

Δίκτυα Υπολογιστών



Δίκτυα υπολογιστών και το Διαδίκτυο

Επιδόσεις

Κ. Βασιλάκης



Περίγραμμα – ενότητες που εξετάζονται

- Τι είναι το διαδίκτυο
 - Στοιχεία που το συνθέτουν
 - Τρόποι παροχής υπηρεσιών
 - Τι είναι τα πρωτόκολλα
- Τα άκρα του δικτύου,
 - Δίκτυα πρόσβασης,
 - Φυσικά μέσα
- Ο πυρήνας του δικτύου
 - Μεταγωγή πακέτου
 - Μεταγωγή κυκλώματος
 - Δομή του διαδικτύου
- Δυσκολίες στη μεταφορά
 - Καθυστερήσεις,
 - Απώλειες,
 - Διεκπεραιωτική ικανότητα
- Επίπεδα πρωτοκόλλων
 - Διαστρωμάτωση
 - Το μοντέλο OSI
- Ιστορία



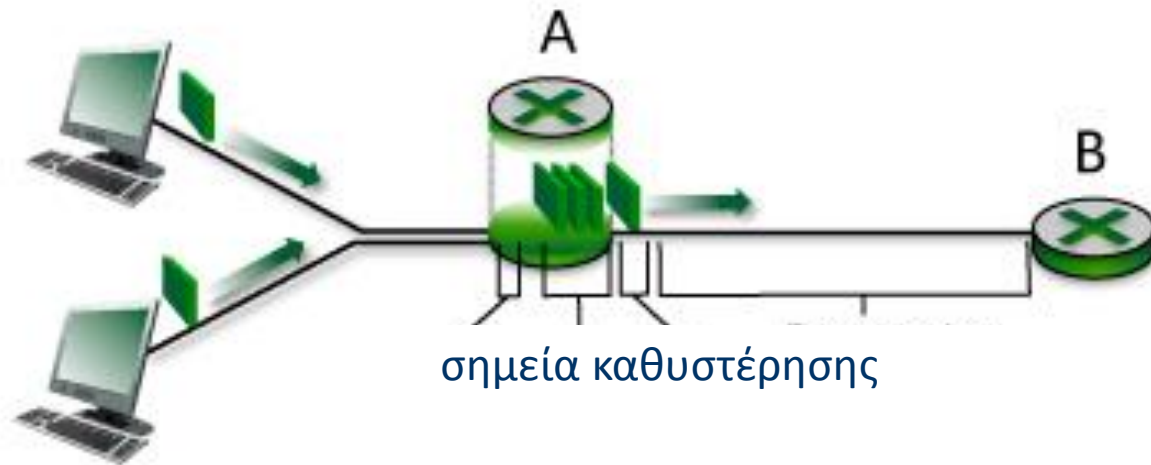
Δεν υπάρχουν ιδανικές συνθήκες μετάδοσης

- Ανέφικτος στόχος: μεταφορά δεδομένων χωρίς
 - καθυστερήσεις και
 - απώλειες
- Καθυστερήσεις – απώλειες –περιορισμοί οφείλονται:
 - Στους τρόπους λειτουργίας και στα χαρακτηριστικά των τερματικών συστήματα και των συσκευών επικοινωνίας.
 - Σε φυσικούς νόμους που διέπουν τα μέσα μετάδοσης.
- Η αντιμετώπιση θεμάτων καθυστερήσεων, απωλειών και των περιορισμών της *διακπεραιωτικής ικανότητας* των δικτύων είναι ακόμη ένα ανοικτό ερευνητικό θέμα.
- **Διεκπεραιωτική ικανότητα:** η ποσότητα δεδομένων που μπορούν να μεταφερθούν ανά μονάδα χρόνου (πχ ανά δευτερόλεπτο).
- Η απόδοση των εφαρμογών επηρεάζεται από τις δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά τη μεταφορά δεδομένων.



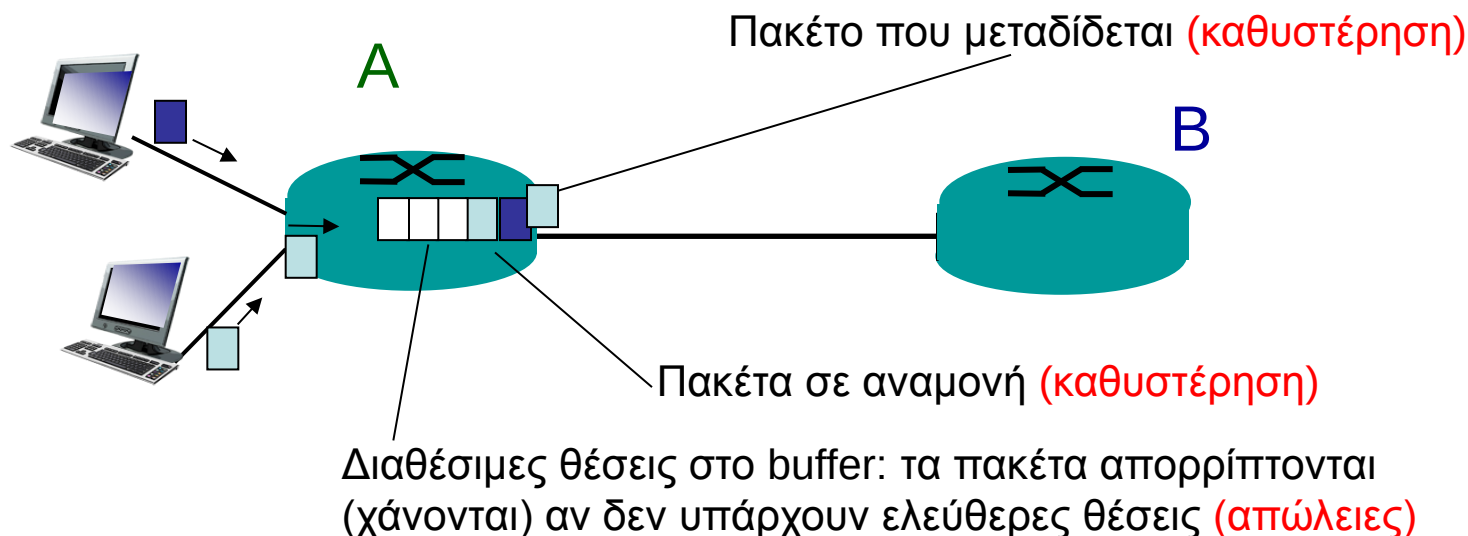
Δίκτυα μεταγωγής πακέτων: καθυστερήσεις

- Ένα πακέτο ξεκινά από ένα host (προέλευση), περνά μια σειρά δρομολογητών για να καταλήξει σ' ένα άλλο host (προορισμός).
- Στη διαδρομή του αυτή ένα πακέτο υπόκειται σε διάφορους τύπους καθυστερήσεων ή και μπορεί να χαθεί (απώλεια).
- Ποιες καθυστερήσεις λαμβάνουν χώρα σε ένα κόμβο στα δίκτυα μεταγωγής πακέτων.
- Στο παράδειγμα μας θα μελετήσουμε τι συμβαίνει κατά τη μεταφορά ενός πακέτου από ένα κόμβο A σε ένα γειτονικό B.

