

17. IPTV και Netflix: Πώς το διαδίκτυο μπορεί να υποστηρίξει την κίνηση βίντεο;

Είδαμε στο Κεφάλαιο 13 ότι το Διαδίκτυο προσφέρει μία “καλύτερης προσπάθειας”, δηλαδή, μία “χωρίς προσπάθεια” υπηρεσία. Έτσι, πώς μπορεί να υποστηρίξει τη διανομή βίντεο, που συχνά επιβάλλει αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά τη ρυθμιαπόδοση και την καθυστέρηση;

17.1 Μία σύντομη απάντηση

17.1.1 Μοντέλα θέασης

Η παρακολούθηση βίντεο είναι ένα σημαντικό μέρος της καθημερινής ζωής πολλών ανθρώπων, και η συσχέτισή της με το Διαδίκτυο και τα ασύρματα δίκτυα είναι γεωμετρικά αυξανόμενη. Ταινίες, τηλεοπτικές εκπομπές και βίντεο από το σπίτι μας μεταφέρονται από το υπολογιστικό νέφος (cloud) μέσω του δικτύου IP στις κινητές συσκευές. Αυτή η τάση αλλάζει τόσο την ίδια τη διαδικτύωση όσο και τη βιομηχανία θεάματος. Το 2011, υπήρχαν πάνω από 100 εκατομμύρια χρήστες IPTV (Internet Protocol TeleVision) στις ΗΠΑ, και τα YouTube και Netflix καταλαμβάνουν περίπου το 50% της χωρητικότητας του Διαδικτύου. Καθώς η τάση της αποσύνδεσης μεταξύ των περιεχομένων, των καναλιών διανομής περιεχομένου και του περιεχόμενου που καταναλώνουν οι συσκευές εντείνεται, το IP έχει γίνει η βάση σχεδόν όλων των συστημάτων διανομής περιεχομένου.

Η τάση αυτή έχει επιφέρει μία επανάσταση στις προτιμήσεις μας ως τηλεθεατές:

- Τύπος Περιεχομένου: Τόσο η δημιουργία όσο και η αδειοδότηση του περιεχομένου των χρηστών έχουν γίνει το κεντρικό σημείο ενδιαφέροντος. Σαφώς, η αύξηση στη δημιουργία περιεχομένου από τους χρήστες συνεπάγεται μία αυξανόμενη ανάγκη στην ικανότητα ανάρτησης (uploading), το οποίο έχει παραδοσιακά σχεδιαστεί να έχει μικρότερη χωρητικότητα από την αντίστοιχη λειτουργία της λήψης αρχείων.
- Πότε: Για διαφορετικά είδη βίντεο, το περιεχόμενό τους μπορεί να παρακολουθηθεί κατά βούληση με τη χρήση συσκευών, όπως η συσκευή ψηφιακής

καταγραφής βίντεο (Digital Video Recorder, DVR) για το IPTV ή υπηρεσίες όπως το HBO Go.

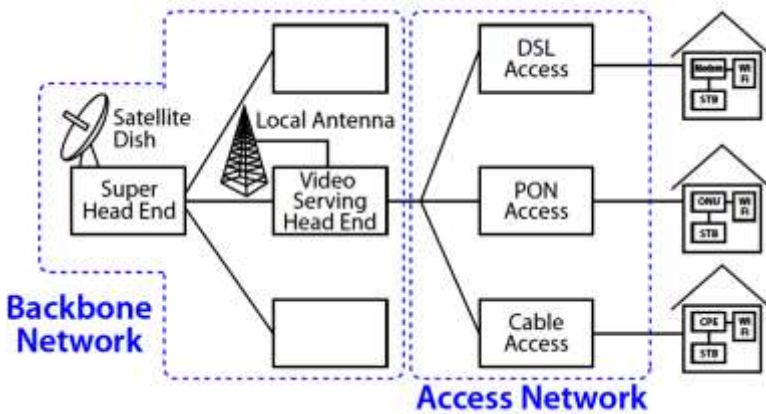
- Πού: Μπορούμε να παρακολουθήσουμε οποιοδήποτε βίντεο από όπου σχεδόν επιθυμούμε, δεδομένης μίας αρκετά γρήγορης σύνδεσης στο Διαδίκτυο.
- Πώς: Εκτός από την αποκλειστική χρήση τηλεοράσεων ή επιτραπέζιων υπολογιστών (desktop computers), μπορούμε να έχουμε πρόσβαση από τα κινητά τηλέφωνα, τα tablet και από οποιαδήποτε συσκευή με δυνατότητα σύνδεσης στο Διαδίκτυο και με μία εύχρηστη οθόνη.
- Ποσότητα: Παρακολουθούμε περισσότερα βίντεο, λόγω της ύπαρξης πολλών εφαρμογών όπως οι Netflix, Hulu, Deja, ενώ μας δίνεται η δυνατότητα ενσωμάτωσής τους σε πολλές ιστοσελίδες. Για παράδειγμα, το Φεβρουάριο του 2012 το Hulu είχε σχεδόν 31 εκατομμύρια θεατές οι οποίοι παρακολούθησαν 951 εκατομμύρια βίντεο. Ομοίως, η Comcast NBS Universal είχε 39 εκατομμύρια θεατές οι οποίοι παρακολούθησαν 205 εκατομμύρια βίντεο (υπερδιπλασιάζοντας το αντίστοιχο ποσοστό που καταγράφηκε το καλοκαίρι του 2011). Ορισμένα από αυτά παρέχονται δωρεάν, άλλα είναι δωρεάν αλλά με επιπρόσθετες διαφημίσεις, ορισμένα απαιτούν μηνιαία συνδρομή, ενώ σε άλλα απαιτείται πληρωμή ανά θέαση και μερικά συμπεριλαμβάνονται σε πακέτο υπηρεσιών, (όπως το τριπλό πακέτο (triple play) της IPTV, της πρόσβασης στο Διαδίκτυο και του VoIP). Αν η χρέωση της σύνδεσης στο Διαδίκτυο συσχετίζεται με τη χρήση, υπάρχει και η παράμετρος του κόστους μεταφοράς ανά GB, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 11.

Μπορούμε να χωρίσουμε τα μοντέλα παρακολούθησης βίντεο σε τέσσερις διαστάσεις. Κάθε συνδυασμός παρουσιάζει διαφορετικές επιπτώσεις στο σχεδιασμό του δικτύου για την υποστήριξη του συγκεκριμένου μοντέλου παρακολούθησης:

- Πραγματικού χρόνου (real-time) - προκωδικοποιημένα (precoded) βίντεο: Ορισμένα βίντεο παρακολουθούνται καθώς δημιουργούνται σε πραγματικό χρόνο, όπως τα αθλητικά, οι ειδήσεις, ο καιρός. Ωστόσο, η συντριπτική πλειοψηφία τους είναι προκωδικοποιημένα: το περιεχόμενο έχει ήδη κωδικοποιηθεί και αποθηκευθεί κάπου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, κάθε βίντεο αποθηκεύεται σε εκατοντάδες διαφορετικές εκδοχές, το καθένα από αυτά με διαφορετικό πρότυπο (format) αναπαραγωγής ή ρυθμό μετάδοσης (bit rate). Τα βίντεο πραγματικού χρόνου είναι πιο ευαίσθητα σε καθυστερήσεις, ενώ τα προκωδικοποιημένα έχουν τη δυνατότητα της κατάλληλης προπαρασκευής. Ορισμένες άλλες υπηρεσίες βίντεο δεν είναι μόνο πραγματικού χρόνου, αλλά και διαδραστικά αμφίδρομες, όπως οι βίντεο-κλήσεις, οι βίντεο-συνδιασκέψεις και τα διαδικτυακά παιχνίδια (on line gaming). Σαφώς, τα διαδραστικά βίντεο παρουσιάζουν ακόμα πιο αυστηρές απαιτήσεις αναφορικά με την καθυστέρηση και το jitter (δηλαδή, τη διακύμανση της χρονικής καθυστέρησης).

- Ισοζυγισμός ροής ή λήψης: Ορισμένα βίντεο, όπως εκείνα που είναι αναρτημένα στο Netflix και το YouTube, μας παρέχονται χωρίς η συσκευή μας να έχει τη δυνατότητα να κρατήσει αντίγραφο του αρχείου (αν και μερικές φορές, ταινίες στο Netflix μπορεί να αποθηκευτούν σε μία τοπική μνήμη, ενώ το YouTube προσφέρει πλέον τη δυνατότητα ενοικίασης ταινιών). Σε άλλες περιπτώσεις, όπως στο iTunes, απαιτείται η λήψη ολόκληρου του βίντεο πριν την αναπαραγωγή του σε κάποια μεταγενέστερη χρονική στιγμή. Φυσικά, το ίδιο το περιεχόμενο μπορεί να διαγράφεται αυτόματα από τα τοπικά μέσα αποθήκευσης, αν γίνεται ορθή διαχείριση των ψηφιακών δικαιωμάτων, όπως στην περίπτωση της ενοικίασης ταινιών. Συνδυασμός αυτών των δύο μας προσφέρει τη δυνατότητα της μερικής λήψης και αναπαραγωγής. Όπως αναλύεται στο Προχωρημένο Υλικό, μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης διακύμανσης της χρονικής καθυστέρησης και πρακτικά ακολουθείται συνεχώς, με εξαίρεση τις περιπτώσεις διαδραστικού και απόλυτα πραγματικού χρόνου περιεχομένου.
- Μέσω καναλιών (channelized) ή κατ' απαίτηση βίντεο: Μερικά περιεχόμενα οργανώνονται σε κανάλια και πρέπει να ακολουθείται αναλόγως το πρόγραμμα του εκάστοτε καναλιού. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει και η από δεκαετίες εμπειρία μας από την τηλεόραση. Ακόμη και με τη χρήση του DVR, το πρόγραμμα δεν μπορεί να μεταφερθεί σε πραγματικό χρόνο. Αντίθετα, το βίντεο κατ' απαίτηση (Video on Demand - VoD) μας επιτρέπει να λαμβάνουμε το περιεχόμενο, όταν το επιθυμούμε. Τόσο το YouTube όσο και το Netflix είναι VoD. Υπάρχουν επίσης υπηρεσίες VoD στην τηλεόραση, οι οποίες συνήθως χρεώνουν κάποιο αρχικό χρηματικό ποσό. Μερικές φορές, οι ιδιοκτήτες του περιεχομένου μετατρέπουν το μοντέλο, όπως έκανε το HBO στις ΗΠΑ το 2011. Άλλαξε τις υπηρεσίες HBO Go στους υπολογιστές και τις φορητές συσκευές σε μοντέλο VoD. Συνδυαστικά, υπάρχει το NVoD, Near Video on Demand, το οποίο διατηρεί το ίδιο κανάλι κάθε μερικά λεπτά, έτσι ώστε μέσα σε αυτή την ολιγόλεπτη χρονική περίοδο να προσφέρεται η εμπειρία του VoD.
- Μονή εκπομπή (Unicast) ή Πολλαπλή εκπομπή (Multicast): Η μονή εκπομπή ορίζεται ως η μετάδοση από μία πηγή προς ένα δέκτη, ενώ η πολλαπλή εκπομπή ορίζεται ως η μετάδοση πληροφορίας από μία πηγή προς πολλούς προορισμούς, ίσως και σε 10 εκατομμύρια, για γεγονότα όπως οι Ολυμπιακοί Αγώνες, οι οποίοι ανήκουν σε μία ομάδα πολλαπλής εκπομπής. Μία «ακράια» μορφή αυτής της πολλαπλής εκπομπής είναι η ανοικτή εκπομπή (broadcast) όπου όλοι ανήκουν σε αυτήν την ομάδα. Εάν ορισμένο τμήμα του περιεχομένου δεν είναι επιθυμητό, δεν απαιτείται η παρακολούθησή του, όμως παρόλα αυτά αποστέλλεται. Η τηλεόραση είναι παραδοσιακά ένα μέσο πολλαπλής εκπομπής, ορισμένες φορές με τη χρήση μέσων που είναι

εγγενώς πολλαπλής εκπομπής, όπως οι δορυφόροι. Το Διαδίκτυο είναι παραδοσιακά μονής εκπομπής. Τώρα οι δύο ακραίες καταστάσεις συγκλίνουν όλο και περισσότερο. Παρατηρούνται δυνατότητες μονής εκπομπής στη διανομή βίντεο σύμφωνα με τις διευθύνσεις IP, καθώς και πολλαπλής εκπομπής σε δίκτυα IP (τα οποία πραγματοποιούνται είτε στο επίπεδο δικτύου μέσω δρομολόγησης πολλαπλής εκπομπής IP ή στο επίπεδο εφαρμογών μέσω δικτύων P2P).

