

Το επίπεδο δικτύου

Δίκτυα Επικοινωνιών

3 Ιουνίου 2011

1/36

Λειτουργίες του επιπέδου δικτύου

Σχεδιαστικές απόψεις

Εικονικά κυκλώματα ή δεδομενογράμματα;

Αλγόριθμοι δρομολόγησης

Ιδιότητες των αλγορίθμων δρομολόγησης

Μερικοί δημοφιλείς αλγόριθμοι δρομολόγησης

Δρομολόγηση με ειδικές απαιτήσεις

Ιδιότητες των αλγορίθμων δρομολόγησης

2/36

Προδιαγραφές για το επίπεδο δικτύου

- ▶ Οι υπηρεσίες πρέπει να είναι ανεξάρτητες από την τεχνολογία του υποδικτύου.
- ▶ Το στρώμα μεταφοράς πρέπει να μην είναι υποχρεωμένο να ασχοληθεί με τον αριθμό, τον τύπο ή την τοπολογία των υπαρχόντων υποδικτύων.
- ▶ Οι δικτυακές διευθύνσεις που βλέπει το στρώμα μεταφοράς πρέπει να χρησιμοποιούν ομοιόμορφο σχέδιο αριθμοδότησης, ακόμη κι όταν περνάμε τα σύνορα από τοπικά σε ευρείας κλίμακας δίκτυα.

3/36

Σχεδιαστικές απόψεις για το επίπεδο δικτύου

1. Το επίπεδο δικτύου πρέπει απλώς να διακινεί τα πακέτα με αποδοτικό τρόπο (άποψη της κοινότητας Internet).
2. Το επίπεδο δικτύου πρέπει να παρέχει μια υπηρεσία διακίνησης πακέτων που θα είναι αξιόπιστη και θα εγγυάται την ποιότητα της «σύνδεσης» (άποψη της τηλεφωνικής κοινότητας).

Σήμερα εξελίσσεται το Internet ενισχυόμενο με ιδιότητες της δεύτερης αντίληψης.

4/36

Η άποψη για ένα λιτό επίπεδο δικτύου

- ▶ Το υποδίκτυο πρέπει απλώς να διακινεί τα bits.
- ▶ Το υποδίκτυο είναι ούτως ή άλλως αναξιόπιστο, οπότε οι ακραίοι κόμβοι (hosts) θα (ξανα-)κάνουν έλεγχο σφαλμάτων.
- ▶ Οι κόμβοι του υποδικτύου δεν χρειάζεται να κάνουν έλεγχο ροής, ακολουθίας πακέτων κ.λπ. αφού ούτως ή άλλως θα (ξανα-)γίνει στα άκρα.
- ▶ Αναγκαστικά τα πακέτα θα φέρουν ολόκληρη τη διεύθυνση του προορισμού.

Το υπόδειγμα αυτής της αντίληψης είναι το Internet.

5/36

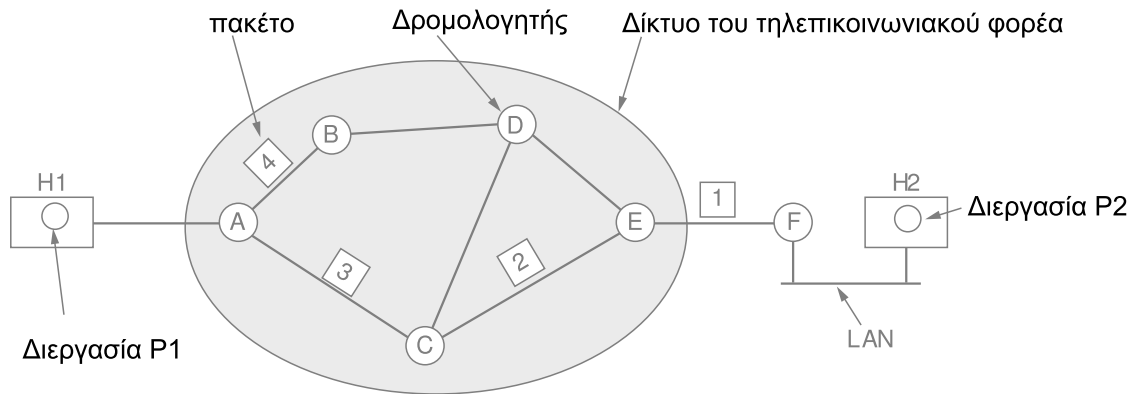
Η άποψη για ένα επίπεδο δικτύου που παρέχει υπηρεσίες σύνδεσης

- ▶ Το υποδίκτυο πρέπει να κάνει ό,τι μπορεί για να δώσει μια αξιόπιστη υπηρεσία μεταφοράς πακέτων στη λογική της σύνδεσης.
- ▶ Το επίπεδο δικτύου θα δημιουργεί κάθε φορά μια σύνδεση ανάμεσα στα δύο άκρα με συγκεκριμένη ταυτότητα, που θα χρησιμοποιείται στα πακέτα της.
- ▶ Κατά την φάση δημιουργίας της σύνδεσης θα γίνεται διαπραγμάτευση ποιότητας και κόστους.
- ▶ Η επικοινωνία είναι αμφίδρομη και τα πακέτα θα παραδίδονται με τη σειρά αποστολής τους.
- ▶ Προκειμένου να αποφεύγεται η συμφόρηση, θα γίνεται έλεγχος ροής.

Το υπόδειγμα αυτής της αντίληψης είναι ο *Ασύγχρονος Τρόπος Μεταφοράς* (asynchronous transfer mode, ATM).

