, πρακτικά ο αριθμός ομάδων που μπορεί να υποστηριχθεί στην προσέγγιση αυτή είναι συνήθως περιορισμένος.

3.3.3 Μετάδοση ενός μόνο επιπέδου με προσαρμοστικό ρυθμό

Για την βιντεοτηλεδιάσκεψη ή για την ανοικτή μετάδοση ζωντανών γεγονότων, η κωδικοποίηση του βίντεο πρέπει να γίνει σε πραγματικό χρόνο. Η διαθεσιμότητα ενός κωδικοποιητή πραγματικού χρόνου παρέχει τη δυνατότητα για αλλαγή του ρυθμού κωδικοποίησης του βίντεο ώστε να ταιριάζει με το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Οπότε, ένα τέτοιο σχέδιο ισχύει μόνο όταν είναι διαθέσιμος ένας κωδικοποιητής πραγματικού χρόνου

και επιπλέον, είναι μια προσέγγιση ενός μόνο στρώματος – επιπέδου που δεν μπορεί να διαχειριστεί την ετερογένεια του εύρους ζώνης ενός περιβάλλοντος πολλαπλής μετάδοσης.

3.3.4 Διακωδικοποίηση

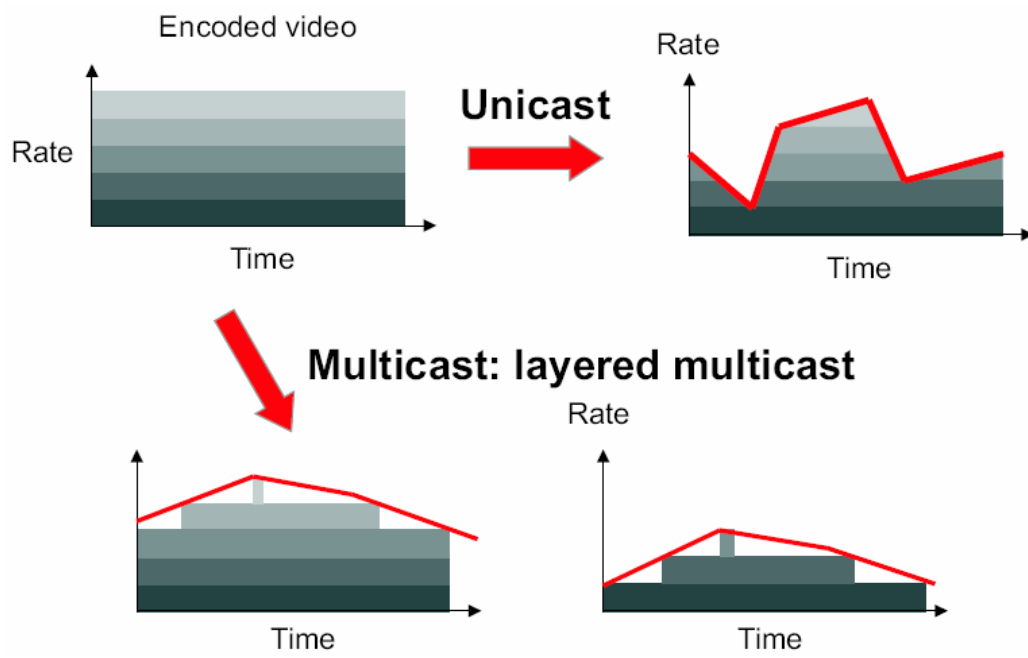
Η διακωδικοποίηση (transcoding) [27] μπορεί να θεωρηθεί ως επέκταση της μετάδοσης με προσαρμοστικό ρυθμό αλλά με χρήση προσυμπιεσμένου βίντεο. Η ιδέα είναι να αποκωδικοποιείται πλήρως ή μερικώς ένα βίντεο και έπειτα να επανασυμπιέζεται με τον ανάλογο ρυθμό ώστε να ικανοποιεί οποιεσδήποτε απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Εντούτοις, εκτός από την ποιοτική υποβάθμιση, η διακωδικοποίηση προσθέτει καθυστέρηση λόγω της σύνθετης λειτουργίας της και της πρόσθετης ενταμίευσης που μπορεί να απαιτείται από μερικούς μηχανισμούς που μειώνουν τον ρυθμό συμπίεσης.

3.3.5 Στρωματοποιημένο βίντεο

Η συμπίεση στρωματοποιημένου (scalable) βίντεο είναι μια τεχνική στην οποία το συμπιεσμένο βίντεο οργανώνεται σε στρώματα. Συνήθως, η χρήση περισσότερων στρωμάτων οδηγεί σε μεγαλύτερο bitrate και, επίσης, σε υψηλότερη τηλεοπτική ποιότητα από την άποψη της χωρικής ανάλυσης, της χρονικής ανάλυσης, ή της ποιότητας της εικόνας. Αλλάζοντας δυναμικά τον αριθμό των στρωμάτων που χρησιμοποιούνται, ο ρυθμός μπορεί να είναι αποδοτικός και στις συνδέσεις unicast και στις συνδέσεις πολλαπλής μετάδοσης, όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα. Ο έλεγχος του ρυθμού σε συνδέσεις πολλαπλής μετάδοσης υλοποιείται από τη στρωματοποιημένη πολυμετάδοση (βλέπε ενότητα 3.2.3) σε συνδυασμό με το στρωματοποιημένο βίντεο. Αντίθετα, καμία από τις προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν μη-στρωματοποιημένο βίντεο δεν μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά το πρόβλημα της ετερογένειας του εύρους ζώνης σε ένα περιβάλλον πολλαπλής μετάδοσης, με εξαίρεση την ομαδοποίηση συνόλου προορισμού (DSG) που περιγράφηκε στην ενότητα 3.3.2. Η προσέγγιση DSG, ωστόσο, έχει το μειονέκτημα της υπερβολικής χρήσης του εύρους ζώνης.

Οι τυποποιημένες τεχνικές συμπίεσης όπως το MPEG και το H.263 (βλέπε ενότητες 2.2.3 και 2.2.1 αντίστοιχα) έχουν δυνατότητες για στρωματοποίηση που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενός μικρού αριθμού στρωμάτων, συνήθως δύο. Εντούτοις, ο μικρός αριθμός διαθέσιμων στρωμάτων περιορίζει τη χρήση τέτοιων τεχνικών για λόγους που αφορούν το ρυθμό κωδικοποίησης. Αντί αυτών των τεχνικών, οι τεχνικές που προσφέρουν fine grained scalability (βλέπε ενότητα 2.2.9) προτιμώνται για τη δυνατότητά τους να ταιριάζουν καλύτερα με το κυμαινόμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Ένα πρόβλημα της συμπίεσης βίντεο σε στρώματα είναι η έλλειψη ανεκτικότητας σε λάθη και έτσι, πρέπει το δίκτυο να παρέχει τις εγγυήσεις παράδοσης.



4 Πρωτόκολλα μεταφοράς βιντεοροών: TCP έναντι UDP

Το επίπεδο μεταφοράς (transport layer) του Διαδικτύου μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα από τα ακόλουθα δύο πρωτόκολλα για να παρέχει μια υπηρεσία Διαδικτύου στις εφαρμογές: το Πρωτόκολλο Αυτοδύναμου Πακέτου Χρήστη (UDP – User Datagram Protocol) και το Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης (TCP – Transmission Control Protocol). Ενώ η πολλαπλή μετάδοση (multicast) απαιτεί τη χρήση του UDP ως πρωτόκολλο μεταφοράς, οι unicast τηλεοπτικές εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιήσουν ως πρωτόκολλο μεταφοράς είτε το TCP είτε το UDP. Εντούτοις, το TCP θεωρείται, συνήθως, ως ακατάλληλο για τις βιντεοροές. Αυτό οφείλεται κυρίως στους ακόλουθους δύο λόγους. Κατ' αρχή, η πλήρης αξιοπιστία του TCP δεν είναι απαραίτητη για τις εφαρμογές βιντεοροών. Πράγματι, τα βίντεο είναι ελαστικά σε λάθη. Λόγω του έμφυτου πλεονασμού σε πληροφορίες που έχει το βίντεο, οι εφαρμογές βιντεοροών μπορούν, συνήθως, να ανεχτούν ένα ορισμένο ποσοστό απώλειας πακέτων χωρίς μεγάλη υποβάθμιση της αντιληπτής ποιότητας. Η πλήρης αξιοπιστία του TCP συνοδεύεται, επίσης, από μια μεγαλύτερη μέση καθυστέρηση μετάδοσης που προκαλείται από την αναμετάδοση των χαμένων πακέτων, τα οποία μπορούν να είναι ένα εμπόδιο για τις βιντεοροές πραγματικού χρόνου. Δεύτερο, ο αλγόριθμος ελέγχου συμφόρησης AIMD του TCP θεωρείται συχνά ακατάλληλος για τις εφαρμογές βιντεοροών, επειδή σε μικρά χρονικά διαστήματα παρατηρείται μεγάλη διακύμανση στη ρυθμοαπόδοση [3]. Έτσι, αυτή η διακύμανση στη ρυθμοαπόδοση μπορεί να οδηγήσει σε κυμαινόμενη ποιότητα των τηλεοπτικών εικόνων, η οποία δεν είναι επιθυμητή.

4.1 UDP

Το UDP είναι ένα πολύ απλό πρωτόκολλο μεταφοράς. Παρέχει απλώς την πολυπλεξία/αποπολυπλεξία στο επίπεδο εφαρμογής, δηλ. επιτρέπει την μεταφορά δεδομένων από μια εφαρμογή της πηγής σε μια εφαρμογή του προορισμού. Οι χαρακτηριστικές εφαρμογές που τρέχουν πάνω από το UDP περιλαμβάνουν ροές πολυμέσων, τηλεφωνία μέσω Διαδικτύου και μετάφραση ονομάτων περιοχών (Domain Name - DNS).

Το UDP είναι πρωτόκολλο χωρίς σύνδεση (connection-less), που σημαίνει ότι δεν απαιτεί την εγκαθίδρυση μιας (εικονικής) σύνδεσης μεταξύ του πελάτη και του εξυπηρετητή. Είναι πρωτόκολλο αυτοδύναμου πακέτου, δηλ. μεταφέρει πλήρη πακέτα από το επίπεδο εφαρμογής προς το επίπεδο δικτύου.

4.2 TCP

Το TCP είναι ένα αξιόπιστο πρωτόκολλο μεταφοράς. Αντίθετα από το UDP, το TCP αναμεταδίδει τα τμήματα που έχουν χαθεί εξαιτίας του δικτύου. Οι χαρακτηριστικές εφαρμογές που τρέχουν πάνω από TCP είναι το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (SMTP), ο Παγκόσμιος Ιστός (HTTP) και η αξιόπιστη μεταφορά αρχείων (FTP).

Το TCP είναι ένα πρωτόκολλο εξαρτώμενο από τη σύνδεση (connection-oriented): απαιτεί την εγκαθίδρυση μιας σύνδεσης μεταξύ του πελάτη και του εξυπηρετητή πριν μεταβιβάσει οποιαδήποτε δεδομένα της εφαρμογής. Η σύνδεση επιτυγχάνεται μέσω ενός πρωτοκόλλου χειραψίας (3-way handshake protocol). Επίσης, το TCP βασίζεται στην ψηφιολέξη (byte), δηλ. ο αποστολέας γράφει ψηφιολέξεις σε μια σύνδεση TCP και ο αποδέκτης διαβάζει ψηφιολέξεις από τη σύνδεση TCP. Στην πηγή, το TCP πρώτα αποθηκεύει τις εισερχόμενες ψηφιολέξεις από την εφαρμογή. Οι αποθηκευμένες ψηφιολέξεις στέλνονται στο επίπεδο IP όταν το μέγεθος του ενταμιευτή (buffer) φτάσει στο Maximum TCP Segment Size (MSS), ή μετά από τη πάροδο κάποιου συγκεκριμένου χρόνου (time-out).

Ο μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης που έχει το TCP έχει ως σκοπό να παρέχει ανταγωνιστικές συνδέσεις TCP που να μην έχουν μεγαλύτερη συμφόρηση από άλλα πρωτόκολλα και να απολαμβάνουν ίσο μερίδιο του εύρους ζώνης. Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε ότι αυτός ο μηχανισμός του TCP είναι σημαντικός στην εξελιξιμότητα και τη σταθερότητα του σημερινού Διαδικτύου.

5 Η εξέλιξη του Διαδικτύου

Όταν το Διαδίκτυο σχεδιάστηκε, είχε προσαρμοστεί στη μεταφορά αρχείων δεδομένων χωρίς καμιά απαίτηση όσο αφορά την καθυστέρηση μετάδοσης. Οι χαρακτηριστικές εφαρμογές ήταν η μεταφορά αρχείων, το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και ο παγκόσμιος ιστός (web). Τώρα που το Διαδίκτυο είναι παντού, θα ήταν βολικό αν χρησιμοποιείτο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως η τηλεφωνία ή η βιντεοτηλεδιάσκεψη. Εντούτοις, τέτοιες εφαρμογές είναι δύσκολο να υλοποιηθούν στο τρέχον best-effort Διαδίκτυο επειδή, όπως αναφέραμε στην ενότητα 3.1.1, το δίκτυο δεν μπορεί να εγγυηθεί οποιαδήποτε ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS), όπως το πόση είναι η μέγιστη καθυστέρηση μετάδοσης από άκρο σε άκρο. Οι εφαρμογές που είναι λιγότερο ευαίσθητες στην ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS) όπως οι ροές αποθηκευμένου βίντεο (βλέπε ενότητα 3.2.1) ή η απλή αναζήτηση στον Ιστό θα μπορούσαν, επίσης, να επωφεληθούν από εγγυήσεις όσο αφορά την ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS), όπως π.χ. πόσο είναι το ελάχιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης ή το μέγιστο ποσοστό απώλειας πακέτων.

Έχουν γίνει δύο βασικές προτάσεις από την Ομάδα Εφαρμοσμένης Μηχανικής Διαδικτύου (IETF – Internet Engineering Task Force) για να προσφέρεται κάποια εγγύηση στην ποιότητα των υπηρεσιών στο Διαδίκτυο. Αυτές οι προτάσεις είναι η Ολοκληρωμένη Υπηρεσία (IntServ – Integrated Service) και η Διαφοροποιημένη Υπηρεσία (DiffServ – Differentiated Service). Και οι δύο προτάσεις απαιτούν τροποποίηση της τρέχουσας αρχιτεκτονικής του Διαδικτύου.

5.1 IntServ

Η αρχιτεκτονική IntServ παρέχει τις απόλυτες εγγυήσεις QoS για κάθε μεμονωμένη ροή, οι οποίες αφορούν το ελάχιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης, τη μέγιστη δυνατή καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και το μέγιστο ποσοστό απώλειας. Το IntServ χρησιμοποιείται από κοινού με το Πρωτόκολλο Προκράτησης Πόρων (RSVP – Resource Reservation Protocol), το οποίο παρέχει τη σηματοδότηση και τον μηχανισμό ελέγχου αποδοχής. Αντίθετα από την υπάρχουσα υποδομή του Διαδικτύου, το IntServ απαιτεί να αποθηκεύεται η κατάσταση της κάθε ροής στους δρομολογητές.

5.2 DiffServ

Ενώ το IntServ παρέχει εγγυήσεις για ποιότητα εξυπηρέτησης για κάθε μεμονωμένη ροή, το DiffServ λειτουργεί με βάση τη συνολική κυκλοφορία του δικτύου, δηλαδή με βάση ένα μεγάλο σύνολο ροών με παρόμοιες απαιτήσεις ποιότητας εξυπηρέτησης. Η αρχιτεκτονική DiffServ διακρίνει δύο κατηγορίες δρομολογητών: τους κεντρικούς δρομολογητές (core routers) και τους δρομολογητές άκρων (edge routers). Στους δρομολογητές άκρων, τα πακέτα είναι ταξινομημένα (ή σημειωμένα) σε διαφορετικές κατηγορίες εξυπηρέτησης. Η εξερχόμενη κυκλοφορία ρυθμίζεται για να ταιριάζει με μια συγκεκριμένη Συμφωνία Εξυπηρέτησης (SLA – Service Level Agreement), η οποία έχει τύχει διαπραγμάτευσης μεταξύ του πελάτη και του Παροχέα Υπηρεσιών Διαδικτύου (ISP – Internet Service Provider). Μια Συμφωνία Εξυπηρέτησης (SLA) καθορίζει μακροπρόθεσμες προδιαγραφές

για την αναμενόμενη κυκλοφορία, όπως η ρυθμοαπόδοση, η πιθανότητα απόρριψης ή η καθυστέρηση (latency). Όσο αφορά τους κεντρικούς δρομολογητές, αυτοί αναλαμβάνουν να προωθήσουν τα πακέτα σύμφωνα με την κατηγορία εξυπηρέτησης στην οποία ανήκουν. Η IETF έχει τυποποιήσει δύο υπηρεσίες προώθησης από τους δρομολογητές, την υπηρεσία σίγουρης προώθησης (AF – Assured Forwarding) και την υπηρεσία αναμενόμενης προώθησης (EF – Expected Forwarding) [57]. Η υπηρεσία αναμενόμενης προώθησης (EF) δίνει απόλυτες εγγυήσεις υπηρεσιών από άκρο σε άκρο ανεξάρτητα από το εύρος ζώνης ή την καθυστέρηση (latency). Η υπηρεσία αυτή είναι συγκρίσιμη με μια εικονική μισθωμένη γραμμή. Η υπηρεσία σίγουρης προώθησης (AF) καθορίζει διαφορετικά επίπεδα διαβεβαιώσεων για τα πακέτα IP. Το IETF έχει καθορίσει 4 διαφορετικές κατηγορίες σίγουρης προώθησης (AF), με 3 διαφορετικές προτεραιότητες απόρριψης για κάθε κατηγορία.

Και οι δύο προτάσεις IntServ και DiffServ έχουν προσελκύσει πολλές ερευνητικές προσπάθειες στα τελευταία χρόνια. Εντούτοις, δεν έχουν ακόμη επεκταθεί, έτσι το τρέχον Διαδίκτυο είναι ακόμα best-effort. Το κύριο ζήτημα είναι αν μπορούν να εξελιχθούν οι δύο προσεγγίσεις και να εφαρμοστούν στην υπάρχουσα αρχιτεκτονική του Διαδικτύου. Με την υπηρεσία IntServ δεν υπάρχουν εγγυήσεις στις από άκρο σε άκρο συνδέσεις, εκτός αν όλοι οι κόμβοι κατά μήκος του μονοπατιού υποστηρίζουν IntServ. Με το DiffServ, στην από άκρο σε άκρο υπηρεσία, οι εγγυήσεις μπορούν να παρασχεθούν αν συνενωθούν οι τοπικές εγγυήσεις υπηρεσιών, το οποίο, όμως, απαιτεί όπως τηρούνται οι Συμφωνίες Εξυπηρέτησης (SLA) από όλους τους πελάτες και τους προμηθευτές υπηρεσιών.

5.3 Άλλες αλλαγές

Εκτός από τις προσεγγίσεις IntServ και DiffServ, οι εφαρμογές Διαδικτύου θα μπορούσαν να ωφεληθούν και από διάφορες άλλες αλλαγές στην αρχιτεκτονική του Διαδικτύου [2], όπως:

- **Ενεργός διαχείριση ουρών αναμονής (Active queue management).** Αυτό συνίσταται σε χρησιμοποίηση των αλγορίθμων διαχείρισης ουρών αναμονής (εκτός από FIFO) μέσα στους δρομολογητές. Ένας δημοφιλής αλγόριθμος διαχείρισης ουρών αναμονής είναι ο αλγόριθμος Τυχαίας Έγκαιρης Ανίχνευσης (RED – Random Early Detection). Το κύριο κίνητρο στον αλγόριθμο αυτό είναι να ελεγχθεί η μέση καθυστέρηση αναμονής στις ουρές των δρομολογητών, ώστε να αποτραπεί η διακύμανση στο μέγεθος των ουρών αναμονής από περιττές απορρίψεις πακέτων.
- **Ρητή ειδοποίηση συμφόρησης (ECN – Explicit Congestion Notification).** Αυτό επιτρέπει στους δρομολογητές να ενεργοποιήσουν το δωφίο συμφόρησης στην επικεφαλίδα IP ως ένδειξη συμφόρησης, παρά να απορρίψουν το πακέτο. Σε αυτήν την περίπτωση, ο αποστολέας TCP εισέρχεται στη φάση αποφυγής συμφόρησης, ώστε να μην έχουμε απώλεια πακέτων.
- **Πρωτόκολλα Πολλαπλής Μετάδοσης (Multicast protocols).** Η επικοινωνία πολλαπλής μετάδοσης συνίσταται στις μεταφορές δεδομένων από ένα εξυπηρετητή σε μια ομάδα πελατών, συναθροίζοντας τις unicast συνδέσεις.