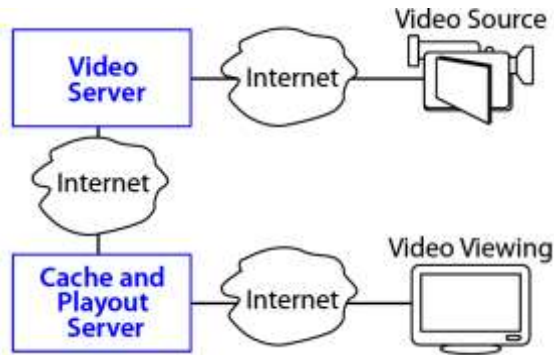


Σχήμα 17.1 Μία τυπική αρχιτεκτονική της IPTV. Το περιεχόμενο συλλέγεται στον κεντρικό πομπό και διανέμεται στους διάφορους τοπικούς πομπούς των βίντεο κατά μήκος όλης της χώρας, οι οποίοι συλλέγουν και το περιεχόμενο τοπικής εμβέλειας. Στη συνέχεια κατανέμεται σε δίκτυα πρόσβασης ποικίλης φύσης όσον αφορά τα υλικά κατασκευής τους όπως χαλκός, οπτικές ίνες ή καλώδια, προτού φτάσει στα σπίτια μας. Αυτό συχνά πραγματοποιείται εντός ιδιωτικών δικτύων που ανήκουν σε έναν μοναδικό πάροχο υπηρεσιών Διαδικτύου (ISP), ο οποίος και τα διαχειρίζεται.

Φαίνεται ότι υπάρχουν $2^4 = 16$ συνδυασμοί οι οποίοι χρησιμοποιούν την προγενέστερη ταξινόμηση των τρόπων θέασης βίντεο. Προφανώς, ορισμένοι συνδυασμοί δεν έχουν νόημα, όπως τα βίντεο πραγματικού χρόνου πρέπει να είναι συνεχούς ροής (streaming) αλλά δεν μπορούν να μεταφορτωθούν. Εντούτοις, τα προκωδικοποιημένα βίντεο μπορεί να είναι είτε συνεχούς ροής είτε να μεταφορτώνονται. Επίσης, τα VoD δεν δύνανται να είναι πολλαπλής εκπομπής καθώς κάθε χρήστης αναζητά το περιεχόμενο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, ενώ το περιεχόμενο που διοχετεύεται μέσω καναλιών ή το περιεχόμενου NVoD μπορεί να είναι είτε μονής είτε πολλαπλής εκπομπής.

17.1.2 Βίντεο IP: IPTV και VoI

Ο όρος “Βίντεο IP” ουσιαστικά περιλαμβάνει δύο όρους: (1) την IPTV (Internet Protocol Television) και (2) το Βίντεο μέσω Διαδικτύου (Video over the Internet - VoI). Η IPTV μετατρέπει τη μετάδοση του τηλεοπτικού καναλιού σε μία μετάδοση βασισμένη στο IP. Η VoI αντιμετωπίζει το Διαδίκτυο ως μία σωλήνωση, η οποία μπορεί να υποστηρίξει οποιοδήποτε τύπο περιεχομένου προς μεταφορά. Το VoI γίνεται διαρκώς εξαιρετικά πιο δημοφιλές για τη χρήση βίντεο σε σχέση με την IPTV. Αν όλα τα περιεχόμενα είναι διαθέσιμα μέσω VoI, τότε ποια είναι τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η IPTV στην εμπειρία του χρήστη;



Σχήμα 17.2 Μία χαρακτηριστική αρχιτεκτονική βίντεο μέσω Διαδικτύου. Πηγές βίντεο, οι οποίες ποικίλουν από iPhone μέχρι επαγγελματικές βιντεοκάμερες, αναρτούν το περιεχόμενο σε εξυπηρετητές βίντεο. Εν συνεχεία, διανέμονται μέσω τοπικών μνημών προς θεατές σε όλο τον κόσμο, οι οποίοι κατεβάζουν το εκάστοτε βίντεο στις συσκευές τους. Όλη αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται στο δημόσιο Διαδίκτυο.

(1) Η IPTV συχνά περιλαμβάνεται ως τμήμα της τριπλής ή της τετραπλής δέσμης υπηρεσιών που παρέχονται από ένα ISP. Κατανέμεται από ένα ιδιωτικό δίκτυο διαχείρισης, μέσω ενός μετασχηματιστή ψηφιακού σήματος (Set-Top-Box, STB) καθ' υπόδειξη του χρήστη. Αυτό το ιδιωτικό δίκτυο χρησιμοποιεί το IP ως πρωτόκολλο ελέγχου, αλλά πολλά κομμάτια του έχουν εγκατασταθεί και διαχειρίζονται από έναν ενιαίο πάροχο υπηρεσιών Διαδικτύου όπως τηλεφωνικές εταιρείες ή εταιρείες τηλεπικοινωνιών οι οποίες προσφέρουν πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Αυτό καθιστά πιο εύκολο τον έλεγχο της ποιότητας των υπηρεσιών. Το περιεχόμενο συχνά διοχετεύεται μέσω καναλιών πολλαπλών εκπομπών και συνεχούς ροής αλλά με τη δυνατότητα εγγραφής από το DVR.

Προτού η τηλεόραση στραφεί προς τα δίκτυα του Διαδικτύου, κατανεμόταν κυρίως μέσω κάποιου από τους παρακάτω τρεις τρόπους: μετάδοση μέσω αέρα, μέσω δορυφόρων ή καλωδίων. Γιατί, λοιπόν, η επανάσταση της IPTV συμβαίνει τώρα; Υπάρχουν μερικοί βασικοί λόγοι:

- Σύγκλιση: σχεδόν τα πάντα συγκλίνουν στο IP, συμπεριλαμβανομένης και της φωνητικής τηλεφωνίας. Βάζοντας το βίντεο στο IP μπορεί να γίνει η διαχείρισή τους ως ενιαία πλατφόρμα.
- Κόστος: Έχοντας μία ενιαία πλατφόρμα μειώνεται το κόστος συντήρησης διαφορετικών δικτύων.
- Ευελιξία: Το IP έχει αποδείξει ότι ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά του είναι η δυνατότητα υποστήριξης πληθώρας μελλοντικών εφαρμογών.
- Η συμπίεση αρχείων βελτιώνεται συνεχώς ενώ η χωρητικότητα πρόσβασης του δικτύου παρουσιάζει επαρκή αύξηση, γεγονός το οποίο και έχει καταστήσει εφικτή την αποστολή καναλιών HDTV.

(2) Βίντεο μέσω Διαδικτύου (Video over Internet, VoI). Κατανέμεται εξ' ολοκλήρου από δημόσια δίκτυα, συχνά μέσω μονής εκπομπής, προς μία πληθώρα συσκευών καταναλωτών. Δεδομένης της τρέχουσας εξέλιξης των επιχειρηματικών μοντέλων, το VoI καταλαμβάνει όλο και περισσότερο τον τομέα της IPTV καθώς οι καταναλωτές έχουν πρόσβαση στο περιεχόμενο των βίντεο από τις συνδέσεις IP χωρίς εγγραφή σε υπηρεσίες TV. Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι VoI:

- Ο ιδιοκτήτης του περιεχομένου στέλνει βίντεο μέσω αρχιτεκτονικών πελάτη –εξυπηρετητή – χωρίς συνδρομή, όπως στα YouTube, ABC και BBC.
- Ο ιδιοκτήτης του περιεχομένου στέλνει το βίντεο μέσω αρχιτεκτονικών πελάτη -εξυπηρετητή με μία συνδρομή, όπως στα Netflix, Amazon Prime, Hulu Plus και HBO Go.
- Δωρεάν ανταλλαγή ταινιών με χρήση P2P, όπως στα Bit Torrent και PPLive.

Εμείς εξετάσαμε τα μοντέλα εσόδων για την IPTV και το VoI. Αναφορικά με τα μοντέλα κόστους, συχνά αποτελούνται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- Περιεχόμενο: Η αγορά των δικαιωμάτων διανομής του περιεχομένου. Οι δημοφιλείς και πρόσφατες ταινίες και τηλεοπτικές σειρές, φυσικά χρεώνονται περισσότερο.
- Εξυπηρετητές: Η εγκατάσταση και η συντήρηση των ηλεκτρονικών συσκευών και των συστημάτων αποθήκευσης.
- Η χωρητικότητα του δικτύου: Η απόκτηση ή η μίσθωση δικτυακών χωρητικότητων για τη μετακίνηση του περιεχομένου και την εν γένει παράδοσή του στους καταναλωτές.
- Η παράδοση του εξοπλισμού, όπως των STB και των κονσολών παιχνιδιών, στους πελάτες.
- Λογισμικό: Τα συστήματα λογισμικού που διαχειρίζονται όλες τις προηγούμενες παραμέτρους και αλληλεπιδρούν με τους καταναλωτές.

Είτε αναφερόμαστε σε IPTV είτε σε VoI, η μέτρηση της ποιότητας εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας, την καθυστέρηση και τη διακύμανση της καθυστέρησης. Τι είδους ρυθμοί μετάδοσης πληροφορίας απαιτούνται για τα βίντεο; Εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως από την ποσότητα κίνησης στο βίντεο, την αποτελεσματικότητα των μεθόδων συμπίεσης, την ανάλυση της οθόνης και το λόγο της απόστασης θέασης προς το μέγεθος της οθόνης. Αλλά σε γενικές γραμμές, η ελάχιστη απαίτηση σήμερα κυμαίνεται στα 300 kbps. Κάτω από αυτό το όριο η οπτική ποιότητα είναι πάρα πολύ κακή, ακόμη και σε μικρές οθόνες. Για ταινίες κανονικής ευκρίνειας χρειαζόμαστε περίπου 1Mbps, ενώ τυπικά μία ταινία καταλαμβάνει 1-2 GB. Για ταινίες υψηλής ευκρίνειας χρειαζόμαστε τουλάχιστον 6-8 Mbps, ενώ τυπικά μία τέτοια ταινία καταλαμβάνει 5-8 GB. Πραγματικά τα βίντεοHD απαιτούν 20-25 Mbps για να διανεμηθούν. Η τελευταία έκδοση του Ultra HD χρειάζεται πάνω από 100 Mbps. Καθώς θα εξηγήσουμε στην επόμενη ενότητα, η δημιουργία λειτουργικών βίντεοIP απαιτεί τεχνολογίες τόσο από την επεξεργασία σήματος όσο και από την επικοινωνία δικτύων.

17.2 Μία εκτενής απάντηση

Όπως φαίνεται στο Σχήμα17.3, η συνολική στοίβα πρωτοκόλλων για τα βίντεο IP περιλαμβάνει τα ακόλουθα: MPEG μέσω HTTP/ SIP/ IGMP/ RTSP, μέσω RTP/ UDP/ TCP, μέσωIP, μέσω ATM ή Ethernet, μέσω ασύρματων δικτύων/οπτικών ινών/ DSL/ καλωδίων. Σε αυτή την ενότητα, θα προχωρήσουμε σε μερική λεπτομερή εξέταση των τριών κορυφαίων παραμέτρων: i) της συμπίεσης, ii) των εφαρμογών και iii) της μεταφοράς, προσπαθώντας να αναδείξουμε κάποιες ενδιαφέρουσες αρχές της δικτύωσης πέρα από την πληθώρα των ακρωνυμίων.

MPEG, etc.	Compression
HTTP / SIP / IGMP / RTSP	Application
RTP / UDP / TCP	Transport
IP	Network
ATM / Ethernet	Link
Wireless / Fiber / DSL / Cable	Physical

Σχήμα 17.3 Πολύ-επίπεδη αρχιτεκτονική δικτύων για τη μετάδοση βίντεο. Πρότυπα συμπίεσης όπως τοMPEG χρησιμοποιούν ποικίλα πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογών,

τα οποία με τη σειρά τους βασίζονται σε συνδυασμούς πρωτόκολλων επίπεδων μεταφοράς και δικτύου. Η προσοχή αυτής της ενότητας στρέφεται στις βασικές ιδέες των τριών πρώτων επιπέδων.

17.2.1 Συμπίεση

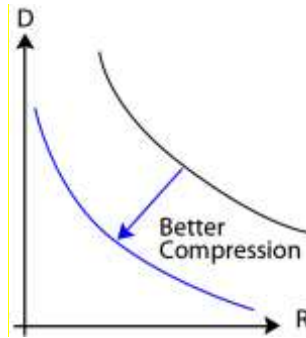
Ένα βίντεο είναι μία ακολουθία πλαισίων τα οποία κινούνται με δεδομένη ταχύτητα. Τα πλαίσια αυτά είναι ακίνητες εικόνες που αποτελούνται από εικονοστοιχεία (pixel). Κάθε εικονοστοιχείο περιγράφεται από τα χρώματα και τη φωτεινότητα, τα οποία κωδικοποιούνται ψηφιακά σε bit. Ο αριθμός των bit ανά πλαίσιο σε συνδυασμό με τον αριθμό των πλαισίων ανά δευτερόλεπτο μας δίνει το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας του αρχείου ενός βίντεο. Τυπικοί ρυθμοί πλαισίων ορίζονται ως 25 ή 29,97 πλαίσια ανά δευτερόλεπτο για κανονική ευκρίνεια, 50 ή 60 πλαίσια ανά δευτερόλεπτο για υψηλή ευκρίνεια. Κατά μέσο όρο θα έχουμε για βίντεο υψηλής ευκρίνειας $1.280 \times 720 = 921.600$ ή $1.920 \times 1.080 = 20.736.004$ πλαίσια ανά δευτερόλεπτο. Αν έπρεπε να στείλουμε όλα αυτά τα bit δεν θα μπορούσαμε να μεταφέρουμε ένα βίντεο με μία αξιοπρεπή ποιότητα στην πλειοψηφία των εν ενεργεία χρηστών στο Διαδίκτυο.