6/36

Δρομολόγηση με δεδομενογράμματα (datagrams)



Πίνακας του A αρχικά αργότερα

A	-	A	-
B	B	B	B
C	C	C	C
D	B	D	B
E	C	E	B
F	C	F	B

προορισμός επόμενος κόμβος

Πίνακας του C

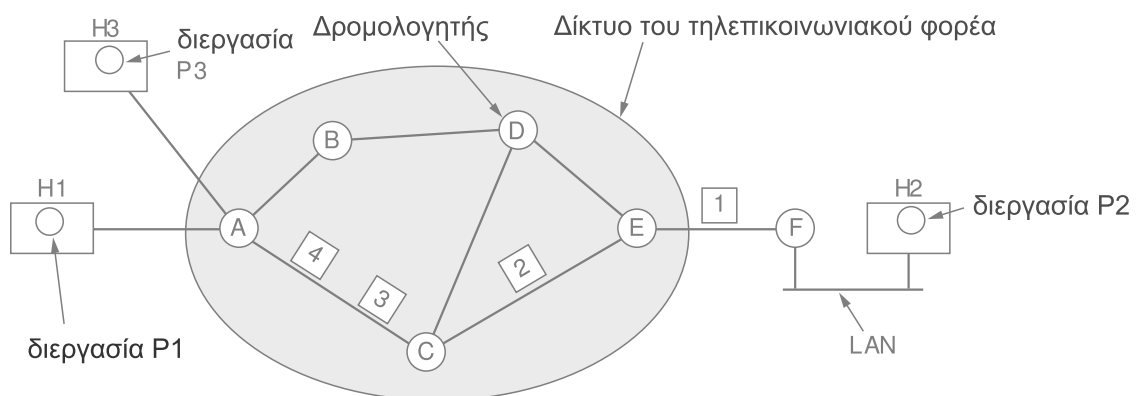
A	A
B	A
C	-
D	D
E	E
F	E

Πίνακας του D

A	C
B	D
C	C
D	D
E	-
F	F

7/36

Δρομολόγηση με εικονικά κυκλώματα



Πίνακας του A

H1	1	C	1
H3	1	C	2

είσοδος έξοδος

Πίνακας του C

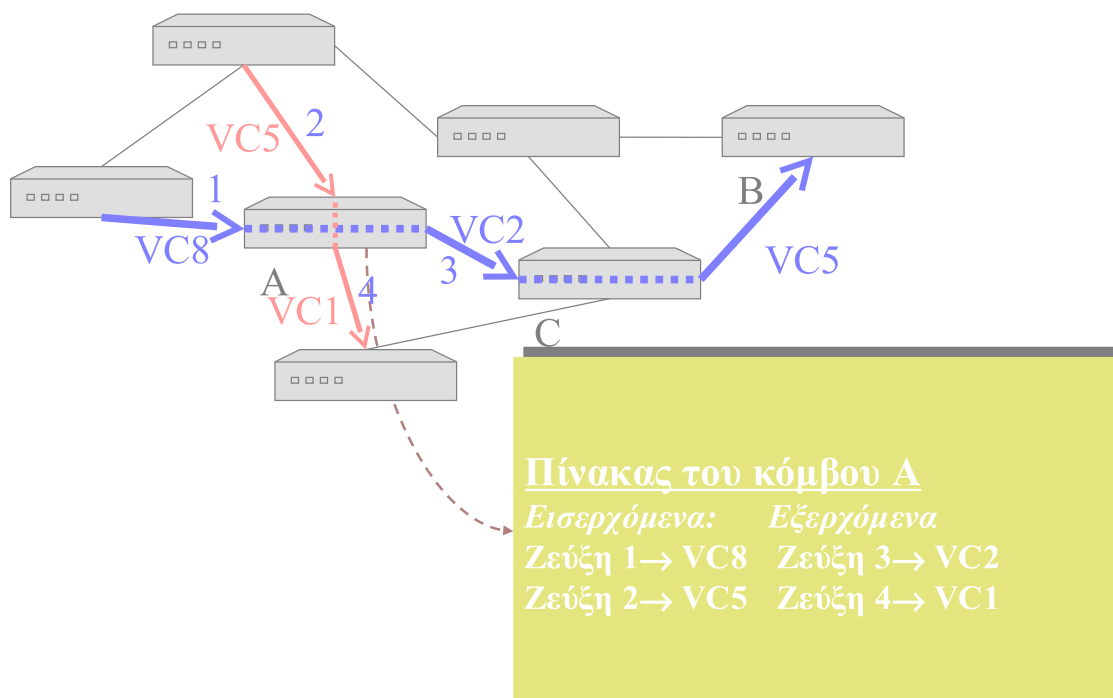
A	1	E	1
A	2	E	2

Πίνακας του E

C	1	F	1
C	2	F	2

8/36

Εναλλαγή στην επιγραφή του εικονικού κυκλώματος (label switching)