Σε μια τέτοια προσέγγιση, οι δρομολογητές πολλαπλής μετάδοσης πρέπει να αντιγράψουν τα δεδομένα που στέλνονται σε μια συγκεκριμένη ομάδα, σε κάθε σύνδεση εξόδου που οδηγεί σε πελάτες της ομάδας. Παρά τα πιθανά κέρδη στο εύρος ζώνης, η δρομολόγηση πολλαπλής μετάδοσης προκαλεί προβληματισμό για το αν είναι δυνατό να επεκταθεί σε μεγάλη κλίμακα, επειδή οι δρομολογητές πολλαπλής μετάδοσης πρέπει να αποθηκεύουν την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η κάθε ομάδα πολλαπλής διανομής.

- **IPv6.** Η έκδοση 6 του πρωτοκόλλου Διαδικτύου είναι ο διάδοχος του τρέχοντος πρωτοκόλλου IPv4. Χαρακτηρίζεται από διάφορες νέες λειτουργίες, όπως η αύξηση στον συνολικό αριθμό των πιθανών διευθύνσεων του Διαδικτύου, η υποστήριξη πολλαπλής μετάδοσης (χωρίς τη χρήση tunnels) και η απλούστερη επικεφαλίδα σε σχέση με το IPv4. Εντούτοις, το IPv6 είναι ανέκδοτο να λειτουργεί μαζί με το IPv4, γεγονός το οποίο έχει συμβάλει στο να καθυστερήσει η επέκτασή του.

Οι αλλαγές στην υποδομή του Διαδικτύου που έχουν παρουσιαστεί σε αυτό το τμήμα θα μπορούσαν να βοηθήσουν στο να γίνει το τρέχον Διαδίκτυο καλύτερης προσπάθειας καταλληλότερο για τις εφαρμογές που έχουν υψηλές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών, όπως η μετάδοση βίντεο πραγματικού χρόνου. Ειδικότερα, αυτές οι αλλαγές μπορούν να βοηθήσουν στην ετερογένεια του δικτύου, στον περιορισμό της συμφόρησης ή μπορούν να παρέχουν εγγυήσεις όσο αφορά το ποσοστό απώλειας, την καθυστέρηση μετάδοσης από άκρο σε άκρο ή το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Εντούτοις, το τρέχον Διαδίκτυο είναι ακόμα best-effort, και έτσι οι εφαρμογές που πρέπει να στείλουν ή να λάβουν δεδομένα μέσω του δικτύου πρέπει να αντιμετωπίσουν την έλλειψη εγγυήσεων στην ποιότητα υπηρεσιών.

6 Προσαρμοστικές τεχνικές για βιντεοροές μέσω του Διαδικτύου

Οι βιντεοροές μέσω του Διαδικτύου μπορούν να βελτιώνουν την ποιότητά τους αν τα συστήματα που τις μεταδίδουν μπορούν να προσαρμόζονται. Η προσαρμογή αυτή μπορεί να αφορά είτε το δίκτυο είτε το περιεχόμενο του βίντεο. Ακόμη καλύτερα είναι να γίνει συνδυασμός των δύο τεχνικών, δηλαδή να γίνεται προσαρμογή του περιεχομένου του βίντεο, αφού πρώτα ληφθούν υπόψη οι κυμαινόμενες συνθήκες του δικτύου.

6.1 Βιντεοροές με προσαρμογή του δικτύου

Λόγω της ποικιλίας και των ετερογενών χαρακτηριστικών του best-effort Διαδικτύου, τα συστήματα βιντεοροών πρέπει να εφαρμόζουν μηχανισμούς που προσαρμόζουν τη μετάδοση στην τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Γι' αυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές ενταμιευτών (buffers) και τεχνικές που διορθώνουν τα λάθη που προέρχονται από απώλειες των πακέτων.

Ενταμίευση αναπαραγωγής (Playback Buffering)

Οι δημοφιλέστερες σημερινές εφαρμογές ροών πολυμέσων, δηλ. το Real Media [20], το Windows Media [21] και το Quicktime [19], απαιτούν μια μικρή *καθυστέρηση εκκίνησης* (της τάξης των μερικών εκατοντάδων χιλιοστών του δευτερολέπτου) προτού το βίντεο να είναι διαθέσιμο στο χρήστη. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, ο εξυπηρετητής στέλνει το αρχικό κομμάτι του βίντεο σε ένα συγκεκριμένο ενταμιευτή του πελάτη, τον οποίο καλούμε *ενταμιευτή αναπαραγωγής (playback buffering)*. Αφότου αρχίσει η αναπαραγωγή του βίντεο, ο εξυπηρετητής συνεχίζει να αποστέλλει νέα δεδομένα που προστίθενται στον ενταμιευτή του πελάτη ο οποίος λειτουργεί με τη λογική του FIFO. Ο όρος *καθυστέρηση αναπαραγωγής* αναφέρεται στην καθυστέρηση μεταξύ της στιγμής που μια εικόνα στέλνεται από τον εξυπηρετητή και της στιγμής που πρέπει να προβληθεί στο χρήστη. Στο σημείο αυτό ας κάνουμε μια διάκριση μεταξύ της αρχικής καθυστέρησης αναπαραγωγής και της καθυστέρησης εκκίνησης: η καθυστέρηση εκκίνησης είναι ο χρόνος αναμονής του χρήστη από τη στιγμή που ζητά το βίντεο μέχρι να προβληθεί η πρώτη εικόνα. Η αρχική καθυστέρηση αναπαραγωγής αντιστοιχεί στη χρονική αξία που έχουν τα δεδομένα που έχουν σταλεί από τον εξυπηρετητή κατά τη διάρκεια της καθυστέρησης εκκίνησης.

Κατά τη διάρκεια της βιντεοροής, η καθυστέρηση αναπαραγωγής δεν είναι σταθερή εξαιτίας των διαφόρων συνθηκών που επικρατούν στο δίκτυο, όπως το διαθέσιμο εύρος ζώνης και η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση μετάδοσης. Έχουν σχεδιαστεί προσαρμοστικοί μηχανισμοί ενταμίευσης της αναπαραγωγής για να διατηρούν μια ανεκτή καθυστέρηση αναπαραγωγής κατά ολόκληρη τη διάρκεια της βιντεοροής και για να προσαρμόζουν το jitter του δικτύου. Το πρόβλημα που εξετάζεται συνήθως είναι το να βρεθεί το ελάχιστο μέγεθος του ενταμιευτή στον παραλήπτη που να ομαλοποιεί το jitter του δικτύου, έτσι ώστε να γίνονται δεκτά και τα αργοπορημένα πακέτα που φτάνουν με τη μέγιστη αποδεκτή καθυστέρηση.

Οι εφαρμογές βιντεοροών αποθηκευμένου βίντεο έχουν χαλαρώσει τις απαιτήσεις καθυστέρησης έναντι των εφαρμογών ζωντανών βιντεοροών. Έτσι, μπορούν να ανεχθούν μια μεγαλύτερη καθυστέρηση αναπαραγωγής, συνήθως μέχρι μερικά δευτερόλεπτα. Μια

υψηλότερη καθυστέρηση αναπαραγωγής επιτρέπει στην εφαρμογή να προσαρμόσει όχι μόνο το jitter, αλλά και τις βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Πράγματι, με το αποθηκευμένο βίντεο όλες οι τηλεοπτικές εικόνες που θα ακολουθήσουν είναι διαθέσιμες στο αποθηκευτικό μέσο των εξυπηρετητών οποιαδήποτε στιγμή. Επομένως, στις περιόδους που το διαθέσιμο εύρος ζώνης της σύνδεσης είναι υψηλότερο από το κωδικοποιημένο bitrate του βίντεο, ο εξυπηρετητής μπορεί να χρησιμοποιήσει το πρόσθετο εύρος ζώνης για να στείλει τα μελλοντικά κομμάτια του βίντεο στον πελάτη, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο το διαθέσιμο χρόνο αναπαραγωγής (playback delay). Τα πρόσθετα ενταμιευμένα στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις περιόδους που το διαθέσιμο εύρος ζώνης γίνεται χαμηλότερο από το bitrate της πηγής. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα βολική στην περίπτωση που ο εξυπηρετητής στέλνει τα στοιχεία στο μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης, ο οποίος, στην περίπτωση μετάδοσης πάνω από TCP, δίνεται από το διαθέσιμο εύρος ζώνης του TCP, ενώ σε περίπτωση μετάδοσης πάνω από UDP, δίνεται από το μερίδιο του ρυθμού που είναι φιλικό προς το TCP. Η διατήρηση ενός υψηλού διαθέσιμου χρόνου αναπαραγωγής (playback delay) μπορεί, επίσης, να επιτρέψει στον εξυπηρετητή να αναμεταδώσει τα χαμένα τηλεοπτικά πακέτα προτού να λήξει η προθεσμία αποκωδικοποίησής τους.

Τεχνικές προσαρμογής απωλειών

Οι μηχανισμοί διόρθωσης λάθους με επιλεγμένες αναμεταδόσεις ή FEC πρέπει, επίσης, να προσαρμοστούν στις αλλαγές των συνθηκών του δικτύου. Επιπλέον, επειδή τα τηλεοπτικά πακέτα έχουν αυστηρές προθεσμίες αποκωδικοποίησης, οι μηχανισμοί επιλεγμένης αναμετάδοσης πρέπει να μπορούν να προσαρμόζονται στις κυμαινόμενες από άκρο σε άκρο καθυστερήσεις.

6.2 Βιντεοροές με προσαρμογή του περιεχομένου του βίντεο

Πιο πάνω παρουσιάστηκαν τεχνικές που στοχεύουν να μεγιστοποιήσουν την απόδοση του συστήματος με βάση τις παραμέτρους του δικτύου. Ενώ αυτά τα μέτρα μπορούν να παρέχουν καλές ενδείξεις της ποιότητας της βιντεοροής, η ποιότητα δεν εξαρτάται πάντα από το ποσοστό των δυφίων ή των πακέτων που λαμβάνονται επιτυχώς. Επομένως, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί πραγματικά η αντιληπτή ποιότητα στον παραλήπτη, και με δεδομένες τις συνθήκες του δικτύου, οι προσαρμοστικές τεχνικές των βιντεοροών στο δίκτυο πρέπει να λάβουν υπόψη και τις ιδιομορφίες του βίντεο και της κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται. Αυτό είναι που αποκαλείται βιντεοροή με προσαρμογή του περιεχομένου.

7 Επισκόπηση των ζητημάτων μετάδοσης βίντεο σε στρώματα

7.1 Μετάδοση βίντεο σε στρώματα

Έχουν προταθεί διάφορα πρωτόκολλα για τη μετάδοση βίντεο σε στρώματα. Αυτά τα πρωτόκολλα μπορούν να διαιρεθούν σε δύο βασικές κατηγορίες: μετάδοση που την αρχίζει ο αποστολέας (sender-initiated) και μετάδοση που την αρχίζει ο παραλήπτης (receiver-initiated). Στην πρώτη περίπτωση (sender-initiated) ο αποστολέας πολυμεταδίδει (multicasts) μια βιντεοροή της οποίας η ποιότητα ρυθμίζεται βάσει της ανατροφοδότησης πληροφοριών που δέχεται από τους δέκτες. Εξαιτίας της ετερογένειας των δεκτών, ο αποστολέας συνήθως προσαρμόζει το ρυθμό του σύμφωνα με τον δέκτη που έχει τη χειρότερη απόδοση, γεγονός που συνεπάγεται σημαντική μείωση της απόδοσης για πολλούς άλλους δέκτες-μέλη της ίδιας ομάδας. Ένα επιπλέον πρόβλημα είναι και η σχεδίαση ενός μηχανισμού για την αποφυγή της συμφόρησης κατά την ανατροφοδότηση, ένα σημείο που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του αποστολέα [7].

Στην δεύτερη περίπτωση (receiver-initiated) το τηλεοπτικό σήμα στέλνεται χωρισμένο σε διάφορα στρώματα, και η κάθε ροή αποστέλλεται σε μια ξεχωριστή IP ομάδα πολυμετάδοσης. Το στρώμα βάσης περιέχει βασικές πληροφορίες της εικόνας, και τα άλλα στρώματα παρέχουν περαιτέρω βελτίωση στην ποιότητα της εικόνας. Ο δέκτης μπορεί να συμμετέχει σε ένα ή περισσότερα στρώματα ανάλογα με τις δυνατότητές του. Ο συνδυασμός όλων των στρωμάτων μαζί διαμορφώνει το πλήρες βίντεο.

Και οι δύο πιο πάνω περιπτώσεις έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, όμως υπάρχουν ορισμένες υβριδικές προσεγγίσεις που συνδυάζουν τα καλά σημεία και των δύο.

Η κλασική λύση για τη μετάδοση που την αρχίζει ο παραλήπτης (receiver-initiated) που προτάθηκε είναι αυτή του Receiver-driven Layered Multicast (RLM) [22]. Το RLM λειτουργεί βάσει της αρχιτεκτονικής του πρωτοκόλλου του Διαδικτύου (IP) και διανέμει πακέτα σε πολλούς και σε πολλά σημεία με τη μέθοδο της καλύτερης προσπάθειας (best effort). Σε αυτήν την προσέγγιση ο αποστολέας μεταδίδει το βίντεο με σταθερό ρυθμό, και οι παραλήπτες ελέγχουν για τον αριθμό των στρωμάτων που μπορούν να λάβουν, κάνοντας «πειράματα συνένωσης», δηλαδή προσαρμόζουν το επίπεδο συμμετοχής τους (subscription level) με το να συνενώνονται ή να αποχωρούν από το κάθε ένα τμήμα πολυμετάδοσης το οποίο μεταφέρει ένα στρώμα από τη βιντεοροή. Συγκρινόμενη με την προσέγγιση όπου τον έλεγχο τον έχει ο αποστολέας (sender-driven), αυτή η προσέγγιση παρέχει καλύτερη λύση όσο αφορά την ετερογένεια και την κλιμακοσιμότητα (scalability). Ωστόσο, απαιτεί έναν αποτελεσματικό μηχανισμό για τον έλεγχο του επιπέδου συμμετοχής για τον κάθε ένα παραλήπτη [7]. Αν και το RLM αποτελεί κύριο σταθμό προς την εξέλιξη της τηλεοπτικής μετάδοσης, εντούτοις πάσχει από ορισμένα μειονεκτήματα:

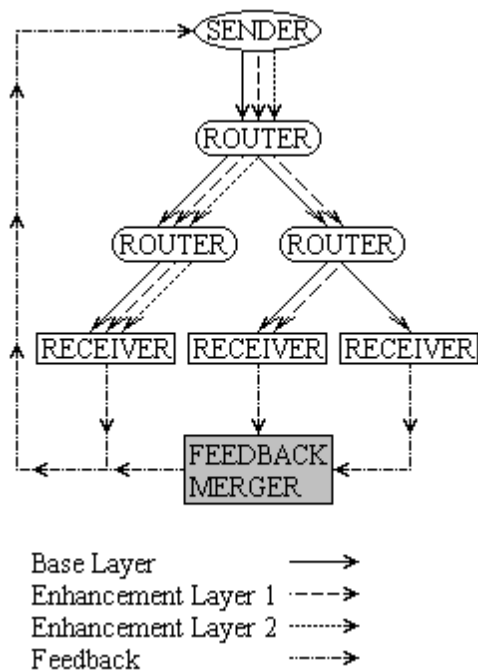
- Απαιτείται περισσότερος χρόνος κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης
- Χρειάζονται μεγαλύτεροι ενταμιευτές (buffers) στο δέκτη
- Προκαλείται συμφόρηση στις συνδέσεις κατά τη διάρκεια των πειραμάτων συνένωσης

- Προκαλείται σύγχυση για τις πληροφορίες που μοιράζονται οι δέκτες
- Δεν υπάρχει δίκαιος διαμοιρασμός του εύρους ζώνης μεταξύ των δεκτών

Μερικά από τα προβλήματα που αντιμετωπίζει το RLM έχουν επιλυθεί από το πρωτόκολλο πολυμετάδοσης στρωματοποιημένου βίντεο με επαναμετάδοση (LVMR – Layered Video Multicast with Retransmission). Σε αυτή την προσέγγιση η τηλεοπτική ποιότητα έχει βελτιωθεί με «έξυπνη» επαναμετάδοση των χαμένων πακέτων, και οι παραλήπτες χρησιμοποιώντας μια ιεραρχική δομή προσαρμόζουν δυναμικά το ρυθμό με τον οποίο παραλαμβάνουν το βίντεο.

Η πολυστρωματική κωδικοποίηση (multi-layered encoding) από μόνη της δεν μπορεί να λύσει όλα τα προβλήματα που συνδέονται με τους περιορισμούς του ποικίλου εύρους ζώνης στις εφαρμογές πολυμετάδοσης (multicast). Υβριδικά πρωτόκολλα όπως τα Source-Adaptive Multi-layered Multicast (SAMM) [33] και Layered Multicast Control Protocol (LMCP) συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα που έχουν οι sender-initiated και receiver-initiated προσεγγίσεις. Το πιο κάτω σχήμα δείχνει τη γενικευμένη αρχιτεκτονική για μια υβριδική πολυμετάδοση βίντεο σε στρώματα. Σε αυτά τα πρωτόκολλα, ο αποστολέας στέλνει το βίντεο σε στρώματα. Ο παραλήπτης δέχεται τα στρώματα ανάλογα με την ικανότητά του και στέλνει, επίσης, μίαν ανατροφοδότηση στον αποστολέα. Με βάση αυτήν την ανατροφοδότηση ο αποστολέας προσαρμόζει τον αριθμό των στρωμάτων και το ρυθμό μετάδοσης για το κάθε ένα κανάλι. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτών των προσεγγίσεων είναι:

- Ο αποστολέας στέλνει μόνο τα στρώματα εκείνα που μπορεί να ελέγξει ο παραλήπτης χωρίς να υπερφορτώνεται άδικα το δίκτυο.
- Η μετάδοση προσαρμόζεται καλύτερα στις απαιτήσεις του δικτύου.



Όλες αυτές οι προσεγγίσεις βασίζονται στη φιλοσοφία της καλύτερης προσπάθειας (best effort), όπου η παράδοση των πακέτων δεν είναι εγγυημένη. Ως εκ τούτου, λόγω της συμφόρησης, μερικά πακέτα μπορεί να χαθούν. Αυτή η απόρριψη των πακέτων είναι

ομοιόμορφη γεγονός που σημαίνει ότι τα πακέτα μπορεί να απορριφθούν από οποιοδήποτε στρώμα, ακόμα και το στρώμα βάσης (base layer). Όμως, από τη στιγμή που το στρώμα βάσης περιέχει τις πιο ευαίσθητες πληροφορίες, δεν θα ήταν καλή ιδέα να αφήσουμε να χαθεί κάποιο πακέτο από το στρώμα αυτό, για να μπορέσει να προσαρμοστεί η ροή στο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Μια καλύτερη λύση μπορεί να επιτευχθεί με τη χρησιμοποίηση μιας προσέγγισης βασισμένης στην προτεραιότητα, όπου η προτεραιότητα δίνεται σε ένα στρώμα ανάλογα με τη χρησιμότητά του. Η απόρριψη κατά προτεραιότητα μπορεί να επιτευχθεί με την αρχιτεκτονική των Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (βλέπε ενότητα 5.2). Σε αυτή την αρχιτεκτονική, η προτεραιότητα των πακέτων δίνεται από την πηγή, και οι κόμβοι του δικτύου μεταχειρίζονται το κάθε πακέτο σύμφωνα με την προτεραιότητά του.