Προκειμένου να συμπεριληφθεί μεγαλύτερη ποσότητα περιεχόμενου εντός μίας δεδομένης σύνδεσης, απαιτείται συμπίεση του αρχείου. Η συμπίεση αποτελεί τη διαδικασία απομάκρυνσης των περιττών τμημάτων από τα σήματα. Εάν το προκύπτον αρχείο δύναται να ανακτηθεί αργότερα, ας υποθέσουμε στη συσκευή του χρήστη, στην αρχική του μορφή, καλείται συμπίεση χωρίς απώλειες, όπως η συμπίεση Lempel-Ziv που χρησιμοποιείται στα αρχεία τύπου .zip. Διαφορετικά, η διαδικασία καλείται συμπίεση με απώλειες, όπου παρατηρείται μεταβολή ανάμεσα στο λόγο συμπίεσης (το μέγεθος του αρχείου μετά τη συμπίεση προς το μέγεθός του πριν τη συμπίεση) και την αποτελεσματική πιστότητα του συστήματος. Ορίζεται ως ο ρυθμός παραμόρφωσης της μεταβολής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 17.4.

Σε πολλές υπηρεσίες VoI, κάθε απόσπασμα βίντεο κωδικοποιείται εκ των προτέρων σε διάφορες ροές δυαδικών ψηφίων (bitstreams), η καθεμία σε διαφορετικό σημείο της καμπύλης του ρυθμού παραμόρφωσης. Επιλέγεται μία συγκεκριμένη κωδικοποίηση για να σταλεί μέσω Δικτύου, με βάση κάποιον συνδυασμό των ακόλουθων τριών παραγόντων:

- της ανάλυσης οθόνης της τερματικής συσκευής του χρήστη,
- της ρυθμαπόδοσης (throughput) που υποστηρίζεται από τη διαδρομή μεταξύ του εξυπηρετητή βίντεο και της συσκευής,
- του ποσοστού του μοτίβου χρήσης δεδομένων του κάθε χρήστη σύμφωνα με ένα πλάνο χρήσης-τιμολόγησης, όπως αυτό που είδαμε στο Κεφάλαιο

11. Η τεχνική αυτή έχει χρησιμοποιηθεί στην πρόσφατη πρόταση για προσαρμογή του ρυθμού βίντεο τη βασισμένη σε όρια χρήσης (Quota Aware Video Adaptation (QAVA)).



Σχήμα 17.4 Καμπύλες ρυθμού παραμόρφωσης για δύο διαφορετικά συστήματα συμπίεσης με απώλειες (lossy compression). Οι παραμορφώσεις μπορεί να μετρηθούν με αντικειμενικές μετρικές ή με υποκειμενικές δοκιμές. Μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης συνοδεύεται από χαμηλότερη παραμόρφωση. Όσο πιο κοντά στην αρχική καμπύλη μεταβολής (trade-off), τόσο καλύτερη είναι η μεταβολή αυτή.

Υπάρχουν πολλές τεχνικές που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη καλύτερης και μεγαλύτερης εμβέλειας μίας τέτοιας μεταβολής αφαιρώντας τα πλεονάζοντα bit, όπως ο μετασχηματισμός κωδικοποίησης (αναζητούνται δομές στο πεδίο συχνοτήτων των σημάτων), η κωδικοποίηση Huffman (μειώνεται το αναμενόμενο μήκος του συμπιεσμένου σήματος, κάνοντας πιο μικρό τον κώδικα που εμφανίζεται συχνότερα, όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 10), και η προσεγγιστική κωδικοποίηση για τα βίντεο (επιτρέποντας την αντιληπτική λογική των χρηστών να καθορίσει ποια εικονοστοιχεία και ποια πλαίσια είναι αναγκαίο να συμπιεστούν). Πολλά πλαίσια μοιάζουν αρκετά μεταξύ τους. Ούτως ή αλλιώς, με αυτό τον τρόπο μπορεί να καταγραφεί στον εγκέφαλό μας η αντίληψη της συνεχούς κίνησης. Συνεπώς, οι συμπίεσεις των βίντεο χρειάζεται να παρακολουθούν μόνο τις διαφορές των πλαισίων, το οποίο οδηγεί σε σημαντική μείωση του απαιτούμενου αριθμού των bit για την απεικόνιση μίας ομάδας πλαισίων.

Η συμπίεση βίντεο έχει εξελιχθεί σημαντικά στη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών:

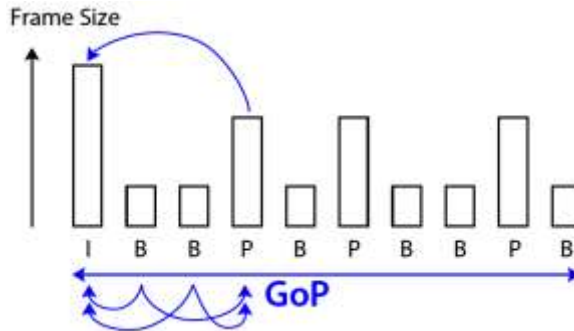
- MPEG1, εμφανίστηκε κατά το 1992: χρησιμοποιείται στο VCD (το οποίο εμφανίζει ρυθμό μετάδοσης 1Mbps).
- MPEG2, εμφανίστηκε κατά το 1996 (καλείται H.262 από ένα διαφορετικό οργανισμό τυποποίησης ο οποίος ονομάζεται ITU-T): χρησιμοποιήθηκε στα DVD και εμφανίζει ρυθμό μετάδοσης 10 Mbps.

- MP3, είναι το 3^ο επίπεδο του προτύπου MPEG2 (δεν υπάρχει MPEG3 γιατί απορροφήθηκε στο MPEG2): αυτή η δημοφιλής φόρμα της διαδικτυακής μουσικής βιομηχανίας χρησιμοποιείται μόνο για την κωδικοποίηση του ήχου, και επιτυγχάνεται αναλογία συμπίεσης 12:1.
- MPEG4, εμφανίστηκε κατά το 2000: αποτελεί το τρέχον πρότυπο συμπίεσης όσον αφορά τα βίντεο.
- MPEG4 Part 10 (καλείται επίσης AVC ή H.264), εμφανίστηκε το 2004: περιλαμβάνοντας 16 προφίλ, προσφέρει σημαντική ευελιξία. Είναι τουλάχιστον δύο φορές καλύτερο από το MPEG2 ως προς την ικανότητα συμπίεσης. Χρησιμοποιείται στην HDTV (με ταχύτητα 20-25Mbps) και στα Blu-ray (με ταχύτητα 40 Mbps). Μπορεί εύκολα να επιτευχθεί ένας παράγοντας συμπίεσης της τάξης 100.
- Υπάρχουν επίσης και άλλες μορφές non-MPEG: η H.261 ήταν δημοφιλής για τα βίντεο IP κατά τον πρώτο καιρό και το QuickTime από την Apple ενσωματώνεται στο MPEG4. Υπάρχουν, επίσης, το Windows Media Player της Microsoft, το Flash της Adobe και το Real Media Viewer της Real Networks.

Η βασική ιδέα στη συμπίεση MPEG είναι η αξιοποίηση του πλεονασμού σε όλα τα πλαίσια, όταν δεν υπάρχει πολλή κίνηση. Αυτό καλείται αντιστάθμιση της κίνησης με ενδο-πλαισιακή πρόβλεψη (inter-frame prediction). Υπάρχουν τρεις τύποι πλαισίων και συλλογικά ένας συνδυασμός αυτών αποτελεί μία ομάδα πλαισίων (Group of Pictures, GoP):

- Πλαίσιο I (ενδο-κωδικοποιημένο-Intra-coded): Είναι ένα ανεξάρτητο πλαίσιο. Η κωδικοποίησή του δεν εξαρτάται από τα πλαίσια πριν ή μετά από αυτό.
- Πλαίσιο P (προβλεπτικά κωδικοποιημένο-Predictive-coded): αυτό το είδος του πλαισίου εξαρτάται από το προηγούμενο πλαίσιο I (ή P), αλλά όχι από το επόμενο του.
- Πλαίσιο B (δικατευθυντικά προβλεπτικά κωδικοποιημένο –Bi-directionally predictive-coded): αυτός ο τύπος πλαισίου εξαρτάται τόσο από το προηγούμενο πλαίσιο I (ή P) όσο και από το αντίστοιχο επόμενο του.

Κάθε GoP πρέπει να ξεκινάει με ένα πλαίσιο I το οποίο να ακολουθείται από μία ακολουθία πλαισίων P και B, όπως φαίνεται στο Σχήμα 17.5. Το πλαίσιο I θεωρείται το πιο σημαντικό από τα πλαίσια, ενώ οι απώλειες των πλαισίων P και B είναι αρκετά πιο ανεκτές. Ταυτόχρονα, τα πλαίσια I παρουσιάζουν μία δυσκολία στη συμπίεση σε σχέση με τα πλαίσια P και B, τα οποία χρησιμοποιούν πρόβλεψη της κίνησης για να υποστηρίξουν τη συμπίεσή τους.



Σχήμα 17.5 Μία τυπική δομή μίας ομάδας πλαισίων (Group of Pictures, GoP). Κάθε GoP ξεκινά με ένα πλαίσιο I, που ακολουθείται από μία αλληλουχία πλαισίων P και B. Το πλαίσιο I είναι ανεξάρτητο και το πιο σημαντικό σε κάθε GoP. Κάθε πλαίσιο P εξαρτάται από το προηγούμενο πλαίσιο I/P. Κάθε πλαίσιο B εξαρτάται τόσο από τα προηγούμενα πλαίσια I/P όσο και από τα αντίστοιχα επόμενά τους. Ορισμένες από αυτές τις σχέσεις εξάρτησης υποδεικνύονται με τα βέλη. Επιλέγοντας το μήκος και τη δομή μίας GoP επηρεάζεται ο ρυθμός μετάδοσης, η αναγνώριση και η αντοχή των σφαλμάτων (error resilience ή error recognition), και οι καθυστερήσεις κατά την αλλαγή των καναλιών.

Το μήκος του GoP επηρεάζει ορισμένες παραμέτρους:

- Η απόδοση του ρυθμού μετάδοσης (bit rate efficiency): Αν η GoP είναι μεγαλύτερη, υπάρχουν περισσότερα πλαίσια P και B (εν δυνάμει τα πιο εύκολα συμπίεσιμα). Ο ρυθμός μετάδοσης μικραίνει.
- Αναγνώριση σφάλματος (error resilience): Αν χαθεί ένα πλαίσιο I και είναι αναγκαίο να αναμεταδοθεί ολόκληρη η GoP, αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη GoP και άρα αναμετάδοση περισσότερων πλαισίων. Εμφανίζεται μία αντίστροφη σχέση μεταξύ απόδοσης και αναγνώρισης, όπως θα προσδιοριστεί από τη μελέτη των ασκήσεων.
- Στιγμιαία αλλαγή καναλιών: Για βίντεο που ανήκουν σε κανάλια, η δυνατότητα γρήγορης αλλαγής των καναλιών είναι μία σημαντική παράμετρος, υποθέτοντας ότι η παραδοσιακή τηλεοπτική εμπειρία θα αντιγραφεί πάνω στην IPTV. Δεδομένου ότι η GoP αντιπροσωπεύει τη βασική λογική μονάδα αναπαραγωγής, μεγαλύτερη GoP σημαίνει μεγαλύτερο χρόνο αναμονής για το θεατή στην αλλαγή καναλιών. Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που παίζουν ρόλο στην αλλαγή καναλιών, όπως οι λειτουργίες ομαδικής πολλαπλής εκπομπής οι οποίες θα εξηγηθούν στη συνέχεια.

17.2.2 Επίπεδο Εφαρμογής

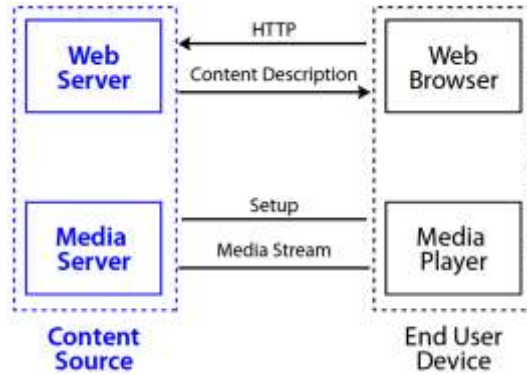
Εκτός από την ικανότητα να πραγματοποιείται δρομολόγηση πολλαπλής εκπομπής, χρειαζόμαστε και το πρωτόκολλο διαχείρισης ομάδων (Internet Group Management Protocol, IGMP). Το IGMP εκτελεί τη διαχείριση των ομάδων πολλαπλής εκπομπής και υπαγορεύει στο δρομολογητή ότι ένας πελάτης (εν τέλει η συσκευή του χρήστη στον οποίον καταλήγει το σήμα) επιθυμεί να ενταχθεί σε μία συγκεκριμένη ομάδα πολλαπλής εκπομπής. Υπάρχουν δύο βασικά είδη εντολών: 1) ο δρομολογητής δίνει ένα ερωτηματολόγιο ζητώντας την ιδιότητα μέλους των χρηστών, και ο καθένας απαντά αναφέροντάς του τις ομάδες στις οποίες ανήκει. Υπάρχει ένα προαιρετικό μήνυμα αποχώρησης από την ομάδα των πελατών προς τους δρομολογητές. Η προαιρετικότητα αυτού του μηνύματος έγκειται στην αρχή της ευέλικτης κατάστασης (soft state) που εξηγείται στο Κεφάλαιο 19: αν η δήλωση συμμετοχής των μελών δεν ανανεώνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα, δύναται να υποτεθεί η αποχώρηση του χρήστη από την ομάδα.