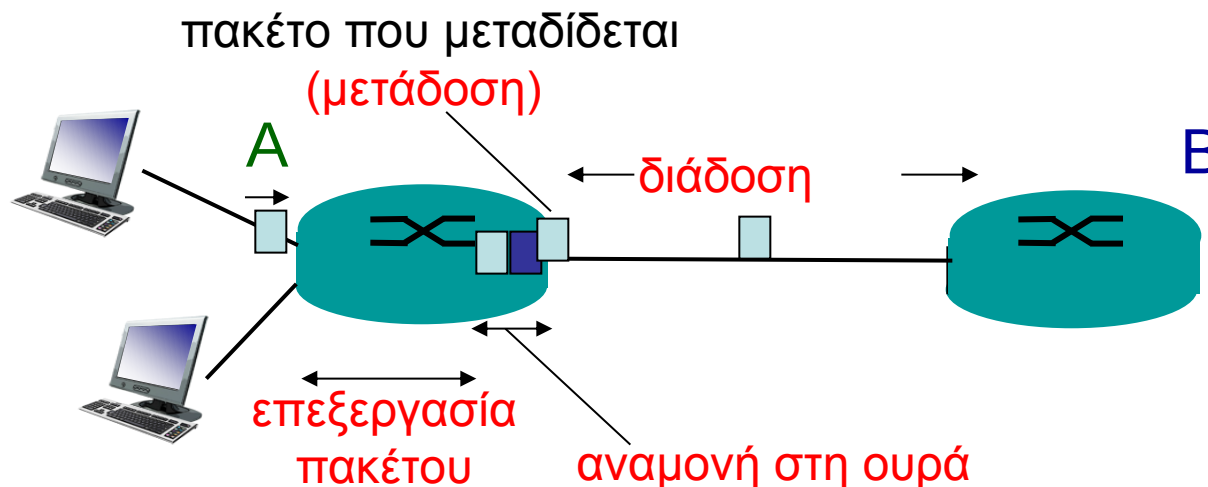


Που οφείλονται οι απώλειες πακέτων

- Στους δρομολογητές τα πακέτα περιμένουν σε ουρές ενταμιευτών (buffers) στους δρομολογητές.
- Αυτό συμβαίνει όταν ο ρυθμός άφιξης των πακέτων υπερβαίνει τη χωρητικότητα της εξερχόμενης ζεύξης.
- Τα πακέτα στις ουρές περιμένουν τη σειρά τους για να μεταδοθούν – καθυστέρηση.
- Αν δεν υπάρχουν οι διαθέσιμες θέσεις στους ενταμιευτές τα πακέτα απορρίπτονται (χάνονται).



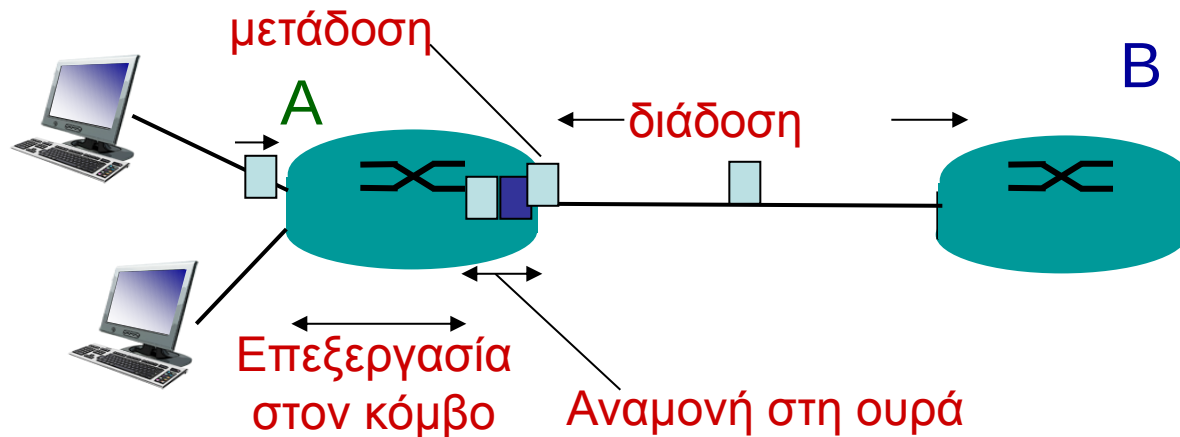
Τέσσερις πηγές καθυστέρησης σ' ένα κόμβο



- Τέσσερις κύριες πηγές καθυστέρησης. Χρόνος για:
 - επεξεργασία (processing) του πακέτου στον κόμβο - d_{proc}
 - αναμονή στη ουρά (queuing) - d_{queue}
 - προώθηση του πακέτου στην εξερχόμενη ζεύξη (μετάδοση, transmission) - d_{trans}
 - διάδοση (propagation) του πακέτου στο φυσικό μέσο μεταφοράς - d_{prop}



Συνολική καθυστέρηση σ' ένα κόμβο



- Η συνολική καθυστέρηση στο κόμβο (d_{nodal}) δίδεται από τον τύπο:

$$d_{\text{nodal}} = d_{\text{proc}} + d_{\text{queue}} + d_{\text{trans}} + d_{\text{prop}}$$

- Η συνεισφορά κάθε συστατικού του τύπου ποικίλει, από αμελητέα έως πολύ σημαντική και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως:
 - Τους ρυθμούς μετάδοσης των ζεύξεων, τις αποστάσεις, τις δυνατότητες των συσκευών κλπ



Καθυστέρηση επεξεργασίας στο κόμβο

- Nodal processing delay (d_{proc})
- Χρόνος που απαιτείται για να εξεταστεί κεφαλίδα του πακέτου και η διεύθυνση του κόμβου-παραλήπτη για να προσδιοριστεί ο επόμενος κόμβος και η εξερχόμενη ζεύξη (καθυστέρηση επεξεργασίας).
- Χρόνος που απαιτείται για τον έλεγχο των σφαλμάτων επιπέδου bit μέσα στο πακέτο.
- Ένας δρομολογητής εξετάζει ένα πακέτο κάθε φορά. Αν τα πακέτα έρχονται πιο γρήγορα απ' ότι μπορεί να εξετάσει ο δρομολογητής τότε οδηγούνται σε ένα ενταμιευτή (ουρά).
- Η καθυστέρηση επεξεργασίας εξαρτάται από τις δυνατότητες της συσκευής.
- Οι καθυστερήσεις επεξεργασίας στους σύγχρονους δρομολογητές είναι της τάξης μsecs (μs , 10^{-6}secs) ή και λιγότερο.
- Μετά τη διαδικασία της επεξεργασίας το πακέτο κατευθύνεται στη ουρά αναμονής της ζεύξης που επιλέχθηκε.



Καθυστέρηση ουράς (Queuing Delay)

- Χρόνος αναμονής στο ενταμιευτή (buffer) της εξερχόμενης ζεύξης (d_{queue}).
- Εξαρτάται από τον αριθμό των πακέτων που βρίσκονται ήδη στη ουρά και περιμένουν να μεταδοθούν (βαθμός συμφόρησης του δρομολογητή).
- Αν δεν προηγείται κάποιο πακέτο, τότε ο χρόνος αναμονής είναι μηδενικός.
- Η μέγιστη καθυστέρηση αναμονής είναι ανάλογη με το μέγεθος του ενταμιευτή.
- Ο αναμενόμενος αριθμός των πακέτων στη ουρά είναι συνάρτηση της έντασης και της φύσης της κίνησης που φτάνει στο δρομολογητή.
- Οι καθυστερήσεις είναι της τάξης microsecs έως millisecs (ms, 10^{-3} secs).

http://media.pearsoncmg.com/aw/aw_kurose_network_2/applets/queuing/queuing.html



Καθυστέρηση μετάδοσης

- Transmission Delay (d_{trans})
- Είναι ο χρόνος που απαιτείται για να ωθήσει ο δρομολογητής το σύνολο των bits του πακέτου στη ζεύξη.
- Καθυστέρηση που προκαλείται από το ρυθμό μετάδοσης της ζεύξης. Θυμηθείτε:
 - είναι ανάλογος του μήκους L του πακέτου (σε bits),
 - αντιστρόφως του ρυθμού μετάδοσης R της ζεύξης (σε bps).
 - ο τύπος είναι: $d_{\text{trans}} = L/R$.
- Δεν εξαρτάται από με την απόσταση μεταξύ των δύο κόμβων (καθυστέρηση διάδοσης).
- Υποθέτουμε ότι η μετάδοση των πακέτων γίνεται με βάση τη σειρά προσέλευσης (first-come-first-served).
- Οι καθυστερήσεις είναι της τάξης microseconds έως millisecs
- Σημαντική καθυστέρηση όταν έχουμε ζεύξεις χαμηλού ρυθμού.