Αυτές και πολλές άλλες παρόμοιες προσεγγίσεις μπορεί να αποτελούν καλά σχήματα για τη μετάδοση του βίντεο σε στρώματα. Όμως, η ερώτηση που μένει ακόμα αναπάντητη είναι το **πώς πρέπει να χωριστεί το βίντεο**. Για αυτό το θέμα πρέπει να εξεταστούν δύο πτυχές:

- Ο αριθμός των στρωμάτων στα οποία πρέπει να διαιρεθεί το βίντεο. Αυξάνοντας τον αριθμό των στρωμάτων μπορεί να ικανοποιηθεί μεγαλύτερη ετερογένεια στο δίκτυο. Από την άλλη η αύξηση του αριθμού των στρωμάτων θα αυξήσει τα γενικά έξοδα του δικτύου και την πολυπλοκότητα του κωδικοποιητή – αποκωδικοποιητή. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική η ανάγκη ο αριθμός των στρωμάτων να είναι ο ελάχιστος.
- Ο διαμοιρασμός του διαθέσιμου εύρους ζώνης μεταξύ των στρωμάτων. Το στρώμα βάσης συνήθως περιέχει τις πιο χρήσιμες πληροφορίες, οπότε το ιδανικό θα ήταν να διατίθεται σ' αυτό το σημαντικότερο μερίδιο από το εύρος ζώνης. Από την άλλη, όμως, αν ένα μεγάλο μέρος του εύρους ζώνης δίνεται σε ένα στρώμα, τότε ο χρήστης δεν θα έχει κανένα σοβαρό λόγο να προσυπογράψει στα υπόλοιπα βελτιωτικά στρώματα.

Ο καταλληλότερος τρόπος για το διαμοιρασμό του βίντεο είναι βάσει της ικανοποίησης των χρηστών και των απαιτήσεων του δικτύου. Για να κρίνουμε την ικανοποίηση του χρήστη πρέπει να ελέγχουμε το πώς ο χρήστης αντιλαμβάνεται την ποιότητα του βίντεο. Όσο αφορά τη "φιλικότητα" της τεχνικής διαμοιρασμού στρωμάτων προς το δίκτυο, μπορεί να μετρηθεί βάσει της:

- υπολογιστικής πολυπλοκότητας του κωδικοποιητή – αποκωδικοποιητή, ο οποίος καθορίζει το φορτίο στον αποστολέα και τους δέκτες.
- αποδοτικότητας του κωδικοποιητή – αποκωδικοποιητή όσο αφορά τη συμπίεση πέρα από κάποιο εύρος ζώνης.
- δυνατότητας να ικανοποιεί μεγαλύτερη ετερογένεια.

7.2 Αντιληπτή ποιότητα του βίντεο

Η αντιληπτή ποιότητα του βίντεο μπορεί να είναι είτε υποκειμενική είτε αντικειμενική. Δεδομένου ότι είναι οι χρήστες που θα αποφασίσουν τελικά για την ποιότητα του βίντεο, οι υποκειμενικές δοκιμές είναι αυτές που λαμβάνονται υπόψη. Οι πιο πολυχρησιμοποιημένες μέθοδοι για τη μέτρηση της υποκειμενικής ποιότητας της ομιλίας και των τηλεοπτικών εικόνων έχουν τυποποιηθεί από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU – International Telecommunications Union). Τα πρότυπα ITU-R και ITU-T εξετάζουν την υποκειμενική αξιολόγηση της ποιότητας της εικόνας σε συστήματα τηλεοράσεων και σε πολυμεσικές

εφαρμογές, αντίστοιχα. Σχεδόν όλες οι υποκειμενικές δοκιμές είναι χρονοβόρες και σύνθετες, επειδή η αξιολόγηση της υποκειμενικής αντίληψης για την ποιότητα είναι μια δύσκολη δουλειά, αφού επηρεάζεται από ένα αριθμό παραγόντων, όπως ο ρυθμός και το μέγεθος των εικόνων, ο φωτισμός, η κίνηση, ο βαθμός συγχρονισμού, ακόμη και η ευκρίνεια του ήχου. Σε ένα πείραμα, παρατηρήθηκε υποκειμενική βελτίωση της ποιότητας του βίντεο όταν είχε βελτιωθεί απλώς η ποιότητα του ήχου.

Η ποιότητα μετάδοσης των πολυμέσων μπορεί, επίσης, να εκφραστεί με αντικειμενικές μετρήσεις (π.χ. καθυστέρηση ή απώλεια των πακέτων). Συνήθως, είναι δύσκολο να βρεθεί οποιαδήποτε ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των υποκειμενικών και των αντικειμενικών αξιολογήσεων. Δημοφιλή απλά μέτρα αξιολόγησης, όπως το PSNR (peak signal-to-noise ratio) και το RMSE (root mean-square error), δεν συσχετίζονται και τόσο καλά με την αντιληπτή ποιότητα. Αυτό συμβαίνει επειδή αυτές οι απλές μετρήσεις δεν λαμβάνουν υπόψη τις συνθήκες κάτω από τις οποίες βλέπει κάποιος το βίντεο όπως η ψυχολογική του κατάσταση ή η φυσική συμπεριφορά του ανθρώπινου οπτικού συστήματος. Ένα γενικό αντικειμενικό μοντέλο πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τις διάφορες πτυχές της επεξεργασίας των οπτικών πληροφοριών στον εγκέφαλο. Αυτές οι πτυχές περιλαμβάνουν:

- την αντίληψη του χρώματος
- τις ιδιότητες ανταπόκρισης των νευρώνων στα οπτικά ερεθίσματα
- χρονικούς και χωρικούς μηχανισμούς
- χρονική και χωρική ευαισθησία αντίθεσης

Διάφορες μήτρες βασισμένες σε ένα σύνθετο χωρικό και χρονικό μοντέλο του ανθρώπινου οπτικού συστήματος (HVS – human visual system) έχουν, επίσης, αναπτυχθεί. Ενώ, όμως, οι μήτρες αυτές είναι πιο γενικές και πιο ακριβείς, η αξιολόγηση με αυτές είναι πιο σύνθετη.

7.3 Τεχνικές κατάτμησης του βίντεο σε στρώματα με διαφορετικούς κωδικοποιητές

Η διάταξη σε στρώματα μπορεί να γίνει μέσα στον κωδικοποιητή – αποκωδικοποιητή ή ως ένα φίλτρο μετεπεξεργασίας στο επίπεδο συστήματος. Στη δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιείται μια απλή τεχνική στην οποία ένα φίλτρο αναλύει τη ροή εξόδου και διαβάζει την επικεφαλίδα (header). Ανάλογα με τον τύπο στρωματοποίησης που απαιτείται, τα πακέτα κατευθύνονται στην κατάλληλη ομάδα πολυμετάδοσης (multicast group). Στον αποκωδικοποιητή, ένας πολυπλέκτης βάζει σε σειρά τα δεδομένα από τις διαφορετικές ομάδες πολυμετάδοσης και στέλνει μια ροή σε έναν αποκωδικοποιητή.

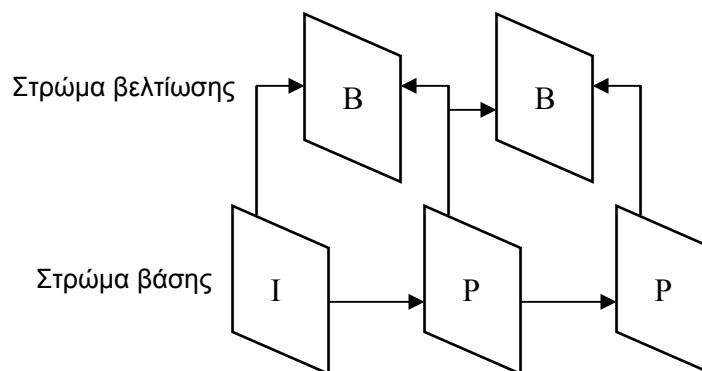
Μερικοί από τους κωδικοποιητές – αποκωδικοποιητές υποστηρίζουν στρωματοποίηση, ενώ κάποιοι άλλοι όχι. Η μετάδοση σε στρώματα δεν υποστηρίζεται από τον κωδικοποιητή H.261 (βλέπε ενότητα 2.2), αλλά μπορεί να γίνει τροποποιώντας τον ή προσθέτοντας ένα φίλτρο μετά από αυτόν. Ενώ το αρχικό H.263 δεν υποστηρίζει στρωματοποίηση, η τροποποιημένη έκδοσή του (H.263+ ή H.263 έκδοση 2) μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 15 στρώματα. Το MPEG-2 υποστηρίζει στρωματοποιημένη αναπαράσταση, αλλά δεν λειτουργεί αποτελεσματικά σε χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, επειδή χρειάζεται πιο ενημερωμένες πληροφορίες μέσα από τα πλαίσια για να επανασυγχρονίσει τον αποκωδικοποιητή όταν παρουσιάζονται λάθη ή χάνονται πακέτα.

Η διάταξη σε στρώματα των δεδομένων του βίντεο μπορεί να γίνει με τη χρήση κάποιας από τις ακόλουθες τέσσερις **τεχνικές στρωματοποίησης** (layering techniques). Η απόδοση των τεχνικών αυτών εξαρτάται από τον κωδικοποιητή – αποκωδικοποιητή που χρησιμοποιείται.

7.3.1 Χρονική στρωματοποίηση

Στη χρονική στρωματοποίηση (temporal layering), τα πλαίσια του βίντεο μπορούν να χωριστούν σε πλαίσια-I (Intra-coded), πλαίσια-P (Predicted) και πλαίσια-B (Bi-directional predicted). Τα πλαίσια-I μπορούν να αποκωδικοποιηθούν ανεξάρτητα, ενώ τα πλαίσια-P απαιτούν τα πλαίσια-I, και τα πλαίσια-B συνήθως απαιτούν και τα πλαίσια-I και τα πλαίσια-B για την αποκωδικοποίηση. Κατά τη συμφόρηση, η σειρά προτίμησης για την απόρριψη είναι πρώτα τα πλαίσια-B, έπειτα τα πλαίσια-P και τέλος τα πλαίσια-I.

Αυτός ο τύπος στρωματοποίησης υλοποιείται ευκολότερα και δεν έχει σχεδόν κανένα κόστος, επειδή μπορεί να γίνει στο επίπεδο μετά τον κωδικοποιητή, διαβάζοντας την επικεφαλίδα του πλαισίου για να προσδιορίσει τον τύπο του. Το πρόβλημα με την απόδοσή του είναι ότι μπορεί να υπάρξουν συνθήκες στις οποίες η απόρριψη πλαισίων-B μπορεί να οδηγήσει σε χειρότερη απόδοση από ότι η απόρριψη των πλαισίων-P [3].



Το πιο πάνω σχήμα δείχνει το παράδειγμα ενός βίντεο κωδικοποιημένου σε δύο στρώματα, όπου τα I-πλαίσια και τα P-πλαίσια συνθέτουν το επίπεδο βάσης, ενώ τα B-πλαίσια συνθέτουν το στρώμα βελτίωσης.

7.3.2 Στρωματοποίηση βασισμένη σε κατάτμηση των δεδομένων

Η κατάτμηση δεδομένων (DP – data partitioning) είναι μια τεχνική που διαιρεί την κωδικοποιημένη τηλεοπτική δυφιοροή (bit stream) σε δύο ή περισσότερα στρώματα, απλώς με το να διαθέσει τα δεδομένα της (δηλ. τις πληροφορίες διανύσματος κίνησης και τους συντελεστές DCT) στα διάφορα στρώματα [8]. Όπως καθορίζεται στα πρότυπα MPEG, σε κάθε κεφαλίδα δεδομένων μπαίνουν Σημεία Προτεραιότητας (PBP – Priority Break Points) για να καθορίσουν την ομαδοποίηση των συντελεστών DCT στα στρώματα. Κατά συνέπεια στην κατάτμηση δεδομένων (DP), τα Σημεία Προτεραιότητας είναι οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία δημιουργίας στρωμάτων. Για να δημιουργηθούν n στρώματα, επιλέγονται $n-1$ Σημεία Προτεραιότητας. Σ' αυτή την τεχνική, η στρωματοποίηση επιτυγχάνεται με το να κατανεμηθούν τα δεδομένα της δυφιοροής σε διαφορετικά επίπεδα. Εκείνα τα διανύσματα κίνησης και εκείνοι οι συντελεστές DCT με την μεγαλύτερη προτεραιότητα μπορούν να κωδικοποιηθούν στο στρώμα βάσης και τα υπόλοιπα στα στρώματα βελτίωσης (enhancement layers). Πρέπει να σημειωθεί ότι η κατάτμηση δεδομένων (DP) εκτελείται στο επίπεδο συστήματος παρά στην ίδια τη διαδικασία κωδικοποίησης. Συνεπώς, μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί και με το προ-κωδικοποιημένο βίντεο.

Μετά από τη χρονική στρωματοποίηση, είναι ευκολότερο να υλοποιηθεί η κατάτμηση των δεδομένων (DP), επειδή απαιτεί μόνο ένα μετεπεξεργαστικό φίλτρο. Η αποδοτικότητα αυτής της μεθόδου στρωματοποίησης είναι υψηλή αφού μόνο οι επικεφαλίδες συμπεριλαμβάνονται σε όλα τα στρώματα. Δυστυχώς, παρέχει χαμηλότερη απόδοση από ότι το SNR (Signal-to-Noise Ratio) και η χωρική στρωματοποίηση. Έχει παρατηρηθεί ότι στο MPEG-2 η ποιότητα της εικόνας αυξάνεται ως τα 4 στρώματα και πέρα από αυτά, δεν υπάρχει μεγάλη καλυτέρευση. Έχει, επίσης, παρατηρηθεί ότι η απόρριψη έστω και ενός μικρού αριθμού πακέτων στο στρώμα βάσης υποβιβάζει σημαντικά την ποιότητα, ενώ η ποιότητα μειώνεται σχεδόν γραμμικά, ανάλογα με τον αριθμό πακέτων που χάνονται στα στρώματα βελτίωσης (enhancement layers). Επομένως, το στρώμα βάσης θα πρέπει να προστατεύεται εις βάρος των στρωμάτων αύξησης.

7.3.3 Στρωματοποίηση βάσει της αναλογίας σήματος προς θόρυβο

Η στρωματοποίηση βάσει της αναλογίας σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) γίνεται στο επίπεδο του κωδικοποιητή, κωδικοποιώντας το βίντεο με χρήση μιας κβαντικής (quantizer) κλίμακας Q_b προκειμένου να παραχθεί ένα στρώμα βάσης, και έπειτα κωδικοποιώντας τη διαφορά μεταξύ του αρχικού βίντεο και του στρώματος βάσης χρησιμοποιώντας μια κβαντική κλίμακα Q_e για τη δημιουργία του στρώματος βελτίωσης (enhancement layer). Πρέπει να σημειωθεί ότι το Q_b είναι μεγαλύτερο από το Q_e . Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται αναδρομικά για περισσότερα από δύο στρώματα, χρησιμοποιώντας πρόσθετες παραμέτρους της κβαντικής κλίμακας [3].

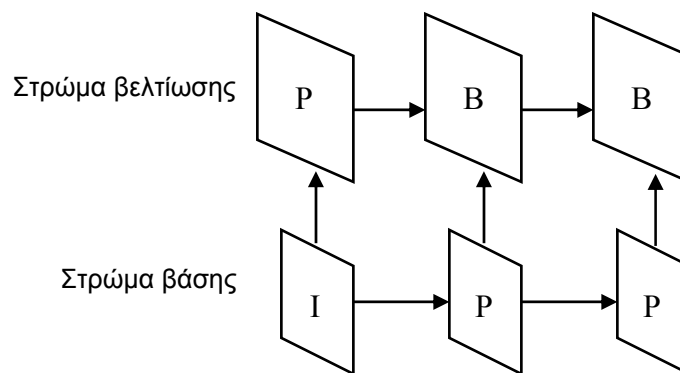
Σε αυτόν τον τύπο στρωματοποίησης η αποδοτικότητα είναι σχετικά χαμηλή, επειδή οι συντελεστές DCT κατανομούνται μεταξύ των στρωμάτων, και οι πληροφορίες για τον κάθε συντελεστή DCT βρίσκονται διασκορπισμένες σε όλα τα στρώματα. Η αποδοτικότητα πέφτει απότομα αν αυξήσουμε έστω και κατά ένα τον αριθμό των στρωμάτων, έτσι δεν

είναι πρακτικό να έχουμε περισσότερα από 2 στρώματα. Για τη στρωματοποίηση SNR, η ποιότητα μειώνεται γραμμικά ανάλογα με το ρυθμό απώλειας των πακέτων στο στρώμα βελτίωσης και πέφτει ραγδαία όταν η απώλεια δεδομένων εμφανίζεται στο στρώμα βάσης.

7.3.4 Χωρική στρωματοποίηση

Η χωρική στρωματοποίηση (spatial layering) παρέχει την καλύτερη απόδοση, ειδικά όταν οι συνθήκες του δικτύου δεν είναι καλές, αλλά, συνάμα, έχει και την υψηλότερη πολυπλοκότητα υλοποίησης. Η αντιληπτή ποιότητα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά ανάλογα με την αύξηση του αριθμού των στρωμάτων, όμως μειώνεται αντίστοιχα η αποδοτικότητα.

Η χωρική στρωματοποίηση είναι ιδιαίτερα επιθυμητή δεδομένου ότι μπορεί να αποκωδικοποιήσει το βίντεο σε διαφορετικές χωρικές αναλύσεις, ικανοποιώντας έτσι μια σημαντική πτυχή της ετερογένειας ότι τα διάφορα τερματικά έχουν διαφορετικές δυνατότητες απεικόνισης. Για παράδειγμα, η μέγιστη δυνατή ανάλυση μιας φορητής συσκευής μπορεί να είναι αρκετά μικρότερη από την πλήρη ανάλυση του κωδικοποιημένου βίντεο. Σε αυτήν την περίπτωση η περιορισμένη ανάλυση υπαγορεύει τον μέγιστο αριθμό χωρικών στρωμάτων που πρέπει να ληφθούν.



Στο πιο πάνω σχήμα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μιας χωρικής στρωματοποίησης βίντεο που είναι κωδικοποιημένη σε δύο στρώματα. Όταν ο αποκωδικοποιητής αποκωδικοποιεί μόνο το στρώμα βάσης για ένα πλαίσιο, μεγαλώνει τις διαστάσεις του για να το παρουσιάσει σε πλήρες μέγεθος, έχοντας όμως μειωμένη χωρική ανάλυση. Όταν ο αποκωδικοποιητής αποκωδικοποιεί και το στρώμα βάσης και το στρώμα βελτίωσης μπορεί να παρουσιάσει το πλαίσιο στο πλήρες μέγεθός του και με πλήρη χωρική ανάλυση. Για περισσότερη αποδοτικότητα κωδικοποίησης, ο αλγόριθμος κωδικοποίησης του στρώματος βελτίωσης μπορεί να χρησιμοποιήσει χωρική πρόβλεψη από το αντίστοιχο πλαίσιο του στρώματος βάσης ή/και χρονική πρόβλεψη από τα προηγούμενα πλαίσια του στρώματος βελτίωσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα.

7.3.5 Στρωματοποίηση περιεχομένου του βίντεο

Η στρωματοποίηση βίντεο που βασίζεται στο περιεχόμενό του (content scalability) προέρχεται άμεσα από τη δυνατότητα που έχει το πρότυπο MPEG-4, να κωδικοποιήσει και να αποκωδικοποιήσει τα διαφορετικά οπτικοακουστικά αντικείμενα ανεξάρτητα. Τα βασικά αντικείμενα του βίντεο μπορούν να συμπεριληφθούν στο στρώμα βάσης, και τα αντικείμενα που δεν είναι κρίσιμα για την κατανόηση του βίντεο μπορούν να συμπεριληφθούν στα διάφορα στρώματα βελτίωσης. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια μιας βιντεοτηλεδιάσκεψης, το κεφάλι του ομιλητή μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί το στρώμα βάσης, ενώ το υπόβαθρο να θεωρηθεί ότι αποτελεί το στρώμα βελτίωσης. Πρέπει να σημειώσουμε ότι η συγκεκριμένη στρωματοποίηση απαιτεί τα αντικείμενα που ανήκουν σε διαφορετικά στρώματα να κωδικοποιούνται χωριστά.