Σύγκριση

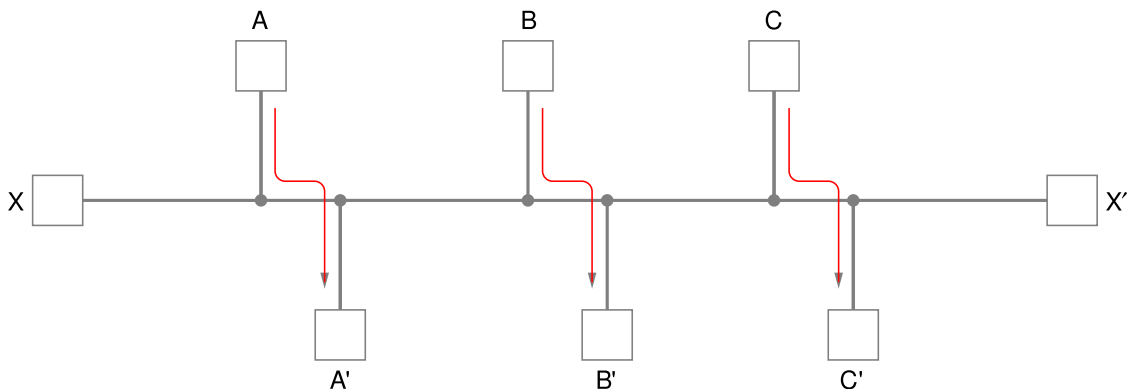
Ζήτημα	δεδομενογράμματα	εικονικά κυκλώματα
αποκατάσταση κυκλώματος	-	χρειάζεται
διευθυνσιοδότηση	διεύθυνση προορισμ. ανά πακέτο	αριθμός VC ανά πακέτο
πληροφορία κατάστασης	όχι	για κάθε VC στον πίνακα δρομ.
δρομολόγηση	ανεξάρτητη ανά πακέτο	επιλέγεται διαδρομή ανά VC
συνέπειες της βλάβης δρομολογητή	μερικά χαμένα πακέτα	τερματισμός των διερχομένων VC
ποιότητα υπηρεσίας	δύσκολη	προϋποθέτει πόρους
έλεγχος συμφόρησης	δύσκολος	προϋποθέτει πόρους και μηχανισμούς

Ταξινόμηση των αλγορίθμων δρομολόγησης



11/36

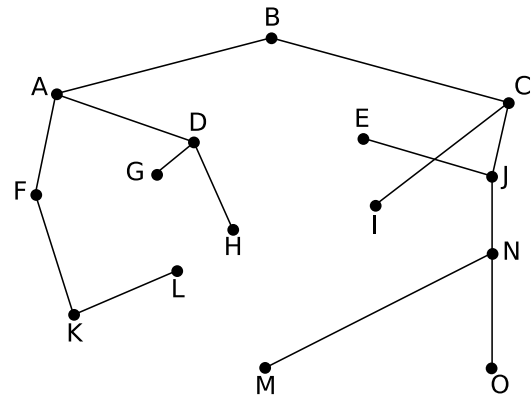
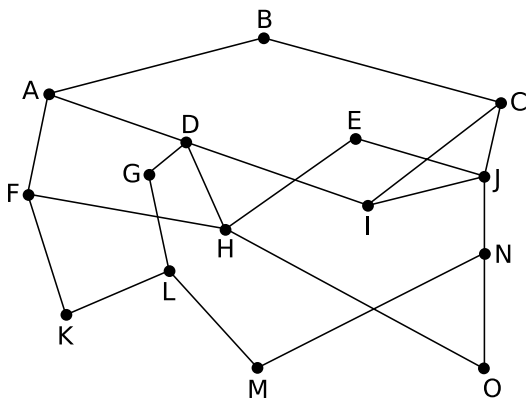
Μπορεί η δρομολόγηση να είναι συγχρόνως δίκαιη και βέλτιστη;



12/36

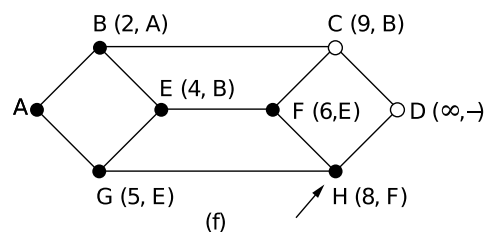
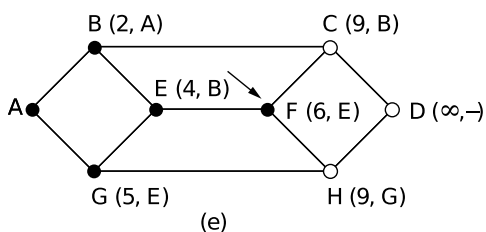
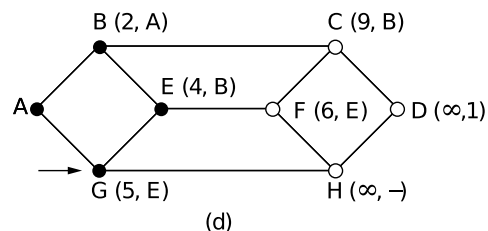
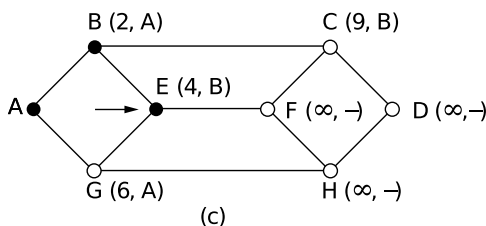
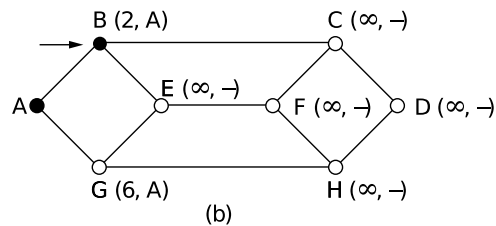
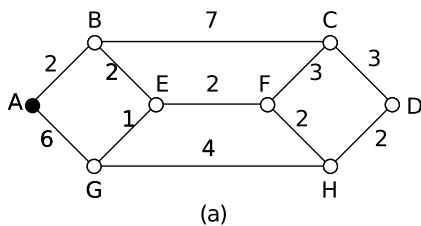
Η βέλτιστη διαδρομή

- ▶ Λήμμα: Αν ο κόμβος J βρίσκεται πάνω στη βέλτιστη διαδρομή από τον κόμβο I στον κόμβο K , η βέλτιστη διαδρομή από τον J στον K είναι μέρος της προηγούμενης διαδρομής.
- ▶ Συμπέρασμα: Οι βέλτιστες διαδρομές ανάμεσα σε ένα κόμβο και σε κάθε άλλο κόμβο σχηματίζουν ένα δέντρο με ρίζα τον πρώτο κόμβο.



