Δίκτυα Υπολογιστών Ι

Δίκτυα Μεταγωγής και Διαδίκτυα: Μέρος Δ'

Ευάγγελος Παπαπέτρου

Τμ. Μηχ. Η/Υ & Πληροφορικής, Παν. Ιωαννίνων

Διάρθρωση

Διάρθρωση

Αναγκαιότητα

Σε κάθε φυσικό δίκτυο το μέγεθος ενός μεταδιδόμενου πακέτου έχει ένα άνω όριο που καλείται μέγιστη μονάδα μετάδοσης (maximum transmission unit, MTU)

Πρόβλημα 1: Κάθε εφαρμογή μπορεί να επιλέξει ελεύθερα το μέγεθος (ακόμα και >MTU) των πακέτων που αυτή δημιουργεί

Πρόβλημα 2: κάθε τεχνολογία δικτύου επιτρέπει διαφορετικό MTU
- π.χ., στα δίκτυα Ethernet το MTU είναι 1500 bytes ενώ στα δίκτυα FDDI 4500 bytes
- στο Internet ένα πακέτο μπορεί να διέλθει από φυσικά δίκτυα με διαφορετικό MTU

Συμπέρασμα: απαιτείται ένας μηχανισμός για τη μετάδοση πακέτων με μέγεθος μεγαλύτερο από MTU

Παράδειγμα: Κατακερματισμός στο IP (1/3)

Το πρωτόκολλο IP προσφέρει έναν ευέλικτο μηχανισμό κατακερματισμού (fragmentation) και επανασυναρμολόγησης (reassembly) των πακέτων

- από το αρχικό πακέτο παράγονται ένα ή περισσότερα πακέτα (θραύσματα, fragments) με μέγεθος ίσο ή μικρότερο του MTU
- ο μηχανισμός ενεργοποιείται μόνο αν απαιτηθεί η μετάδοση σε ένα δίκτυο με MTU μικρότερο από το μέθεγος του πακέτου

Ένα θραύσμα αποτελεί από μόνο του ένα αυτόνομο πακέτο IP και μεταδίδεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα

- όλα τα θραύσματα έχουν την ίδια τιμή στο πεδίο αναγνωριστικό (Ident) της κεφαλίδας
- το αναγνωριστικό επιλέγεται από τον αποστολέα και είναι μοναδικό για όλα τα μη κατακερματισμένα πακέτα από τον ίδιο αποστολέα

Παράδειγμα: Κατακερματισμός στο IP (2/3)

Σε κάθε θραύσμα:

- το bit M στο πεδίο σημαίες (Flags) έχει την τιμή 1 εκτός από το τελευταίο θραύσμα
- το πεδίο σχετική απόσταση (Offset) δηλώνει τη θέση των δεδομένων που μεταφέρει το θραύσμα στο αρχικό πακέτο

Η επανασυναρμολόγηση των θραυσμάτων στο αρχικό πακέτο μπορεί να γίνει:

- στον επόμενο δρομολογητή (διαφανής κατακερματισμός)
- στον παραλήπτη υπολογιστή (αδιαφανής κατακερματισμός)

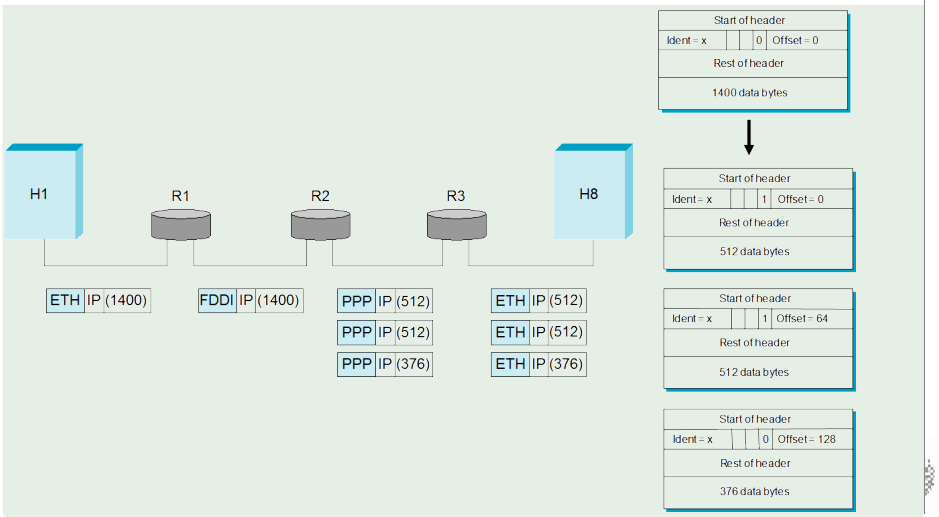
  ένα θραύσμα μπορεί να υποστεί ξανά κατακερματισμό
  η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται στο Διαδίκτυο