Καθυστέρηση διάδοσης

- Propagation delay (d_{prop})
- Είναι ο χρόνος που απαιτείται για την διάδοση των bits από την αρχή της ζεύξης στον δρομολογητή προέλευσης προς τον δρομολογητή προορισμού.
- Τα bits διαδίδονται με την ταχύτητα s διάδοσης της ζεύξης, η οποία είναι της τάξης $2 \cdot 10^8 m/s$ έως $3 \cdot 10^8 m/s$ ανάλογα με το μέσο μετάδοσης.
- Αν d είναι το μήκος της φυσική ζεύξης, τότε η καθυστέρηση είναι: $d_{prop} = d/s$.
- Όταν και το τελευταίο bit του πακέτου φτάσει στο δρομολογητή προορισμού, αποθηκεύεται όλο το πακέτο και συνεχίζεται η διαδικασία προώθησης στον επόμενο κόμβο.
- Οι καθυστερήσεις είναι της τάξης των millisecs.



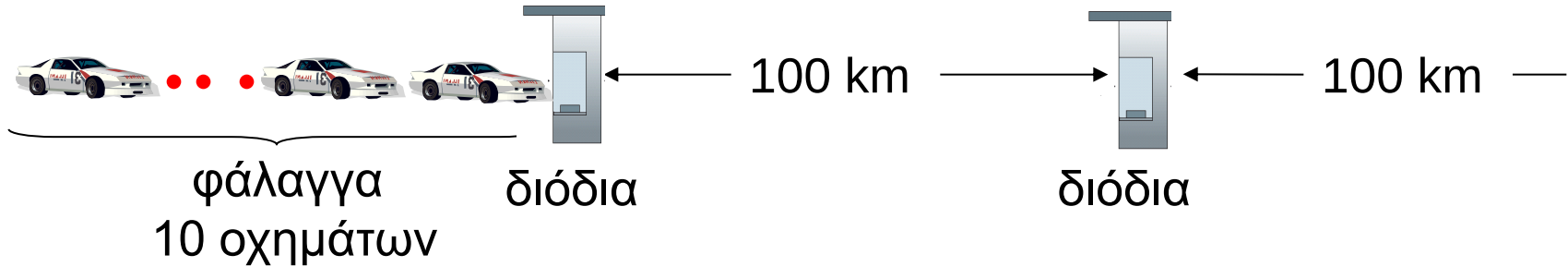
Σύγκριση καθυστερήσεων μετάδοσης και διάδοσης

- Η καθυστέρηση μετάδοσης είναι διαφορετική από αυτή της καθυστέρησης διάδοσης.
- Καθυστέρηση μετάδοσης:
 - ο χρόνος που απαιτείται για την προώθηση του πακέτου,
 - συνάρτηση του μήκους του πακέτου και του ρυθμού μετάδοσης
 - δεν έχει σχέση με την απόσταση.
- Καθυστέρηση διάδοσης:
 - ο χρόνος που απαιτείται για να διαδοθεί ένα bit από τον ένα κόμβο στο άλλο.
 - συνάρτηση της απόστασης και της ταχύτητας του μέσου.
 - δεν έχει σχέση με το μήκος του πακέτου, ούτε το ρυθμό μετάδοσης της ζεύξης.

http://media.pearsoncmg.com/aw/aw_kurose_network_2/applets/transmission/delay.html



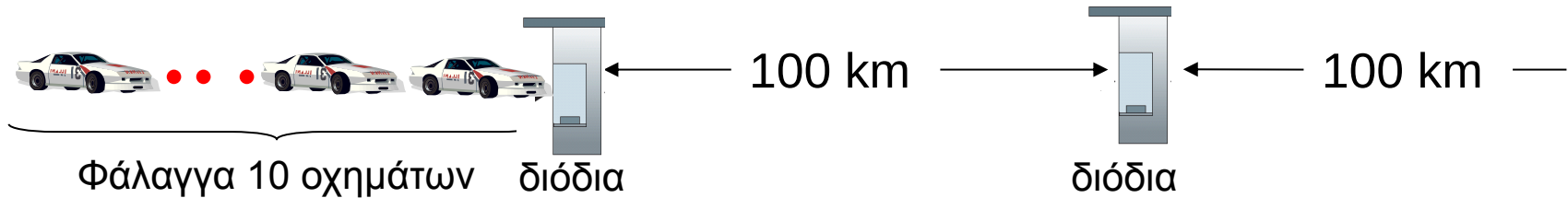
Αναλογία φάλαγγα οχημάτων



- Τα οχήματα οδεύουν (βλ. διαδίδονται) με ταχύτητα 100 km/h
- Χρόνος που απαιτείται στα διόδια για κάθε όχημα: 12sec (χρόνος μετάδοσης ενός bit)
- Όταν το 1^ο αυτοκίνητο φτάσει στα διόδια περιμένει μέχρι να φτάσουν όλα
- Αναλογίες: όχημα $\sim$ bit , φάλαγγα $\sim$ πακέτο
- **Πόσος χρόνος απαιτείται για να φτάσει η φάλαγγα στα 2^α διόδια;**
 - Συνολικός χρόνος διέλευσης όλων των οχημάτων από τα διόδια: 120sec ($12\text{sec} \times 10 = 120 \text{ sec} - 2 \text{ mins}$)
 - Χρόνος διαδρομής από τα πρώτα διόδια στα δεύτερα: 1h ($100\text{km}/100\text{km/h}$)
- **Απάντηση: 62mins**



Αναλογία φάλαγγα οχημάτων (περισσότερα)



- Αν υποθέσουμε ότι:
 - τα οχήματα οδεύουν (διαδίδονται) με ταχύτητα 1000 km/h
 - ο χρόνος που απαιτείται στα διόδια για κάθε όχημα: 1min
- Τότε έχουμε:
 - Συνολικό χρόνο διέλευσης όλων των οχημάτων από τα διόδια: 10min ($1\text{min} \cdot 10 = 10\text{min}$)
 - Χρόνο διαδρομής από τα πρώτα διόδια στα δεύτερα: 6min ($100\text{km} / 1000\text{km/h} = 0.1\text{h} = 6\text{min}$)
- Σε 7 λεπτά το 1^ο αυτοκίνητο θα έχει φτάσει στα δευτέρα διόδια, ενώ στο πρώτο θα περιμένουν ακόμα 3 αυτοκίνητα.
- Δηλαδή, το 1^ο bit μπορεί να έχει φτάσει (διαδοθεί), ενώ δεν θα έχει μεταδοθεί πλήρως το πακέτο...



Ένταση κίνησης

- Ιδιαιτερότητα: η καθυστέρηση ουράς μπορεί να διαφέρει από πακέτο σε πακέτο.
- Πότε η καθυστέρηση ουράς είναι μεγάλη και πότε αμελητέα;
- Εξαρτάται από:
 - Το **ρυθμό μετάδοσης** της ζεύξης
 - Τη **φύση της κίνησης** (π.χ. περιοδικά ή σε ριπές)
- Έστω **a** ο μέσος ρυθμός άφιξης των πακέτων στη ουρά.
- Αν κάθε πακέτο έχει **L bits** τότε ο ρυθμός άφιξης των bits στην ουρά είναι **aL bits/sec**.
- Ο λόγος **La/R** καλείται **ένταση κίνησης (traffic intensity)**
 - R : ρυθμός μετάδοσης R της ζεύξης
- Η ένταση κίνησης παίζει σημαντικό ρόλο στη εκτίμηση της καθυστέρησης ουράς (μικρή ή μεγάλη).