Η είσοδος και η έξοδος ομάδων πολλαπλών εκπομπών επιβαρύνονται με την αύξηση και την επεξεργασία καθυστερήσεων. Η άμεση αλλαγή καναλιών μπορεί να μην είναι εφικτή. Για την επιτάχυνση αυτής της διαδικασίας, ένας πάροχος υπηρεσιών IPTV μπορεί να στείλει κάποιες GoP μονής εκπομπής στον τελικό χρήστη, όταν ζητείται αλλαγή καναλιού για πρώτη φορά. Μόλις γίνει επεξεργασία της αίτησης συμμετοχής στην ομάδα, μεταπίπτει σε λειτουργία πολλαπλής εκπομπής. Είναι σαφές ότι υφίσταται μία αλληλεπίδραση μεταξύ της επίδοσης του δικτύου και της εμπειρίας του ίδιου του χρήστη. Θα εξετάσουμε περισσότερες τέτοιες εξαρτήσεις σχετικές με τη βελτιστοποίηση της διαδικτυακής μεταφοράς των βίντεο.

Για τις εφαρμογές ρευμάτων/ροών (streaming applications), χρησιμοποιείται συχνά το πρωτόκολλο ροής πραγματικού χρόνου (Real Time Streaming Protocol, RTSP). Το RTSP επιτρέπει σε μία συσκευή αναπαραγωγής πολυμέσων (media player) τον έλεγχο της μετάδοσης της ροής τους με τη χρήση των: fast-forward, rewind, pause, play. Θεωρείται ανεξάρτητο του προτύπου συμπίεσης ή του πρωτοκόλλου μεταφοράς.

Μία τέτοια τυπική διαδικασία φαίνεται στο Σχήμα 17.6. Το αίτημα για το περιεχόμενο εκτελείται για πρώτη φορά μέσω του HTTP από ένα φυλλομετρητή ιστού σε έναν εξυπηρετητή ιστού. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας το είδος των μέσων και της συμπίεσης που χρησιμοποιούνται (μέσω της απάντησης που λαμβάνεται από τον εξυπηρετητή ιστού), ο πελάτης μπορεί να ανοίξει το σωστό πρόγραμμα αναπαραγωγής πολυμέσων, το οποίο μετέπειτα χρησιμοποιεί το RTSP για την εκτέλεση της ανταλλαγής των μηνυμάτων ανάμεσα στον πελάτη και στον εξυπηρετητή μέσων που κατέχει το αρχείο του βίντεο. Σε αντίθεση με το HTTP, στο RTSP είναι απαραίτητο να παρακολουθείται η τρέχουσα κατάσταση του φακέλου στη συσκευή αναπαραγωγής πολυμέσων του χρήστη, έτσι ώστε να μπορούν να εκτελούνται λειτουργίες όπως η παύση και η αναπαραγωγή (pause, play). Θα πρέπει να έχετε συνειδητοποιήσει ότι

υπάρχει μία μεγάλη επιβάρυνση η οποία σχετίζεται με τη διαχείριση της διανομής των βίντεο, και θα δούμε περισσότερες τέτοιες περιπτώσεις γενικά στο Κεφάλαιο 19.



Σχήμα 17.6 Πρωτόκολλο ροής πραγματικού χρόνου (Real Time Streaming Protocol, RTSP) σε λειτουργία. Μία σύννοδος http πρώτα εξασφαλίζει την ανταλλαγή του ελέγχου πληροφοριών μεταξύ του φυλλομετρητή ιστού του πελάτη και του εξυπηρετητή ιστού. Ακολουθεί η πραγματική ροή των πολυμέσων από τον εξυπηρετητή πολυμέσων (media server) στο λογισμικό αναπαραγωγής πολυμέσων (media-player software) της τερματικής συσκευής του χρήστη.

Ένα άλλο πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται συχνά για τη μετάδοση πολυμεσικής κίνησης πάνω από το IP είναι το Πρωτόκολλο Αρχικοποίησης Συνόδου (Session Initiation Protocol (SIP)) της Internet Engineering Task Force (IETF). Το SIP καθιερώνει μία κλήση μεταξύ καλούντος και καλούμενου μέσω ενός δικτύου IP, καθορίζει τη διεύθυνση IP, και διαχειρίζεται την κλήση προσθέτοντας καλούντες, πραγματοποιώντας μεταφορές ή αναμονές κλήσεων, ή αλλάζοντας φωνητικές κωδικοποιήσεις. Σε συνδυασμό με τα πρότυπα βίντεο, το SIP μπορεί να παρέχει ένα μηχανισμό για βίντεο-συνδιασκέψεις.

Ένα ακόμα σύνηθες πρωτόκολλο είναι το **H.323** της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union, ITU). Στην πραγματικότητα αφορά μία μεγάλη ομάδα πρωτοκόλλων που περιλαμβάνει πολλά στοιχεία από αυτά που αναλύονται σε αυτήν την υπο-ενότητα.

Όπως μπορείτε να δείτε υπάρχει πληθώρα οργανισμών δημιουργίας προτύπων: η IETF δημιουργεί πολλά πρωτόκολλα για το Διαδίκτυο, η ITU και το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE) έχουν πολλούς οργανισμούς δημιουργίας προτύπων, ενώ ορισμένα σημαντικά πρότυπα δημιουργούνται από τους δικούς τους εξειδικευμένους οργανισμούς, όπως τα 3GPP και 3GPP2 για κυψελωτά δίκτυα το WiMAXForum για το WiMAX, το DSLForum για το DSL, το MPEG για τη συμπίεση βίντεο κτλ. Ο τρόπος που λειτουργούν αποτελεί ένα συνδυασμό τεχνολογικών, επιχειρησιακών

και πολιτικών παραγόντων, όμως όλοι μοιράζονται έναν κοινό στόχο ενδολειτουργίας των συσκευών, ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη του φαινομένου της επίδρασης του δικτύου στην αποδοχή του Διαδικτύου.

17.2.3 Επίπεδο Μεταφοράς

Έχουμε μελετήσει το TCP, το οποίο είναι ένα πρωτόκολλο μεταφοράς προσανατολισμένο στη σύνδεση στο Κεφάλαιο 14. Όμως, ένα μεγάλο μέρος μεταφοράς πολυμεσικής κίνησης, ειδικά της κίνησης πραγματικού χρόνου ή διαδραστικής φύσης, τρέχουν στο επίπεδο μεταφοράς μέσω του Πρωτοκόλλου Δεδομενογράμματος του Χρήστη (User Datagram Protocol, UDP). Το UDP είναι πρωτόκολλο χωρίς σύνδεση, το οποίο σημαίνει ότι δεν γίνεται προσπάθεια διατήρησης της από άκρο σε άκρο αξιοπιστίας καθώς και της επιλογής των πακέτων στην κατάλληλη σειρά. Λειτουργεί με διευθύνσεις IP για τη μεταφορά των πακέτων στους εκάστοτε προορισμούς, εντούτοις αν τα πακέτα δεν φτάσουν σωστά, δεν θα γίνει προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος. Για παράδειγμα, το Skype χρησιμοποιεί UDP εκτός κι αν ο πελάτης χρησιμοποιεί τείχος προστασίας το οποίο επιτρέπει τη χρήση μόνο του TCP. Το UDP χειρίζεται επίσης αρκετά καλά τις πολλαπλές εκπομπές, δεδομένου ότι δεν απαιτείται η λήψη ενός πακέτου σε όλους τους προορισμούς. Το IGMP που μόλις εξετάσαμε εκτελείται συχνά μέσω του UDP.

Το UDP είναι θεμελιωδώς διαφορετικό από το TCP ως προς τον από άκρο σε άκρο έλεγχο του Διαδικτύου. Γιατί εφαρμογές με αυστηρές προθεσμίες προτιμούν το UDP; Η απάντηση βρίσκεται στη μεταβολή μεταξύ έγκαιρης μεταφοράς και της αξιοπιστίας.

- Το TCP χρησιμοποιεί μία χειραγία τριών δρόμων (3-way handshake), η οποία εξηγείται στο κεφάλαιο 19, για τη δημιουργία μίας ειδικής λειτουργίας, ενώ για το UDP δεν παρατηρείται παρόμοια ακολουθία. Επίσης εκτελεί έλεγχο συμμόρφωσης για τη ρύθμιση των ρυθμών μετάδοσης, σε αντίθεση με το UDP που στέλνει το πακέτο αμέσως μόλις δημιουργείται από το επίπεδο εφαρμογής.
- Το TCP εξασφαλίζει την αξιοπιστία του μέσω πακέτων αναμετάδοσης στο επίπεδο μεταφοράς, αλλά πολλές εφαρμογές πολυμέσων είναι ενσωματωμένες με τους δικούς τους μηχανισμούς αναγνώρισης και αντοχής σε σφάλματα. Επί παραδείγματι, η απώλεια ενός πλαισίου B σε μία GoP μπορεί συχνά να καλύπτεται σε ένα πρόγραμμα αναπαραγωγής πολυμέσων, με αποτέλεσμα οι θεατές να μην μπορούν να καταλάβουν τη διαφορά. Επιπλέον, ένα χαμένο και στη συνέχεια αναμεταδοθέν πακέτο θα φθάσει κατά πάσα πιθανότητα πολύ αργά για να είναι χρήσιμο στην αναπαραγωγή κατά τη στιγμή της άφιξης του στον προορισμό. Συνεπώς, είναι πιο σημαντική η αποφυγή καθυστέρησης της αναπαραγωγής και απλά να πραγματοποιείται η διαδικασία.

Επιπλέον των εφαρμογών πραγματικού χρόνου ή των διαδραστικών πολυμέσων, πολλά πρωτόκολλα διαχείρισης δικτύου ή σηματοδοσίας, όπως το SNMP στο κεφάλαιο 19 και το RIP στο κεφάλαιο 13, λειτουργούν μέσω του UDP. Γι' αυτά τα πρωτόκολλα σηματοδοσίας, υπάρχουν δύο ακόμη λόγοι ως προς την επιλογή του UDP:

- Το TCP διατηρεί πάρα πολλές καταστάσεις της κάθε συνόδου συγκριτικά με το UDP. Έτσι το UDP μπορεί να υποστηρίξει περισσότερες τέτοιες συνόδους ταυτόχρονα.
- Η επικεφαλίδα του TCP καταλαμβάνει 20 byte ενώ του UDP 8 byte. Για τα μικρά πακέτα ελέγχου η διαφορά αυτή είναι αρκετά σημαντική.

Ένα πρωτόκολλο πάνω από το UDP είναι το πρωτόκολλο μεταφοράς πραγματικού χρόνου (Real-time Transport Protocol, RTP), το οποίο χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό σε πολλές εφαρμογές πολυμεσικής κίνησης IP, συμπεριλαμβανομένου και του VoIP (Voice over IP, υπηρεσία φωνής μέσω διαδικτύου). Καθορίζει ένα πρότυπο για τη μεταφορά πολυμεσικών ροών. Η κύρια πρόκληση εδώ είναι η υποστήριξη πολλαπλών διαφορετικών προτύπων μέσων συμπεριλαμβανομένων και των υπό ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Η αντίστοιχη λύση είναι ο καθορισμός ενός εύρους προφίλ και ωφέλιμων προτύπων ειδικά για κάθε τύπο μέσων, χωρίς να καθίσταται αναγκαία η εξάρτηση των πρωτοκόλλων από τον τύπο των μέσων. Το RTP εκτελείται στο επίπεδο των δεδομένων, το οποίο μεταδίδει τα πραγματικά δεδομένα, ενώ το πρωτόκολλο ελέγχου του RTP (RTP Control Protocol, RTCP) εκτελείται στο επίπεδο ελέγχου, το οποίο στέλνει σήματα ελέγχου. Το RTCP παρακολουθεί τη ροή πληροφοριών του RTP, όπως το πλήθος των πακέτων, τον αριθμό των byte και τα στοιχεία χρονικής καταγραφής των πληροφοριών. Ακολουθεί τις στατιστικές αναλύσεις και συγχρονίζει τις πολλαπλές ροές.

Τώρα που ολοκληρώθηκε η επισκόπηση των τριών ανωτέρων επιπέδων του Σχήματος 17.3, θα συνεχίσουμε με δύο παραδείγματα των συμβιβασμών που γίνονται στη μεταφορά βίντεο μέσω IP.