Η επανασυναρμολόγηση αποτυγχάνει αν κάποιο από τα θραύσματα δεν φτάσει στον παραλήπτη

- το IP δεν επιχειρεί να ανακτήσει θραύσματα που λείπουν

Παράδειγμα: Κατακερματισμός στο IP (3/3)

Example



Διάρθρωση

Εισαγωγή

Η λειτουργία ενός δικτύου μεταγωγής θέτει ένα ζήτημα κατανομής πόρων

- πακέτα από διαφορετικούς χρήστες ανταγωνίζονται για τους πόρους των δρομολογητών

Δύο προσεγγίσεις για τη διαχείριση των πόρων:

- μεταγωγή εικονικού κυκλώματος: κατανομή ή εκχώρηση πόρων (resource allocation)
- μεταγωγή πακέτου: απουσία κατανομής πόρων

Και μια ενδιάμεση λύση σε δίκτυα με μεταγωγή πακέτου:

- μπορούν να εφαρμοστούν πολιτικές με συνδεσμοστρεφή λογική με τη χρήση της έννοιας της ασυνδεσμικής ροής (flow)

Προσεγγίσεις στη διαχείριση πόρων

Απουσία κατανομής πόρων:

- δεν απαιτείται κάποιος μηχανισμός για την κατανομή των πόρων με αποτέλεσμα να μην αποκλείεται η συμφόρηση
- η συμφόρηση αντιμετωπίζεται μέσω μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης (congestion control)
- επιτρέπει τον υψηλό βαθμό αξιοποίησης των πόρων αλλά δεν παρέχει εγγυήσεις ποιότητας (best effort)
- ευέλικτη προσέγγιση με χαμηλή πολυπλοκότητα

Εκχώρηση πόρων:

- απαιτείται μηχανισμός κράτησης πόρων (resource reservation) και αποκλείει τη συμφόρηση
- αποτελεί την συνδεσμοστρεφή προσέγγιση γιατί απαιτεί την διατήρηση "μόνιμων" πληροφοριών κατάστασης (hard state)
- είναι προϋπόθεση για την παροχή ποιότητας υπηρεσιών (quality of service, QoS)
- έχει σημαντική πολυπλοκότητα

Ασυνδεσμικές ροές

Οι αποφάσεις για τη διαχείριση των πόρων πρέπει να λαμβάνονται για ομάδες πακέτων που αποστέλλονται μεταξύ των ίδιων υπολογιστών

Στα δίκτυα μεταγωγής πακέτων ένας δρομολογητής μπορεί να κατατάξει τα πακέτα σε ροές (flows)

Ροή: μια ακολουθία πακέτων μεταξύ ενός ζεύγους προέλευσης/προορισμού που ακολουθούν το ίδιο δρομολόγιο

- αν και τα πακέτα μετάγονται ανεξάρτητα, στην πράξη τις περισσότερες φορές ακολουθούν το ίδιο δρομολόγιο

Η καταγραφή ροών απαιτεί τη διατήρηση προσωρινών πληροφοριών κατάστασης (soft state)

- δεν απαιτείται η δημιουργία και διαγραφή των πληροφοριών με σηματοδότηση

✏ Μια ροή μπορεί επίσης να οριστεί μεταξύ δύο διεργασιών

Ταξινόμηση μηχανισμών διαχείρισης πόρων

Σημαντικότερες ταξινομήσεις μηχανισμών διαχείρισης πόρων:

- επικεντρωμένοι στους δρομολογητές vs επικεντρωμένοι στους υπολογιστές υπηρεσίας

  οι δρομολογητές λαμβάνουν τις αποφάσεις και ενημερώνουν τους υπολογιστές υπηρεσίας vs οι υπολογιστές υπηρεσίας παρατηρούν το δίκτυο και προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους

- βασισμένοι σε δεσμεύσεις (reservations) vs βασισμένοι σε ανάδραση (feedback)

  ο αποστολέας υποβάλλει αίτημα για τη δέσμευση πόρων vs ο αποστολέας προσαρμόζει την ταχύτητα μετάδοσης ανάλογα με την ανάδραση (ρητή ή υπονοούμενη) που λαμβάνει

- βασισμένοι σε παράθυρα (window-based) vs βασισμένοι στο ρυθμό (rate-based)

  ο αποστολέας μπορεί να αποστείλει συγκεκριμένη ποσότητα δεδομένων που ανανεώνεται ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου vs ο αποστολέας μπορεί να αποστείλει δεδομένα με συγκεκριμένο ρυθμό