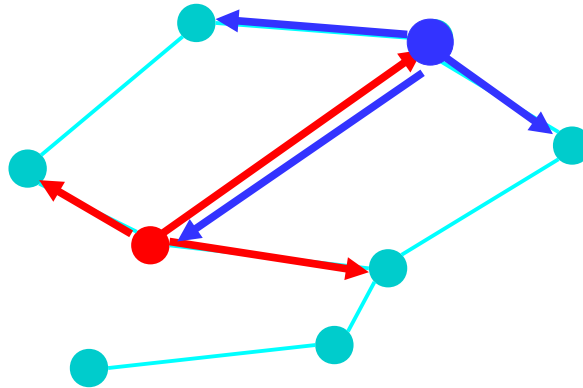
13/36

Η ελάχιστη διαδρομή με τον αλγόριθμο του Dijkstra



14/36

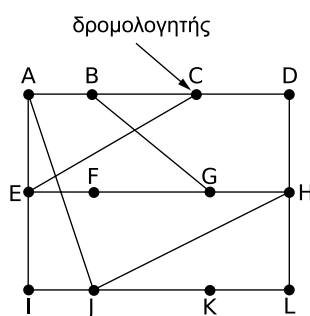
Ο αλγόριθμος πλημμύρας



- ▶ Σε πόσα βήματα φτάνει ένα πακέτο στον προορισμό του;
- ▶ Πώς αντιμετωπίζεται ο πολλαπλασιασμός των πακέτων;

15/36

Αλγόριθμοι διανύσματος απόστασης: Bellman-Ford



	A	I	H	K	νέος πίνακας J	
A	0	24	20	21	8	A
B	12	36	31	28	20	A
C	25	18	19	36	28	I
D	40	27	8	24	20	H
E	14	7	30	22	17	I
F	23	20	19	40	30	I
G	18	31	6	31	18	H
H	17	20	0	19	12	H
I	21	0	14	22	10	I
J	9	11	7	10	0	-
K	24	22	22	0	6	K
L	29	33	9	9	15	K

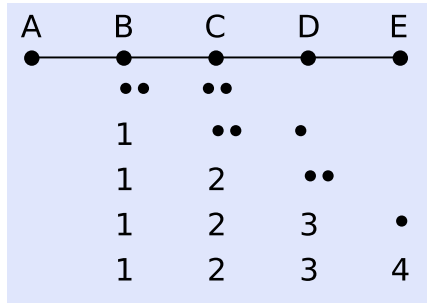
	JA	JI	JH	JK
καθυστ.	8	10	12	6

Ο J συλλέγει τους διανύσματα καθυστέρησης από τους γείτονές του και τις νέες καθυστερήσεις απ' αυτούς. Στη συνέχεια υπολογίζει το νέο δικό του νέο διάνυσμα απόστασης με τον τύπο

$$d_{Jx} = \min\{d_{JA} + d_{Ax}, d_{JI} + d_{Ix}, d_{JH} + d_{Hx}, d_{JK} + d_{Kx}\}$$

16/36

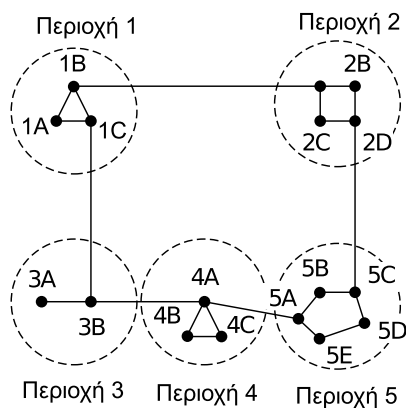
Το μέτρημα ως το άπειρο



A	B	C	D	E
•	•	•	•	•
	1	2	3	4
	3	2	3	4
	3	4	3	4
	5	4	5	4
	5	6	5	6
	7	6	7	6
	7	8	7	8
		⋮		
••		••		

17/36

Ιεραρχική δρομολόγηση



Πλήρης πίνακας του 1A
Προορ. γραμμή βήματα

1A	-	-
1B	1B	1
1C	1C	1
2A	1B	2
2B	1B	3
2C	1B	3
2D	1B	4
3A	1C	3
3B	1C	2
4A	1C	3
4B	1C	4
4C	1C	4
5A	1C	4
5B	1C	5
5C	1B	5
5D	1C	6
5E	1C	5