7.4 Τεχνικές ψηφιακής συμπίεσης

Οι διάφορες τεχνικές ψηφιακής συμπίεσης [23] που μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορες εφαρμογές μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

7.4.1 Πρόβλεψη

Είναι μια διαδικασία με την οποία δημιουργείται ένα σύνολο προβλεπόμενων τιμών (συχνά βασιζόμενες εν μέρει σε κάποια ένδειξη που στάλθηκε από έναν κωδικοποιητή) που χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν τις τιμές των εισερχόμενων δειγμάτων βίντεο, έτσι ώστε οι πραγματικές τιμές που χρειάζονται να προκύψουν μόνο από τις, ευκολότερα κωδικοποιούμενες, διαφορές από τις προβλεφθείσες τιμές. Αυτές οι διαφορές καλούνται κατάλοιπα (residual values).

7.4.2 Μετασχηματισμός

Ο μετασχηματισμός (transformation) είναι μια διαδικασία (καλούμενη, επίσης, και ως αποσύνθεση υποζώνης – subband decomposition) που είναι στενά συνδεδεμένη με την πρόβλεψη, κατά την οποία διαμορφώνεται ένα νέο σύνολο δειγμάτων από ένα συνδυασμό εισερχόμενων δειγμάτων, χρησιμοποιώντας συνήθως ένα γραμμικό συνδυασμό. Απλά μιλώντας, ένας μετασχηματισμός μπορεί να αποτρέψει την ανάγκη να αναπαριστάνονται επανειλημμένα παρόμοιες τιμές και μπορεί να πιάσει μόνο την «ουσία» του εισερχόμενου σήματος. Ένα χαρακτηριστικό όφελος του μετασχηματισμού είναι η μείωση των εισερχόμενων δειγμάτων, αφού τα πιο συσχετισμένα μέρη των εισερχόμενων δειγμάτων συγκεντρώνονται σε ένα μικρό αριθμό μεταβλητών.

7.4.3 Κβαντοποίηση

Η κβαντοποίηση (quantization) είναι μια διαδικασία κατά την οποία η ακρίβεια που χρησιμοποιείται για την αντιπροσώπευση μιας τιμής δείγματος (ή μιας ομάδας από τιμές δειγμάτων) μειώνεται, προκειμένου να μειωθεί και η ποσότητα πληροφοριών που απαιτείται για την κωδικοποίηση. Αυτή η διαδικασία είναι ανάλογη με έννοιες όπως η στρωγγυλοποίηση των λιγότερο σημαντικών ψηφίων της τιμής μιας στατιστικής.

7.4.4 Κωδικοποίηση εντροπίας

Η κωδικοποίηση εντροπίας (entropy encoding) είναι μια διαδικασία κατά την οποία αναπαριστάνονται τα σύμβολα της πηγής που έχουν διακριτές τιμές, με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούνται οι σχετικές πιθανότητες για τις πιθανές τιμές που μπορεί να πάρει το κάθε σύμβολο. Ένας γνωστός τύπος κώδικα που χρησιμοποιεί εντροπία είναι ο κώδικας μεταβλητού μήκους (VLC – Variable Length Code), κατά τον οποίο δημιουργείται ένας δένδροειδής πίνακας που χρησιμοποιεί μικρά δυαδικά αλφαριθμητικά για την αναπαράσταση των τιμών που είναι έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να εμφανιστούν και μεγαλύτερα δυαδικά αλφαριθμητικά για την αναπαράσταση των τιμών των συμβόλων που

έχουν λιγότερες πιθανότητες να εμφανιστούν. Η πιο γνωστή μέθοδος VLC είναι η γνωστή μέθοδος κωδικοποίησης Huffman, η οποία παράγει ένα βέλτιστο VLC. Μια κάπως λιγότερο γνωστή μέθοδος κωδικοποίησης εντροπίας που τυπικά μπορεί να είναι περισσότερο βέλτιστη από την κωδικοποίηση VLC και μπορεί, επίσης, να σχεδιαστεί ευκολότερα ώστε να προσαρμόζεται σε ποικιλία συμβόλων, είναι μια νεότερη τεχνική γνωστή ως αριθμητική κωδικοποίηση.

8 Η δική μας προσέγγιση

Σ' αυτό το μέρος της μελέτης μας γίνεται διεξοδική περιγραφή του αλγορίθμου που υλοποιήσαμε ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη λήψη των αποφάσεων. Ο αλγόριθμος είναι υπεύθυνος να ρυθμίζει τις παραμέτρους κωδικοποίησης, προκειμένου να ταιριάξει ο τηλεοπτικός ρυθμός παραγόμενου βίντεο με το τρέχον διαθέσιμο εύρος ζώνης της σύνδεσης. Στην ανάλυση που ακολουθεί επεξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους λαμβάνονται οι συγκεκριμένες αποφάσεις σε κάθε βήμα του αλγορίθμου και έπειτα περιγράφονται και σχολιάζονται τα διάφορα σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν για να αποδειχθεί η ορθότητά του.

8.1 Στόχος

Ο στόχος της δικής μας υλοποίησης είναι η διατήρηση της αντιληπτής ποιότητας του βίντεο στο χρήστη. Είναι ένας δύσκολος στόχος, διότι υπεισέρχονται πολλοί απρόβλεπτοι παράγοντες που επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία του συστήματος και οφείλονται κυρίως στο δίκτυο. Εντούτοις, η ποιότητα του βίντεο πρέπει να διαφυλάσσεται παρά όλες αυτές τις αδιευκρίνιστες συνθήκες. Έτσι, ο αλγόριθμός μας πρέπει να πραγματοποιήσει πολλούς ελέγχους για να λάβει τις σωστές αποφάσεις σύμφωνα με την κατάσταση που προκύπτει.

Αυτές οι απρόβλεπτες συνθήκες που παρουσιάζονται ανά πάσα στιγμή μέσα στο δίκτυο γνωστοποιούνται στον αλγόριθμό μας μέσω της ανατροφοδότησης (feedback). Οπότε, στόχος του αλγορίθμου είναι να προσαρμόσει τις παραμέτρους του βίντεο, ώστε η βιντεοροή να μεταδοθεί με τη μέγιστη δυνατή ποιότητα.

8.2 Τι χρησιμοποιήθηκε στην υλοποίησή μας

Πιο κάτω παρουσιάζεται η υποδομή πάνω στην οποία στηρίχθηκε η υλοποίησή μας για τον «αλγόριθμο βέλτιστης προσαρμογής».

8.2.1 Πλατφόρμα

Το λειτουργικό σύστημα στο οποίο έγινε η υλοποίησή μας είναι το Linux και η γραφή του κώδικα έγινε σε C++ σε συνδυασμό με την γλώσσα script ονόματι TCL [34]. Σ' αυτή την πλατφόρμα χρησιμοποιήσαμε τον προσομοιωτή δικτύου NS2 (Network Simulator 2) για να φτιάξουμε την τοπολογία του δικτύου μας. Μέσα από αυτή την τοπολογία, η οποία παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα, έγινε η προσομοίωση και δοκιμάστηκε ο αλγόριθμος.

Ένα άλλο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε πάνω από την πιο πάνω πλατφόρμα είναι αυτό του Goddard Streaming Media, το οποίο προσομοιάζει τη μετάδοση βιντεοροών μέσα από δίκτυα πακέτων. Το σύστημα αυτό περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

8.2.2 Το σύστημα Goddard Streaming Media

Το σύστημα Goddard Streaming Media είναι ένα λογισμικό που προσομοιάζει τη μετάδοση βιντεοροών μέσα από δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε στο πανεπιστήμιο WPI [14] και βασίζεται στον τρόπο μετάδοσης βιντεοροών σε πραγματικά δίκτυα. Αποτελείται από ένα εξυπηρετητή ο οποίος αποστέλλει τη βιντεοροή σε ένα ή περισσότερους παραλήπτες. Η μετάδοση των βιντεοροών από τον εξυπηρετητή γίνεται με χρήση στρωμάτων (layers).

Ο εξυπηρετητής Goddard υποστηρίζει πολλαπλά στρώματα κωδικοποιημένου βίντεο τα οποία δημιουργούνται σύμφωνα με τις επιθυμίες του χρήστη, θέτοντας αρχικές τιμές στις παραμέτρους `bitrate_#_`. Ο πιο κάτω πίνακας δείχνει ένα δείγμα ρυθμίσεων των παραμέτρων αυτών. Εδώ φαίνεται ότι το σύστημα χρησιμοποιεί 5 στρώματα κωδικοποίησης του βίντεο, με μικρότερο αυτό των 56 kbps και μεγαλύτερο αυτό των 768 kbps.

Παράμετρος	Στρώμα	Bitrate (σε bps)
<code>bitrate_0_</code>	0	56000
<code>bitrate_1_</code>	1	128000
<code>bitrate_2_</code>	2	256000
<code>bitrate_3_</code>	3	512000
<code>bitrate_4_</code>	4	768000

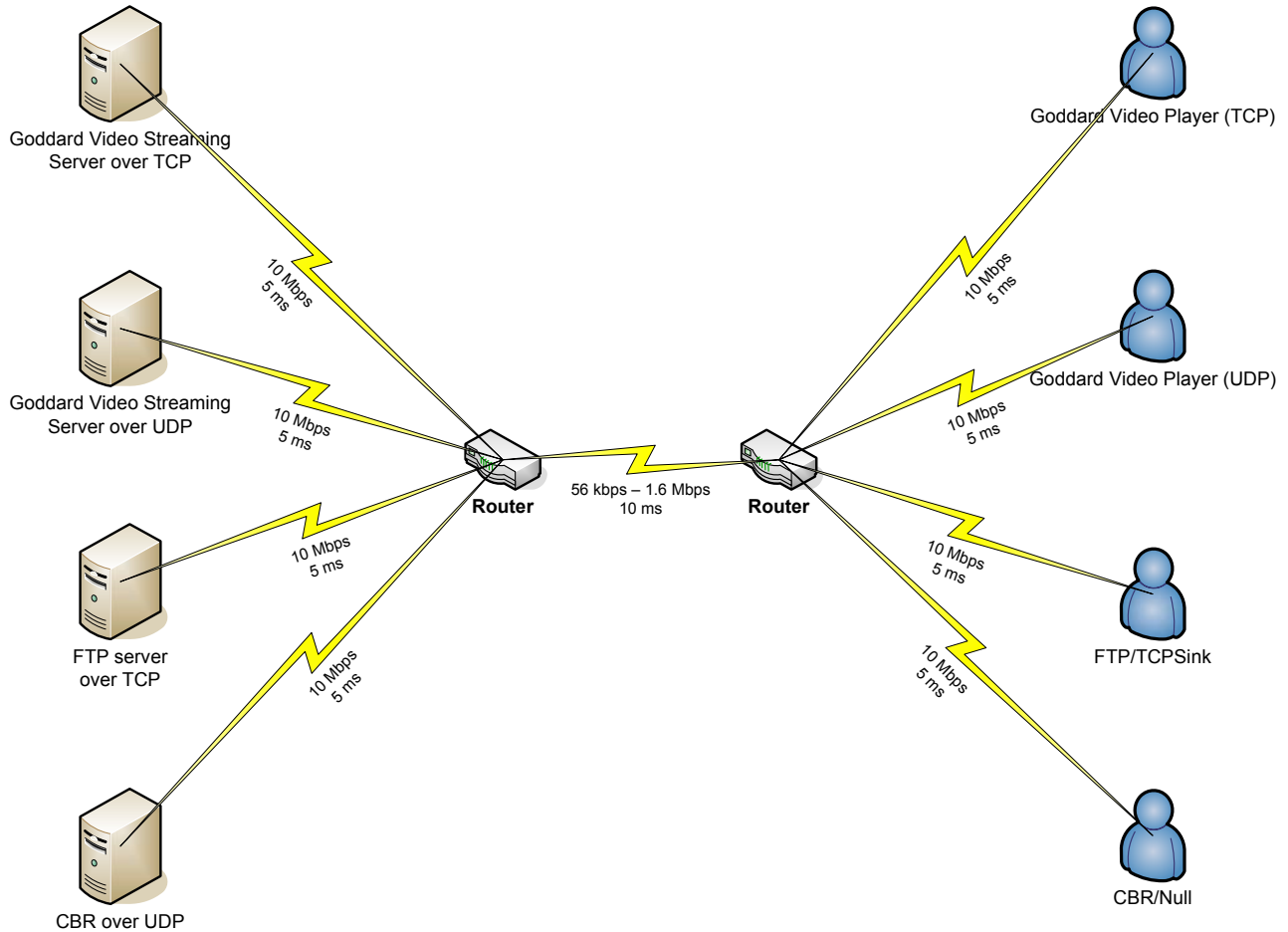
Για να επιλεγεί σε ποιο από τα πιο πάνω επίπεδα θα γίνει η βιντεοροή, το σύστημα υπολογίζει πρώτα το εύρος ζώνης χρησιμοποιώντας ζεύγη πακέτων (packet pairs). Επίσης, κατά τη διάρκεια της βιντεοροής το σύστημα ελέγχει αν πρέπει να αλλάξει στρώμα μετάδοσης, ανάλογα με το αν υπάρχει απώλεια πακέτων. Επίσης, έχουμε προσθέσει κώδικα στο σύστημα για να μπορεί να αλλάξει στρώμα με βάση την ανατροφοδότηση που θα πάρει από το δίκτυο και από το χρήστη.

Ο ρυθμός μετάδοσης των πλαισίων (fps) μετά από τις αλλαγές μας υπολογίζεται με βάση την επιλογή του χρήστη, ή αν ο χρήστης είναι αδιάφορος για αυτό, ο ρυθμός μετάδοσης υπολογίζεται με βάση το πρότυπο χρωματισμού: 30 fps για NSTC και 25 fps για PAL.

Η αρχική έκδοση του συστήματος goddard είναι γραμμένη έτσι ώστε σε κάθε επίπεδο να στέλνονται πλαίσια σταθερού μεγέθους (CBR) ανάλογα με το ποιο στρώμα επιλέγηκε. Επειδή, όμως, στόχος του δικού μας αλγόριθμου είναι η βελτιστοποίηση της ποιότητας, τότε η μετάδοση του βίντεο πρέπει να γίνει χρησιμοποιώντας μεταβλητό μέγεθος πλαισίων (VBR). Έτσι έχουμε αλλάξει το σύστημα ώστε να διαβάζει από ένα αρχείο το μέγεθος του κάθε πλαισίου που πρέπει να αποσταλεί (βλέπε παράρτημα). Με αυτό τον τρόπο το σύστημά μας μπορεί να κάνει προσομοίωση χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα βίντεο.

8.3 Η τοπολογία του δικτύου

Το πιο κάτω διάγραμμα δείχνει τη συνδεσμολογία του δικτύου που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση. Για να είναι το σενάριό μας πιο ρεαλιστικό, εκτός από τη μετάδοση βίντεο μέσω TCP και UDP, προστέθηκε και ένας εξυπηρετητής FTP, καθώς και μια σύνδεση μετάδοσης σταθερού ρυθμού (CBR). Έτσι, στη σύνδεση μεταξύ των δύο δρομολογητών τοποθετούμε αυξημένη κίνηση για να ελέγξουμε την αντίδραση του αλγορίθμου μας σε περιπτώσεις απώλειας ή καθυστέρησης των πακέτων.



8.4 Ο αλγόριθμος βέλτιστης προσαρμογής

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια αναλυτική περιγραφή των παραμέτρων που μπορεί να ρυθμίσει ο χρήστης και έπειτα περιγράφεται ο αλγόριθμος και τα κριτήρια λήψης της απόφασής του.

8.4.1 Παράμετροι

Οι παράμετροι που μπορεί να ρυθμίσει ο χρήστης παρουσιάζονται πιο κάτω, καθώς και οι πιθανές τιμές που μπορεί να πάρει η κάθε μια. Μέσω των παραμέτρων αυτών ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να υποβάλει στον αλγόριθμο τις επιθυμίες του, όπως για παράδειγμα αν θέλει να βλέπει εικόνα με μεγαλύτερες διαστάσεις και μικρότερη ποιότητα, ή αν θέλει να βλέπει μικρότερη εικόνα με βελτιωμένη ποιότητα.

Παράμετρος	Περιγραφή								
max_scale_ = 5	Αντιπροσωπεύει το μέγιστο πλήθος στρωμάτων που υποστηρίζει ο εξυπηρετητής, π.χ. 5								
bitrate_0_ = 56000 bitrate_1_ = 128000 bitrate_2_ = 256000 bitrate_3_ = 512000 bitrate_4_ = 768000	Αντιπροσωπεύουν το bitrate για τα διάφορα επίπεδα που υποστηρίζει ο εξυπηρετητής. Η τιμή που δίνεται σε κάθε παράμετρο πρέπει να είναι σε bits per second (bps)								
colour_standard_NTSC_PAL_ = 0	Δίνει το πρότυπο που θα χρησιμοποιηθεί. Αν δοθεί η τιμή 0 (μηδέν), τότε σημαίνει ότι θα χρησιμοποιηθεί το αμερικάνικο πρότυπο NTSC στο οποίο χρησιμοποιούνται όχι περισσότερα από 30 πλαίσια ανά δευτερόλεπτο (fps), ενώ αν δοθεί η τιμή 1, τότε σημαίνει ότι θα χρησιμοποιηθεί το πρότυπο PAL στο οποίο χρησιμοποιούνται όχι περισσότερα από 25 fps.								
fps_ = 10	Είναι ο αριθμός των πλαισίων που θέλει ο χρήστης να χρησιμοποιηθεί για την κωδικοποίηση του βίντεο.								
aspect_ratio_ = 1.33333333	Δίνει το aspect ratio της εικόνας. Οι τιμές που μπορεί να πάρει η παράμετρος αυτή πρέπει να δίνονται σε δεκαδική μορφή, όπως για παράδειγμα: 1.33333333 για aspect ratio 4:3 1.77777777 για aspect ratio 16:9								
frm_width_ = 180	Αφορά τις διαστάσεις της κάθε εικόνας (πλαίσιου) του βίντεο σε pixels. Η συγκεκριμένη παράμετρος δίνει το πλάτος του πλαισίου και ο αλγόριθμος υπολογίζει το ύψος του ανάλογα με το aspect ratio που ζητήθηκε.								
bpp_quality_ = 0.2	Η ποιότητα του πλαισίου. Μπορεί να πάρει δεκαδικές τιμές ως εξής [9]: <table style="margin-left: 40px;"> <tr> <td>>=0.225</td> <td>Πολύ καλή ποιότητα</td> </tr> <tr> <td>>=0.175</td> <td>Καλή ποιότητα</td> </tr> <tr> <td>>=0.125</td> <td>Μέτρια ποιότητα</td> </tr> <tr> <td>< 0.125</td> <td>Χαμηλή ποιότητα</td> </tr> </table>	>=0.225	Πολύ καλή ποιότητα	>=0.175	Καλή ποιότητα	>=0.125	Μέτρια ποιότητα	< 0.125	Χαμηλή ποιότητα
>=0.225	Πολύ καλή ποιότητα								
>=0.175	Καλή ποιότητα								
>=0.125	Μέτρια ποιότητα								
< 0.125	Χαμηλή ποιότητα								
max_bitrate_ = 56000	** Αντιπροσωπεύει το εύρος ζώνης της σύνδεσης του χρήστη. Η τιμή που δίνεται στην παράμετρο αυτή πρέπει να είναι σε bits per second (bps). Αν για παράδειγμα ο χρήστης είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο με modem των 56kbrps, τότε η τιμή που πρέπει να δοθεί στην παράμετρο αυτή είναι 56000. Αν δοθεί η τιμή 0 (μηδέν), αυτό σημαίνει ότι η παράμετρος δεν θα χρησιμοποιηθεί.								
avail_bandwidth_ = 56000	** Είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε bits per second (bps). Αν δοθεί η τιμή 0 (μηδέν), αυτό σημαίνει ότι η παράμετρος δεν θα χρησιμοποιηθεί.								