Παραδείγματα μηχανισμών διαχείρισης πόρων

Μερικοί από τους σημαντικότερους μηχανισμούς που εφαρμόζονται σε δίκτυα είναι:

- μηχανισμοί παροχής ποιότητας υπηρεσιών
  σημαντικές τεχνικές: RSVP, differentiated services, integrated services
- μηχανισμοί διαχείρισης ουρών
  σημαντικές τεχνικές είναι οι FIFO (first-in-first out), FQ (fair queueing) και WFQ (weighted fair queueing)
- μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης (congestion control)
  σημαντικότεροι μηχανισμοί είναι οι DECbit και τυχαίας πρώιμης ανίχνευσης (random early detection, RED)
- μηχανισμοί αποφυγής συμφόρησης (congestion avoidance)
  σημαντικότερη τεχνική: αποβολή φορτίου

Διάρθρωση

Εισαγωγή

Τα πρωτόκολλα δικτύωσης μέχρι και το επίπεδο δικτύου προδιαγράφουν την επικοινωνία μεταξύ υπολογιστών υπηρεσίας

Ζήτημα: η επικοινωνία λαμβάνει χώρα μεταξύ διεργασιών (εφαρμογών)
- τα δεδομένα παράγονται και καταναλώνονται από τις εφαρμογές

Το επίπεδο μεταφοράς (transport layer) είναι υπεύθυνο *για την επικοινωνία των διεργασιών*

✏ Ένα πρωτόκολλο μεταφοράς ονομάζεται και πρωτόκολλο από άκρο σε άκρο γιατί προδιαγράφει την επικοινωνία μεταξύ των τελικών προγραμμάτων εφαρμογών

Ρόλος επιπέδου μεταφοράς

Ρόλος του επιπέδου μεταφοράς είναι να *μετατρέψει* την υπηρεσία παράδοσης πακέτων (δεδομένων) μεταξύ υπολογιστών υπηρεσίας (hosts), την οποία παρέχει ένα δίκτυο, σε ένα κανάλι επικοινωνίας μεταξύ δύο διεργασιών

Μηχανισμοί επιπέδου μεταφοράς (1/2)

Ένα πρωτόκολλο μεταφοράς πρέπει να προσφέρει επικοινωνία των εφαρμογών με τα χαρακτηριστικά που αυτές επιθυμούν όπως:
- την εγγυημένη παράδοση των μηνυμάτων
- την παράδοση των μηνυμάτων με τη σωστή σειρά
- την παράδοση ενός μόνο αντιγράφου για κάθε μήνυμα
- την παράδοση μηνυμάτων χωρίς περιορισμό μεγέθους
- την απόρριψη μηνυμάτων με μεγάλη καθυστέρηση
- τον έλεγχο ροής στην επικοινωνία, κα

Η επικοινωνία των εφαρμογών θα πρέπει να είναι ανεπηρέαστη από τους περιορισμούς του μοντέλου υπηρεσίας του υποκείμενου δικτύου
- το δίκτυο μπορεί να μην υποστηρίζει συγκεκριμένες υπηρεσίες, π.χ. η παράδοση των πακέτων μπορεί να μην είναι εγγυημένη

Μηχανισμοί επιπέδου μεταφοράς (2/2)

Ζήτημα: η ανάπτυξη μηχανισμών που θα μετατρέπουν το μοντέλο υπηρεσίας του υποκείμενου δικτύου στο μοντέλο υπηρεσίας που απαιτούν οι εφαρμογές

Το επίπεδο μεταφοράς θα πρέπει επίσης να επιτρέπει την από κοινού χρήση των υπηρεσιών του δικτύου από πολλές διεργασίες

- για το σκοπό αυτό απαιτείται: η διευθυνσιοδότηση των διεργασιών (addressing) και η πολύπλεξη/αποπολύπλεξη των μηνυμάτων (multiplexing/demultiplexing) διαφορετικών διεργασιών

✏ Σε πολλές περιπτώσεις το πρόβλημα είναι η αναξιόπιστη λειτουργία του υποκείμενου δικτύου επομένως θεωρούμε ότι στόχος του επιπέδου μεταφοράς είναι η δημιουργία ενός αξιόπιστου καναλιού επικοινωνίας

Πρωτόκολλα μεταφοράς στο Διαδίκτυο (1/2)

Ένα πρωτόκολλο μεταφοράς πρέπει να υλοποιεί υποχρεωτικά τη διευθυνσιοδότηση των διεργασιών και την πολύπλεξη/αποπολύπλεξη των δεδομένων