Ένταση κίνησης και χρόνος αναμονής στη ουρά

- $La/R > 1$: η ουρά αυξάνεται χωρίς όριο (φτάνουν περισσότερα πακέτα απ' όσα μπορούν να εξυπηρετηθούν). Τείνει στο άπειρο. Πρέπει να αποφεύγεται.
- $La/R \leq 1$: παίζει ρόλο η φύση της αφικνούμενης κίνησης.
- $La/R \sim 0$: η μέση καθυστέρηση αναμονής είναι αμελητέα.

$La/R \sim 0$



$La/R > 1$



Τι γίνεται όταν ένταση κίνησης ≤ 1 ($La/R \leq 1$)

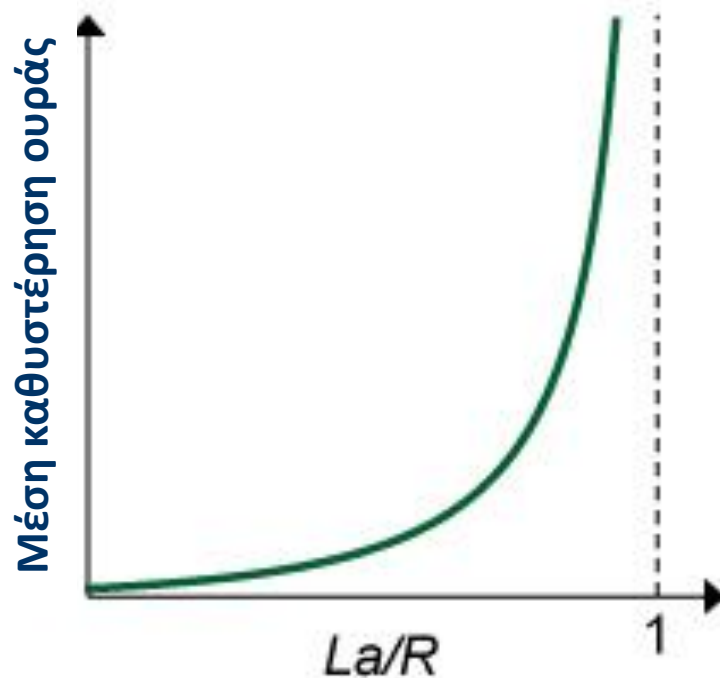
- Αν τα πακέτα φτάνουν κάθε L/R secs δεν υπάρχει ουρά και κάθε πακέτο μεταδίδεται άμεσα.
- Αν τα πακέτα φτάνουν σε ριπές (bursts) αλλά περιοδικά, θα έχουμε σημαντική μέση καθυστέρηση ουράς.
- Παράδειγμα: Έστω ότι N πακέτα φτάνουν ταυτόχρονα κάθε $(L/R)/N$ secs
 - Τότε το 1^ο πακέτο δεν έχει καθυστέρηση ουράς
 - Το 2^ο θα μεταδοθεί μετά από L/R secs
 - Το 3^ο μετά από $2L/R$ secs
 - Και N -οστό μετά από $(N-1)L/R$.
- Η μέση καθυστέρηση ουράς για N πακέτα υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} Ave_d_{queue} &= [0 + L/R + 2L/R + \dots + (N-1)L/R]/N \\ &= L/NR[1 + 2 + \dots + (N-1)] \\ &= (L/NR) (N-1) N/2 \\ &= (N-1)L/2R \end{aligned}$$



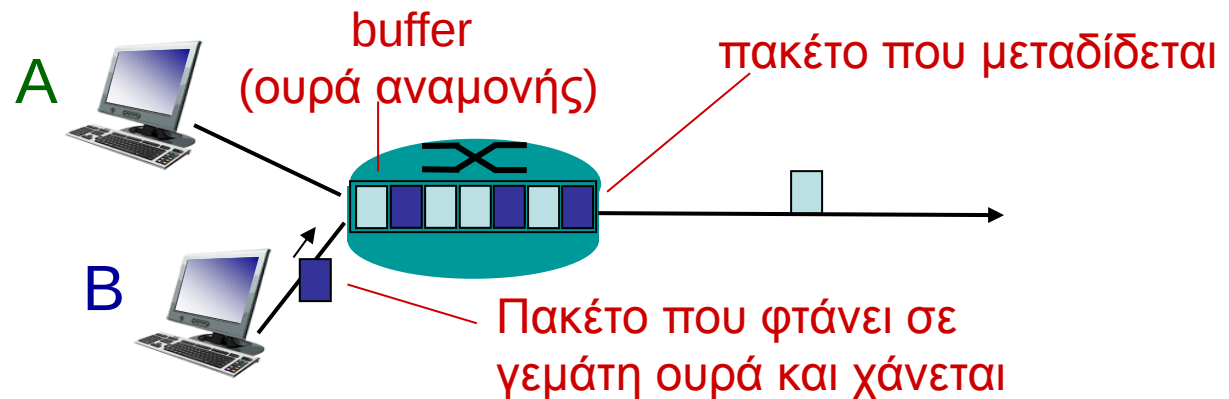
Εξάρτηση έντασης κίνησης & μέσης καθυστέρηση ουράς

- Στη πραγματικότητα ο ρυθμός άφιξης των πακέτων είναι τυχαίος και η ένταση κίνησης δεν επαρκεί για τον χαρακτηρισμό της καθυστέρησης.
- Το διπλανό γράφημα απεικονίζει τη ποιοτική εξάρτηση της μέσης καθυστέρησης ουράς από την ένταση κίνησης.
- Σημαντικό χαρακτηριστικό: καθώς η ένταση προσεγγίζει το 1, η μέση καθυστέρηση ουράς αυξάνεται πολύ γρήγορα.



Απώλειες πακέτων

- Στην πραγματικότητα οι ενταμιευτές (buffers) έχουν περιορισμένη μνήμη και συνεπώς οι ουρές έχουν πεπερασμένη χωρητικότητα.
- Όταν ένα πακέτο φτάσει σε μια γεμάτη ουρά, τότε αυτό απορρίπτεται (packet loss –χάνεται) - **Υπερχείλιση**.
- Ανάλογα με τη πολιτική που εφαρμόζεται ένα χαμένο πακέτο μπορεί να μεταδοθεί ξανά, είτε από το προηγούμενο στη σειρά κόμβο, είτε από τον κόμβο αποστολής ή να αγνοηθεί.
- Η απόδοση ενός κόμβου εξαρτάται από τη πιθανότητα απώλειας πακέτων.



Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο

- Στη πραγματικότητα μεταξύ ενός κόμβου αποστολέα και ενός κόμβου παραλήπτη μεσολαβούν διάφοροι ενδιάμεσοι δρομολογητές και όχι ένας μόνο.
- Αν έχουμε $N-1$ δρομολογητές μεταξύ αποστολέα-παραλήπτη τότε θα υπάρχουν N ζεύξεις. Αν υποθέσουμε ότι οι ενδιάμεσες ζεύξεις έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, οι ενδιάμεσοι δρομολογητές παρουσιάζουν τις ίδιες καθυστερήσεις και ότι δεν υπάρχουν συμφορήσεις, τότε η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, δίδεται από τον τύπο:

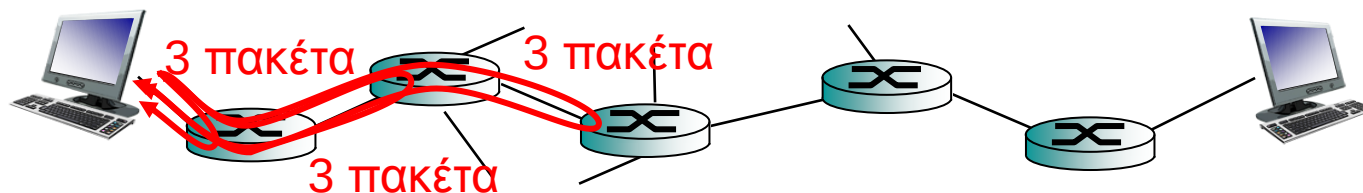
$$D_{\text{end-end}} = N (d_{\text{proc}} + d_{\text{trans}} + d_{\text{prop}})$$

- Όμως, στα υφιστάμενα δίκτυα έχουμε ετερογενείς καθυστερήσεις στους κόμβους και οι καθυστερήσεις ουράς είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστούν.