Ιεραρχικός πίνακας του 1A
Προορ. γραμμή βήματα

1A	-	-
1B	1B	1
1C	1C	1
2	1B	2
3	1C	2
4	1C	3
5	1C	4

18/36

Δρομολόγηση για εκπομπή

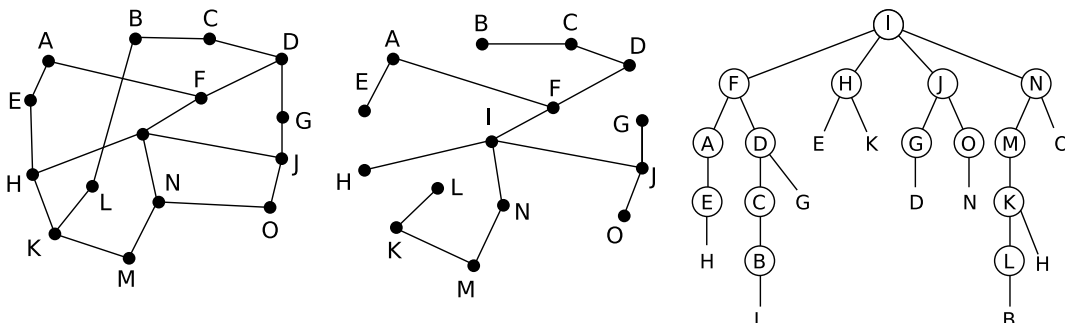
Η πληροφορία πρέπει να διαδοθεί σε όλους τους κόμβους.
Μέθοδοι υλοποίησης της εκπομπής:

- ▶ Αποστολή χωριστού πακέτου σε κάθε κόμβο.
- ▶ Πλημμύρα.
- ▶ Δρομολόγηση με πακέτα πολλών προορισμών: Το πακέτο περιέχει τις διευθύνσεις ενός συνόλου προορισμών. Κάθε κόμβος εξετάζει ποιες γραμμές εξόδου χρειάζονται. Για κάθε μια γεννάει ένα πακέτο με τις διευθύνσεις που της αντιστοιχούν.
- ▶ Χρήση του διατρέχοντος δέντρου.
- ▶ Προώθηση αντίστροφης διαδρομής (βλ. επόμενη σελίδα).

19/36

Προώθηση αντίστροφης διαδρομής

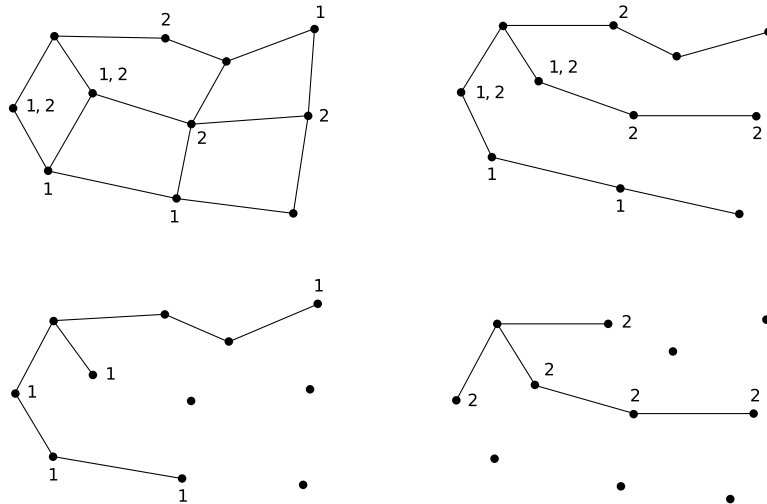
- ▶ Όταν φτάνει ένα πακέτο εκπομπής σε ένα κόμβο, αυτός εξετάζει αν έφτασε μέσα από τη ζεύξη, που θα είχε χρησιμοποιήσει ο κόμβος για να στείλει πακέτα στον αρχικό αποστολέα του πακέτου.
- ▶ Αν ναι, το πακέτο προωθείται προς όλες τις άλλες ζεύξεις, που βγαίνουν από τον κόμβο. Αλλιώς καταστρέφεται.



20/36

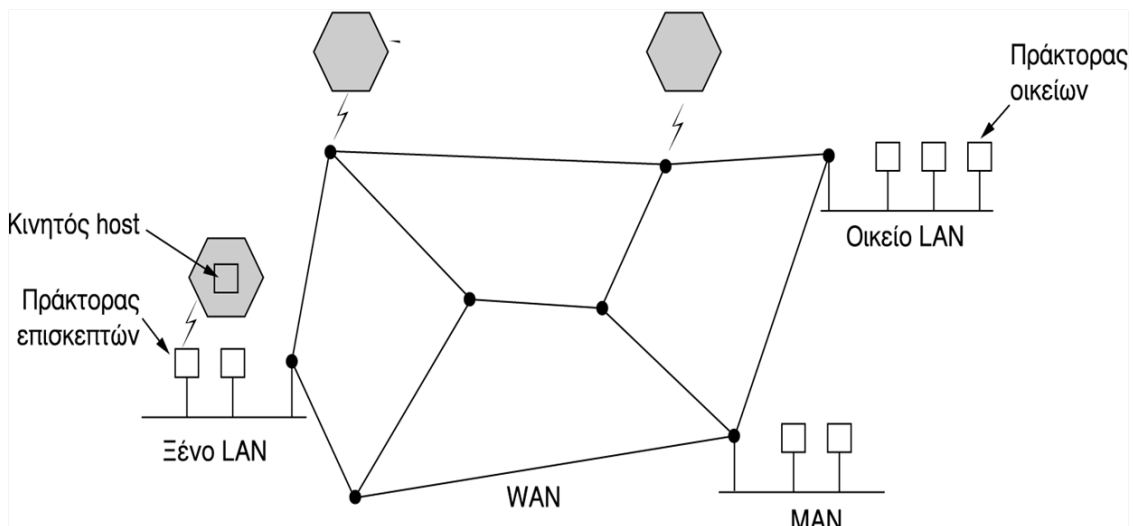
Δρομολόγηση για διανομή

- ▶ Τα πακέτα πρέπει να φτάσουν σε ομάδες κόμβων.
- ▶ Ξεκινώντας από ένα δέντρο με όλους τους κόμβους, δημιουργήσε ένα δέντρο μόνο με τους κόμβους της επιθυμητής ομάδας με αποκοπή των υπόλοιπων κλάδων.