Η υλοποίηση επιπλέον μηχανισμών, που βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά της επικοινωνίας, είναι προαιρετική

- κάθε πρωτόκολλο μεταφοράς επιλέγει τους μηχανισμούς που θα υλοποιήσει και επομένως τις υπηρεσίες που θα προσφέρει
- η επιλογή είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ των χαρακτηριστικών της απαιτούμενης υπηρεσίας και της πολυπλοκότητας υλοποίησης

Ορισμένοι μηχανισμοί υλοποιούνται από τις ίδιες τις εφαρμογές ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα και να ενισχυθεί η ευελιξία

- ένα απλούστερο πρωτόκολλο μεταφοράς μπορεί να μην ικανοποιεί πλήρως αλλά να είναι συμβατό με περισσότερες εφαρμογές

Πρωτόκολλα μεταφοράς στο Διαδίκτυο (2/2)

Στο Διαδίκτυο δύο είναι τα σημαντικότερα πρωτόκολλα μεταφοράς

- το πρωτόκολλο Αυτοδύναμων Πακέτων Χρήστη (User Datagram Protocol, UDP)

  προσφέρει την απλούστερη υπηρεσία μεταφοράς δεδομένων με χαμηλή πολυπλοκότητα
- το πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης (Transmission Control Protocol, TCP)

  προσφέρει αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ διεργασιών με αντάλλαγμα την πολυπλοκότητα υλοποίησης

✏ Στα δίκτυα IP προδιαγράφονται και άλλα πρωτόκολλα που προσφέρουν εξειδικευμένες υπηρεσίες μεταφοράς, όπως τα Real Time Protocol (RTP), Stream Control Transmission Protocol (SCTP), κλπ

Διάρθρωση

Εισαγωγή

Το πρωτόκολλο User Datagram Protocol (UDP) προσφέρει την απλούστερη υπηρεσία μεταφοράς δεδομένων μεταξύ διεργασιών

- υλοποιεί μόνο την πολύπλεξη/αποπολύπλεξη δεδομένων
- καθιστά διαθέσιμες τις αναξιόπιστες υπηρεσίες ενός δικτύου IP στις εφαρμογές

Το UDP δεν προσφέρει κανενός είδους αξιοπιστία στη μετάδοση δεδομένων

- οι μηχανισμοί για αξιόπιστη μετάδοση πρέπει να υλοποιηθούν από τις ίδιες τις εφαρμογές

Το UDP χαρακτηρίζεται από χαμηλή πολυπλοκότητα και υψηλή ευελιξία

Διευθυνσιοδότηση διεργασιών

Κάθε διεργασία σε ένα υπολογιστή υπηρεσίας προσδιορίζεται μοναδικά από έναν ακέραιο αριθμό που ονομάζεται θύρα (port)

- η θύρα ονομάζεται αλλιώς γραμματοκιβώτιο (mailbox): μια διεργασία μπορεί να στείλει δεδομένα σε μια θύρα και η διεργασία παραλήπτης να διαβάσει τα δεδομένα από τη συγκεκριμένη θύρα

Οι διεργασίες σε διαφορετικούς υπολογιστές προσδιορίζονται από το ζεύγος τιμών <διεύθυνση IP υπολογιστή, θύρα>

- αυτό το ζεύγος τιμών αποτελεί το κλειδί αποπολύπλεξης (demultiplexing key)

✏ Η θύρα είναι ένας αριθμός με μήκος 16 bit, επομένως σε κάθε υπολογιστή υπηρεσίας μπορούν να προσδιοριστούν μονοσήμαντα μέχρι ~ 64000 διεργασίες

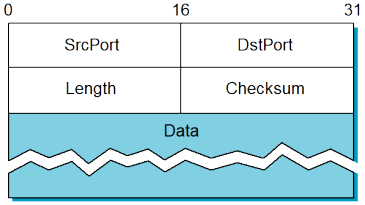
Μετάδοση πληροφορίας

Οι θύρες αποστολέα και παραλήπτη μεταφέρονται στην κεφαλίδα του πακέτου UDP ώστε να είναι δυνατή:

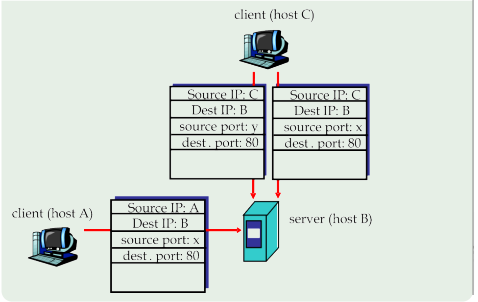
- η παράδοση του μηνύματος στον παραλήπτη
- η απάντηση του παραλήπτη στον αποστολέα