Μετρήσεις καθυστέρησης στο Διαδίκτυο

- Πως μπορούμε να δούμε έμπρακτα τις καθυστερήσεις στο διαδίκτυο;
- Το λογισμικό **traceroute** μας δίνει τη δυνατότητα να δούμε τις μετρήσεις καθυστέρησης από τον κόμβο αποστολής προς κάθε ενδιάμεσο δρομολογητή μιας διαδρομής προς τον κόμβο προορισμού.
 - Για κάθε ενδιάμεσο δρομολογητή i , το traceroute:
 - Στέλνει 3 ειδικά πακέτα που θα φτάσουν στον ενδιάμεσο δρομολογητή στη διαδρομή προς τον αποδέκτη.
 - Ο ενδιάμεσος δρομολογητής i θα επιστρέψει τα πακέτα στο αποστολέα.
 - Ο αποστολέας (traceroute) μετρά τα χρονικά διαστήματα από την μετάδοση μέχρι την παραλαβή.



Παράδειγμα μετρήσεων με το traceroute

■ traceroute: gaia.cs.umass.edu to www.eurecom.fr

3 μετρήσεις καθυστέρησης από
gaia.cs.umass.edu προς cs-gw.cs.umass.edu

```
1 cs-gw (128.119.240.254) 1 ms 1 ms 2 ms
2 border1-rt-fa5-1-0.gw.umass.edu (128.119.3.145) 1 ms 1 ms 2 ms
3 cht-vbns.gw.umass.edu (128.119.3.130) 6 ms 5 ms 5 ms
4 jn1-at1-0-0-19.wor.vbns.net (204.147.132.129) 16 ms 11 ms 13 ms
5 jn1-so7-0-0-0.wae.vbns.net (204.147.136.136) 21 ms 18 ms 18 ms
6 abilene-vbns.abilene.ucaid.edu (198.32.11.9) 22 ms 18 ms 22 ms
7 nycm-wash.abilene.ucaid.edu (198.32.8.46) 22 ms 22 ms 22 ms
8 62.40.103.253 (62.40.103.253) 104 ms 109 ms 106 ms
9 de2-1.de1.de.geant.net (62.40.96.129) 109 ms 102 ms 104 ms
10 de.fr1.fr.geant.net (62.40.96.50) 113 ms 121 ms 114 ms
11 renater-gw.fr1.fr.geant.net (62.40.103.54) 112 ms 114 ms 112 ms
12 nio-n2.cssi.renater.fr (193.51.206.13) 111 ms 114 ms 116 ms
13 nice.cssi.renater.fr (195.220.98.102) 123 ms 125 ms 124 ms
14 r3t2-nice.cssi.renater.fr (195.220.98.110) 126 ms 126 ms 124 ms
15 eurecom-valbonne.r3t2.ft.net (193.48.50.54) 135 ms 128 ms 133 ms
16 194.214.211.25 (194.214.211.25) 126 ms 128 ms 126 ms
17 * * *
18 * * *
19 fantasia.eurecom.fr (193.55.113.142) 132 ms 128 ms 136 ms
```

υπερατλαντική
ζεύξη

* Δεν υπήρξε απάντηση (χαμένα πακέτα, μη απόκριση δρομολογητή)



Δοκιμή στο www.traceroute.org

- Traceroute από το Μετσόβιο Πολυτεχνείο στο gaia.cs.umass.edu

traceroute gaia.cs.umass.edu

traceroute to gaia.cs.umass.edu (128.119.245.12), 15 hops max, 52 byte packets

```
1  warp-srv.noc.ntua.gr (147.102.222.200) 0.573 ms * 0.330 ms
2  ntua-zogr-2-gw.kolettir.access-link.grnet.gr (62.217.96.176) 0.403 ms 0.405 ms 0.431 ms
3  eier-to-kolr-2.backbone.grnet.gr (62.217.100.67) 0.519 ms 0.551 ms 0.495 ms
4  grnet.mx2.ath.gr.geant.net (62.40.124.89) 0.536 ms 0.538 ms 0.571 ms
5  ae1.mx1.ath.gr.geant.net (62.40.112.215) 0.592 ms 0.578 ms 0.567 ms
6  ae2.mx1.mil2.it.geant.net (62.40.98.150) 33.338 ms 31.129 ms 33.331 ms
7  ae6.mx1.gen.ch.geant.net (62.40.98.112) 43.442 ms 45.676 ms 45.659 ms
8  ae1.mx1.fra.de.geant.net (62.40.98.109) 51.791 ms 51.800 ms 49.652 ms
9  ae1.mx1.ams.nl.geant.net (62.40.98.129) 56.307 ms 56.295 ms 58.546 ms
10 xe-0-3-0.102.rtr.newy32aoa.net.internet2.edu (198.71.45.236) 133.077 ms 145.315 ms
    130.771 ms
11 nox300gw1-vl-110-nox-i2.nox.org (192.5.89.221) 136.203 ms 136.157 ms 150.574 ms
12 nox300gw1-peer-nox-umass-192-5-89-102.nox.org (192.5.89.102) 140.096 ms 150.318
    ms 140.114 ms
13 core1-rt-xe-0-0-0.gw.umass.edu (192.80.83.101) 152.573 ms 162.607 ms 150.371 ms
14 lgrc-rt-106-8-po-10.gw.umass.edu (128.119.0.233) 138.081 ms 137.879 ms 140.288 ms
15 128.119.3.32 (128.119.3.32) 150.311 ms 137.976 ms 140.325 ms
```



Άλλες καθυστερήσεις

- Τερματικών συστημάτων
 - Χαρακτηριστικά, απόδοση, τρόπος σύνδεσης.
- Εφαρμογών
 - Προαπαιτούμενες ενέργειες, ταχύτητα επεξεργασίας και άντλησης/καταγραφής δεδομένων.
- Παραδείγματα:
 - Καθυστέρηση για μετάδοση του πακέτου σε διαμοιραζόμενο μέσο.
 - Καθυστέρηση πακετοποίησης σε εφαρμογές διαδικτυακής τηλεφωνίας (κωδικοποίηση).
 - Συμπίεση δεδομένων.
 - Κρυπτογράφηση.
 - Αναζήτηση σε βάσεις δεδομένων.
 - κλπ



Διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput)

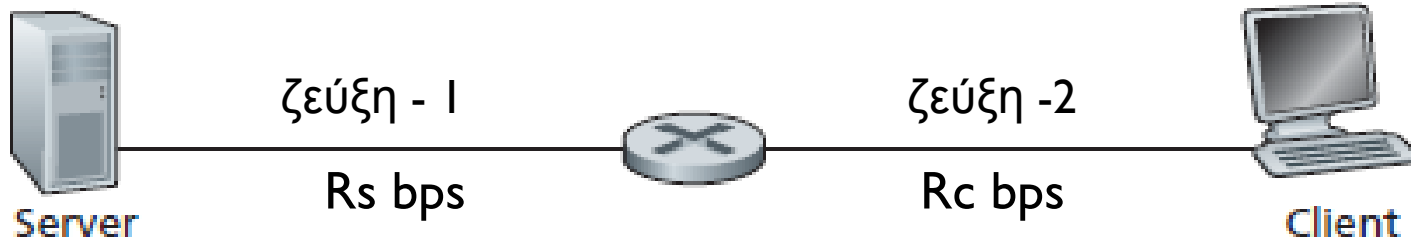
- Διεκπεραιωτική ικανότητα –ρυθμαπόδοση, throughput:
ο ρυθμός (bits/secs) στον οποίο τα bits μεταφέρονται μεταξύ αποστολέα-παραλήπτη
- Πρόκειται για ένα κρίσιμο κριτήριο-μέτρο απόδοσης στα δίκτυα υπολογιστών.
- **Στιγμιαία** (instantaneous throughput):
Ο ρυθμός (bits/sec) σε ένα συγκεκριμένο σημείο στο χρόνο
- **Μέση** (average throughput):
Ο ρυθμός σε μια μεγάλη περίοδο χρόνου
- Για ορισμένες εφαρμογές είναι επιθυμητό να έχουμε μικρή καθυστέρηση και στιγμιαία ρυθμαπόδοση > συγκεκριμένη τιμή.
- Για άλλες η καθυστέρηση δεν είναι κρίσιμη. Απλά είναι καλό να έχουμε την υψηλότερη δυνατή διεκπεραιωτική ικανότητα.