17.3 Παραδείγματα

17.3.1 Ποιότητα βίντεο και πλαίσια I/P/B

Σε αυτό το παράδειγμα, θα εξετάσουμε την επίδραση των πλαισίων I, P και B στην υποβάθμιση της ποιότητας του βίντεο. Θεωρούμε την κάθε τιμή του εικονοστοιχείου στη θέση (x, y) της μονοχρωματικής κλίμακας του γκρι στο πλαίσιο i . Το εκπεμπόμενο πλαίσιο είναι το p_i και το ληφθέν πλαίσιο το \bar{p}_i . Για τη μετρική της ποιότητας του βίντεο μας, χρησιμοποιούμε τη νόρμα L-1, το άθροισμα των απόλυτων διαφορών κατά μήκος όλων των εικονοστοιχείων και των πλαισίων, δηλαδή, το σφάλμα $= \sum_{x,y,i} |p_i(x,y) - \bar{p}_i(x,y)|$

Σκεφτείτε ένα πολύ απλό παράδειγμα με 2×2 εικονοστοιχεία. Για λόγους απλοποίησης, υποθέτουμε ότι όλες οι τιμές των εικονοστοιχείων σε ένα δεδομένο πλαίσιο είναι ίδιες (αυτό είναι ένα αρκετά βαρετό βίντεο). Μία GoP αποτελείται από 4 πλαίσια τα οποία δεικτοδοτούνται από το $i = 1, 2, 3, 4$. Εν συνεχεία, θα υποβαθμίσουμε κάθε πλαίσιο της GoP, και θα υπολογίσουμε την επίδραση που έχει στη μετρική του σφάλματος. Υποθέστε ότι τα πλαίσια 0 και 5 (τα οποία ανήκουν στις προηγούμενες και τις επόμενες GOP, αντίστοιχα) λαμβάνονται πάντα επιτυχώς.

0	0	1	1	2	2	3	3	4	4
0	0	1	1	2	2	3	3	4	4
$i = 0$		$i = 1$		$i = 2$		$i = 3$		$i = 4$	
Last GoP B frame		I frame		P frame		B frame		B frame	
				5	5				
				5	5				
				$i = 5$					
				Next GoP I frame					

Υπενθυμίζουμε ότι ένα πλαίσιο I δεν έχει πλαίσιο αναφοράς, ένα πλαίσιο P χρησιμοποιεί το τελευταίο πλαίσιο I ή πλαίσιο P ως πλαίσιο αναφοράς, και ένα πλαίσιο B χρησιμοποιεί το τελευταίο πλαίσιο I ή πλαίσιο P και το επόμενο πλαίσιο I/P ως πλαίσιο αναφοράς. Ένα «σφάλμα» στο πλαίσιο i σημαίνει ότι είτε το πλαίσιο i λείπει, είτε έχει πραγματοποιηθεί απόκρυψη σφάλματος, λόγω της απουσίας αναφοράς του πλαισίου i . Μπορούμε να δημιουργήσουμε ορισμένους κανόνες απόκρυψης σφάλματος στο δέκτη.

- Αν ο δέκτης χάνει κάποιο πλαίσιο, παρουσιάζει το τελευταίο διαθέσιμο πλαίσιο.
- Αν ο δέκτης ανιχνεύσει σφάλμα στο πλαίσιο αναφοράς ενός πλαισίου P, ομοίως εμφανίζει το τελευταίο διαθέσιμο πλαίσιο στη θέση του πλαισίου P.
- Αν ο δέκτης ανιχνεύει σφάλμα σε ένα πλαίσιο αναφοράς ενός πλαισίου, εμφανίζει το άλλο πλαίσιο αναφοράς.

Αν το πλαίσιο I της παρούσας GoP υποβαθμιστεί, ο δέκτης εμφανίζει ό,τι συνοψίζεται στον Πίνακα 17.1.

Πίνακας 17.1 Πλαίσιο 1: χάνεται, έτσι επαναλαμβάνεται το πλαίσιο 0. Πλαίσιο 2: σφάλμα στο πλαίσιο αναφοράς 1, έτσι επαναλαμβάνεται το πλαίσιο 1. Πλαίσιο 3:

σφάλμα στο πλαίσιο αναφοράς 2, οπότε παρουσιάζεται το πλαίσιο 5. Πλαίσιο 4: σφάλμα στο πλαίσιο αναφοράς 2, έτσι εμφανίζεται το πλαίσιο 5.

	$\bar{p}(1,1)$	$\bar{p}(1,2)$	$\bar{p}(2,1)$	$\bar{p}(2,2)$
$i = 0$	0	0	0	0
$i = 1$	0	0	0	0
$i = 2$	0	0	0	0
$i = 3$	5	5	5	5
$i = 4$	5	5	5	5
$i = 5$	5	5	5	5

Τότε το σφάλμα μεταξύ της εκπεμπόμενης και της ληφθείσας εικόνας είναι:

$$\begin{aligned}
 & |p_1(1,1) - \bar{p}_1(1,1)| + |p_1(1,2) - \bar{p}_1(1,2)| + |p_1(2,1) - \bar{p}_1(2,1)| \\
 & \quad + |p_1(2,2) - \bar{p}_1(2,2)| + \\
 & |p_2(1,1) - \bar{p}_2(1,1)| + |p_2(1,2) - \bar{p}_2(1,2)| + |p_2(2,1) - \bar{p}_2(2,1)| \\
 & \quad + |p_2(2,2) - \bar{p}_2(2,2)| + \\
 & |p_3(1,1) - \bar{p}_3(1,1)| + |p_3(1,2) - \bar{p}_3(1,2)| + |p_3(2,1) - \bar{p}_3(2,1)| \\
 & \quad + |p_3(2,2) - \bar{p}_3(2,2)| + \\
 & |p_4(1,1) - \bar{p}_4(1,1)| + |p_4(1,2) - \bar{p}_4(1,2)| + |p_4(2,1) - \bar{p}_4(2,1)| \\
 & \quad + |p_4(2,2) - \bar{p}_4(2,2)| \\
 & = 4 |p_1(1,1) - \bar{p}_1(1,1)| + 4 |p_2(1,1) - \bar{p}_2(1,1)| \\
 & + 4 |p_3(1,1) - \bar{p}_3(1,1)| + 4 |p_4(1,1) - \bar{p}_4(1,1)| \\
 & = 4|1 - 0| + 4|2 - 0| + 4|3 - 5| + 4|4 - 5| \\
 & = 24.
 \end{aligned}$$

Αν το πλαίσιο P υποβαθμίζεται, ο δέκτης μπορεί να εμφανίζει αυτό που συνοψίζεται στον Πίνακα 17.2.

Το σφάλμα μεταξύ της εκπεμπόμενης και ληφθείσας εικόνας είναι:

$$\begin{aligned}
 & 4 |p_1(1,1) - \bar{p}_1(1,1)| + 4 |p_2(1,1) - \bar{p}_2(1,1)| \\
 & + 4 |p_3(1,1) - \bar{p}_3(1,1)| + 4 |p_4(1,1) - \bar{p}_4(1,1)| \\
 & = 4|1 - 1| + 4|2 - 1| + 4|3 - 5| + 4|4 - 5| = 16.
 \end{aligned}$$

Εάν το πρώτο πλαίσιο B, πλαίσιο 3, υποβαθμιστεί τότε ο δέκτης εμφανίζει αυτό που συνοψίζεται στον Πίνακα 17.3.

Πίνακας 17.2 Πλαίσιο 2: χάνεται, έτσι επαναλαμβάνεται το πλαίσιο 1. Πλαίσιο 3: σφάλμα στο πλαίσιο αναφοράς 2, οπότε παρουσιάζεται το πλαίσιο 5. Πλαίσιο 4: σφάλμα στο πλαίσιο αναφοράς 2, οπότε παρουσιάζεται το πλαίσιο 5.

	$\bar{p}(1,1)$	$\bar{p}(1,2)$	$\bar{p}(2,1)$	$\bar{p}(2,2)$
$i = 0$	0	0	0	0
$i = 1$	1	1	1	1
$i = 2$	1	1	1	1
$i = 3$	5	5	5	5
$i = 4$	5	5	5	5
$i = 5$	5	5	5	5

Πίνακας 17.3 Πλαίσιο 3: χάνεται, έτσι επαναλαμβάνεται το πλαίσιο 2.

	$\bar{p}(1,1)$	$\bar{p}(1,2)$	$\bar{p}(2,1)$	$\bar{p}(2,2)$
$i = 0$	0	0	0	0
$i = 1$	1	1	1	1
$i = 2$	2	2	2	2
$i = 3$	2	2	2	2
$i = 4$	4	4	4	4
$i = 5$	5	5	5	5

Το σφάλμα μεταξύ της εκπεμπόμενης και της ληφθείσας εικόνας είναι:

$$4 |p_1(1,1) - \bar{p}_1(1,1)| + 4 |p_2(1,1) - \bar{p}_2(1,1)| \\ + 4 |p_3(1,1) - \bar{p}_3(1,1)| + 4 |p_4(1,1) - \bar{p}_4(1,1)| \\ = 4|1 - 1| + 4|2 - 2| + 4|3 - 2| + 4|4 - 4| = 4.$$

Εάν το δεύτερο πλαίσιο Β, πλαίσιο 4, υποβαθμιστεί, ο δέκτης εμφανίζει αυτά που συνοψίζονται στον Πίνακα 17.4.

Το σφάλμα μεταξύ της εκπεμπόμενης και της ληφθείσας εικόνας είναι:

$$4 |p_1(1,1) - \bar{p}_1(1,1)| + 4 |p_2(1,1) - \bar{p}_2(1,1)| \\ + 4 |p_3(1,1) - \bar{p}_3(1,1)| + 4 |p_4(1,1) - \bar{p}_4(1,1)| = 4|1 - 1| + 4|2 - 2| + \\ 4|3 - 3| + 4|4 - 3| = 4.$$

Το μεγαλύτερο σφάλμα προκύπτει από την υποβάθμιση του πλαισίου I, ακολουθούμενη από τα πλαίσια P, και, εν τέλει, από τα πλαίσια B. Περισσότερα σημαντικά πλαίσια προκαλούν περισσότερα σφάλματα στην υποβάθμιση της GOP, οδηγώντας σε μεγαλύτερη υποβάθμιση της οπτικής ποιότητας.

Πίνακας 17.4: Πλαίσιο 4: χάνεται, έτσι επαναλαμβάνεται το πλαίσιο 3.

	$\bar{p}(1, 1)$	$\bar{p}(1, 2)$	$\bar{p}(2, 1)$	$\bar{p}(2, 2)$
$i = 0$	0	0	0	0
$i = 1$	1	1	1	1
$i = 2$	2	2	2	2
$i = 3$	3	3	3	3
$i = 4$	3	3	3	3
$i = 5$	5	5	5	5

17.3.2 Σχέση καθυστέρησης και διακύμανσης καθυστέρησης

Σε αυτό το παράδειγμα, θα εξετάσουμε την επίδραση της αρχικής ενταμίευσης (buffering) κατά την αναπαραγωγή μίας ροής βίντεο. Θα δούμε ποια θα πρέπει να είναι η καθυστέρηση της αναπαραγωγής για την παροχή μίας ομαλής εμπειρίας θέασης.

Ας υποθέσουμε ότι υπάρχει ένα πλαίσιο ανά πακέτο. Στο Σχήμα 17.7 φαίνονται τα εκπεμπόμενα, τα ληφθέντα (στο δέκτη), και τα εκτελεσθέντα πλαίσια κατά την πάροδο του χρόνου. Αναφερόμαστε σε αυτά ως χρονικές καμπύλες ή χάριν συντομίας ως καμπύλες V , A , και P . Οι καμπύλες V και A προσδιορίζονται από την πηγή και το δίκτυο και η δική μας δουλειά έγκειται στο να σχεδιάσουμε την καλύτερη δυνατή καμπύλη P .

Η πηγή του βίντεο εκπέμπει με σταθερό ρυθμό, έτσι το V αποτελεί υπέρθεση βαθμωτών συναρτήσεων. Παραποιούμε λίγο τη μαθηματική ορολογία για να χρησιμοποιήσουμε διανύσματα για την αναπαράσταση των διακριτών βημάτων στις γραφικές παραστάσεις. Ας ορίσουμε το V_i ως το χρόνο κατά το οποίο μεταδίδεται το πακέτο i , το A_i ως το χρόνο κατά τον οποίο λαμβάνεται πακέτο i , και P_i το χρόνο κατά τον οποίο εμφανίζεται στο χρήστη το πακέτο i . Η καθυστέρηση μεταξύ του εκπεμπόμενου και ληφθέντος πακέτου i δίνεται από την σχέση $d_i = A_i - V_i$. Συνεπώς, έχουμε:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 5,8 \\ 7,5 \\ 8 \\ 9,4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{d} = \mathbf{A} - \mathbf{V} = \begin{bmatrix} 4,8 \\ 5,5 \\ 5 \\ 5,4 \end{bmatrix}.$$

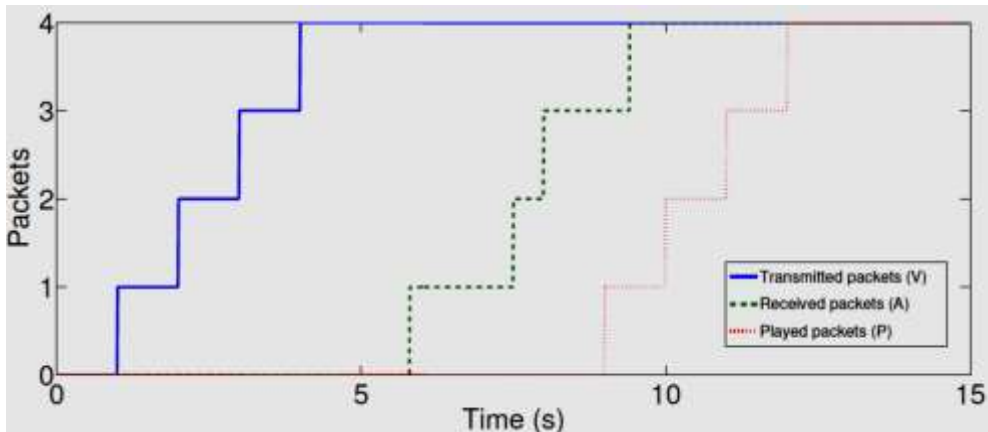
Στην πραγματικότητα, δεν μπορούμε να ξέρουμε το A εκ των προτέρων και πρέπει είτε να εκτιμηθεί, είτε να εκτιμηθεί σε πραγματικό χρόνο, όπως μία άσκηση. Προς το παρόν, μπορούμε να υποθέσουμε ότι είναι γνωστό μέγεθος. Η P πρέπει να είναι μία μοναδιαία βηματική συνάρτηση δεδομένου ότι τα πλαίσια χρειάζεται να εμφανίζονται με ένα σταθερό ρυθμό. Πότε είναι η κατάλληλη στιγμή για την έναρξη της αναπαραγωγής, δηλαδή, ποια είναι η τιμή του P_1 ; Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί η συνολική καθυστέρηση που αντιλαμβάνεται ο χρήστης:

ελαχιστοποιήστε $\sum_i (P_i - V_i)$

υπό τους περιορισμούς $P_i + 1 = P_i + 1, \forall i$

$$P_i \geq A_i, \forall i$$

με μεταβλητές $\{P_i\}$.