Το πακέτο UDP μεταφέρει δεδομένα μεταβλητού μεγέθους και ενθυλακώνεται σε ένα πακέτο IP

- το πεδίο Μήκος (Length) στην κεφαλίδα προσδιορίζει το μέγεθος του πακέτου UDP



Example



Μηχανισμοί ανάθεσης θυρών

Προϋπόθεση για έναρξη επικοινωνίας: η διεργασία που ενεργοποιεί την επικοινωνία (πελάτης, client) να μάθει τη θύρα της διεργασίας αποδέκτη της επικοινωνίας (διακομιστής, server)

- η διεργασία διακομιστής μπορεί να μάθει τη θύρα της διεργασίας πελάτη καθώς αυτή περιέχεται στα μηνύματα από τον πελάτη

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις:

- ο διακομιστής δέχεται μηνύματα σε μια προκαθορισμένη θύρα (ευρέως γνωστή θύρα, well known port)

  υπάρχουν προκαθορισμένες θύρες για συγκεκριμένες εφαρμογές, π.χ. θύρα 25 για μηνύματα αλληλογραφίας
- ο διακομιστής δέχεται μηνύματα σε μια ευρέως γνωστή θύρα και στη συνέχεια η επικοινωνία γίνεται σε νέα θύρα που συμφωνείται
- μια διεργασία αντιστοιχιστή θυρών (port mapper) δέχεται μηνύματα σε μια μοναδική θύρα και προσδιορίζει τη θύρα επικοινωνίας ανάλογα με την εφαρμογή

Αποπολύπλεξη δεδομένων

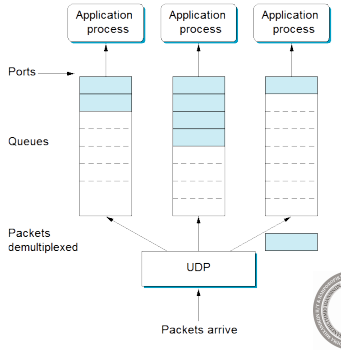
Κάθε υπολογιστής διατηρεί μια ουρά για κάθε διεργασία που επικοινωνεί μέσα από το δίκτυο

- στην ουρά αποθηκεύονται τα λαμβανόμενα πακέτα ώστε να είναι διαθέσιμα για ανάγνωση από τη διεργασία
- η ανάγνωση των πακέτων γίνεται με την τεχνική FIFO

Τα λαμβανόμενα πακέτα τοποθετούνται στην κατάλληλη ουρά ανάλογα με τη θύρα προορισμού

Δεν υπάρχει κάποιος μηχανισμός ελέγχου ροής

- πακέτα μπορεί να χαθούν λόγω υπερχείλισης των ουρών αποθήκευσης



Έλεγχος ορθής παράδοσης

Το UDP παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου τη ορθότητας ενός πακέτου που παραδόθηκε μέσω της χρήσης του αθροίσματος ελέγχου (checksum)

Το άθροισμα ελέγχου υπολογίζεται με βάση:

- την κεφαλίδα του UDP
- τα δεδομένα του πακέτου UDP
- ένα στοιχείο που αποκαλείται ψευδοκεφαλίδα

Η ψευδοκεφαλίδα αποτελείται από:

- τον αριθμό πρωτοκόλλου της κεφαλίδας IP
- τις διευθύνσεις IP αποστολέα και παραλήπτη
- το πεδίο μήκους του UDP

Η χρήση της ψευδοκεφαλίδας στο άθροισμα ελέγχου έχει στόχο να πιστοποιήσει ότι το πακέτο παραδόθηκε μεταξύ των σωστών άκρων επικοινωνίας

Διάρθρωση

Εισαγωγή (1/2)

Το πρωτόκολλο Transmission Control Protocol (TCP) παρέχει μια αξιόπιστη, συνδεσμοστρεφή (connection-oriented) επικοινωνία μεταξύ διεργασιών

Η συνδεσμοστρεφής προσέγγιση είναι απαραίτητη ώστε πέρα από τη αξιόπιστη μετάδοση να εξασφαλιστούν:

- η εν σειρά παράδοση των δεδομένων
- η αποφυγή παράδοσης διπλότυπων μηνυμάτων

Το TCP είναι πλήρως αμφίδρομο (full-duplex) πρωτόκολλο

- κάθε σύνδεση υποστηρίζει την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων και προς τις δύο κατευθύνσεις

Εισαγωγή (2/2)