** Αυτή η παράμετρος μπορεί να αλλάζει τιμή δυναμικά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Οι πιο πάνω τιμές αντιπροσωπεύουν απλώς την αρχική τιμή.

8.4.2 Περιγραφή του αλγόριθμου

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να κάνει ο χρήστης όταν πρόκειται να χρησιμοποιήσει το σύστημα είναι να ρυθμίσει τις παραμέτρους που αναφέρονται πιο πάνω. Στις περισσότερες από τις παραμέτρους, η ρύθμιση που φαίνεται εδώ αποτελεί απλώς την αρχική τους τιμή η οποία μπορεί να αλλάξει δυναμικά κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Αφού το σενάριο της προσομοίωσης είναι γραμμένο σε TCL (γλώσσα script) [34], μπορεί εύκολα ο χρήστης να επέλθει στο script αυτό και να ρυθμίσει τις τιμές που θέλει να πάρουν οι παράμετροι. Μπορεί, επίσης, αν θέλει να θέσει τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες θα γίνει η αλλαγή των παραμέτρων. Αυτές οι χρονικές στιγμές μπορεί να καθοριστούν αυστηρά και να έχουν συγκεκριμένο χρονικό σημείο που θα ενεργοποιηθούν, ή να ενεργοποιούνται σε τυχαία χρονικά διαστήματα που να ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη κατανομή (π.χ. ομοιόμορφη, εκθετική, Poisson).

Ο χρήστης, μέσα από τη ρύθμιση των παραμέτρων, μπορεί να καθορίσει από μόνος του το πλήθος των στρωμάτων που θέλει να χρησιμοποιούνται στην προσομοίωσή του για τη μετάδοση του βίντεο και φυσικά να καθορίσει το bitrate που θα χρησιμοποιείται στο κάθε στρώμα (βλέπε παραμέτρους «max_scale_» και «bitrate_#_» αντίστοιχα).

Όταν ξεκινά η προσομοίωση, ο εξυπηρετητής αποστέλλει στον παραλήπτη μια λίστα με όλα τα δυνατά επίπεδα που μπορεί να υποστηρίξει. Αυτό γίνεται διότι είναι ο παραλήπτης που αποφασίζει για την κλίμακα στην οποία θέλει να του αποσταλεί το βίντεο. Έπειτα διαβάζονται οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων και φυλάγονται στη μνήμη. Ο αλγόριθμος είναι ικανός να λειτουργεί σωστά και να λαμβάνει τις αποφάσεις του ακόμα και όταν ο χρήστης δεν δώσει τιμές στις παραμέτρους. Σε τέτοια περίπτωση γίνονται διάφορες υποθέσεις και σενάρια για τις πιθανές τιμές που θα μπορούσαν να πάρουν οι παράμετροι και ανάλογα εκτελούνται οι κατάλληλες ενέργειες.

Κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης, στον παραλήπτη ξεκινά και ένα χρονόμετρο, με βάση το οποίο ελέγχεται κάθε ένα δευτερόλεπτο αν υπήρξε αλλαγή στο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Αν το εύρος ζώνης έχει την ίδια τιμή με αυτή που είχε στο προηγούμενο δευτερόλεπτο, τότε δεν χρειάζεται να γίνει καμιά προσαρμογή, ούτε να ληφθεί καμιά νέα απόφαση για πιθανή αλλαγή στην κλίμακα και έτσι η προσομοίωση συνεχίζει κανονικά βασισμένη στους προηγούμενους ρυθμούς αποστολής των πλαισίων του βίντεο. Αν βέβαια, έχουμε απώλεια πακέτων μεγαλύτερη από ένα όριο (βλέπε παράμετρο `downscale_frame_loss_rate`) και έχουν περάσει τουλάχιστον μερικά δευτερόλεπτα (βλέπε παράμετρο `loss_monitor_interval`) από την προηγούμενη φορά που έγινε αλλαγή κλίμακας, τότε η μετάδοση θα κατέβει κατά ένα στρώμα [35].

Στην περίπτωση που το διαθέσιμο εύρος ζώνης έχει νέα τιμή, είτε μικρότερη είτε μεγαλύτερη, τότε ο αλγόριθμός μας αναλαμβάνει να κάνει τους απαραίτητους ελέγχους (που αναφέρονται πιο κάτω) και να αποφασίσει σε ποια κλίμακα πρέπει να αποστέλλονται τα πλαίσια του βίντεο από εδώ και πέρα και, επίσης, με ποιο ρυθμό, ποιο μέγεθος εικόνας και ποια ποιότητα εικόνας, ώστε να αφήνει ικανοποιημένο το χρήστη. Βέβαια, η απόφαση

αυτή λαμβάνεται πάντα με γνώμονα τις επιθυμίες του χρήστη, δηλαδή τις τιμές που έδωσε στις παραμέτρους.

Με δεδομένο το διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου, ο αλγόριθμος πρέπει να βρει ποιο είναι το εύρος ζώνης που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο χρήστης αφού λάβει υπόψη του τη σύνδεση που χρησιμοποιεί και, επίσης, τις δυνατότητες του εξυπηρετητή. Αυτοί οι τρεις παράγοντες είναι αλληλεξαρτώμενοι και ο καθένας περιορίζει τους άλλους δύο. Έτσι, το εύρος ζώνης που τελικά θα επιτρέψει ο αλγόριθμός μας να χρησιμοποιηθεί είναι η μικρότερη τιμή μεταξύ των τριών, δηλαδή μεταξύ του διαθέσιμου εύρους ζώνης του δικτύου, του εύρους ζώνης της σύνδεσης και της μέγιστης κλίμακας που μπορεί να υποστηρίξει ο εξυπηρετητής. Αυτή η σύγκριση είναι η πρώτη που γίνεται μέσα στον αλγόριθμο, έτσι ώστε οι αποφάσεις που θα ληφθούν από το σημείο αυτό και πέρα να υπόκεινται σ' αυτόν το βασικό περιορισμό. Επίσης, εάν ο μέγιστος δυνατός ρυθμός μετάδοσης που θα επιλεγεί είναι μικρότερος από το μικρότερο επίπεδο το οποίο υποστηρίζει ο εξυπηρετητής, τότε σημαίνει ότι η μετάδοση είναι αδύνατη, και έτσι η βιντεοροή τερματίζει, ενημερώνοντας, βέβαια, το χρήστη με το ανάλογο μήνυμα.

Αφού παρθεί η απόφαση για το ποιος θα είναι ο μέγιστος δυνατός ρυθμός μετάδοσης, ο αλγόριθμος δημιουργεί στη μνήμη του ένα πίνακα με τους διάφορους πιθανούς συνδυασμούς μεταξύ των παραμέτρων: πλαίσια ανά δευτερόλεπτο (frames per second – fps) και δυφία ανά εικονοστοιχείο (bits per pixel – bpp). Αυτός ο πίνακας δημιουργείται χρησιμοποιώντας κάποιες βασικές γνώσεις σχετικά με τα πρότυπα χρωματισμού NTSC και PAL. Γνωρίζουμε ότι στο πρότυπο χρωματισμού NTSC ο μέγιστος αριθμός πλαισίων που αποστέλλονται είναι τα 30 (κατ' ακρίβεια τα 29.97), ενώ απ' εκεί και πέρα δεν έχουμε αντιληπτή βελτίωση στην ποιότητα του βίντεο. Ο αντίστοιχος μέγιστος αριθμός πλαισίων για το πρότυπο χρωματισμού PAL είναι τα 25 fps. Γνωρίζουμε, επίσης, ότι αν η παράμετρος bpp έχει τιμή τουλάχιστον 0.225 [9], τότε η ποιότητα της εικόνας (ή του πλαισίου) του βίντεο είναι πάρα πολύ καλή. Άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι αν έχουμε 30 fps σε συνδυασμό με 0.225 bpp (ή περισσότερα), τότε η ποιότητα του βίντεο που παίρνουμε είναι πάρα πολύ καλή. Άρα πολλαπλασιάζοντας τις δύο τιμές μεταξύ τους, το γινόμενο που προκύπτει (6.75) είναι μια σχετική ενδεικτική τιμή για τη μέγιστη ποιότητα που μπορούμε να έχουμε στο βίντεο. Βέβαια, αυτό το γινόμενο δεν αποτελεί αυστηρά τη μέγιστη ποιότητα, διότι μπορεί να έχουμε μεγαλύτερες τιμές bpp από το 0.225, οι οποίες βελτιώνουν την ποιότητα. Όμως, αφού η τιμή των 0.225 bpp μας δίνει πολύ καλή ποιότητα, την αποδεχόμαστε ως μέτρο σύγκρισης, χωρίς να ψάχνουμε το συνδυασμό για τη βέλτιστη ποιότητα. Προσπαθώντας να κάνουμε αναγωγή στο 100 του γινομένου που προέκυψε, το πολλαπλασιάζουμε με τον αριθμό 14.81 (αγνοώντας τα δεκαδικά ψηφία), παίρνοντας έτσι τον αριθμό 94.5. Αυτός ο αριθμός μπορούμε να πούμε ότι αντιπροσωπεύει τη σχετική ποσοστιαία αντιληπτή ποιότητα του βίντεο, ή το Mean Opinion Score (MOS). Τα δεκαδικά ψηφία αγνοήθηκαν επίτηδες για το λόγο που αναφέρθηκε και πιο πριν, δηλαδή για να έχουμε περιθώριο βελτίωσης όταν η τιμή του bpp που θα δοθεί είναι μεγαλύτερη από το 0.225.

Η λογική που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο χρησιμοποιείται και με τις υπόλοιπες τιμές κάνοντας συνδυασμούς μεταξύ τους. Τα γινόμενα που προκύπτουν πολλαπλασιάζονται με τον αριθμό 14 ώστε να μετατραπούν στην αντίστοιχη σχετική ποσοστιαία τιμή. Έτσι δημιουργείται ο πιο κάτω «πίνακας ποιότητας» στον παραλήπτη, στον οποίο γίνεται συχνά αναφορά, όταν ο αλγόριθμος θέλει να λάβει κάποια απόφαση που αφορά την ποιότητα, συναρτήσει των παραμέτρων fps και bpp. Είναι σημαντικό να

αναφέρουμε ότι αφού δημιουργηθεί ο πίνακας ταξινομείται κατά φθίνουσα σειρά με βάση το γινόμενο $\text{fps} \times \text{bpp} \times 14$. Με αυτό τον τρόπο ο αλγόριθμος γνωρίζει ότι οι πρώτες θέσεις του πίνακα αντιπροσωπεύουν τους συνδυασμούς που δίνουν καλύτερη ποιότητα, ενώ όσο προχωρά προς τις τελευταίες θέσεις του η ποιότητα μειώνεται κλιμακωτά.

Πίνακας ποιότητας			MOS
$\text{fps} \times \text{bpp} \times 14$	fps	bpp	
94.5	30	0.225	Ασύλληπτη ποιότητα
84	30	0.2	
78.75	25	0.225	Καλή ποιότητα, χωρίς ενοχλητικά στοιχεία
73.5	30	0.175	
70	25	0.2	
63	20	0.225	
61.25	25	0.175	
56	20	0.2	Μέτρια ποιότητα, με ελαφρώς ενοχλητική εικόνα
52.5	30	0.125	
49	20	0.175	
47.25	15	0.225	
43.75	25	0.125	
42	15	0.2	Φτωχή ποιότητα με ενοχλητική εικόνα
42	30	0.1	
36.75	15	0.175	
35	25	0.1	
35	20	0.125	
31.5	10	0.225	
28	10	0.2	
28	20	0.1	
26.25	15	0.125	
24.5	10	0.175	
21	15	0.1	Κακή ποιότητα με πολύ ενοχλητική εικόνα
17.5	10	0.125	
14	10	0.1	

Θα μπορούσαμε, ίσως, να αντιστοιχήσουμε το γινόμενο της πρώτης στήλης ($\text{fps} \times \text{bpp} \times 14$) με τις μετρήσεις για το Mean Opinion Score (MOS) που δίνονται στο [36] και φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα. Σύμφωνα με την αντιστοιχία αυτή, στην τελευταία στήλη του πίνακα ποιότητας φαίνεται η περιγραφή της ποιότητας που αντιστοιχεί στον κάθε ένα συνδυασμό.

PSNR (dB)	MOS
> 37	5 – Ασύλληπτη
31 – 37	4 – Καλή
25 – 31	3 – Μέτρια
20 – 25	2 – Φτωχή
< 20	1 – Κακή

Έπειτα από τη δημιουργία και την ταξινόμηση του πίνακα ποιότητας, ο αλγόριθμός μας ξεκινά να ελέγχει τις τιμές που έχουν οι παράμετροι. Όσες από τις παραμέτρους έχουν τιμές, τότε σημαίνει ότι πρέπει να έχουν προτεραιότητα στον αλγόριθμο, αφού εκφράζουν

τις επιθυμίες του χρήστη, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι που δεν έχουν τιμή τίθενται σε δευτερεύον ρόλο και έχουν μειωμένη βαρύτητα ως προς την λήψη της απόφασης.

Πρώτη από όλες τις παραμέτρους ελέγχεται αυτή που αφορά το μέγεθος της εικόνας (του πλαισίου) του βίντεο, και ονομάζεται «`frm_width`» (frame width). Σε αυτή την παράμετρο ελέγχεται κατ' αρχή αν έχει ή δεν έχει τιμή και ξεχωρίζονται έτσι οι δύο περιπτώσεις. Στην κάθε περίπτωση ο αλγόριθμος κάνει διαφορετικές ενέργειες, έχοντας ως τελικό στόχο να λάβει τη βέλτιστη απόφαση για τις ρυθμίσεις των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση της βιντεοροής. Αυτή η παράμετρος θεωρείται ως πολύ βασική (γι' αυτό άλλωστε ελέγχεται και πρώτη), διότι δίνει τον περιορισμό του χρήστη ως προς το μέγεθος του πλαισίου που θα βλέπει. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μπορεί να έχουμε χρήστες που θέλουν να δουν το βίντεο από το κινητό τηλέφωνό τους, τότε πρέπει να τους εξασφαλίσουμε εγγυήσεις ότι δεν θα τους αποσταλεί βίντεο που να έχει μέγεθος πλαισίου μεγαλύτερο από την οθόνη του κινητού τηλεφώνου τους.

Στο σημείο αυτό, ίσως ο αναγνώστης να διερωτάται για το ποιο είναι το πραγματικό μέγεθος του πλαισίου του βίντεο που μεταδίδεται, αφού γνωρίζουμε μόνο μια διάστασή του που είναι το πλάτος του. Πώς θα υπολογίσουμε το ύψος του πλαισίου; Η απάντηση στην ερώτηση αυτή είναι πολύ απλή αν έχουμε στη διάθεσή μας την εξίσωση που δίνεται στο [9] και η οποία δείχνει τη σχέση που συνδέει τις διάφορες παραμέτρους που αφορούν μια βιντεοροή. Την εξίσωση αυτή μπορούμε να τη λύσουμε ως προς οποιονδήποτε παράγοντα που πιθανόν να μας είναι άγνωστος. Συνοψίζοντας, λοιπόν, ισχύουν οι πιο κάτω σχέσεις:

$$BPP = \text{BitRate} \times 1/\text{FPS} \times 1/(\text{W} \times \text{H}) \quad (1)$$

από την οποία προκύπτει ότι:

$$\text{BitRate} = BPP \times \text{FPS} \times \text{W} \times \text{H} \quad (2)$$

$$\text{W} \times \text{H} = \text{BitRate} / (BPP \times \text{FPS}) \quad (3)$$

$$\text{FPS} = \text{BitRate} / (BPP \times \text{W} \times \text{H}) \quad (4)$$

Επίσης, στην πιο πάνω σχέση μπορούμε να εισαγάγουμε και την έννοια της αναλογίας της εικόνας (Aspect Ratio – AR), έχοντας ως δεδομένη τη σχέση:

$$\text{AR} = \text{W} / \text{H} \quad (5)$$

Αντικαθιστώντας την σχέση (5) στις προηγούμενες εξισώσεις (1-4), παίρνουμε ότι:

$$\text{H} = \text{Sqrt} (\text{BitRate} / (BPP \times \text{FPS} \times \text{AR})) \quad (6)$$

$$\text{W} = \text{AR} \times \text{H} \quad (7)$$

όπου το AR είναι μια δεκαδική τιμή που προκύπτει από τη σχέση (5). Για παράδειγμα αν θέλω αναλογία 4:3, τότε ισχύει ότι $\text{AR} = 4/3 = 1.33$, που είναι η τιμή που θα χρησιμοποιηθεί στις πιο πάνω σχέσεις.

Ερχόμαστε τώρα στην άλλη περίπτωση στην οποία δεν ενδιαφέρει το χρήστη για το ποιο θα είναι μέγεθος που θα έχει το κάθε πλαίσιο του βίντεο, οπότε δεν δίνει καμία τιμή στην παράμετρο «`frm_width`». Γι' αυτό και ο αλγόριθμός μας υποθέτει ότι δεν έχει κανένα περιορισμό για το μέγεθος των πλαισίων του βίντεο, και επικεντρώνει την προσοχή του στους περιορισμούς που τίθενται από τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Έτσι, η πρώτη παράμετρος που ελέγχεται είναι αυτή που αφορά την ποιότητα του κάθε πλαισίου, δηλαδή το BPP. Αν η παράμετρος έχει τιμή, τότε ο αλγόριθμος τη χρησιμοποιεί, αλλιώς παίρνει τις περαιτέρω αποφάσεις του δίνοντας στο BPP την τιμή 0.225, που μεταφράζεται ως πολύ καλή ποιότητα. Αυτό μπορεί να γίνει διότι δεν έχουμε περιορισμό ως προς το μέγεθος της εικόνας του βίντεο, επομένως αν έχουμε περιορισμό ως προς το bitrate, τότε θα διατηρήσουμε την πολύ καλή ποιότητα της εικόνας, απλώς θα την στέλνουμε με μικρότερο μέγεθος.

Ο επόμενος έλεγχος που πραγματοποιείται έπειτα από τους πιο πάνω είναι για την αναλογία της εικόνας του βίντεο, δηλαδή το aspect ratio. Ελέγχεται, αρχικά, εάν αυτή η παράμετρος έχει τιμή. Σε αντίθετη περίπτωση χρησιμοποιείται η εξ' ορισμού τιμή που είναι το 4:3, ή το 1.33. Με τον έλεγχο όλων των παραμέτρων που έχουν προηγηθεί, ο αλγόριθμός μας έχει στη διάθεση του όλα τα στοιχεία που χρειάζεται (bitrate, bpp, fps, aspect ratio) έτσι ώστε να μπορεί να υπολογίσει το μέγεθος του πλαισίου με το οποίο θα ζητήσει να του αποστέλλεται το βίντεο. Οπότε, ο αλγόριθμος υπολογίζει το ύψος του πλαισίου χρησιμοποιώντας τη σχέση (6) και το πλάτος του χρησιμοποιώντας τη σχέση (7).