Σχήμα 17.7 Ενταμιευτής αναμετάδοσης (play back buffer) εξομαλύνει την αναπαραγωγή του βίντεο. Αυτό το γράφημα δείχνει την καμπύλη V στον πομπό: πώς τα πακέτα μεταδίδονται με σταθερό ρυθμό, την καμπύλη A στο δέκτη: πώς οι χρόνοι άφιξης των πακέτων διαφέρουν καθώς διασχίζουν το δίκτυο, και την καμπύλη P στην αναπαραγωγή: πώς ο χρόνος μεταφοράς της αναπαραγωγής μπορεί να εξομαλύνει το jitter (διακύμανση της χρονικής καθυστέρησης) της άφιξης. Οι καμπύλες V και A θεωρούνται δεδομένες και η καμπύλη P χρειάζεται να σχεδιαστεί ώστε να βεβαιωθούμε ότι αποτελεί υπέρθεση των βηματικών συναρτήσεων, βρίσκεται κάτω από την καμπύλη A , και εν τούτοις βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο αριστερά.

Ο πρώτος περιορισμός της προηγούμενης βελτιστοποίησης διασφαλίζει ότι η καμπύλη αναπαραγωγής P είναι μία βαθμιαία συνάρτηση και ο δεύτερος διασφαλίζει ότι η αναπαραγωγή του πακέτου μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μετά τη λήψη του. Η ζητούμενη συνάρτηση μπορεί να απλοποιηθεί ακόμα περισσότερο αφού οι P και V είναι βαθμιαίες συναρτήσεις, η διαφορά $P_i - V_i$ είναι ίδια για όλα τα i , οπότε η επιθυμητή συνάρτηση ταυτίζεται με την ελαχιστοποίηση του κάθε $P_i - V_i$.

Το δεδομένο πρόβλημα μπορεί εύκολα να λυθεί μέσω ενός οπτικού έλεγχου. Κατά βάση, στρέφουμε τη βηματική συνάρτηση P προς τα αριστερά, έως ότου ισχύει ότι $P_k = A_k$ για κάθε k και $P_i \geq A_i$, $\forall i \neq k$. Επομένως, θέλουμε την καμπύλη P όσο το δυνατόν πιο κοντά στην καμπύλη A , αλλά να παραμένει κάτω από την A .

Από το Σχήμα 17.7, είναι σαφές ότι $k = 2$. Καθώς $P_2^* = A_2 = 7,5$ s έχουμε $P_1^* = 6,5$ s. Αυτό σημαίνει ότι η αναπαραγωγή θα πρέπει να ξεκινά στα 6,5 s, το οποίο με τη σειρά του σημαίνει καθυστέρηση αναπαραγωγής κατά $P_1 - A_1 = 6,5 - 5,8 = 0,7$ s. Η ενσωμάτωση αυτής της καθυστέρησης στην αναπαραγωγή επιτυγχάνει την αποφυγή «παγωμένων» βίντεο, φαινόμενο το οποίο οφείλεται στη διακύμανση της λήψης των πακέτων μέσω του δικτύου.

Σε γενικές γραμμές, για μία πηγή σταθερού ρυθμού μετάδοσης, η αναπαραγωγή πρέπει να αρχίσει όταν $P_1^* = A_1 + D$, όπου $D = \max_i (d_i - d_1)$ και αντιπροσωπεύει τη μέγιστη διακύμανση καθυστέρησης. Αυτός ο τύπος εφαρμόζεται στο παραπάνω παράδειγμα. Αφού $D = d_2 - d_1 = 5,5 - 4,8 = 0,7$ s, έχουμε $P_1^* = A_1 + D = 5,8 + 0,7 = 6,5$ s.

17.4 Προχωρημένο υλικό

Υπάρχουν επιπλέον τρεις βασικές προσεγγίσεις στη διαχείριση της ποιότητας των υπηρεσιών σε σχέση με τις υπηρεσίες απλής συνδεσιμότητας, οι οποίες προσφέρονται με την καλύτερη δυνατή προσπάθεια από το λεπτό στρώμα των TCP/IP.

- Αντιμετωπίζονται οι διαφορετικές σύνοδοι ατομικά κατά την κατανομή των πόρων.
- Ρυθμίζεται ποιοι χρήστες μπορεί να γίνουν δεκτοί.
- Κατανέμονται οι εξυπηρετητές σε στρατηγικές τοποθεσίες.

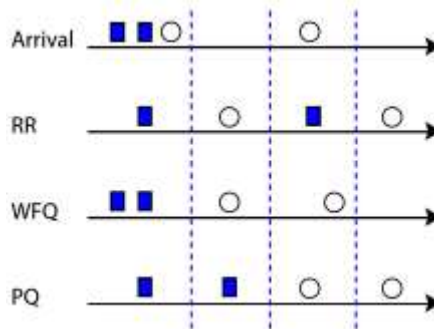
Κατ' αναλογία, σκεφτείτε τον έλεγχο της κυκλοφορίας σε μία εθνική οδό. Η διαφοροποίηση της κατανομής των πόρων μπορεί να ταυτιστεί με τη χρήση μίας λωρίδας μόνο από ορισμένα οχήματα, όπως μία λωρίδα συνοδήγησης (car-pool lane). Η ρύθμιση της αποδοχής των χρηστών ομοίως μπορεί να θεωρηθεί ταυτόσημη με τους φωτεινούς σηματοδότες κατά τη διάρκεια κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η κατανομή στους εξυπηρετητές μοιάζει με την κατασκευή καινούριων εξόδων προς δημοφιλείς προορισμούς, όπως προς μεγάλα παντοπωλεία. Βέβαια, το τελευταίο σημείο είναι σαφώς μία επιχείρηση πολύ μεγαλύτερης κλίμακας σε σχέση με τα δύο προηγούμενα.

17.4.1 Πολιτικές Ουράς Αναμονής

Διαφορετικές συνεδρίες μπορεί να αντιμετωπίζονται διαφορετικά εντός ενός κόμβου ή κατά μήκος μίας ζεύξης σε ένα δίκτυο. Για παράδειγμα, υπάρχουν ποικίλα

πρότυπα διαχείρισης ουρών δεδομένων (queuing disciplines) σε ένα δρομολογητή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 17.8, οι ακόλουθες τρεις μέθοδοι θα δημιουργήσουν διαφορετικές χρονικές ακολουθίες υπηρεσιών μεταξύ των εισερχόμενων συνεδριών. Όμως και οι τρεις αυτές μέθοδοι δεν θα χαράμισουν μία χρονοθυρίδα εάν υπάρχει κάποιο πακέτο που πρέπει να εξυπηρετηθεί (work-conserving).

- Ο χρονοπρογραμματισμός εξυπηρέτησης εκ περιτροπής (round robin): Εναλλάσσεται η σειρά κάθε κατηγορίας κίνησης.
- Ζυγостаθμισμένη ευνομία των ουρών (weighted fair queuing): Κατά την εναλλαγή, κάποια κατηγορία μπορεί να λάβει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης από κάποια άλλη.
- Ουρά προτεραιότητας (priority queuing): Πακέτα μεγαλύτερης προτεραιότητας και σπουδαιότητας επεξεργάζονται πριν από τα αντίστοιχα μικρότερης προτεραιότητας, τα οποία πρέπει να περιμένουν μέχρι να μην υπάρχουν πια πακέτα μεγάλης προτεραιότητας στην ουρά.



Σχήμα 17.8 Τρεις κλάσεις διαχείρισης ουρών δεδομένων (queuing disciplines) δίνουν διαφορετική προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση πακέτων. Υπάρχουν δύο κατηγορίες κίνησης που φθάνουν μετά τις χρονοσχισμές (timeslots) οι οποίες δηλώνονται με διακεκομμένες γραμμές. Στον προγραμματισμό round robin (RR), τα τετράγωνα πακέτα και τα στρογγυλά πακέτα εξυπηρετούνται με τη λογική του ενός πακέτου σε κάθε χρονοσχισμή. Στη WFQ οι δύο κατηγορίες εξυπηρετούν εκ περιτροπής, όμως τα τετράγωνα πακέτα έχουν μεγαλύτερο ρυθμό εξυπηρέτησης. Στην PQ, τα τετράγωνα πακέτα έχουν απόλυτη σειρά προτεραιότητας και τα στρογγυλά πακέτα παίρνουν σειρά μόνο όταν έχουν σταλεί όλα τα τετράγωνα πακέτα.

Τι μπορεί να αποτελέσει μία δίκαιη κατανομή μεταξύ των ανταγωνιστικών συνεδριών; Αυτό είναι ένα ακόμη παράδειγμα επιβεβαίωσης της έννοιας της ευνομίας/δικαιοσύνης. Θα δούμε μία συστηματική αντιμετώπιση του ζητήματος στο Κεφάλαιο 20.

Φυσικά, οι διαφορετικές μέθοδοι αντιμετώπισης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, δεν αποτελούν εγγύηση της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών. Γι αυτό,

χρειαζόμαστε μεθόδους για τη δέσμευση πόρων. Υπάρχουν δυναμικές εκδοχές της εγκατάστασης των από άκρο σε άκρο κυκλωμάτων στο επίπεδο του δικτύου και της δέσμευσης επαρκών πόρων (όπως χωρητικότητα, χρονοσχισμών και ισχύος διεργασίας), έτσι ώστε να είναι εγγυημένη η πολύ καλή ποιότητα της εμπειρίας του χρήστη. Η διαπομπή (handoff) στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που συζητείται στο Κεφάλαιο 19 προσφέρει ένα τέτοιο παράδειγμα.

17.4.2 Έλεγχος Εισόδου

Μία εναλλακτική προσέγγιση στην προσπάθεια διαχείρισης των πόρων είναι η ρύθμιση της ζήτησης. Υπό αυτή την έννοια, ο έλεγχος συμφόρησης του TCP εκτελεί το ζητούμενο μέσω ενός βρόχου ανάδρασης, ο οποίος λειτουργεί στη χρονική κλίμακα του RTT. Η αστυνόμευση ή ο στραγγαλισμός διαμορφώνουν περαιτέρω το ρυθμό της έγχυσης κίνησης στο δίκτυο. Η χρονο-εξαρτημένη τιμολόγηση που αναλύεται στο Κεφάλαιο 12 είναι μία άλλη μορφή ελέγχου εισόδου αλλά σε μεγαλύτερη χρονική κλίμακα.

Για τον έλεγχο ανοικτού βρόχου, μπορούμε να εφαρμόσουμε έλεγχο εισόδου: να λαμβάνεται η απόφαση αν θα πρέπει να επιτραπεί η έναρξη μετάδοσης μίας συνόδου σε κάθε δοθείσα χρονοσχισμή. Τέτοιου είδους έλεγχος λαμβάνει χώρα συνήθως στην άκρη του δικτύου, συχνά στο πρώτο στοιχείο του δικτύου το οποίο βλέπει τις τερματικές συσκευές του χρήστη.

Ένας πιθανός έλεγχος εισόδου είναι ο έλεγχος του μέγιστου ρυθμού της εισερχόμενης, σε κάποια χρονική κλίμακα. Αυτό ταυτίζεται με τους φωτεινούς σηματοδότες οι οποίοι ρυθμίζουν την είσοδο των αυτοκίνητων ενός αυτοκινητόδρομου και εξομαλύνουν την κίνηση της κυκλοφορίας στο οδικό δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής. Με τη μείωση του ρυθμού μεταβολής των πράσινων σηματοδοτών, μπορούμε να μειώσουμε το ρυθμό αύξησης της κυκλοφορίας στον αυτοκινητόδρομο (στον κορμό του δικτύου, back bone network), αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση συμφόρησης στο σηματοδότη (το δίκτυο πρόσβασης ή εισόδου).