21/36

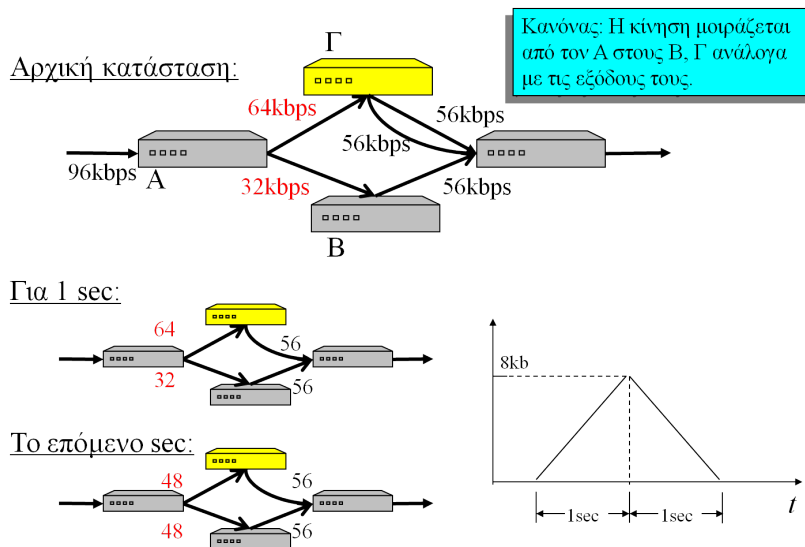
Δρομολόγηση σε κινητά δίκτυα



22/36

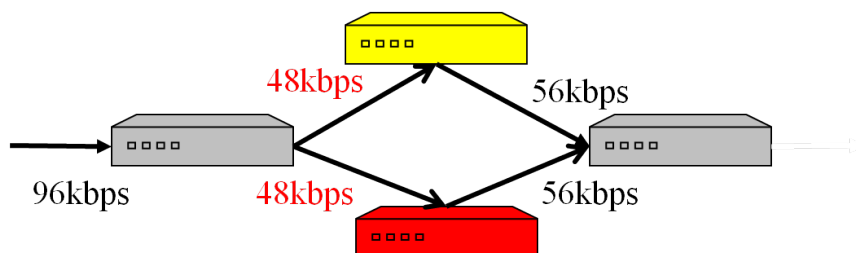
Αντοχή του αλγορίθμου δρομολόγησης

- ▶ Τα πακέτα πρέπει να φτάσουν σε ομάδες κόμβων.
- ▶ Ξεκινώντας από ένα δέντρο με όλους τους κόμβους, δημιουργήστε ένα δέντρο μόνο με τους κόμβους της επιθυμητής ομάδας με αποκοπή των υπόλοιπων κλάδων.



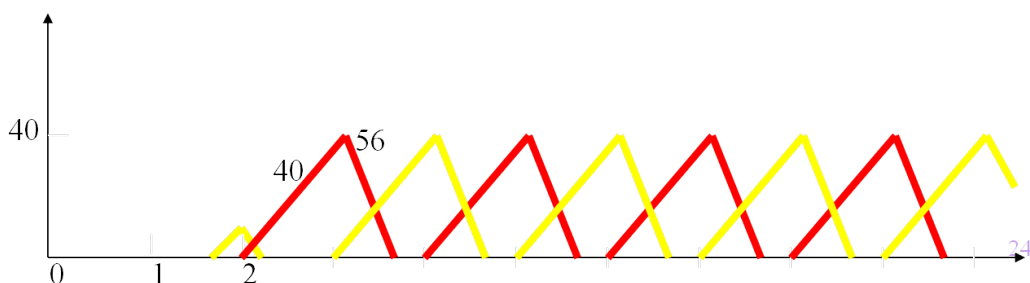
23/36

Σταθερότητα του αλγορίθμου δρομολόγησης



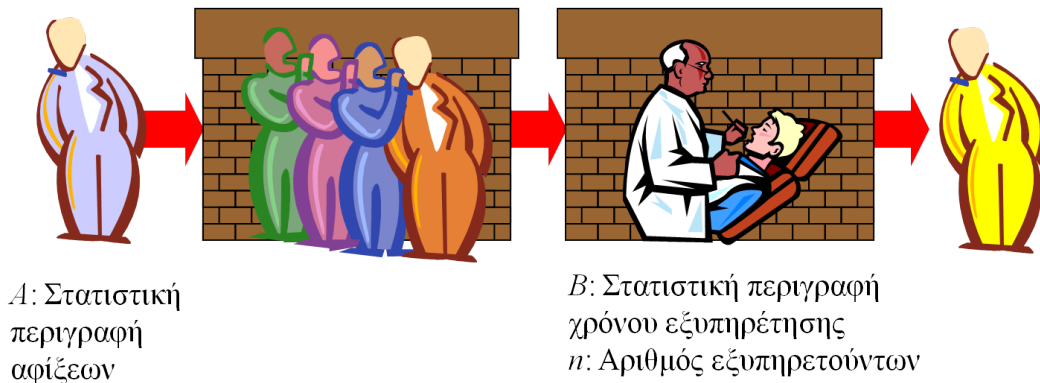
Κανόνας I: Ουρές ίσες \Rightarrow ίση κατανομή

Κανόνας II: Ουρές άνισες \Rightarrow όλο το φορτίο στην πιο μικρή



24/36

Υπόβαθρο: Σύστημα αναμονής $A/B/n$



25

25/36

Υπόβαθρο: Σύστημα αναμονής $M/M/1$

- ▶ $A = M =$ αφίξεις Poisson: Η πιθανότητα να εμφανισθούν N αφίξεις σε διάστημα t είναι

$$\Pr\{N(t) = k\} = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}$$

όπου λ είναι ο ρυθμός αφίξεων (δηλ. $E\{N(t)\} = \lambda t$).