Αμέσως μετά γίνεται ένας από τους πιο σημαντικούς ελέγχους που κάνει ο αλγόριθμος για να διασφαλίσει την ικανοποιητική ποιότητα στο χρήστη, ο οποίος έχει σχέση με την απώλεια των πλαισίων. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα μπορεί να κρατά στατιστικά στοιχεία σχετικά με τα πλαίσια του βίντεο που λαμβάνονται ή χάνονται. Ο αλγόριθμός μας, εκμεταλλευόμενος τις δυνατότητες αυτές του Goddard, χρησιμοποιώντας τη σχέση (8) υπολογίζει το ρυθμό απώλειας των πλαισίων.

$$\text{Ρυθμός απώλειας πλαισίων} = \# \text{ χαμένων πακέτων} / \# \text{ συνολικών πακέτων} \quad (8)$$

όπου:

$$\begin{aligned} \# \text{ συνολικών πακέτων} &= \# \text{ χαμένων πακέτων} + \\ &\# \text{ παραλαμβανόμενων πακέτων} \end{aligned}$$

Εάν το υπολογιζόμενο ποσοστό απώλειας των πλαισίων είναι μεγαλύτερο από 10%, τότε ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τον πίνακα ποιότητας και προσπαθεί να βρει κάποιο από τους συνδυασμούς ο οποίος χρησιμοποιεί περισσότερα πλαίσια ανά δευτερόλεπτο (fps). Έτσι, αυτό που έχει ως στόχο ο αλγόριθμος είναι να στέλνει τόσα περισσότερα πλαίσια από τα ζητούμενα, ώστε τελικά ο χρήστης, ακόμα και με την απώλεια που θα υποστεί, να πάρει την ποιότητα που ζήτησε. Τον αριθμό για το πόσα περισσότερα πλαίσια θα πρέπει να σταλούν, μας τον δίνει η σχέση (9):

$$\# \text{ πακέτων που πρέπει να σταλούν} = (100 \times \# \text{ πλαισίων που ζητήθηκαν}) / (100 - \text{ποσοστό απώλειας πλαισίων}) \quad (9)$$

Για παράδειγμα, αν ο χρήστης ζητήσει να του στέλνονται τα πακέτα με ρυθμό 20 fps, και λόγω της συμφόρησης στο δίκτυο έχουμε απώλεια της τάξης του 30%, τότε θα πρέπει να του αποσταλούν $(100 \times 20) / (100 - 30) = 28.57$ πλαίσια, ώστε τελικά ο χρήστης να πάρει τα 20 που ζήτησε ($28.57 \times 30\% = 20$). Βέβαια ο αλγόριθμος δεν θα ζητήσει ακριβώς 28.57 πλαίσια, αλλά θα στρογγυλοποιήσει προς τα πάνω τον αριθμό στο επόμενο πολλαπλάσιο του 5. Άρα θα ζητήσει 30 πλαίσια, υπό την προϋπόθεση ότι το πρότυπο χρωματισμού είναι το NTSC, ενώ αν το πρότυπο είναι το PAL, τότε θα ζητήσει 25 πλαίσια. Η αύξηση στον

αριθμό των πλαισίων που θα αποσταλούν θα γίνει μόνο αν δεν βρισκόμαστε στο μέγιστο, αλλιώς ο ρυθμός θα παραμείνει ο ίδιος.

Στο σημείο αυτό γίνεται ο υπολογισμός του bitrate, σύμφωνα με τη σχέση (2), χρησιμοποιώντας τις υπολογιζόμενες διαστάσεις του πλαισίου και τις τιμές bpp και fps που επιλέγονται από τον πίνακα ποιότητας. Αυτό το υπολογιζόμενο bitrate συγκρίνεται με το μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης που αποφασίστηκε στην αρχή του αλγορίθμου και ελέγχεται αν είναι μικρότερο, ώστε να μπορεί το βίντεο να αποσταλεί. Σε μια τέτοια περίπτωση, όλα πήγαν καλά και έτσι ο παραλήπτης ειδοποιεί τον εξυπηρετητή για τις ρυθμίσεις που αποφάσισε, ώστε να του σταλεί το βίντεο με βάση αυτές.

Στην περίπτωση που το υπολογιζόμενο bitrate δεν είναι μικρότερο από τον μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης, τότε πρέπει να κάνουμε περαιτέρω ελέγχους και να βελτιώσουμε τις παραμέτρους για να είναι δυνατή η μετάδοση του βίντεο με ικανοποιητική ποιότητα. Έτσι, η επόμενη ενέργεια του αλγορίθμου είναι να μειώσει τις διαστάσεις του πλαισίου (μην ξεχνάτε ότι ο χρήστης δεν ζήτησε διαστάσεις), διατηρώντας την ποιότητα της εικόνας και το ρυθμό μετάδοσης στα επίπεδα που ζήτησε ο χρήστης ή σε αυτά που αποφασίστηκαν προηγουμένως από τον αλγόριθμο όταν προσπέλασε τον πίνακα ποιότητας. Οπότε, πρέπει να μειωθούν οι διαστάσεις του πλαισίου, να υπολογιστεί ξανά το bitrate και να ξαναγίνει έλεγχος αν έχει πέσει κάτω από τον μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης.

Το ερώτημα είναι, πόσο πρέπει να μειωθούν οι διαστάσεις του πλαισίου προτού γίνει ξανά ο έλεγχος; Αυτό που κάνει ο αλγόριθμος είναι με βάση την αναλογία των διαστάσεων του πλαισίου (aspect ratio) που ζήτησε ο χρήστης, να μειώνει σταδιακά και ταυτόχρονα και το ύψος και το πλάτος του πλαισίου και να ξαναδοκιμάζει. Το βήμα μείωσης εξαρτάται από την αναλογία του πλαισίου, οπότε το πλάτος και το ύψος μειώνονται κατά 4 και 3 και κατά 16 και 9 για αναλογίες 4:3 και 16:9 αντίστοιχα. Βέβαια, έχουν τεθεί τα όρια 80x60 (για αναλογία 4:3) και 80x45 (για αναλογία 16:9) όσο αφορά το ελάχιστο μέγεθος του πλαισίου που μπορεί να σταλεί. Επομένως, σε κάθε μείωση των διαστάσεων ελέγχεται αν έχουν πέσει κάτω από τα όρια αυτά. Αν ναι, τότε αναγκαστικά πρέπει να μειωθεί και η ποιότητα του πλαισίου (bpp) και ο ρυθμός μετάδοσης των πλαισίων (fps) σύμφωνα με τους συνδυασμούς που βρίσκονται στον πίνακα ποιότητας. Φυσικά, με όλους αυτούς τους συνδυασμούς οι διαστάσεις του πλαισίου που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι 80x60 και 80x45 για αναλογίες 4:3 και 16:9 αντίστοιχα.

Όλοι οι πιο πάνω έλεγχοι αφορούν την περίπτωση στην οποία δεν ενδιαφέρουν το χρήστη οι διαστάσεις του πλαισίου του βίντεο. Τι γίνεται, όμως, στην περίπτωση που ο χρήστης ζητήσει συγκεκριμένες διαστάσεις για τα πλαίσια του βίντεο, ρυθμίζοντας την αντίστοιχη παράμετρο;

Σε μια τέτοια περίπτωση, οι έλεγχοι που γίνονται είναι παρόμοιοι με αυτούς που γίνονται και στην περίπτωση που οι διαστάσεις του πλαισίου δεν ενδιαφέρουν το χρήστη. Όμως, στην περίπτωση που ζητηθούν διαστάσεις του πλαισίου, τότε θεωρείται ως η σημαντικότερη από τις παραμέτρους αυτή και επομένως ο αλγόριθμος προσπαθεί να κρατήσει αναλλοίωτη την τιμή της, ρυθμίζοντας πρώτα τις τιμές όλων των άλλων παραμέτρων που σ' αυτή την περίπτωση θεωρούνται δευτερεύουσας σημασίας. Οι τιμές για τις διαστάσεις του πλαισίου αλλάζουν (μειώνονται) μόνο όταν έχουν μειωθεί οι τιμές όλων των άλλων παραμέτρων σε ένα ελάχιστο όριο και εξακολουθεί να είναι αδύνατη η μετάδοση του βίντεο. Αυτό το ελάχιστο όριο για τις παραμέτρους που αφορούν την

ποιότητα των πλαισίων βρίσκεται στο σημείο που η ποιότητα είναι ακόμη υποφερτή (π.χ. 0.100 bpp και 30 fps), σύμφωνα με τον πίνακα ποιότητας που δημιουργήθηκε στην αρχή. Αυτό το όριο τίθεται με βάση τη λογική ότι τελικά δεν θα έχει σημασία να αποστέλλεται το βίντεο με τις ζητούμενες διαστάσεις και ταυτόχρονα η ποιότητά του να είναι χάλια. Οπότε, από το σημείο αυτό και πέρα κρατείται η ποιότητα στο συγκεκριμένο όριο και ξεκινά η σταδιακή μείωση των διαστάσεων του πλαισίου.

Βέβαια, ισχύει ο περιορισμός ότι το ελάχιστο μέγεθος του πλαισίου θα έχει διαστάσεις 80x60 ή 80x45 για αναλογίες 4:3 και 16:9 αντίστοιχα. Είναι αυτονόητο το ότι αν, κατά την προσπάθεια του αλγορίθμου, μειωθούν όλες οι παράμετροι στο ελάχιστο (συμπεριλαμβανομένων των διαστάσεων του πλαισίου) και το βίντεο εξακολουθεί να μην μπορεί να μεταδοθεί, τότε ο αλγόριθμος εγκαταλείπει τις προσπάθειες, ενημερώνοντας το χρήστη ότι δεν είναι σε θέση να λάβει το βίντεο κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες του δικτύου.

8.5 Σενάρια με τα αναμενόμενα αποτελέσματά τους

Στο σημείο αυτό θεωρούμε σκόπιμο να σημειώσουμε τα πιθανά σενάρια που μπορεί να προκύψουν, όσο αφορά τις ρυθμίσεις των παραμέτρων από το χρήστη. Όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόφαση του αλγορίθμου συνδυάζονται μεταξύ τους, και παρατίθενται οι αναμενόμενες ενέργειες και αποτελέσματα. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε μετά να ελέγξουμε τον αλγόριθμο και να επιβεβαιώσουμε ότι τελικά δίνει την βέλτιστη δυνατή ποιότητα στον παραλήπτη του βίντεο.

Σε όλες τις παρακάτω περιπτώσεις, ο πίνακας δείχνει για την κάθε μια παράμετρο αν ο χρήστης της έχει δώσει τιμή ή όχι, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του. Κάτω από τον πίνακα περιγράφονται τα αναμενόμενα αποτελέσματα σύμφωνα με αυτά που έχουν ζητηθεί.

Το «max_possible_bitrate» σε κάθε ρύθμιση παίρνει τη μικρότερη τιμή μεταξύ των παραμέτρων max_bitrate, avail_bandwidth (όπου αυτές έχουν τιμή) και MAX_POSSIBLE. Το MAX_POSSIBLE είναι το bitrate που έχουμε στο μεγαλύτερο στρώμα που υποστηρίζει ο εξυπηρετητής (π.χ. το bitrate του στρώματος 5, δηλαδή 768000 bps). Αν, για παράδειγμα, έχουμε διαθέσιμο εύρος ζώνης τα 1 Mbps, ο εξυπηρετητής βίντεο υποστηρίζει μέχρι 768 kbps και ο χρήστης είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο με ένα μόντεμ των 56 kbps, τότε η μετάδοση θα γίνει με βάση τη μικρότερη τιμή από τις τρεις, δηλαδή στα 56 kbps χωρίς να μπορεί να αυξηθεί.

Περίπτωση Α:

Διαστάσεις εικόνας (frm_width)	Εύρος ζώνης της σύνδεσης του χρήστη (max_bitrate)	Ποιότητα εικόνας (brr_quality)	Ρυθμός πλαισίων (fps)	Διαθέσιμο εύρος ζώνης (avail_bandwidth)
Δίνεται	Δίνεται	Δίνεται	Αν δεν δοθεί από το χρήστη τότε παίρνουμε την τιμή 30 ή 25 ανάλογα με το πρότυπο χρωματισμού που χρησιμοποιείται (NTSC ή PAL αντίστοιχα).	Δίνεται
Δίνεται	Δίνεται	Δίνεται		ΔΕΝ δίνεται
Δίνεται	ΔΕΝ δίνεται	Δίνεται		Δίνεται
Δίνεται	ΔΕΝ δίνεται	Δίνεται		ΔΕΝ δίνεται

Με βάση το «max_possible_bitrate» που έχει επιλεγεί, ο αλγόριθμος ελέγχει αν το πλαίσιο με διαστάσεις που δίνονται από την παράμετρο «frm_width» είναι εφικτό να σταλεί με την ποιότητα που ζητήθηκε με την παράμετρο «brr_quality» και το ρυθμό πλαισίων (fps) που ζητήθηκε. Αν δεν είναι εφικτή η αποστολή λόγω περιορισμένου εύρους ζώνης, τότε μειώνει την ποιότητα μέχρι ένα κατώτατο όριο του πίνακα ποιότητας, στο οποίο διατηρείται μια ικανοποιητική ποιότητα, και ξαναελέγχει. Ο αλγόριθμος προσπαθεί να μην πειράξει ακόμη τις διαστάσεις του πλαισίου, ψάχνοντας να βρει χαμηλότερη αλλά ταυτόχρονα και ικανοποιητική ποιότητα, για να στείλει το πλαίσιο με τις ζητούμενες διαστάσεις. Μετά και από αυτό, αν ακόμη δεν είναι εφικτό να σταλεί το βίντεο, τότε ξεκινούν να μειώνονται και οι διαστάσεις του πλαισίου μέχρι το κατώτατο όριο που το πλάτος του πλαισίου να γίνει 80 pixels. Την ώρα που μειώνονται οι διαστάσεις του πλαισίου, χρησιμοποιείται το ίδιο κατώτατο όριο του πίνακα ποιότητας που χρησιμοποιήθηκε και πριν, αυτό δηλαδή που εγγυάται ικανοποιητική ποιότητα.

Περίπτωση Β:

Διαστάσεις εικόνας (frm_width)	Εύρος ζώνης της σύνδεσης του χρήστη (max_bitrate)	Ποιότητα εικόνας (brr_quality)	Ρυθμός πλαισίων (fps)	Διαθέσιμο εύρος ζώνης (avail_bandwidth)
Δίνεται	Δίνεται	ΔΕΝ δίνεται	Αν δεν δοθεί από το χρήστη τότε παίρνουμε την τιμή 30 ή 25 ανάλογα με το πρότυπο χρωματισμού που χρησιμοποιείται (NTSC ή PAL αντίστοιχα).	Δίνεται
Δίνεται	Δίνεται	ΔΕΝ δίνεται		ΔΕΝ δίνεται
Δίνεται	ΔΕΝ δίνεται	ΔΕΝ δίνεται		Δίνεται
Δίνεται	ΔΕΝ δίνεται	ΔΕΝ δίνεται		ΔΕΝ δίνεται

Με βάση το «max_possible_bitrate» που έχει επιλεγεί, ελέγχει αν το πλαίσιο με διαστάσεις αυτές που δίνονται στο «frm_width» είναι εφικτό αν έχει ποιότητα ίση με αυτή της θέσης της πρώτης εμφάνισης του «fps» με το αντίστοιχο «brr_quality» μέσα στον πίνακα ποιότητας. Αν δεν είναι εφικτή η μετάδοση του βίντεο, τότε ο αλγόριθμος μειώνει την ποιότητα μέχρι ένα κατώτατο όριο του πίνακα ποιότητας στο οποίο διατηρείται ικανοποιητική ποιότητα και ξαναελέγχει. Αν δεν είναι εφικτή η μετάδοση, τότε αρχίζει να μειώνει και τις διαστάσεις του πλαισίου, μέχρι το σημείο που πλάτος του να γίνει 80 pixels. Κατά τη διάρκεια της μείωσης των διαστάσεων του πλαισίου, χρησιμοποιείται η ποιότητα στην οποία αναφέρεται το κατώτατο όριο του πίνακα ποιότητας στο οποίο, όμως, έχουμε ικανοποιητική ποιότητα.

Περίπτωση Γ:

Διαστάσεις εικόνας (frm_width)	Εύρος ζώνης της σύνδεσης του χρήστη (max_bitrate)	Ποιότητα εικόνας (brr_quality)	Ρυθμός πλαισίων (fps)	Διαθέσιμο εύρος ζώνης (avail_bandwidth)
ΔΕΝ δίνεται	Δίνεται	Δίνεται	Αν δεν δοθεί από το χρήστη τότε παίρνουμε την τιμή 30 ή 25 ανάλογα με το πρότυπο χρωματισμού που χρησιμοποιείται (NTSC ή PAL αντίστοιχα).	Δίνεται
ΔΕΝ δίνεται	Δίνεται	Δίνεται		ΔΕΝ δίνεται
ΔΕΝ δίνεται	ΔΕΝ δίνεται	Δίνεται		Δίνεται
ΔΕΝ δίνεται	ΔΕΝ δίνεται	Δίνεται		ΔΕΝ δίνεται

Με βάση το «max_possible_bitrate» που έχει επιλεγεί, ο αλγόριθμος υπολογίζει τις διαστάσεις του πλαισίου χρησιμοποιώντας την ποιότητα που δίνεται με την παράμετρο «brr_quality» και το ρυθμό πλαισίων «fps», έτσι ώστε το συνολικό bitrate να μην ξεπερνά αυτό που επιλέχθηκε πιο πριν (max_possible_bitrate). Αν το ξεπερνά, τότε ο αλγόριθμος προσπαθεί να κάνει τους υπολογισμούς χωρίς να πειράξει την ποιότητα που του βίντεο που ζητήθηκε. Έτσι, μειώνει τις διαστάσεις της εικόνας μέχρι το πλάτος του πλαισίου να γίνει 80 pixels, χρησιμοποιώντας την ποιότητα που ζήτησε ο χρήστης. Αν δεν είναι εφικτή η μετάδοση του βίντεο, τότε είναι που ξεκινά να μειώνει την ποιότητα χωρίς να ξεπερνά το κατώτατο όριο του πίνακα ποιότητας στο οποίο έχουμε ικανοποιητική ποιότητα, και ξαναελέγχει.

Περίπτωση Δ:

Διαστάσεις εικόνας (frm_width)	Εύρος ζώνης της σύνδεσης του χρήστη (max_bitrate)	Ποιότητα εικόνας (brr_quality)	Ρυθμός πλαισίων (fps)	Διαθέσιμο εύρος ζώνης (avail_bandwidth)
ΔΕΝ δίνεται	Δίνεται	ΔΕΝ δίνεται	Αν δεν δοθεί από το χρήστη τότε παίρνουμε την τιμή 30 ή 25 ανάλογα με το πρότυπο χρωματισμού που χρησιμοποιείται (NTSC ή PAL αντίστοιχα).	Δίνεται
ΔΕΝ δίνεται	Δίνεται	ΔΕΝ δίνεται		ΔΕΝ δίνεται
ΔΕΝ δίνεται	ΔΕΝ δίνεται	ΔΕΝ δίνεται		Δίνεται
ΔΕΝ δίνεται	ΔΕΝ δίνεται	ΔΕΝ δίνεται		ΔΕΝ δίνεται

Με βάση το «max_possible_bitrate» που έχει επιλεγεί, ο αλγόριθμος υπολογίζει τις διαστάσεις του πλαισίου, χρησιμοποιώντας ποιότητα ίση με αυτή της θέσης της πρώτης εμφάνισης της τιμής του ρυθμού πλαισίων «fps» με το αντίστοιχο brr μέσα στον πίνακα ποιότητας, έτσι ώστε το συνολικό bitrate να μην ξεπερνά αυτό που επιλέγηκε πιο πριν (max_possible_bitrate). Αν το ξεπερνά, διατηρείται η ποιότητα που έχει μόλις επιλεγεί και θυσιάζονται οι διαστάσεις του πλαισίου. Αυτές μειώνονται μέχρι το πλάτος του πλαισίου να γίνει 80 pixels. Αν ακόμη και με αυτό το μέγεθος του πλαισίου δεν είναι εφικτή η μετάδοση του βίντεο, τότε αρχίζει να μειώνεται και η ποιότητα μέχρι το κατώτατο όριο του πίνακα ποιότητας στο οποίο διατηρείται ικανοποιητική ποιότητα και ξαναελέγχει.

Και στις τέσσερις πιο πάνω περιπτώσεις, αν στην τελική προσπάθεια προσαρμογής, με το πλάτος του πλαισίου μειωμένο στο 80 και την ποιότητα στο κατώτατο σημείο του πίνακα ποιότητας στο οποίο έχουμε ικανοποιητική ποιότητα, εξακολουθεί να μην είναι εφικτή η μετάδοση, τότε ο αλγόριθμος εγκαταλείπει τις προσπάθειες προσαρμογής γιατί με βάση το τρέχον εύρος ζώνης δεν είναι δυνατή η αποστολή του βίντεο με ικανοποιητική ποιότητα. Θα ξαναγίνει προσπάθεια μόλις έχουμε μεταβολή στο «max_possible_bitrate».