Κεντρική ιδέα: χρήση ενός μηχανισμού κυλιόμενου παραθύρου για την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων πάνω από το αναξιόπιστο διαδίκτυο

Η πολυπλοκότητα ενός διαδικτύου επιβάλλει επίσης την ενσωμάτωση στο TCP:

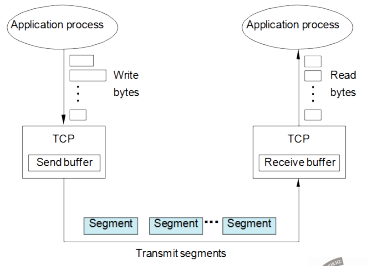
- ενός μηχανισμού ελέγχου ροής (flow control)
- ενός μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης (congestion control)

Χρησιμοποιείται ο ίδιος μηχανισμός αποπολύπλεξης όπως και στο UDP

Ροή πληροφορίας και Τμήματα

Το πρωτόκολλο TCP είναι ένα πρωτόκολλο προσανατολισμένο σε byte και επομένως μεταφέρει τα δεδομένα ως ένα ρεύμα byte (byte stream)

- η διεργασία αποστολέας αποστέλλει μια συνεχόμενη σειρά από bytes και η διεργασία παραλήπτης διαβάζει την ίδια σειρά από bytes
- το πρωτόκολλο TCP είναι υπεύθυνο για την τμηματοποίηση της πληροφορίας σε πακέτα και την ανασύνθεση του αρχικού ρεύματος byte



Τα πακέτα TCP ονομάζονται τμήματα (segments)

- κάθε πακέτο μεταφέρει ένα τμήμα του αρχικού ρεύματος byte

Μορφή τμήματος (1/2)

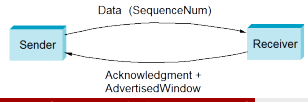
Τα πεδία θύρα προέλευσης (SrcPort) και θύρα προορισμού (DstPort) καθορίζουν τα άκρα της επικοινωνίας

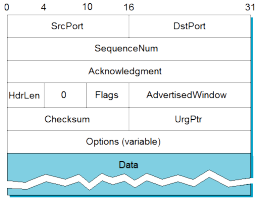
Ο αλγόριθμος κυλιόμενου παραθύρου χρησιμοποιεί τα πεδία:

- αριθμός ακολουθίας (SequenceNum): περιέχει τον αριθμό ακολουθίας του πρώτου byte που μεταφέρεται
  στο TCP κάθε byte έχει έναν ακολουθιακό αριθμό
- επιβεβαίωση (Acknowledgment): περιέχει τον αριθμό ακολουθίας στον οποίο αναφέρεται μια επιβεβαίωση
- αναγγελθέν παράθυρο (AdvertisedWindow)

Ο αριθμός ακολουθίας χρησιμοποιείται στην κατεύθυνση μετάδοσης των δεδομένων

- η επιβεβαίωση και το αναγγελθέν παράθυρο χρησιμοποιούνται στην αντίθετη κατεύθυνση





Μορφή τμήματος (2/2)

Το πεδίο σημαίες (Flags) προσδιορίζει πακέτα ελέγχου του TCP

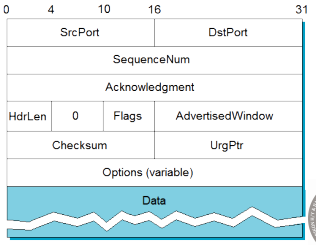
- SYN (synchronize): χρησιμοποιείται στην εγκαθίδρυση μιας σύνδεσης
- FIN (finish): χρησιμοποιείται στον τερματισμό μιας σύνδεσης
- RESET: χρησιμοποιείται για την επανεκκίνηση μιας σύνδεσης μετά από περιπτώσεις σφαλμάτων
- ACK: χρησιμοποιείται για να δηλώσει ένα πακέτο επιβεβαίωσης
- PUSH: δηλώνει ότι τα δεδομένα στάλθηκαν από τον αποστολέα με τη λειτουργία *ώθησης (push)*

Άθροισμα ελέγχου (Checksum):

- χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ορθότητας ενός ληφθέντος πακέτου όπως και στο UDP

Μήκος κεφαλίδας (HdrLen):

- δηλώνει το μέγεθος της κεφαλίδας σε λέξεις των 32 bit



Μηχανισμός κυλιόμενου παραθύρου: Γενικές αρχές

Ο μηχανισμός κυλιόμενου παραθύρου του TCP εξασφαλίζει την αξιόπιστη και εν σειρά παράδοση των δεδομένων