- ▶ $A = M =$ ο χρόνος εξυπηρέτησης T του πελάτη είναι εκθετικά κατανομημένος, ήτοι

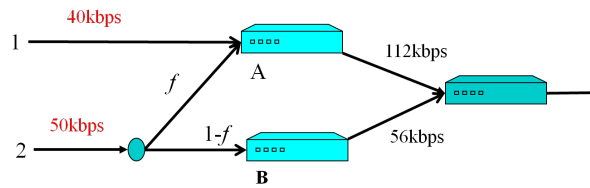
$$\Pr\{T \leq \tau\} = 1 - e^{-\mu\tau}$$

- ▶ Τότε η μέση καθυστέρηση είναι

$$E\{D\} = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

26/36

Δικαιοσύνη



Για πακέτα μήκους 1000 bits.

$$E\{D_A\} = \frac{1}{\mu_A - \lambda_A} = \frac{1}{112 - (40 + f \times 50)}$$

$$E\{D_B\} = \frac{1}{\mu_B - \lambda_B} = \frac{1}{56 - (1 - f)50}$$

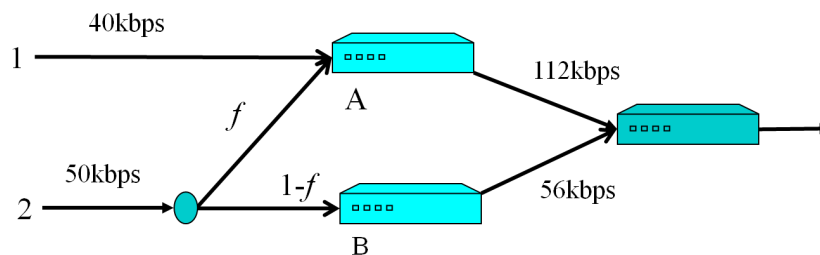
$$E\{D_1\} = E\{D_A\}$$

$$E\{D_1\} = fE\{D_A\} + (1 - f)E\{D_B\}$$

$$E\{D_1\} = E\{D_2\} \Leftrightarrow f = 0,66$$

27/36

Ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης



$$E\{D_A\} = \frac{1}{112 - (40 + f \times 50)}$$

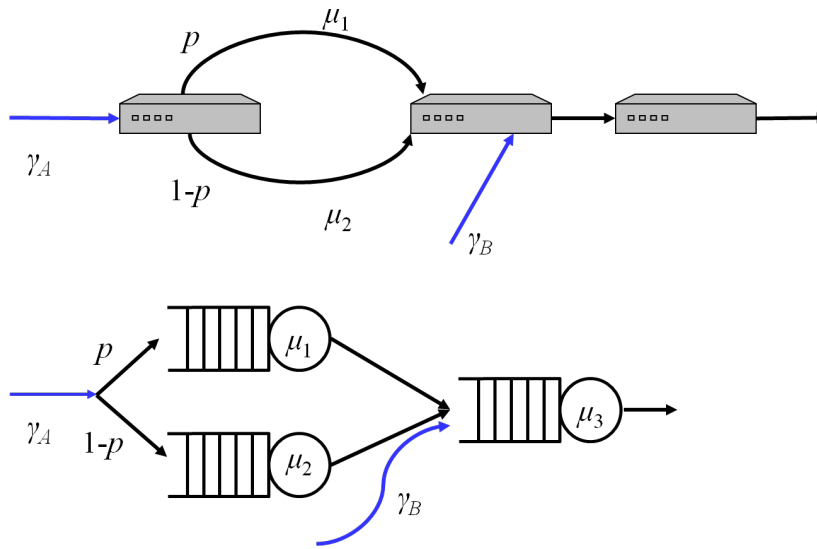
$$E\{D_B\} = \frac{1}{56 - (1 - f)50}$$

$$E\{D_1\} = \frac{40}{90}E\{D_1\} + \frac{50}{90}E\{D_2\}$$

$$\min E\{D\} \Leftrightarrow f = 0,46$$

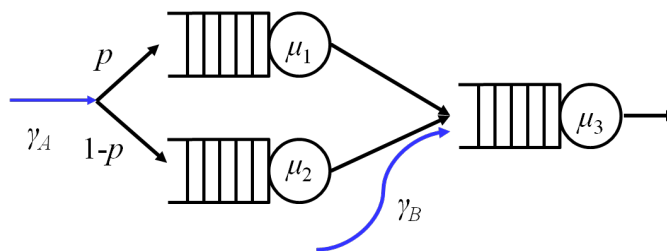
28/36

Πιθανοτική στατική δρομολόγηση



Ποια είναι η πιθανότητα p που διανέμει την κίνηση έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η μέση καθυστέρηση;