8.6 Ο αλγόριθμος «εν δράσει»

Πέραν από τις εν μέρει δοκιμές για τη σωστή λειτουργία του αλγόριθμου, χρησιμοποιήσαμε και ένα πιο γενικό σενάριο, με το οποίο προσβλέπουμε στο να αποδείξουμε την ορθότητα του αλγορίθμου μας. Το σενάριο αυτό φτιάχτηκε έτσι ώστε να φαίνεται το γεγονός ότι ο παραλήπτης του βίντεο, σε κάθε χρονική στιγμή, λαμβάνει το βίντεο με την καλύτερη δυνατή ποιότητα, δεδομένου ότι έχουμε κυμαινόμενες συνθήκες στο δίκτυο μετάδοσης. Άλλωστε, αυτός ήταν και ο γενικότερος στόχος της συγκεκριμένης μελέτης.

Για το σενάριο που περιγράφεται παρακάτω, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο Παράρτημα Α για να βρει λεπτομέρειες για τον τρόπο που έγινε η μετατροπή του βίντεο από τη μια μορφή στην άλλη, καθώς και τεχνικές λεπτομέρειες που αφορούν τη χρήση των αρχείων για την αποθήκευση του μεγέθους των πλαισίων του βίντεο.

Επομένως, για να φανεί και η χρήση της μετάδοσης του βίντεο σε στρώματα, έγινε δοκιμή του αλγορίθμου μας για 5 διαφορετικές περιπτώσεις. Στην κάθε μια περίπτωση προστίθετο ένα επιπλέον στρώμα. Η δοκιμή μας ξεκίνησε αρχικά χρησιμοποιώντας μόνο ένα στρώμα στα 56 kbps. Το bitrate που χρησιμοποιείται για το κάθε ένα στρώμα που προστίθεται είναι: 128 kbps, 256 kbps, 512 kbps και 768 kbps.

Στην κάθε μια προσομοίωση βγαίνουν στατιστικά στοιχεία τα οποία φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν για την κάθε μια περίπτωση ξεχωριστά. Πρέπει να αναφέρουμε ότι κάθε φορά που έχουμε αλλαγή στις συνθήκες του δικτύου που επηρεάζουν το ρυθμό μετάδοσης του βίντεο, ο αλγόριθμος προσπαθεί να προσαρμόσει τις παραμέτρους του βίντεο στις νέες αυτές συνθήκες. Έτσι, η κάθε εγγραφή που φαίνεται στους πιο κάτω πίνακες αντιπροσωπεύει την απόφαση του αλγορίθμου. Στις περιπτώσεις βέβαια που δεν παρατηρείται αλλαγή στις τιμές των παραμέτρων, δεν σημαίνει ότι ο αλγόριθμος δεν έκανε τη δουλειά του. Απλώς, οι περιορισμοί που τίθενται από το δίκτυο δεν επιτρέπουν καμιά προσαρμογή.

Η αρχική ρύθμιση των παραμέτρων, όπως αναφέρθηκε και πιο πριν, αποτελεί τις επιλογές του χρήστη για την ποιότητα του βίντεο που θέλει να πάρει. Για την ανάλυση που θα ακολουθήσει είναι σημαντικό να σημειώσουμε τις αρχικές ρυθμίσεις που ζήτησε ο χρήστης στη συγκεκριμένη προσομοίωση:

Παράμετρος	Περιγραφή
<code>fps_ = 15</code>	Ο χρήστης ζητά να του αποστέλλεται το βίντεο με ρυθμό 15 fps
<code>aspect_ratio_ = 1.33333333</code>	Η αναλογία των διαστάσεων τη εικόνας θέλει να είναι 4:3
<code>frm_width_ = 480</code>	Το πλάτος του πλαισίου του βίντεο που θα του αποστέλλεται θέλει να μην ξεπερνά τα 480 εικονοστοιχεία. Με βάση αυτό το πλάτος και σε συνάρτηση με την αναλογία των διαστάσεων της εικόνας (<i>aspect ratio</i>) θα υπολογιστεί και το ύψος του πλαισίου από τον αλγόριθμο.
<code>bpp_quality_ = 0.2</code>	Η ποιότητα της εικόνας θέλει να είναι καλή.

Ο πιο κάτω πίνακας δείχνει το τι αντιπροσωπεύει το κάθε στοιχείο που φαίνεται στους πίνακες με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Στοιχείο	Περιγραφή
Time	<i>Αφορά το χρόνο στον οποίο έγινε η προσαρμογή (ή, τουλάχιστον, έγινε προσπάθεια για προσαρμογή) έπειτα από αλλαγή στις συνθήκες του δικτύου.</i>
Calculated bitrate	<i>Είναι το υπολογιζόμενο κάθε φορά bitrate για το βίντεο αφού ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί του δικτύου. Έτσι, αφού κάθε φορά ρυθμιστούν πρώτα οι τιμές για όλες τις παραμέτρους του δικτύου, υπολογίζεται έπειτα το bitrate που απαιτεί το βίντεο.</i>
Max available bandwidth	<i>Είναι το μέγιστο δυνατό εύρος ζώνης που έχουμε σε κάθε δεδομένη στιγμή. Αυτό δίνεται με ανατροφοδότηση (feedback) από το δίκτυο.</i>
Max layer bitrate	<i>Είναι το bitrate του στρώματος που αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση του βίντεο.</i>
Frame width	<i>Είναι το πλάτος του πλαισίου του βίντεο, το οποίο κάθε φορά αναπροσαρμόζεται.</i>
Frame height	<i>Είναι το ύψος του πλαισίου του βίντεο, το οποίο κάθε φορά αναπροσαρμόζεται.</i>
Bpp	<i>Είναι η ποιότητα του πλαισίου του βίντεο, έτσι όπως θα αναπροσαρμοστεί κάθε φορά.</i>
Fps	<i>Είναι ο ρυθμός με τον οποίο θα αποστέλλονται τα πλαίσια του βίντεο</i>
Loss Rate	<i>Είναι το υπολογιζόμενο ποσοστό απώλεια των πακέτων.</i>

Προτού παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα, έχει σημασία να υπενθυμίσουμε ότι στην περίπτωση που ο χρήστης ζητήσει συγκεκριμένες διαστάσεις πλαισίου του βίντεο, τότε ο αλγόριθμος θα προσπαθήσει να μην πειράξει τις διαστάσεις που ζητήθηκαν, αλλά να μειώνει την ποιότητα του πλαισίου (bpp και fps). Όμως, τελικά δεν θα έχει σημασία να αποστέλλεται το βίντεο με τις ζητούμενες διαστάσεις και η ποιότητά του να είναι χάλια. Έτσι, σύμφωνα με τον πίνακα ποιότητας, η ποιότητα του πλαισίου θα μειώνεται μέχρι το σημείο που η ποιότητα θα είναι ακόμη υποφερτή και, από το σημείο αυτό και πέρα κρατείται η ποιότητα στο συγκεκριμένο όριο και ξεκινά η σταδιακή μείωση των διαστάσεων του πλαισίου.

Προσομοίωση Α:

Χρήση ενός μόνο στρώματος: 56kbps

Time	Calculated bitrate	Max available bandwidth	Max Layer bitrate supported	Frame width	Frame height	Bpp	Fps	Loss rate
0.113912	54756	2048000	55920	156	117	0.100	30	0.000000
0.123912	54756	2048000	55920	156	117	0.100	30	0.000000
1.062818	54756	483365	55920	156	117	0.100	30	0.000000
2.062818	54756	687524	55920	156	117	0.100	30	0.000000
3.062818	55296	427638	55920	128	96	0.225	20	0.180328
4.062818	55296	103115	55920	128	96	0.225	20	0.214286
5.062818	55296	157852	55920	128	96	0.225	20	0.181818
6.062818	55296	466414	55920	128	96	0.225	20	0.230769
7.062818	54756	583089	55920	104	78	0.225	30	0.444444
8.062818	54756	75898	55920	104	78	0.225	30	0.404762
9.062818	52920	105247	55920	112	84	0.225	25	0.350877
12.062818	55296	305500	55920	128	96	0.225	20	0.200000
13.062818	55296	446461	55920	128	96	0.225	20	0.200000
18.062818	55296	430702	55920	128	96	0.225	20	0.200000
22.062818	54756	553428	55920	156	117	0.100	30	0.000000
25.062818	54756	610739	55920	156	117	0.100	30	0.000000

Προσομοίωση Β:

Χρήση 2 στρωμάτων: 56kbps και 128kbps

Time	Calculated bitrate	Max available bandwidth	Max Layer bitrate supported	Frame width	Frame height	Bpp	Fps	Loss rate
0.114167	125316	2048000	127920	236	177	0.100	30	0.000000
0.124167	125316	2048000	127920	236	177	0.100	30	0.000000
1.063293	125316	483365	127920	236	177	0.100	30	0.000000
2.063293	125316	687524	127920	236	177	0.100	30	0.000000
3.063293	124416	427638	127920	192	144	0.225	20	0.180328
4.063293	55296	103115	55920	128	96	0.225	20	0.214286
5.063293	124416	157852	127920	192	144	0.225	20	0.193878
6.063293	125316	466414	127920	236	177	0.100	30	0.076923
7.063293	124416	583089	127920	192	144	0.225	20	0.142857
8.063293	55296	75898	55920	128	96	0.225	20	0.159091
9.063293	55296	105247	55920	128	96	0.225	20	0.118644
12.063293	123201	305500	127920	156	117	0.225	30	0.600000
13.063293	123201	446461	127920	156	117	0.225	30	0.600000
18.063293	123201	430702	127920	156	117	0.225	30	0.600000
22.063293	123201	553428	127920	156	117	0.225	30	0.600000
25.063293	123201	610739	127920	156	117	0.225	30	0.600000

Προσομοίωση Γ:

Χρήση 3^{wv} στρωμάτων: 56 kbps, 128 kbps και 256 kbps

Time	Calculated bitrate	Max available bandwidth	Max Layer bitrate supported	Frame width	Frame height	Bpp	Fps	Loss rate
0.114622	254016	2048000	255960	336	252	0.100	30	0.000000
0.124622	254016	2048000	255960	336	252	0.100	30	0.000000
1.063768	254016	483365	255960	336	252	0.100	30	0.000000
2.063768	254016	687524	255960	336	252	0.100	30	0.000000
3.063768	249696	427638	255960	272	204	0.225	20	0.180328
4.063768	55296	103115	55920	128	96	0.225	20	0.228916
5.063768	124416	157852	127920	192	144	0.225	20	0.232323
6.063768	254016	466414	255960	336	252	0.100	30	0.000000
7.063768	254016	583089	255960	336	252	0.100	30	0.071429
8.063768	55296	75898	55920	128	96	0.225	20	0.142857
9.063768	55296	105247	55920	128	96	0.225	20	0.105263
12.063768	254016	305500	255960	336	252	0.100	30	0.000000
13.063768	254016	446461	255960	336	252	0.100	30	0.000000
18.063768	254016	430702	255960	336	252	0.100	30	0.000000
22.063768	254016	553428	255960	336	252	0.100	30	0.000000
25.063768	254016	610739	255960	336	252	0.100	30	0.000000

Προσομοίωση Δ:

Χρήση 4^{wv} στρωμάτων: 56 kbps, 128 kbps, 256 kbps και 512 kbps

Time	Calculated bitrate	Max available bandwidth	Max Layer bitrate supported	Frame width	Frame height	Bpp	Fps	Loss rate
0.114878	509796	2048000	511920	476	357	0.100	30	0.000000
0.124878	509796	2048000	511920	476	357	0.100	30	0.000000
1.064243	254016	483365	255960	336	252	0.100	30	0.000000
2.064243	509796	687524	511920	476	357	0.100	30	0.000000
3.064243	249696	427638	255960	272	204	0.225	20	0.172414
4.064243	55296	103115	55920	128	96	0.225	20	0.250000
5.064243	124416	157852	127920	192	144	0.225	20	0.224490
6.064243	254016	466414	255960	336	252	0.100	30	0.071429
7.064243	509796	583089	511920	476	357	0.100	30	0.068966
8.064243	54756	75898	55920	156	117	0.100	30	0.069767
9.064243	54756	105247	55920	156	117	0.100	30	0.084746
12.064243	254016	305500	255960	224	168	0.225	30	0.600000
13.064243	254016	446461	255960	224	168	0.225	30	0.600000
18.064243	254016	430702	255960	224	168	0.225	30	0.600000
22.064243	505521	553428	511920	316	237	0.225	30	0.600000
25.064243	505521	610739	511920	316	237	0.225	30	0.600000

Προσομοίωση Ε:

Χρήση 5 στρωμάτων: 56 kbps, 128 kbps, 256 kbps, 512 kbps και 768 kbps

Time	Calculated bitrate	Max available bandwidth	Max Layer bitrate supported	Frame width	Frame height	Bpp	Fps	Loss rate
0.115133	518400	2048000	768000	480	360	0.200	15	0.000000
0.125133	518400	2048000	768000	480	360	0.200	15	0.000000
1.064718	254016	483365	255960	336	252	0.100	30	0.000000
2.064718	509796	687524	511920	476	357	0.100	30	0.000000
3.064718	249696	427638	255960	272	204	0.225	20	0.196721
4.064718	55296	103115	55920	128	96	0.225	20	0.238095
5.064718	124416	157852	127920	192	144	0.225	20	0.224490
6.064718	254016	466414	255960	336	252	0.100	30	0.071429
7.064718	509796	583089	511920	476	357	0.100	30	0.068966
8.064718	55296	75898	55920	128	96	0.225	20	0.113636
9.064718	55296	105247	55920	128	96	0.225	20	0.133333
12.064718	254016	305500	255960	336	252	0.100	30	0.000000
13.064718	254016	446461	255960	336	252	0.100	30	0.000000
18.064718	254016	430702	255960	336	252	0.100	30	0.000000
22.064718	509796	553428	511920	476	357	0.100	30	0.000000
25.064718	509796	610739	511920	476	357	0.100	30	0.000000

8.6.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων:

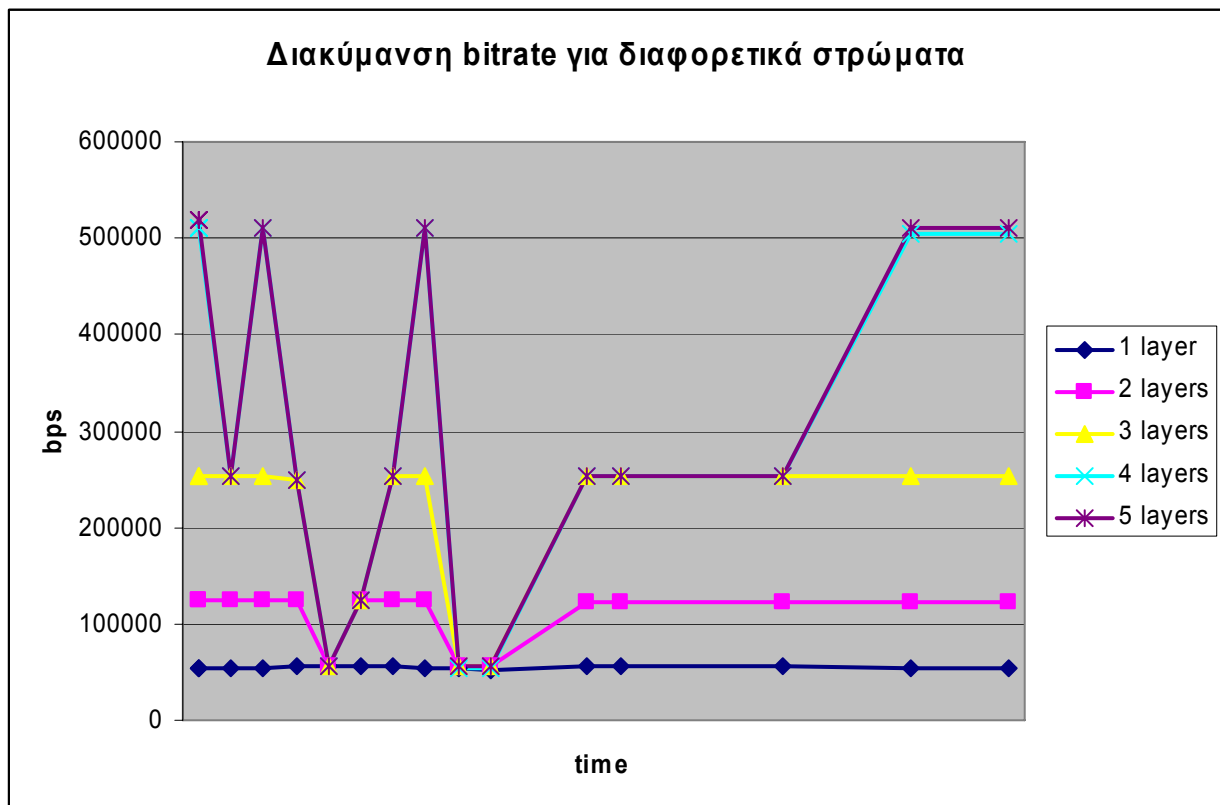
Από τα αποτελέσματα που καταγράφονται στους πιο πάνω πίνακες παρατηρούμε ότι γίνονται πολλές προσπάθειες από τον αλγόριθμο για να προσαρμοστεί στα νέα δεδομένα του δικτύου. Σε κάθε προσομοίωση, όμως, περιορίζεται από το bitrate του μεγαλύτερου στρώματος που υποστηρίζεται στην κάθε περίπτωση. Επομένως, σύμφωνα με την περιγραφή του αλγόριθμου που έγινε στην ενότητα 8.4.2, και δεδομένου του ότι ο χρήστης έχει ζητήσει συγκεκριμένες διαστάσεις πλαισίου, ελαττώνεται πρώτα η ποιότητα των πλαισίων (bpp) και ο ρυθμός μετάδοσής τους (fps), και αφού αυτά κατέλθουν στο κατώτατο όριο που έψαξε και βρήκε ο αλγόριθμος στον πίνακα ποιότητας (π.χ. 0.100 bpp και 30 fps, αντίστοιχα), τότε γίνεται μείωση και στις διαστάσεις των πλαισίων.

Είναι πολύ σημαντική και αξιοσημείωτη η λειτουργία του αλγορίθμου στις περιπτώσεις που έχουμε ποσοστό απώλειας πλαισίων. Στις περιπτώσεις αυτές, παρατηρώντας και τα αποτελέσματα στους πιο πάνω πίνακες, φαίνεται ότι ο αλγόριθμος προσπαθεί να διατηρήσει την ποιότητα του βίντεο στο χρήστη, αυξάνοντας το ρυθμό μετάδοσης των πλαισίων και θυσιάζοντας από τις διαστάσεις του πλαισίου του βίντεο. Έτσι, η απώλεια που έχουμε στα πλαίσια θα περάσει όσο το δυνατό ανώδυνα και πιθανόν να μη γίνει αντιληπτή από το χρήστη.

Γενικά, στις πιο πάνω προσομοιώσεις, η ποιότητα του βίντεο διατηρείται σε ικανοποιητικά επίπεδα και ποτέ δεν πέφτει κάτω από το όριο που τέθηκε, δηλαδή να γίνει φτωχή ποιότητα με ενοχλητική εικόνα. Φυσικά, μπορεί οι διαστάσεις των πλαισίων να έχουν κυμαινόμενο και μικρότερο μέγεθος από ότι ζητήθηκε, όμως αυτό που έχει σημασία είναι η ποιότητα του βίντεο. Και βέβαια ο αλγόριθμος διασφαλίζει το ότι αφού εξασφαλιστεί η ικανοποιητική ποιότητα των πλαισίων, σίγουρα το βίντεο θα μεταδοθεί με όσο το δυνατό

μεγαλύτερες διαστάσεις μας επιτρέπει το διαθέσιμο εύρος ζώνης και το bitrate του μεγαλύτερου στρώματος που υποστηρίζεται στην κάθε περίπτωση.