Επιπλέον, ενσωματώνει και ένα μηχανισμό ελέγχου ροής

- αντί της χρήσης ενός σταθερού μεγέθους παραθύρου, ο παραλήπτης αναγγέλλει στον αποστολέα το μέγεθος παραθύρου
- η αναγγελία του παραθύρου γίνεται μέσω του πεδίου αναγγελθέν παράθυρο
- ο αποστολέας προσαρμόζεται ώστε τα μη επιβεβαιωμένα δεδομένα να μην έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από το μέγεθος του παραθύρου

Ο παραλήπτης επιλέγει το μέγεθος παραθύρου με βάση το διαθέσιμο αποθηκευτικό χώρο

Αξιόπιστη και διατεταγμένη παράδοση (1/2)

Ο αποστολέας διατηρεί ένα χώρο προσωρινής αποθήκευσης για δεδομένα που:

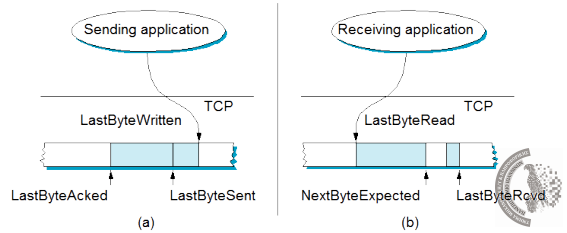
- έχουν σταλεί αλλά δεν έχουν επιβεβαιωθεί
- έχουν εγγραφεί από την εφαρμογή αλλά δεν έχουν αποσταλεί

Ο αποστολέας διατηρεί τρεις μετρητές:

- LastByteAcked: τελευταίο επιβεβαιωμένο byte
- LastByteSent: τελευταίο σταλθέν byte
- LastByteWritten: τελευταίο εγγεγραμμένο byte

$LastByteAcked \leq LastByteSent$

$LastByteSent \leq LastByteWritten$



Αξιόπιστη και διατεταγμένη παράδοση (2/2)

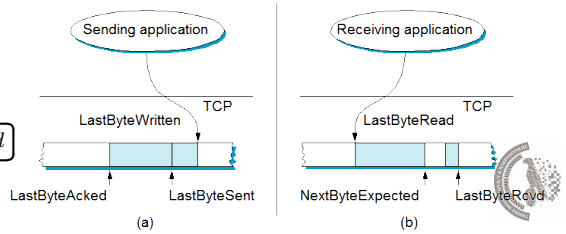
Ο παραλήπτης διατηρεί ένα χώρο προσωρινής αποθήκευσης για δεδομένα που:

- λαμβάνονται χωρίς σωστή σειρά
- δεδομένα που είναι σε σωστή σειρά (δηλαδή δεν λείπουν byte στο ρεύμα byte που προηγείται) αλλά η εφαρμογή δεν τα έχει διαβάσει

Ο παραλήπτης διατηρεί επίσης τρεις μετρητές:

- LastByteRead: τελευταίο διαβασμένο byte
- NextByteExpected: επόμενο αναμενόμενο byte
- LastByteRcvd: τελευταίο ληφθέν byte

$LastByteRead \leq NextByteExpected$



Έλεγχος ροής (1/3)

Στο πρωτόκολλο κυλιόμενου παραθύρου το μέγεθος του παραθύρου καθορίζει το μέγιστο ρυθμό του αποστολέα

- αναπαριστά τα δεδομένα που μπορεί να στείλει ο αποστολέας χωρίς επιβεβαίωση
- το μέγιστο παράθυρο καθορίζεται από το μέγιστο αποθηκευτικό χώρο του αποστολέα (MaxSendBuffer) και του παραλήπτη (MaxRcvBuffer)

Ο παραλήπτης μπορεί να ελέγξει το ρυθμό του αποστολέα αναγγέλοντας μέσω μιας επιβεβαίωσης ένα παράθυρο ανάλογα με την αποθηκευτική του ικανότητα

$(LastByteRcvd - LastByteRead \leq MaxRcvBuffer)$

$$AdvertisedWindow = MaxRcvBuffer - ((NextByteExpected - 1) - LastByteRead)$$

Το παράθυρο αναπροσαρμόζεται ανάλογα με την ικανότητα του παραλήπτη να διαβάζει δεδομένα

- το παράθυρο λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι MaxRcvBuffer

Έλεγχος ροής (2/3)