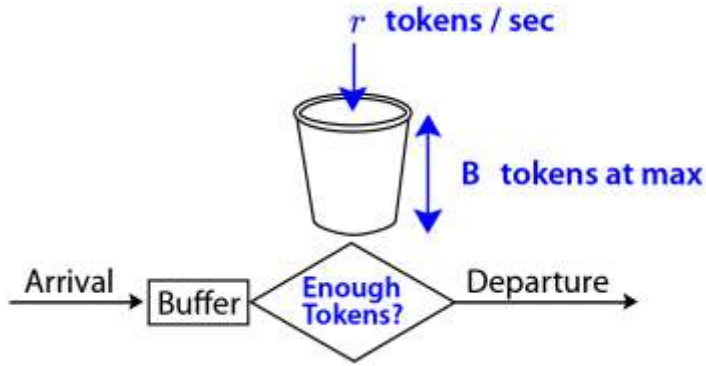
Ένα παράδειγμα ελέγχου εισόδου είναι εκείνο του «διαρρέοντος κάδου» (leaky bucket), που δίνεται στο Σχήμα 17.9. Για να γίνει δεκτό κάθε πακέτο, πρέπει να υπάρχει ένας (εικονικά) τρύπιος κάδος, ο οποίος στάζει μία συγκεκριμένη και κατάλληλη ποσότητα. Ο κάδος στάζει την πρέπουσα αυτή ποσότητα με ρυθμό α και καταλαμβάνει όγκο B ποσοστιαίων μονάδων. Σε ένα πρόβλημα, θα δούμε ότι η σωστά υπολογισμένη ουρά μαζί με το διαρρέοντα κάδο μπορούν να διαμορφώσουν οποιοδήποτε ρυθμό άφιξης στον επιθυμητό.

17.4.3 Διανομή Περιεχομένου

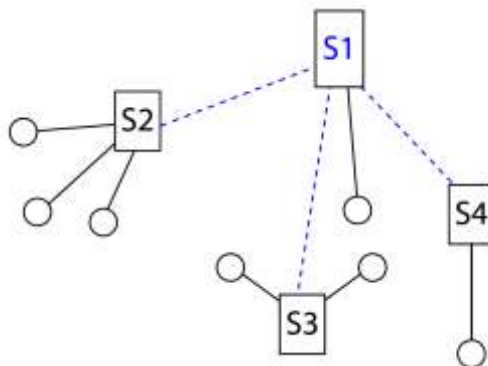
Επιπλέον, μία ακόμη προσέγγιση, εκτός από το διαχωρισμό της κατανομής των πόρων και τον έλεγχο της εισόδου χρηστών, είναι η αλλαγή θέσης της προέλευσης του

περιεχομένου, έτσι ώστε το περιεχόμενο να βρίσκεται πιο κοντά στους χρήστες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 17.10. Η προσέγγιση αυτή εκμεταλλεύεται τη συνεχή πτώση του κόστους αποθήκευσης και την ευρεία δημοφιλία ορισμένων περιεχομένων στη δημιουργία χωρικής αλληλουχίας δεδομένων για τη διανομή του περιεχομένου.

Η ιδέα να αλλάξει η θέση της πηγής εφαρμόζεται στους διαδικτυακούς εξυπηρετητές διαμεσολάβησης (web proxy servers) από τα μέσα της δεκαετίας του 1990. Οι γρήγορες μνήμες των δημοφιλών ιστοσελίδων των ISP διατηρούνται σε τοπικούς αποθηκευτικούς χώρους αρκετά κοντά στους χρήστες στους οποίους απευθύνονται.



Σχήμα 17.9 «Διαρρέων κάδος» για τον έλεγχο εισόδου. Κάθε κάδος μπορεί να διατηρεί τουλάχιστον B «κουπόνια», ενώ r κουπόνια προστίθενται στον κάδο ανά δευτερόλεπτο. Κάθε μεταδιδόμενο πακέτο καταναλώνει ένα κουπόνι. Προκειμένου ένα πακέτο στην ενδιάμεση μνήμη (buffer) να μεταδίδεται στο σύνδεσμο εξόδου, πρέπει να υπάρχει ένα διαθέσιμο κουπόνι (token) στον κάδο.



Σχήμα 17.10 Μία απεικόνιση ενός δικτύου διανομής περιεχομένου. Το περιεχόμενο που αρχικά τοποθετείται στον εξυπηρετητή $S1$ αντιγράφεται σε άλλες τρεις τοποθεσίες $S2$, $S3$, και $S4$ και αποστέλλεται μέσω ζεύξεων οπτικών ινών οι οποίες φαίνο-

νται ως τις διακεκομμένες γραμμές. Όταν ένας πελάτης ζητά ένα τμήμα του περιεχομένου, επιλέγεται ένας συγκεκριμένος εξυπηρετητής ως πηγή για την εξυπηρέτηση της δεδομένης ζήτησης.

Επομένως, ένας ολόκληρος βιομηχανικός τομέας, ο οποίος καλείται Πάροχοι Δικτύου Διανομής Περιεχομένου (Content Distribution Networks, CDN), έχει δημιουργηθεί με αυτό ακριβώς το σκοπό. Η συγκεκριμένη υπηρεσία εξυπηρετεί ISP ή ιδιοκτήτες περιεχομένου και διαχειρίζεται τις ακόλουθες διεργασίες:

- Χρησιμοποιούνται πολλοί εξυπηρετητές, μερικές φορές εξυπηρετητές ιδιωτικών κέντρων και άλλες φορές εξυπηρετητές που ανήκουν σε κέντρα δεδομένων κοινής χρήσης. Οι συγκεκριμένοι συχνά καλούνται ιστότοποι «καθρέπτες» (mirror sites).
- Αντιγραφή περιεχομένων και αποθήκευσή τους σε διαφορετικούς εξυπηρετητές. Αυτό περιλαμβάνει βελτιστοποίηση με βάση τη διαθεσιμότητα των ζεύξεων υψηλής ταχύτητας και του αποθηκευτικού χώρου μεγάλης χωρητικότητας, καθώς και την πρόβλεψη της δημοφιλίας του περιεχομένου στις διάφορες γεωγραφικές περιοχές.
- Για κάθε αίτημα ανάκτησης του περιεχομένου, επιλέγεται ο κατάλληλος εξυπηρετητής με σκοπό να χρησιμοποιηθεί ως πηγή προέλευσης του περιεχομένου.

Η συγκεκριμένη βελτιστοποίηση στην επιλογή του εξυπηρετητή αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης που αντιλαμβάνεται ο χρήστης. Εκτελείται από το CDN μέσω μίας δεδομένης διαδρομής η οποία καθορίζεται από τον ISP. Εντούτοις, ο ISP εκτελεί βελτιστοποίηση δρομολόγησης μέσω της μηχανικής κίνησης (traffic engineering), όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 13, κάτω από δεδομένα συγκεκριμένα πρότυπα κίνησης μεταξύ εξυπηρετητών και χρηστών. Τα δύο αυτά προβλήματα βελτιστοποίησης είναι οι δύο όψεις του ίδιου νομίσματος και οι ανάλογες λειτουργίες του CDN διαχειριστή και του ISP δύναται να έχουν ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις.

Η σύγκλιση του αρχικού περιεχομένου και του περιεχόμενου που μεταφέρεται δημιουργεί μία πολύ ενδιαφέρουσα δυναμική αλληλεπίδραση. Η σωστή λειτουργία των CDN μπορεί να δημιουργήσει αρκετά ιδανικές συνθήκες: οι καταναλωτές λαμβάνουν καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών (μειώνεται η καθυστέρηση και αυξάνεται η επίδοση), ενώ οι ιδιοκτήτες περιεχομένου ή οι ISP μειώνουν το κόστος χρήσης εξυπηρετητών μεγάλων χωρητικότητας και ζεύξεων (καθώς μειώνεται η συμφόρηση στο δίκτυο).

Σύνοψη

Πλαίσιο 17: Μηχανισμοί ποιότητας υπηρεσιών

Τα περιεχόμενα αποσυνδέονται από συγκεκριμένα κανάλια διανομής περιεχομένου και συσκευές κατανάλωσης περιεχομένου και το IP έχει γίνει η βάση για σχεδόν όλα τα συστήματα διανομής περιεχομένου, όπως η IPTV και το VoI. Η συμπίεση των βίντεο, οι εφαρμογές βίντεο στο δίκτυο και τα πρωτόκολλα μεταφοράς χωρίς σύνδεση συνεισφέρουν στη μεγάλη αύξηση των βίντεο στο Διαδίκτυο. Η διαφορά στην ποιότητα, ο έλεγχος εισόδου και η ικανότητα διανομής περιεχομένου επιτρέπει στο Διαδίκτυο την καλύτερη δυνατή προσπάθεια για την υποστήριξη εφαρμογών βίντεο.

Περαιτέρω Μελέτη

Το αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου καλύπτει τόσο τα αναλυτικά μοντέλα της ποιότητας των υπηρεσιών όσο και τα συστήματα σχεδιασμού των πρωτοκόλλων πολυμέσων.

1. Οι βασικές αρχές της επεξεργασίας σήματος βίντεο μπορεί να βρεθούν σε πολλά μεταπτυχιακά βιβλία σχετικά με το θέμα, συμπεριλαμβανομένου και του πρόσφατου:

A. C. Bovik, *The Essential Guide to Video Processing*, Academic Press, 2009.

2. Το βιβλίο που ακολουθεί παρέχει μία συνοπτική παρουσίαση όλων των συστημάτων βίντεο μέσω συστημάτων IP, όπως η IPTV και VoI:

W. Simpson, *Video over IP*, 2nd edn., FocalPress, 2008.

3. Το παρακάτω πρότυπο εγχειρίδιο δικτύωσης υπολογιστών παρέχει πολύ περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογής και μεταφοράς που αναφέραμε, όπως τα IGMP, RTSP, SIP, UDP και RTP:

J. Kurose and K. Ross, *Computer Networking: A Top-Down Approach*, 5th edn., Addison Wesley 2009.

4. Το ακόλουθο κλασικό άρθρο συνδυάζει τον έλεγχο εισόδου διαρρέοντος δοχείου και του γενικευμένου διαμοιρασμού επεξεργαστή με σκοπό να παρέχει εγγύηση ποιότητας:

A. Parekh and R. G. Gallager, "A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: The single-node case", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 1, no. 3, pp. 344-357, June 1993.

5. Το βιβλίο που ακολουθεί παρέχει μία συνοπτική επισκόπηση τόσο της ντετερμινιστικής, αλγεβρικής προσέγγισης όσο και της στοχαστικής αποτελεσματικής προσέγγισης εύρους ζώνης για το σχεδιασμό της εγγύησης ποιότητας σε ένα δίκτυο:

C. S. Chang, *Performance Guarantees in Communication Networks*, Springer Verlag, 2000.

Ασκήσεις

17.1 Μοντέλα θέασης βίντεο

Συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα ο οποίος δηλώνει ποια μοντέλα θέασης/παρακολούθησης βίντεο είναι ανέφικτα. Δώστε παραδείγματα εταιρειών που ακολουθούν τα σωστά μοντέλα. Ορισμένες σειρές έχουν συμπληρωθεί ως παράδειγμα.

Real-time or precoded	Streaming or download	Channelized or on-demand	Unicast or multicast	Companies
Real-time	Streaming	Channelized	Unicast	
Real-time	Streaming	Channelized	Multicast	
Real-time	Streaming	On-demand	Unicast	
Real-time	Streaming	On-demand	Multicast	
Real-time	Download	Channelized	Unicast	
Real-time	Download	Channelized	Multicast	
Real-time	Download	On-demand	Unicast	
Real-time	Download	On-demand	Multicast	
Precoded	Streaming	Channelized	Unicast	
Precoded	Streaming	Channelized	Multicast	
Precoded	Streaming	On-demand	Unicast	YouTube, Hulu, NBC, HBO Go
Precoded	Streaming	On-demand	Multicast	Infeasible (on-demand multicast)
Precoded	Download	Channelized	Unicast	
Precoded	Download	Channelized	Multicast	
Precoded	Download	On-demand	Unicast	
Precoded	Download	On-demand	Multicast	

17.2 Σύγκριση συμπίεσης-αξιοπιστίας

Ας εξετάσουμε τη μεταβολή ανάμεσα στη συμπίεση και την αναγνώριση και την αντοχή στα σφάλματα, μέσω ενός πρόχειρου υπολογισμού. Υποθέτουμε ότι έχουμε να μεταδώσουμε 15 πλαίσια και δύο πιθανές δομές GoP: (1) IPB και (2) IPBBB.

Επίσης θεωρούμε ότι ένα πλαίσιο I καταλαμβάνει 17 kB, ένα πλαίσιο P καταλαμβάνει 3 kB και ένα πλαίσιο B καταλαμβάνει 1kB.

Αν δεν έχει ληφθεί σωστά μία ολόκληρη GoP, υποθέτουμε ότι η GoP πρέπει να σταλεί ξανά. Ως μετρική της αντοχής σε σφάλματα, θεωρούμε το αναμενόμενο πλήθος των bit που πρέπει να αναμεταδοθούν τουλάχιστον μία φορά. Η πιθανότητα απόρριψης ενός πλαισίου είναι 1% και θεωρούμε ότι είναι ανεξάρτητη. (Αυτές οι παραδοχές γίνονται για την απλοποίηση του προβλήματος στο πλαίσιο του μαθήματος. Σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον, αν χαθεί ένα πλαίσιο P ή B σε μία GoP, δεν χρειάζεται να αναμεταδοθεί ολόκληρη η GoP. Οι απώλειες δεν είναι ανεξάρτητες και συνήθως υπολογίζονται μικρότερες από το 1%. Επίσης σε ένα τμήμα βίντεο θα πρέπει να υπάρχουν πολλά περισσότερα πλαίσια).