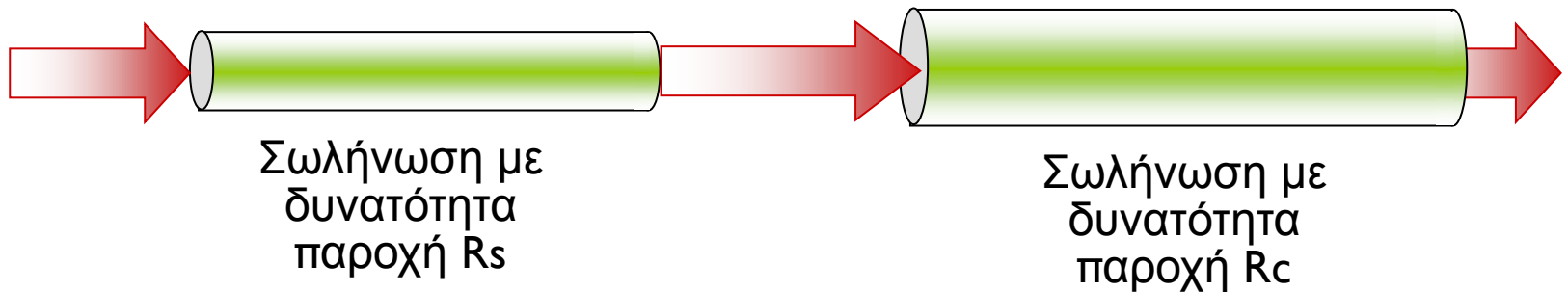
Διεκπεραιωτική ικανότητα από άκρο σε άκρο

Ο server στέλνει R_s bps

Ο client λαμβάνει R_c bps

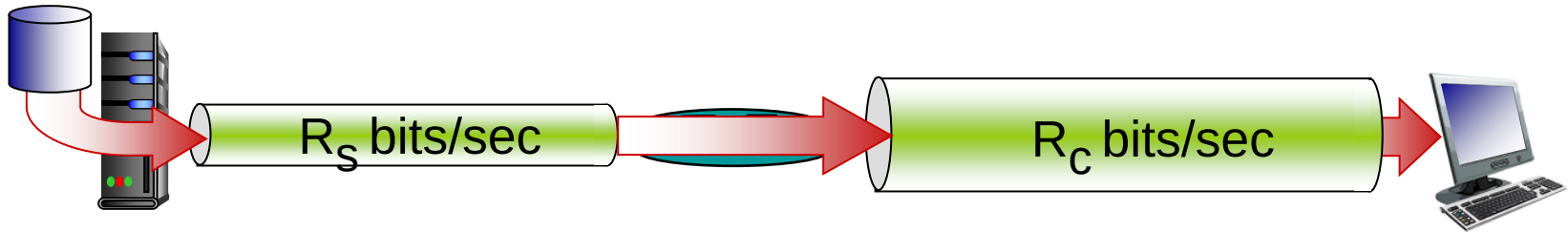


- R_s, R_c : οι ταχύτητες των ζεύξεων 1 και 2.
- Ποια είναι η μέση διεκπεραιωτική ικανότητα από άκρο σε άκρο;
- Αναλογία με σωληνώσεις (ζεύξεις) και ρευστό (ροή bits):

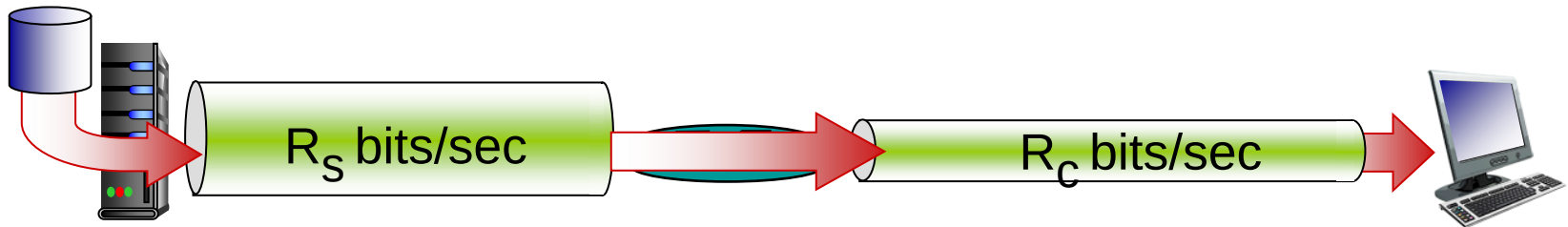


Ζεύξη συμφόρησης (bottleneck link)

- Αν $R_s < R_c$: τότε η διεκπεραιωτική ικανότητα είναι R_s



- Αν $R_c < R_s$: τότε η διεκπεραιωτική ικανότητα είναι R_c



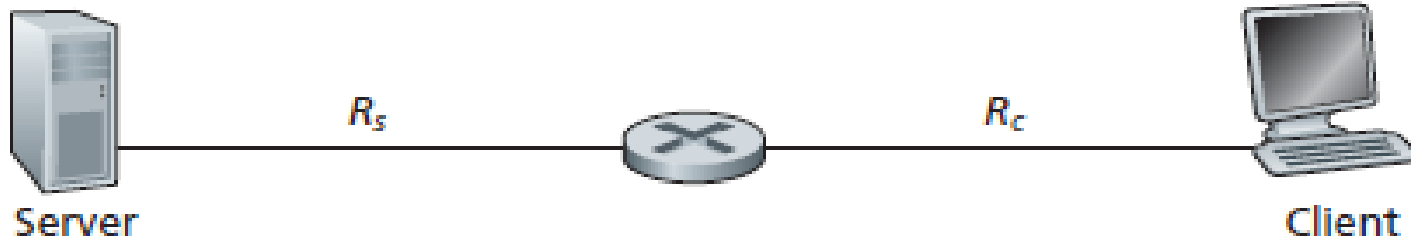
- Δηλαδή, η διεκπεραιωτική ικανότητα είναι $\min\{R_s, R_c\}$

Ζεύξη συμφόρησης

Η ζεύξη σε ένα από άκρο-σε-άκρο μονοπάτι, η οποία περιορίζει την από άκρο-σε-άκρο διεκπεραιωτική ικανότητα.