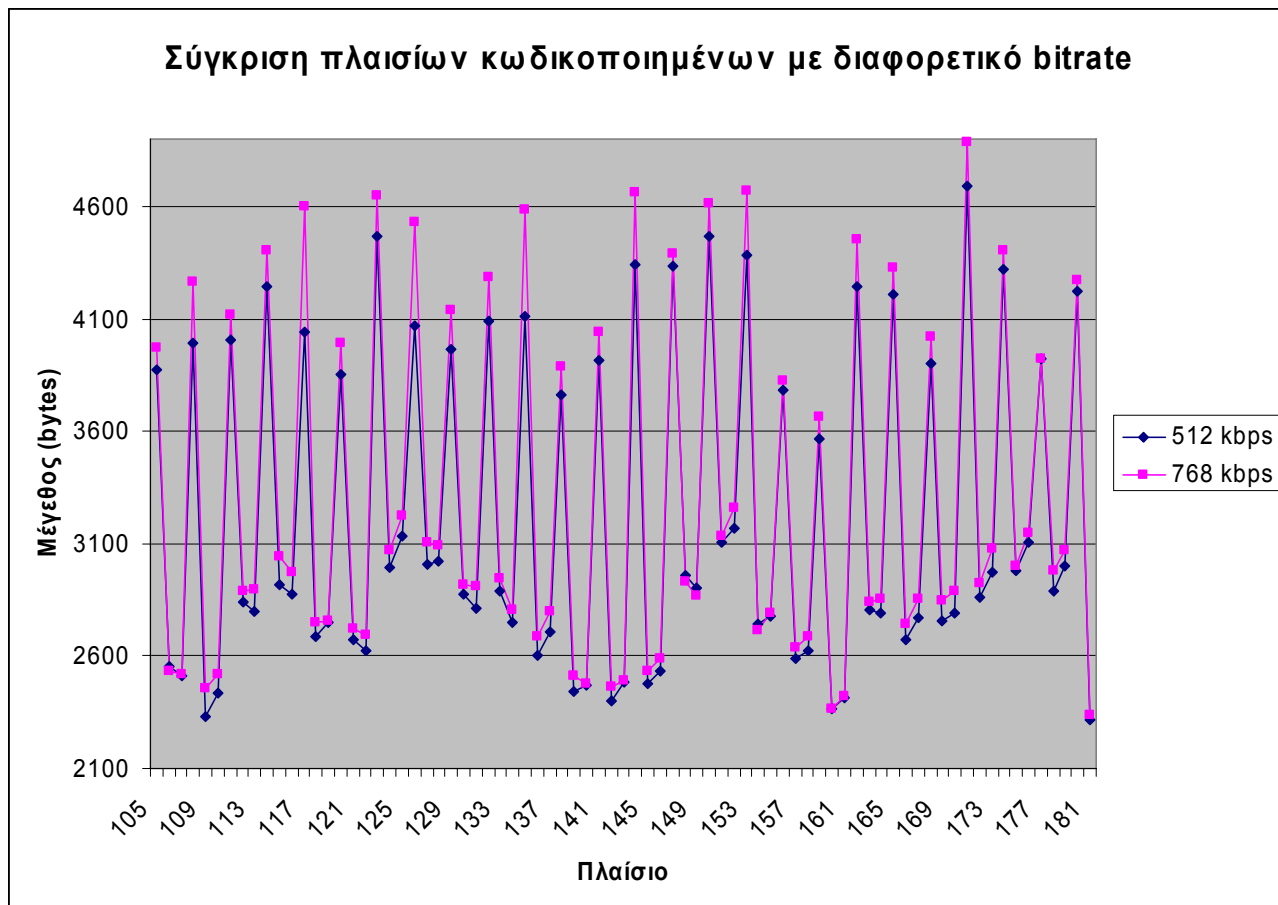
Στο πιο κάτω διάγραμμα φαίνεται η διακύμανση του bitrate όταν χρησιμοποιούνται περισσότερα στρώματα για τη μετάδοση του βίντεο. Αυτό το διάγραμμα αντικατοπτρίζει τις διάφορες προσομοιώσεις που προηγήθηκαν. Ο αναγνώστης βλέποντας το διάγραμμα αυτό και τον πίνακα της προσομοίωσης E, μπορεί να παρατηρήσει ότι το bitrate της προσομοίωσης αυτής δεν ξεπερνά τα 518400 bps, ενώ λογικά έχει περιθώριο μέχρι τα 768 kbps που είναι το bitrate του πέμπτου στρώματος. Αυτό δεν έγκειται σε λανθασμένη λειτουργία του αλγορίθμου, απλώς όταν ικανοποιηθούν όλες οι απαιτήσεις του χρήστη, το υπολογιζόμενο bitrate φτάνει τα 518400 bps. Το συγκεκριμένο bitrate είναι μεγαλύτερο από τα 512 kbps που αποτελούν τα όρια για το τέταρτο στρώμα, οπότε αυτό το υπολογιζόμενο bitrate εμπίπτει στο εύρος που καλύπτει το πέμπτο στρώμα, δηλαδή τα 768 kbps. Σ' αυτό οφείλεται και η μικρή διαφορά που παρατηρείται στις καμπύλες που δείχνουν το bitrate των προσομοιώσεων Δ και Ε.



Πιο κάτω φαίνονται μερικά πλαίσια που πάρθηκαν από βίντεο το οποίο μεταδόθηκε μέσω του συστήματος Goddard Streaming Media και του αλγορίθμου που υλοποιήσαμε. Δυστυχώς, δεν ήταν δυνατό να έχουμε στη διάθεσή μας ένα κωδικοποιητή ο οποίος να μπορεί να αλλάξει την κωδικοποίηση του βίντεο με διαφορετικές διαστάσεις πλαισίου και να το προσαρμόσει στα μέτρα του αλγορίθμου μας, έτσι στα πιο κάτω πλαίσια φαίνεται μόνο η ποιοτική αλλαγή που είχαμε στα διαφορετικά στρώματα κωδικοποίησης. Στο παράδειγμα που ακολουθεί παρουσιάζεται συγκριτικά το βίντεο σε τρεις περιπτώσεις στρωματοποίησης: με ένα στρώμα στα 56 kbps, με δύο στρώματα στα 56 και 128 kbps και με τρία στρώματα στα 56, 128 και 256 kbps. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το YUVviewer.



Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η διαφορά που υπάρχει στο μέγεθος των πλαισίων ανάμεσα σε κωδικοποίηση με ρυθμό 512 kbps και κωδικοποίηση με ρυθμό 768 kbps, που έγινε χρησιμοποιώντας τα εργαλεία που αναφέρονται στο Παράρτημα Α (mp4.exe).



Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι τα πλαίσια δεν έχουν αισθητή διαφορά στις δύο κωδικοποιήσεις. Επίσης, να σημειώσουμε ότι τα πλαίσια 0 μέχρι 104 είχαν ακριβώς το ίδιο μέγεθος γι' αυτό παραλείπονται από το διάγραμμα.

9 Μελλοντική έρευνα

Να επεκταθεί ο αλγόριθμος ώστε να λαμβάνει υπόψη του για την προσαρμογή και την τελική του απόφαση και άλλες επιπλέον παραμέτρους, όπως είναι για παράδειγμα οι επεξεργαστικές δυνατότητες του υπολογιστή του χρήστη ή η ποσότητα μνήμης που διαθέτει ο υπολογιστής και η κάρτα γραφικών του.

Επίλογος

Η τηλεοπτική επικοινωνία μέσα από τα δίκτυα πακέτων έχει λάβει αλματώδη πρόοδο τα τελευταία χρόνια, από το απλό κατέβασμα βίντεο μέχρι τις διάφορες προσαρμοστικές τεχνικές, και από την άμεση χρήση της υποδομής του δικτύου μέχρι και τη χρήση αρχιτεκτονικών που επικαλύπτουν το τι πραγματικά γίνεται στο δίκτυο. Η εξέλιξη στους αλγορίθμους και η αύξηση των υπολογιστικών δυνατοτήτων καθώς και οι εξελίξεις στις επικοινωνίες και στις τεχνολογίες υποδομής των δικτύων φέρνουν συνέχεια νέες βελτιώσεις στις ροές πολυμέσων, απλοποιώντας κάθε φορά μερικές από τις εκάστοτε προκλήσεις και δημιουργώντας νέες εφαρμογές και ταυτόχρονα νέες προκλήσεις. Η εμφάνιση νέων τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης με υψηλό εύρος ζώνης απαιτεί να δοθούν λύσεις στις ροές πολυμέσων που εφαρμόζονται όχι μόνο στα ασύρματα περιβάλλοντα, αλλά επίσης και όταν οι χρήστες κινούνται. Από την άλλη, η πιθανή υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας (QoS) στο Διαδίκτυο υπόσχεται ένα πιο προβλέψιμο δίκτυο για τις εφαρμογές ροής πολυμέσων, που μπορεί να κάνει πραγματικότητα τη μετάδοση ποιοτικών πολυμέσων με μικρή καθυστέρηση μέσα από συνδέσεις IP που έχουν μικρό εύρος ζώνης. Επομένως, πιστεύουμε ότι οι βιντεοροές θα συνεχίσουν να είναι ένας δελεαστικός τομέας για εξερεύνηση, ανάπτυξη και μελλοντική επέκταση.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Steven Ray McCanne. “Scalable Compression and Transmission of Internet Multicast Video”. PhD thesis, University of California, Berkeley, December 1996.
- [2] Wai-tian Tan. “Video Compression and Streaming over Packet-switched Networks”. PhD thesis, University of California, Berkeley, 2000.
- [3] Philippe de Cuetos. “Network and Content Adaptive Streaming of Layered–Encoded Video over the Internet”. PhD thesis, Institut Eurécom, Sophia, September 2003.
- [4] John G. Apostolopoulos, Wai-tian Tan, Susie J. Wee. “Video Streaming: Concepts, Algorithms and Systems”. Mobile and Media Systems Laboratory, HP Laboratories Palo Alto, September 2002.
- [5] Homayoun Yousefi’zadeh Hamid Jafarkhani Amir Habibi. “Layered Media Multicast Control (LMMC): Rate Allocation and Partitioning”. University of California, Irvine.
- [6] Aruna Thakur, Lenka Motyckova-Carr. “Encoding of Video in Layers Based on Perceptual Quality of Video”. Luleå University of Technology, Sweden.
- [7] Young-Gook Kim, C.-C. Jay Kuo. “TCP-friendly Layered Video for Internet Multicast”. University of Southern California, Los Angeles, CA 90089-2564.
- [8] Jun-ichi Kimura, Fouad A. Tobagi, Jose-Miguel Pulido, Peder J. Emstad. “Perceived quality and bandwidth characterization of layered MPEG-2 video encoding”. Dept. of Electrical Engineering, Stanford University, Stanford. September 1999.
- [9] “Encoding Settings Calculator”
https://helixcommunity.org/project/shownotes.php?release_id=204
- [10] <http://www.techteam.gr/index.php?act=kb&article=159>
- [11] Mathias Johanson, Arne Lie. “Layered Encoding and Transmission of Video in Heterogeneous Environments”. Alkit Communications, Sweden, SINTEF Telecom and Informatics, Norway.
- [12] Eitan Altman, Tania Jimenez. “NS Simulator for beginners”. Lecture notes, University de Los Andes, Merida, Venezuela and ESSI, Sophia-Antipolis, France. December 2003.
- [13] Kevin Fall, Kannan Varadhan. “The NS manual (formerly ns Notes and Documentation)”. UC Berkeley, LBL, USC/ISI and Xerox PARC. October 2005.
- [14] Worcester Polytechnic Institute. “Research related to performance of networks, specifically congestion control and multimedia systems”.
<http://perform.wpi.edu>

- [15] "MPEG-4 and H.263 Video Traces for Network Performance Evaluation"
<http://trace.eas.asu.edu/TRACE/trace.html>
- [16] Chih-Heng Ke, Cheng-Han Lin, Ce-Kuen Shieh, Wen-Shyang Hwang, "A Novel Realistic Simulation Tool for Video Transmission over Wireless Network", The IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC2006), June 5-7, 2006, Taichung, Taiwan
http://hpds.ee.ncku.edu.tw/~smallko/ns2/Evalvid_in_NS2.htm
- [17] S. Cheung, M. H. Ammar, X. Li, "On the Use of Destination Set Grouping to Improve Fairness in Multicast Video Distribution", Proc. IEEE INFOCOM '96, San Francisco, pp. 553–60, Mar. 1996.
- [18] B. Leiner, V. Cerf, D. Clark, R. Kahn, L. Kleinrock, D. Lynch, J. Postel, L. Roberts, and S. Wolff. "A brief history of the internet". The Internet Society, 2000.
- [19] Quicktime. <http://www.apple.com>
- [20] Real Media. <http://www.realnetworks.com>
- [21] Windows Media. <http://www.microsoft.com>.
- [22] E. Amir, S. McCanne, R. Katz. "Receiver-driven bandwidth adaptation for light-weight sessions". In Proc. ACM Intl. Multimedia Conf. '97, pp. 415-426, Seattle, WA., November 1997.
- [23] Gary J. Sullivan. "Video Compression – From concepts to the H.264/AVC standard". Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 1, pp. 18-30, January 2005.
- [24] Brian Nielsen, Thomas Bang, Jesper Krogh, Heino Juvoll Madsen, Thomas Poulsen. "Transmission of Layered Video". Aalborg University, January 1999.
- [25] Dapeng Wu, Yiwei Thomas Hou, Wenwu Zhu, Ya-Qin Zhang, Jon M. Peha. "Streaming Video over the Internet: Approaches and Directions". IEEE Transactions On Circuits And Systems For Video Technology, Vol. 11, No. 3, pp. 282-300, March 2001.
- [26] Bo Li, Jiangchuan Liu. "Multirate Video Multicast over the Internet: An Overview". IEEE Network, , University of Science and Technology, Hong Kong, January/February 2003.
- [27] Jun Xin, Chia-Wen Lin, Ming-Ting Sun. "Digital Video Transcoding". Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No.1, pp. 84-97, January 2005.
- [28] Xue Li, Mostafa H. Ammar, Sanjoy Paul. "Video Multicast over the Internet". Partially supported by Lucent, Intel, IBM and the International Institute of Foundation grant NCR-96283793.

- [29] Aravindan Raghuvier, NamOh Kang, David H.C.Du. "Techniques for Efficient Streaming of Layered Video in Heterogeneous Client Environments". University of Minnesota, Minneapolis and Chung-Ang University, South Korea, April 2005.
- [30] "IBM MPEG-4 Technologies"
<http://www.research.ibm.com/mpeg4/Projects/MPEG4.htm>
- [31] David Kuhlman, Michael West. "Overview of the History and State of MPEG-4". The Video Development Initiative MPEG-4 Working Group, November 2002.
- [32] Rob Koenen. "Overview of the MPEG-4 Standard". ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N3931, January 2001.
- [33] Celio Albuquerque, Brett J. Vickers, Tatsuya Suda. "A source adaptive multi-layered multicast algorithm for Internet Video Distribution". University of California, Irvine and Rutgers University, 1999.
- [34] Brent Welch, Prentice Hall. "Practical Programming in Tcl and Tk", 3rd Edition, ISBN 0-13-022028-0
<http://www.beedub.com/book/>
- [35] Jae Chung, Mark Claypool, Robert Kinicki. "MTP: A Streaming-Friendly Transport Protocol". Worcester Polytechnic Institute, Worcester, USA.
- [36] J.-R. Ohm, Bildsignalverarbeitung fuer Multimedia-Systeme,
<http://bs.hhi.de/users/ohm/download/bvm-kap1&2.pdf>, (1999).

Παράρτημα Α

Το βίντεο που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές ονομάζεται «batuka.mpeg». Για να γίνει μετάδοση του συγκεκριμένου βίντεο μέσα από το δίκτυό μας, πρέπει να ακολουθηθούν τα πιο κάτω βήματα (για περισσότερες πληροφορίες βλέπε [16]):

1. Windows:

Δημιουργία ενός φακέλου με όνομα

```
c:\videotest\batuka\HEIGHTxWIDTH_NUMOFFps_NUMOFkbps
```

2. Windows:

Στο φάκελο που δημιουργήθηκε πιο πάνω αντίγραψε τα πιο κάτω προγράμματα / αρχεία:

```
avitoyuv.exe  
et.exe  
example.par  
MP4.exe  
mpeg4decoder.exe  
mpeg4encoder.exe  
myfixyuv.exe  
psnr.exe  
YUVviewer.exe
```

3. Windows:

Με χρήση του “Open Video Converter” κάνε μετατροπή του “batuka.mpeg” σε μορφή .avi, και αντίγραψε το νέο αρχείο “batuka.avi” στο φάκελο που δημιούργησες πιο πριν.

4. Windows:

Μετάτρεψε το “batuka.avi” σε μορφή .yuv, εκτελώντας την πιο κάτω εντολή στο φάκελο που δημιούργησες πριν:

```
avitoyuv.exe batuka.avi batuka.yuv
```

5. Windows:

Μέσα στο αρχείο “example.par”, ρύθμισε τις πιο κάτω παραμέτρους στις επιθυμητές τιμές:

```
Source.Width  
Source.Height  
Source.LastFrame  
Source.FilePrefix  
Source.FrameRate[0]  
RateControl.BitsPerSecond[0]  
Scalability.Spatial.Width  
Scalability.Spatial.Height
```

6. Windows:

Για να κωδικοποιηθεί η ακολουθία .yuv σε μορφή MPEG-4, εκτέλεσε την πιο κάτω εντολή στο φάκελο που δημιούργησες πριν:

```
mpeg4encoder.exe example.par
```

7. Windows:

Με την εντολή στο προηγούμενο βήμα, δημιουργήθηκε η συμπιεσμένη ακολουθία "cmp\batuka.cmp" του βίντεο σε μορφή MPEG-4. Αντέγραψε την ακολουθία αυτή στο φάκελο που δημιούργησες πιο πριν και εκτέλεσε την πιο κάτω εντολή (από το Evalvid) για να δημιουργηθεί το αρχείο "st" που θα περιέχει τις πληροφορίες για τα πλαίσια του βίντεο:

```
MP4.exe -send 224.1.2.3 5555 1000 videoname.cmp >st
```

8. Windows:

Από το αρχείο "st" να δημιουργήσεις μέσω του MS-Excel ένα νέο αρχείο με όνομα "videoframes.dat" που να έχει μόνο το μέγεθος των πλαισίων του βίντεο.

9. Linux:

Δημιούργησε ένα φάκελο με όνομα:

```
z:\ns2\ns-allinone-2.28\ns-
```

```
2.28\tcl\goddard\ex\HEIGHTxWIDTH_NUMOFfps_ NUMOFkbps
```

και αντίγραψε σε αυτό τα πιο κάτω αρχεία:

```
st  
videoframes.dat  
test-goddard.tcl  
a.out (executable of the file rd_be.c)  
videoname.cmp  
videoname.yuv
```

10. Linux

Μέσα στο αρχείο:

```
\ns2\ns-allinone-2.28\ns-2.28\goddard\goddard.h
```

ρύθμισε την παράμετρο "TOTAL_FRAMES" και κάνε compile το σύστημα Goddard.

11. Linux

Διάγραψε το αρχείο "sd.dat" εάν υπάρχει, εκτέλεσε την προσομοίωση και δημιούργησε το αρχείο "rd.dat", εκτελώντας τις εντολές:

```
# rm -f sd.dat; ns test-goddard.tcl; a.out;
```

12. Linux

Χρησιμοποίησε το εργαλείο "et.exe" (από το Evalvid) για να αναπαραχθεί το λαμβανόμενο βίντεο ("err.cmp").

```
# et.exe sd.dat rd.dat st batuka.cmp err.cmp 1
```

13. Windows

Αντέγραψε το αρχείο "err.cmp" στο φάκελο των Windows που δημιούργησες πριν

14. Windows

Εκτέλεσε την πιο κάτω εντολή για την αποκωδικοποίηση του βίντεο και τη μετατροπή του σε .yuv μορφή.

```
mpeg4decoder.exe err.cmp err HEIGHT WIDTH > df
```

15. Linux

Αντέγραψε από τα Windows τα πιο κάτω αρχεία:

```
df  
err.yuv
```

16. Linux

Διόρθωσε την αποκωδικοποιημένη ακολουθία .yuv, εκτελώντας την εντολή:

```
#myfixyuv.exe df qcif TOTAL_FRAMES err.yuv myfix.yuv
```

17. Linux

Υπολόγισε το PSNR, εκτελώντας την εντολή:

```
# psnr.exe HEIGHT WIDTH 420 videoname.yuv myfix.yuv >  
psnr_myfix
```

18. Σχημάτισε γραφική παράσταση του PSNR, εκτελώντας την εντολή:

```
# xgraph psnr_myfix
```