29/36



$$d_1 = \frac{1}{\mu_1 - p\gamma_A} \quad d_2 = \frac{1}{\mu_2 - (1-p)\gamma_A} \quad d_3 = \frac{1}{\mu_3 - (\gamma_A + \gamma_B)}$$

$$d = \frac{p\gamma_A}{\gamma_A + \gamma_B} (d_1 + d_3) + \frac{(1-p)\gamma_A}{\gamma_A + \gamma_B} (d_2 + d_3) + \frac{\gamma_B}{\gamma_A + \gamma_B} d_3$$

$$d = \min \Leftrightarrow p = \min \left\{ \frac{\mu_1\sqrt{\mu_2} - \mu_2\sqrt{\mu_1} + \gamma_A\sqrt{\mu_1}}{\gamma_A(\sqrt{\mu_1} + \sqrt{\mu_2})}, 1 \right\} \quad (\mu_1 > \mu_2)$$

30/36

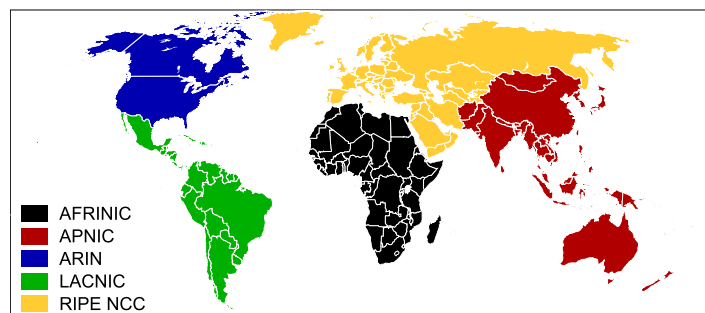
Ονόματα και διευθύνσεις (κατά IP v4) I

- ▶ Για να δρομολογηθεί ένα πακέτο είναι απαραίτητο να υπάρχει η διεύθυνση του παραλήπτη.
- ▶ Οι κόμβοι ενός δικτύου χαρακτηρίζονται από τις μήκους 32 bits διευθύνσεις δικτύου, που συνήθως γράφονται σε τέσσερα τμήματα με τελείες ανάμεσά τους, και καθένα είναι σε δεκαδική μορφή, π.χ. 147.102.250.3.
- ▶ Η διαδικασία παραχώρησης διευθύνσεων επιβλέπεται από μη κερδοσκοπικό οργανισμό που λέγεται Internet Corporation for Assigned Names and Numbers (ICANN). Τα κατά τόπους γραφεία, γνωστά ως regional Internet registry (RIR) διαχειρίζονται σε μια ευρεία περιοχή τη διανομή των διευθύνσεων, μέσα στην οποία η διαχείριση περνάει στα

31/36

Ονόματα και διευθύνσεις (κατά IP v4) II

«τοπικά ληξιαρχεία», local Internet registries (LIR), δηλαδή ISPs και ακαδημαϊκά ιδρύματα.¹



- ▶ Η φυσική διεύθυνση μιας διεπαφής είναι αμετάβλητη (π.χ. μιας κάρτας Ethernet αποτελείται από 48 bits, του δακτυλίου ProNet είναι μόνο 8 bits).

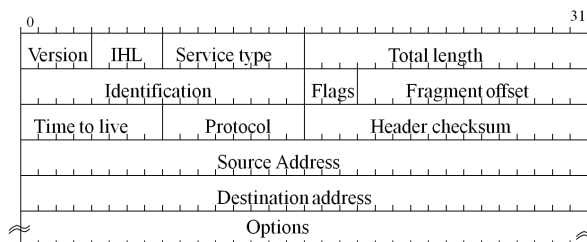
32/36

Ονόματα και διευθύνσεις (κατά IP v4) III

- ▶ Για ευκολία δίνουμε μνημονικά ονόματα, π.χ. central.ntua.gr, που λέγονται *ονόματα τομέα* (domain names).
- ▶ Τα ονόματα τομέα και οι αντιστοιχίες τους με τις διευθύνσεις δικτύου τηρούνται από ένα εξυπηρετητή ονομάτων (name server).
- ▶ Τα ονόματα τομέα παραχωρούνται από τους *καταχωρητές* (ή ληξιαρχους, αγγλ. registrars) που πιστοποιούνται και επιβλέπονται από τον ICANN).

¹<https://www.ripe.net/membership/indices/GR.html>

Επικεφαλίδα πακέτου IPv4



- ▶ Version: έκδοση του πρωτοκόλλου IP
- ▶ IHL: Internet Header Length
- ▶ Service Type: Προσδιορίζει την ποιότητα υπηρεσίας
- ▶ Identification, flags, fragment offset επιτρέπουν την ανασύνθεση πακέτων.
- ▶ Time to live: Πόσα βήματα επιτρέπεται να κάνει το πακέτο.
- ▶ Protocol: Ποιό πρωτόκολλο ανωτέρου επιπέδου κρύβεται στα δεδομένα.
- ▶ Header checksum αφορά στην επαλήθευση της επικεφαλίδας μόνο.

Προβλήματα του IPv4

- ▶ Το IPv4 διαθέτει διευθύνσεις των 32 bits μόνο.
- ▶ Δεν έχει έλεγχο στην ποιότητα υπηρεσίας.
- ▶ Δεν παρέχει ασφάλεια.

35/36

IPv6

- ▶ Το IPv6 διαθέτει διευθύνσεις των 128 bits, π.χ.:
8000:0000:0000:0000:0123:4567:89AB:CDEF
ή 8000::123:4567:89AB:CDEF
- ▶ Διατίθενται $2^{128} \approx 3,4 \times 10^{38}$ διευθύνσεις.
- ▶ Η επικεφαλίδα του διαθέτει τα εξής πεδία:
[Version—Priority—Flow—Total Length—Next Header—Hop
Limit—Source Address—Destination Address]

36/36