Ο αποστολέας πρέπει να τηρήσει το αναγγελθέν παράθυρο ($LastByteSent - LastByteAcked \leq AdvertisedWindow$)) υπολογίζοντας ένα δραστικό παράθυρο:

$$EffectiveWindow = AdvertisedWindow - (LastByteSent - LastByteAcked)$$

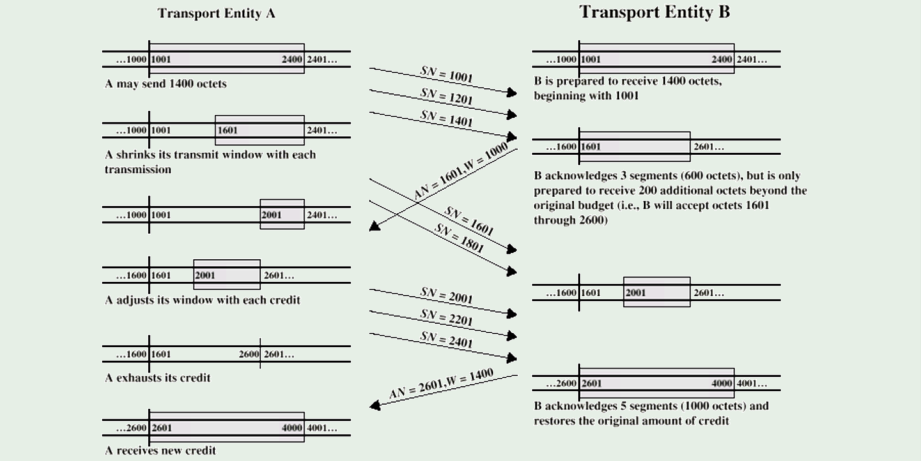
- παράλληλα πρέπει να εξασφαλίσει ότι η εφαρμογή δεν θα προκαλέσει υπερχείλιση του αποθηκευτικού χώρου ($LastByteWritten - LastByteAcked \leq MaxSendBuffer$)

Ο αποστολέας σταματά την αποστολή δεδομένων αν το δραστικό παράθυρο γίνει μηδέν

- πρόβλημα: η μη αποστολή δεδομένων δεν παράγει επιβεβαιώσεις ώστε να ενημερωθεί ο αποστολέας για μεταβολές του παραθύρου του παραλήπτη
- λύση: το TCP εξακολουθεί να στέλνει ένα byte δεδομένων ακόμα και αν το δραστικό παράθυρο είναι μηδέν

Έλεγχος ροής (3/3)

Example



Προσαρμοστική αναμετάδοση

Καθορισμός βέλτιστου χρόνου αναμονής (timeout): ιδιαίτερα σημαντικός για την απόδοση του αλγόριθμου κυλιόμενου παραθύρου

- ο προσδιορισμός του σχετίζεται με το χρόνο RTT
- ο χρόνος RTT είναι μεταβαλλόμενος σε ένα διαδίκτυο και η μέτρησή του είναι δύσκολη

Το TCP καθορίζει ένα μηχανισμό εκτίμησης του χρόνου RTT

- για κάθε αποστολή πακέτου και λήψη μιας επιβεβαίωσης ένας κόμβος πραγματοποιεί μια μέτρηση του χρόνου RTT (SampleRTT)
- ο εκτιμώμενος χρόνος RTT (EstimatedRTT) υπολογίζεται ως:
  $$EstimatedRTT = \alpha EstimatedRTT + (1 - \alpha)SampleRTT$$
- η τιμή α έχει σκοπό να εξομαλύνει τις απότομες διακυμάνσεις του χρόνου RTT

Το TCP καθορίζει $timeout = 2EstimatedRTT$

✏ Έχουν προταθεί περισσότερο αποδοτικοί αλγόριθμοι για τον υπολογισμό του χρόνου RTT όπως οι αλγόριθμοι των Karn/Partridge και Jacobson/Karels

Εγκαθίδρυση και τερματισμός σύνδεσης

Η ανταλλαγή δεδομένων στο TCP μπορεί να γίνει μετά την εγκαθίδρυση της σύνδεσης (connection setup)

Σκοπός: τα δύο άκρα επικοινωνίας πρέπει να συμφωνήσουν σε ένα σύνολο παραμέτρων

- στην περίπτωση του TCP οι παράμετροι είναι οι εναρκτήριοι αριθμοί ακολουθίας

Η εγκαθίδρυση της σύνδεσης γίνεται με τον αλγόριθμο τριπλής χειραψίας (threeway handshake)

- η διαδικασία ξεκινά από τον πελάτη (ασύμμετρη διαδικασία)

Η διαδικασία τερματισμού της σύνδεσης πρέπει να ξεκινήσει από κάθε άκρο ξεχωριστά (συμμετρική διαδικασία)

- σκοπός: η αποδέσμευση των πόρων του συστήματος
- κάθε άκρο τερματίζει τη δική του κατεύθυνση της σύνδεσης (δεν επιθυμεί να στείλει άλλα δεδομένα)