- α. Στην περίπτωση 1, η δομή του πλαισίου για το βίντεο είναι IPB / IPB / IPB / IPB / IPB. Ποιο είναι το συνολικό κόστος του βίντεο σε kB; Ποιο είναι το κόστος ανά GoP ανά kB;
- β. Ποια είναι η πιθανότητα μία ολόκληρη GoP να μεταδοθεί με επιτυχία στην περίπτωση 1; Ποιο είναι το αναμενόμενο πλήθος των GOP που είναι επιτυχείς με την πρώτη προσπάθεια μετάδοσης ολόκληρου του βίντεο; Ποια είναι η αναμενόμενη ποσότητα των GoP που πρέπει να αναμεταδοθεί τουλάχιστον μία φορά; Πόσο στοιχίζει σε kB η πρώτη αναμετάδοση;
- γ. Επαναλάβετε το ερώτημα (α) για την περίπτωση 2, όπου η δομή του πλαισίου για το βίντεο είναι τώρα IPBBB / IPBBB / IPBBB.
- δ. Επαναλάβετε το ερώτημα (β) για την περίπτωση 2.
- ε. Να συγκρίνετε τα αποτελέσματά σας από τα ερωτήματα (α), (β), (γ), (δ) σε σχέση με τη μεταβολή της συμπεριφοράς ως προς την αναμετάδοση. Τι μπορείτε να συμπεράνετε;

17.3 Ενταμιευτής αναμετάδοσης (playback buffer) με τυχαίο χρόνο άφιξης

Θα εξετάσουμε μία ερώτηση παρόμοια με το παράδειγμα της ενότητας 17.3.2, στο οποίο αναλύσαμε τη συσχέτιση του χρόνου μεταφοράς με τη διακύμανση της χρονικής καθυστέρησης, αλλά με ένα ρεαλιστικό χρόνο άφιξης των πακέτων. Έστω $V_1 = 0$, $V_2 = 1$ και $V_3 = 2$, δηλαδή μία βηματική συνάρτηση. Τώρα τα πακέτα φθάνουν ανεξάρτητα στις χρονικές στιγμές A_1 , A_2 και A_3 , όπου το A_i ορίζεται τυχαίως ανάμεσα στο $\bar{A}_i - 1$ και $\bar{A}_i + 1$ και ορίζουμε τα $\bar{A}_1 = 3$, $\bar{A}_2 = 4,2$, $\bar{A}_3 = 4,6$. Ποιος είναι ο βέλτιστος χρόνος αναπαραγωγής του πρώτου p^* πακέτου που ελαχιστοποιεί το χρόνο μεταφοράς, αλλά εξασφαλίζει ότι όλα τα πακέτα λαμβάνονται με πιθανότητα τουλάχιστον 95%;

17.4 Εξυπηρέτηση εκ περιτροπής (Round Robin), ζυγοσταθμισμένη ευνομία «ουρών» (weighted fair queuing) και ουρές προτεραιότητας (priority queuing)

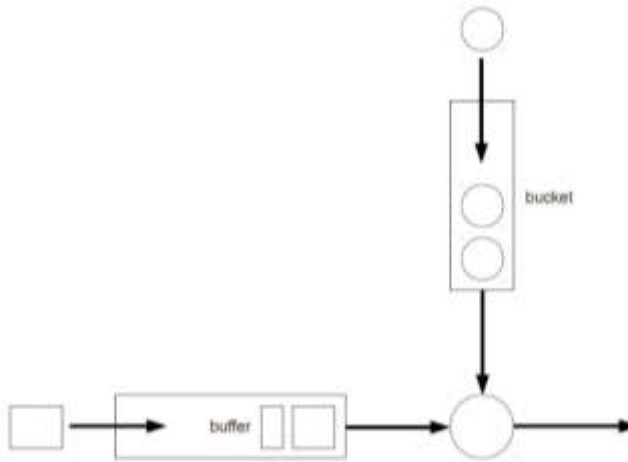
Συγκρίνουμε τις τρεις πολιτικές κατανομής πόρων. Ας υπενθυμίσουμε τα ακόλουθα:

- Ο χρονοπρογραμματισμός εξυπηρέτησης εκ περιτροπής απλά δίνει σε κάθε ουρά τη σειρά για τη μετάδοση ενός πακέτου.
- Η μέθοδος ουράς προτεραιότητας επιτρέπει στην ουρά με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα να εξυπηρετείται συνεχώς μέχρι να αδειάσει.
- Μια ειδική εκδοχή της ζυγοσταθμισμένης ευνομίας των «ουρών» ελέγχει την αρχή κάθε ουράς και μεταδίδει το πακέτο η μετάδοση του οποίου δύναται να τελειώσει πιο γρήγορα με τη χρήση του συστήματος γενικευμένου επεξεργαστή διαμοίρασης (Generalized Processor Sharing (GPS)). Το GPS είναι ένας ιδανικός χρονοπρογραμματιστής ροής ρευστών, και ορίζεται ως εξής: αν έχουμε n ουρές με προτεραιότητα p_1, p_2, \dots, p_n το εύρος ζώνης της ουράς j ανά χρονικό βήμα είναι $p_j / \sum_i p_i$.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μία ουρά A και μία ουρά B με πακέτα που φθάνουν:

Time (s)	Queue A arrived packet size (MB)	Queue B arrived packet size (MB)
$t = 0$		3
$t = 1$	1	
$t = 2$	1	
$t = 3$		2
$t = 4$		
$t = 5$		4

Η ουρά A έχει προτεραιότητα 1 και η ουρά B έχει προτεραιότητα 3 (μεγαλύτερος αριθμός υποδηλώνει υψηλότερη προτεραιότητα). Ο εξερχόμενος σύνδεσμος έχει εύρος ζώνης 1 Mbps. Μόλις ένα πακέτο αρχίσει να μεταδίδεται, δεν μπορεί να αντικατασταθεί από άλλα πακέτα. Συμπληρώστε στον παρακάτω πίνακα για τον προγραμματισμό round robin, τη μέθοδο με ουρές προτεραιότητας και τη ζυγοσταθμισμένη ευνομία των «ουρών».

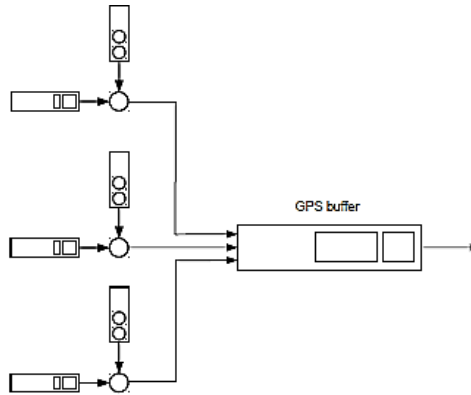


Σχήμα 17.11 Μία απεικόνιση ενός διαρρέοντος κάδοι για τον έλεγχο εισόδου.

Time (s)	Queue A departed packet size (MB)	Queue B departed packet size (MB)
$t = 0$		
$t = 1$		
$t = 2$		
$t = 3$		
$t = 4$		
$t = 5$		

17.5 Διαρρέων κάδος (*Leaky bucket*) και GPS

Μία ζεύξη γεμίζει όταν τα πακέτα φτάνουν με ταχύτερο ρυθμό από ό,τι μπορεί να υποστηρίξει η ζεύξη. Ο «διαρρέων» κάδος του μοντέλου των ουρών είναι ένας τρόπος για την επίλυση αυτού του προβλήματος. Σε αυτό το μοντέλο, υπάρχει ένας κάδος που περιέχει τα κουπόνια (tokens). Για κίνηση της τάξης k , ο κάδος έχει μέγεθος B_k και τα κουπόνια ξαναγεμίζουν τον κάδο με ρυθμό a_k . Τα πακέτα που περιμένουν στην ουρά μπορεί να αποδεσμευτούν μόνο με ένα κουπόνι από τον κάδο. Ως εκ τούτου, ο μέγιστος αριθμός των πακέτων που φεύγουν από την ουρά κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος $[u, t]$ είναι $B_k + a_k(t - u)$. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 17.11.



Σχήμα 17.12 Μία απεικόνιση των γενικευμένων επεξεργαστών διαμοίρασης (GPS).

Αρκετοί διαρρέοντες κάδοι καταλήγουν στον ίδιο ενταμιευτή. Αυτός ο ενταμιευτής ακολουθεί την υπηρεσία του γενικευμένου επεξεργαστή διαμοίρασης -GPS. Εδώ κάθε κίνηση τάξης k έχει βάρος w_k , C είναι ο ρυθμός που υποστηρίζεται από τη ζεύξη έξω από τον ενταμιευτή και είναι ο στιγμιαίος ρυθμός με τον οποίο τα πακέτα της κίνησης τάξης k φεύγουν από τον ενταμιευτή GPS. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 17.12.

- α. Κατά το χρονικό διάστημα $[u, t]$, τουλάχιστον $\rho_k (t - u)$ πακέτα φεύγουν από το ρυθμιστικό ενταμιευτή GPS. Το $B_{t,k}$ είναι το ανεκτέλεστο κομμάτι της κίνησης τάξης k στον ενταμιευτή GPS τη χρονική στιγμή t . Αποδείξτε ότι το ανεκτέλεστο κομμάτι της κίνησης τάξης k στον ενταμιευτή δεν μπορεί να υπερβεί μερικά B_k αν $\rho_k \geq \alpha_k$. Αρχικά υποθέτουμε ότι υπάρχει μία χρονική στιγμή t κατά την οποία το ανεκτέλεστο τμήμα $B_{t,k} \geq B_k$. Θεωρήστε το μεγαλύτερο χρόνο $< t$ ώστε $B_{u,k} = 0$, και να γράψετε τη σχετική ανισότητα της αλλαγής στο μέγεθος του ανεκτέλεστου κομματιού από το χρόνο u στο χρόνο t .
- β. Αποδείξτε ότι η καθυστέρηση που αντιλαμβάνεται ένα πακέτο τάξης k στο Σχήμα. 17.12 δεν μπορεί να υπερβεί το B_k/ρ_k αν $\rho_k \geq \alpha_k$.

Ας θεωρήσουμε ότι το F_k χαρακτηρίζει το χρόνο μετάδοσης του πακέτου k (ο χρόνος κατά τον οποίο το πακέτο k φεύγει από τον ενταμιευτή) μέσω του WFQ. Ομοίως καθορίστε το G_k για το GPS. Ορίζουμε το L_k να χαρακτηρίζει το μέγεθος (σε bit) του πακέτου k και το L_{max} είναι το μεγαλύτερο L_k . Θα δείξουμε ότι

$$F_k \leq G_k + L_{max} / C, \forall k \tag{17.1}$$

Τα GPS και WFQ επεξεργάζονται τα πακέτα με τον ίδιο ρυθμό, επομένως το συνολικό πλήθος πακέτων στο σύστημα παραμένει το ίδιο. Ως εκ τούτου, οι κατελημμένες και οι αδρανείς περιόδους τους είναι οι ίδιες και χρειάζεται μόνο να

δείξουμε ότι το αποτέλεσμα ισχύει για μία μόνο κατειλημμένη περίοδο. Υποθέτουμε ότι $F1 < F2 < \dots < Fk$ αντιστοιχούν σε k πακέτα μίας κατειλημμένης περιόδου της WFQ.

- γ. Διαλέξτε ένα οποιοδήποτε $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ και υπολογίστε το μέγιστο $m < k$ ώστε $G_m > G_k$. (Εάν δεν υπάρχει τέτοιο m , θεωρείται ότι $m = 0$). Αυτό συνεπάγεται ότι $G_n \leq G_k < G_m$ για μία ομάδα περιεχομένου $P = \{m + 1, m + 2, \dots, k - 1\}$. Ορίζουμε το T_m ως το χρόνο όπου το WFQ επιλέγει να μεταδώσει το πακέτο m . Τώρα θεωρήστε το χρόνο $S_m = F_m - T_m$. Δείξτε ότι τα πακέτα στο σύνολο P πρέπει να έχουν φτάσει μετά το S_m .
- δ. Τώρα θεωρήστε το χρονικό διάστημα $[S_m, G_k]$. Πακέτα από την ομάδα P φθάνουν και φεύγουν κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος. Επιπλέον, το πακέτο k μεταδίδεται κατά το χρονικό αυτό διάστημα. Υπενθυμίζουμε ότι το σύστημα διατηρεί την εργασία (work-conserving). Γράψτε μία ανισότητα η οποία συνδέει το διάστημα $[S_m, G_k]$ με τους χρόνους μετάδοσης των πακέτων στην ομάδα P και χρησιμοποιώντας το δείξτε το κύριο αποτέλεσμα της (17.1).
- ε. Υποθέτουμε ότι οι ουρές των πολλαπλών «διαρρέοντων» κάδων πολυπλέκονται σε ένα μονό ενταμιευτή WFQ, παρόμοιο με εκείνο του Σχήματος 17.12. Συνδυάστε τα ερωτήματα (β) και (δ) για να δείξετε ότι η μέγιστη καθυστέρηση που αντιλαμβάνεται ένα πακέτο τάξης k είναι $B_k / \rho_k + L_{max} / C$.