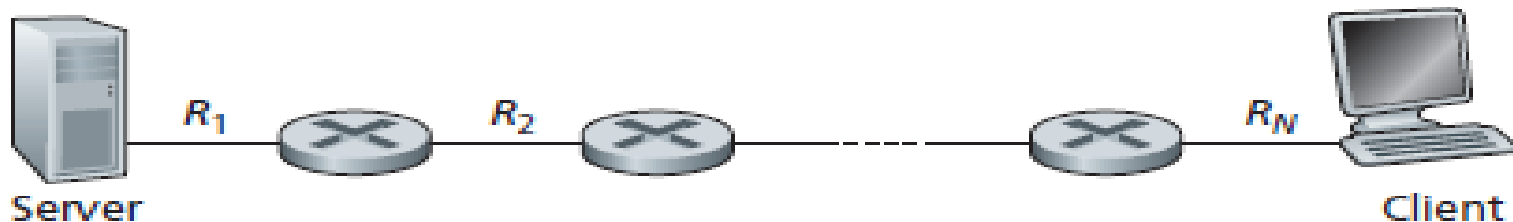


Άσκηση με ζεύξη συμφόρησης



- Αν $R_s=2\text{Mbps}$ και $R_c=1\text{Mbps}$ πόσος χρόνος απαιτείται για να «κατεβάσει» ο πελάτης ένα αρχείο 4MByte από τον εξυπηρετητή;
- Η ζεύξη συμφόρησης είναι η R_c με 1Mbps ($\min\{R_s, R_c\}$)
- Ο χρόνος που απαιτείται είναι (1 Byte = 8bits):

$$T = 4\text{MByte} / 1\text{Mbps} = 32\text{Mbit} / 1\text{Mbps} = \mathbf{32\text{secs}}$$

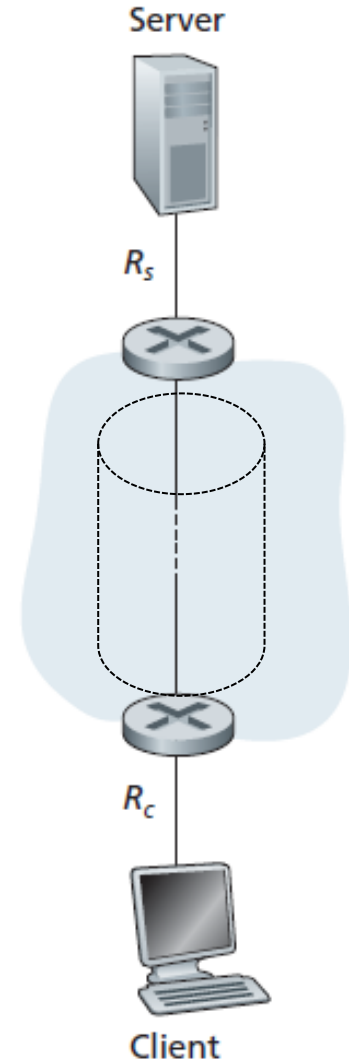


- Γενικά, η διεκπεραιωτική ικανότητα είναι ο ρυθμός της ζεύξης συμφόρησης που είναι $\min\{R_1, R_2, R_3, \dots, R_N\}$



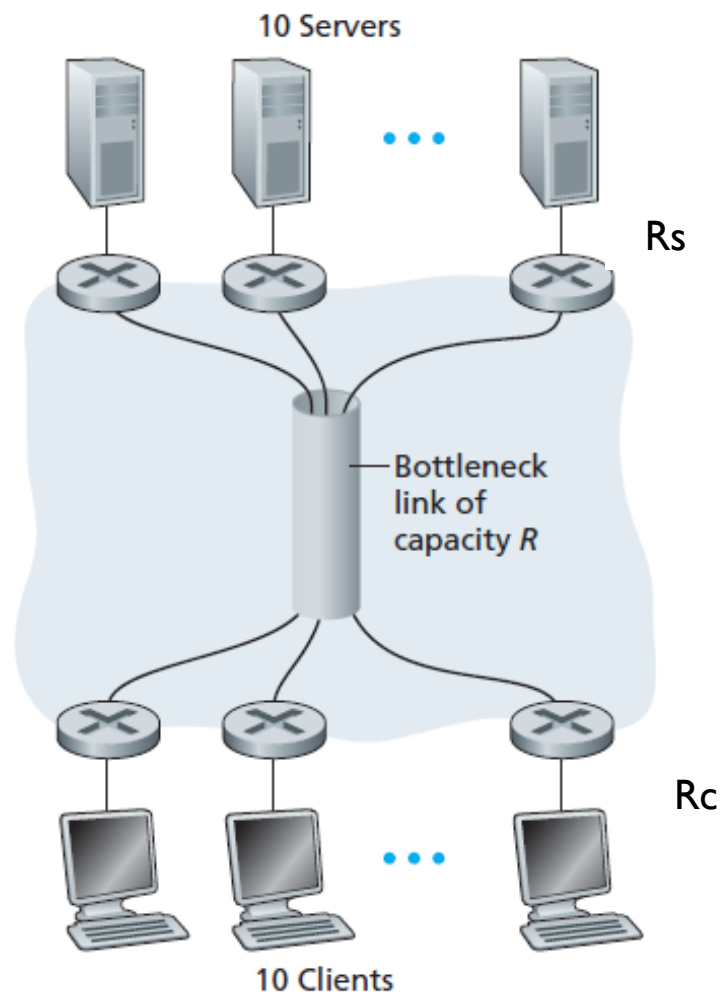
Διεκπεραιωτική ικανότητα: τι γίνεται στο διαδίκτυο;

- Σήμερα οι ζεύξεις του πυρήνα του διαδικτύου έχουν πολύ ψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (over-provisioned).
- Στο σχήμα, υποθέτουμε ότι τα μόνα bits που στέλνονται στο διαδίκτυο είναι αυτά από το server στον client.
- Ο πυρήνας μοιάζει σαν ένα τεράστιο σωλήνα.
- Η διεκπεραιωτική ικανότητα είναι πάλι $\min\{R_s, R_c\}$.
- Περιοριστικός παράγοντας (συμφόρηση): συνήθως τα δίκτυα προσπέλασης.



Διεκπεραιωτική ικανότητα στο διαδίκτυο: σενάριο-2

- 10 servers που στέλνουν με την ίδια ταχύτητα R_s .
- 10 clients που λαμβάνουν με την ίδια ταχύτητα R_c .
- 10 ταυτόχρονα «κατεβάσματα» (downloads).
- R : ο ρυθμός της διαμοιραζόμενης ζεύξης στον πυρήνα.
- Ποια είναι η διεκπεραιωτική ικανότητα κάθε σύνδεσης;
- Απάντηση: $\min(R_s, R_c, R/10)$
- Και πάλι στη πράξη συχνά η συμφόρηση οφείλεται στο R_c ή R_s .



10 συνδέσεις που «δίκαια» μοιράζονται τη ζεύξη συμφόρησης που έχει ρυθμό R

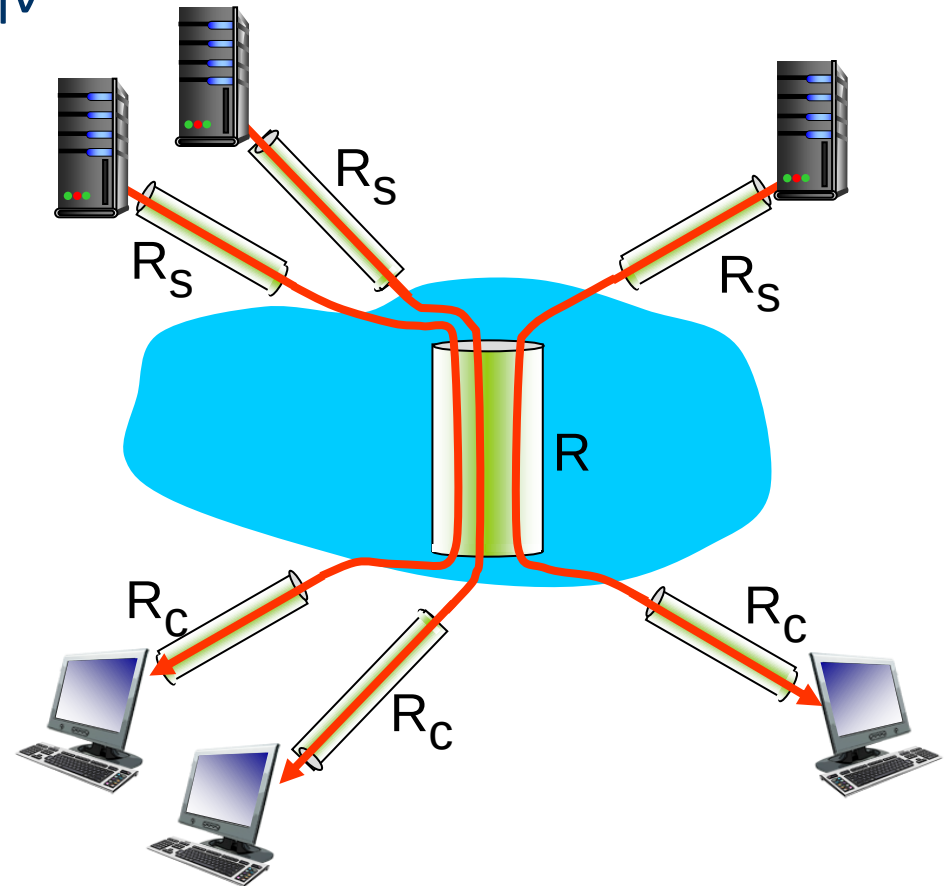


Διεκπεραιωτική ικανότητα: παράδειγμα

- 10 servers που στέλνουν με την ίδια ταχύτητα $R_s=2\text{Mbps}$
- 10 clients που λαμβάνουν με την ίδια ταχύτητα $R_c=1\text{Mbps}$
- 10 ταυτόχρονα «κατεβάσματα»
- $R=5\text{ Mbps}$: ο ρυθμός της διαμοιραζόμενης ζεύξης
- Ποια είναι η ζεύξη συμφόρησης;
- Απάντηση:

η διαμοιραζόμενη ζεύξη.

$$(5\text{Mbps} / 10 = 500\text{kbps})$$

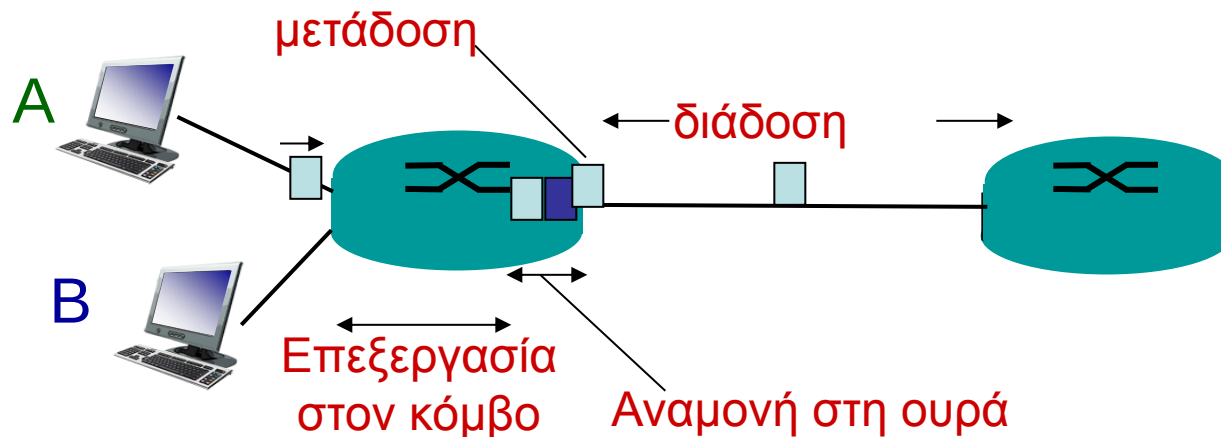


Διεκαπεραιωτική ικανότητα: συμπεράσματα

- Ο ρυθμός (bits/secs) στον οποίο τα bits μεταφέρονται μεταξύ αποστολέα-παραλήπτη.
- Εξαρτάται από τους ρυθμούς των ζεύξεων όπου «ρέουν» τα δεδομένα.
- Εξαρτάται και από την παρεμβαλλόμενη κίνηση (σενάριο 2).
- Αν δεν υπάρχει άλλη κίνηση υπολογίζεται κατά προσέγγιση ως ο ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης στη διαδρομή από την προέλευση στο προορισμό.
- Η ζεύξη που φέρει αυτό τον ελάχιστο ρυθμό ονομάζεται *ζεύξη συμφόρησης*.
- Οι ζεύξεις συμφόρησης συνήθως βρίσκονται στα δίκτυα προσπέλασης.



Πηγές καθυστέρησης: επεξεργασία, αναμονή στη ουρά

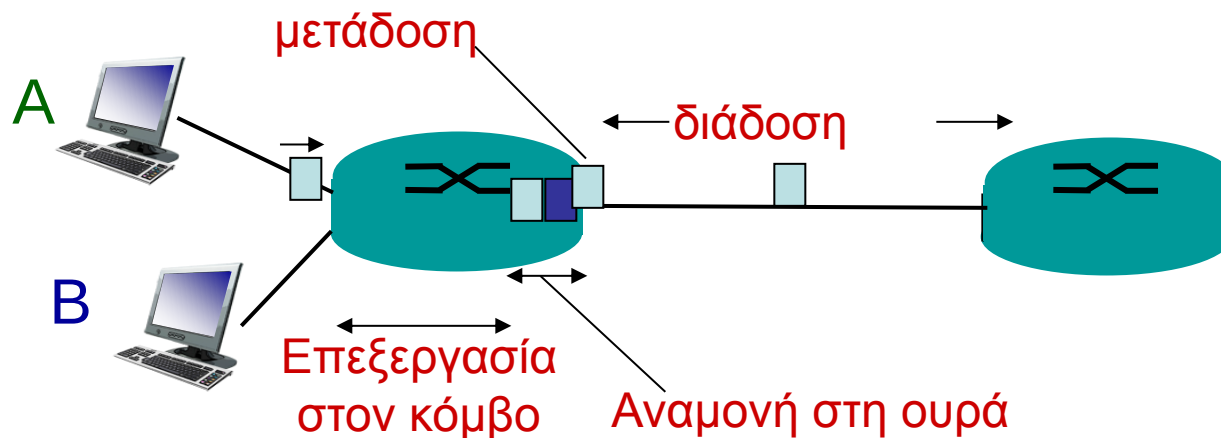


$$d_{\text{nodal}} = d_{\text{proc}} + d_{\text{queue}} + d_{\text{trans}} + d_{\text{prop}}$$

- **Επεξεργασία στον κόμβο (d_{proc})**
 - Προσδιορισμός εξερχόμενης ζεύξης
 - Έλεγχος σφαλμάτων bits
 - Καθυστέρηση περίπου λίγα microseconds ή λιγότερο
- **Αναμονή στην ουρά (d_{queue})**
 - Χρόνος αναμονής στη εξερχόμενη ζεύξη
 - Εξαρτάται από το βαθμό συμφόρησης του δρομολογητή.



Πηγές καθυστέρησης: μετάδοσης, διάδοσης



$$d_{\text{nodal}} = d_{\text{proc}} + d_{\text{queue}} + d_{\text{trans}} + d_{\text{prop}}$$

- Καθυστέρηση μετάδοσης(d_{trans})
 - L: μήκος πακέτου (bits)
 - R: ρυθμός μετάδοσης ζεύξης (bps)
 - $d_{\text{trans}} = L/R$
 - Καθυστέρηση διάδοσης(d_{prop})
 - d: μήκος φυσική ζεύξης
 - s = ταχύτητα διάδοσης μέσου ($\sim 2 \times 10^8$ m/sec)
 - $d_{\text{prop}} = d/s$
- Είναι διαφορετικές

