



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΤΜΗΜΑ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ &
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων (M132)

Εισαγωγή

Διδάσκων:

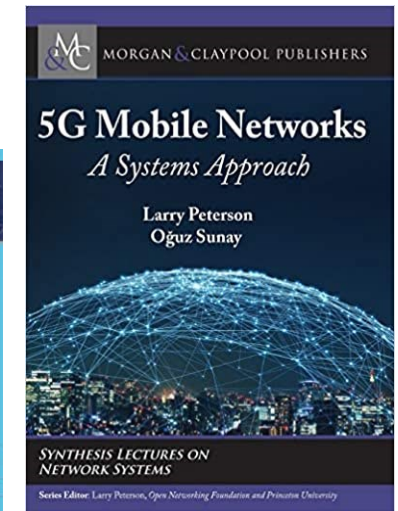
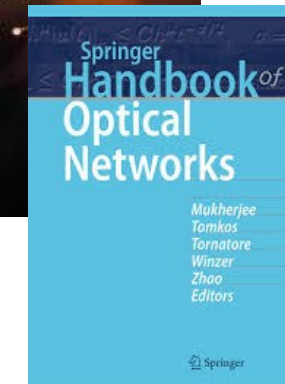
Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

kchristodou@di.uoa.gr

<https://eclass.uoa.gr/courses/DI469/>

Διαδικαστικά

- Διαλέξεις: Τετάρτη 16:00 – 18:30
- Στόχος: >11 διαλέξεις
- Προαιρετική Εργασία
 - Παρουσίαση μιας ερευνητικής εργασίας (paper), διάρκεια ~15 λεπτά
 - Θα αναρτηθούν 5 Papers ανά θεματική ενότητα που καλύπτει το μάθημα στο eclass
 - Επιλογή ενός – από οποιαδήποτε θεματική ενότητα
 - Βαθμολόγηση: 2 μονάδες, επιπρόσθετες στο βαθμό της τελικής εξέτασης
- Τελική γραπτή εξέταση (10 μονάδες)
 - Βάση 4/10



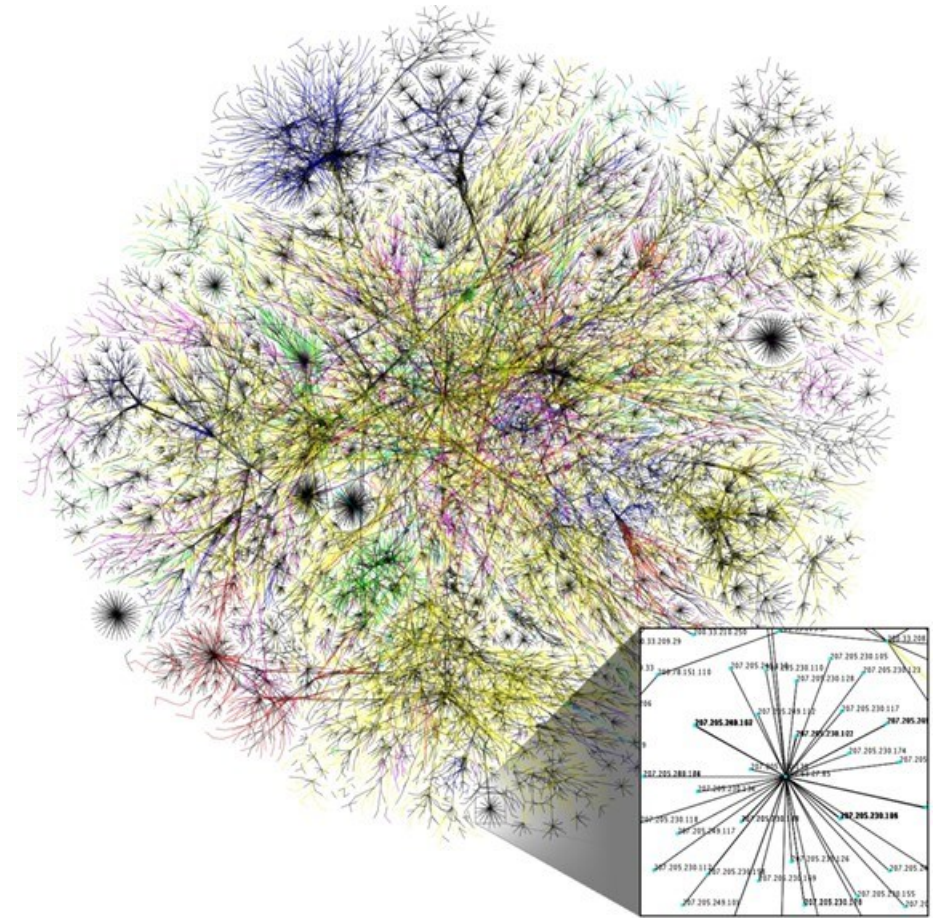
Σχετικά βιβλία:

- 1) Computer Networking: A Top-Down Approach, 2022, by Kurose & Ross, Addison-Wesley, 8^η Έκδοση, Ελληνική Μετάφραση: Εκδόσεις : Μ. Γκιούρδας
- 2) Optical Networks: A Practical Perspective, 3rd Edition, 2008, by R. Ramaswami, K. Sivarajan, G. Sasaki, The Morgan Kaufmann Series
- 3) Handbook of Optical Networks, Springer, 2020
- 4) 5G Mobile Networks: A Systems Approach, Larry Peterson, Oguz Sunay, and Bruce Davie, MC publishers, (online version: Private 5G: A Systems Approach, 2022)

Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων

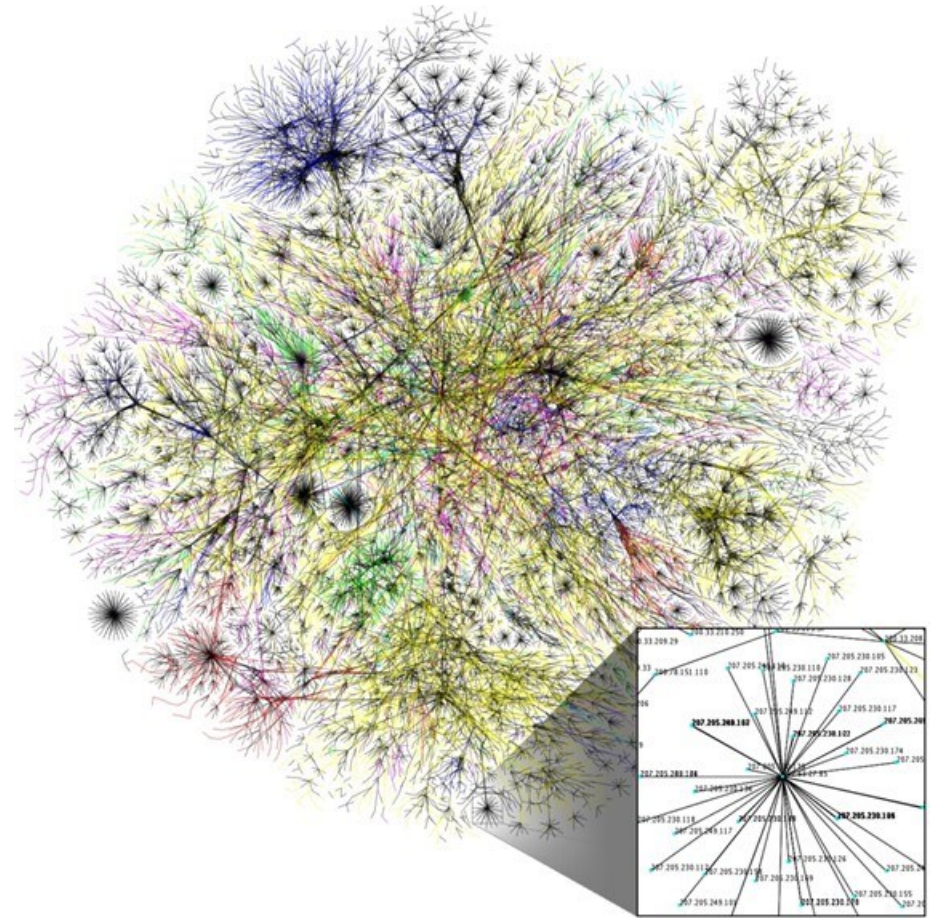
Θεματικές Ενότητες (ΘΕ) μαθήματος

- Εισαγωγή
- Δίκτυα Κορμού και Μητροπολιτικά Δίκτυα
(Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Μήκους Κύματος)
- Δίκτυα πρόσβασης – Ενσύρματα
(Δίκτυα καλωδίου, DSL, παθητικά οπτικά δίκτυα)
- Δίκτυα πρόσβασης – Ασύρματα/Κινητά Δίκτυα
(κινητά δίκτυα 4G και 5G)
- Τοπικά δίκτυα - δίκτυα κέντρων δεδομένων
(Datacenter networks)

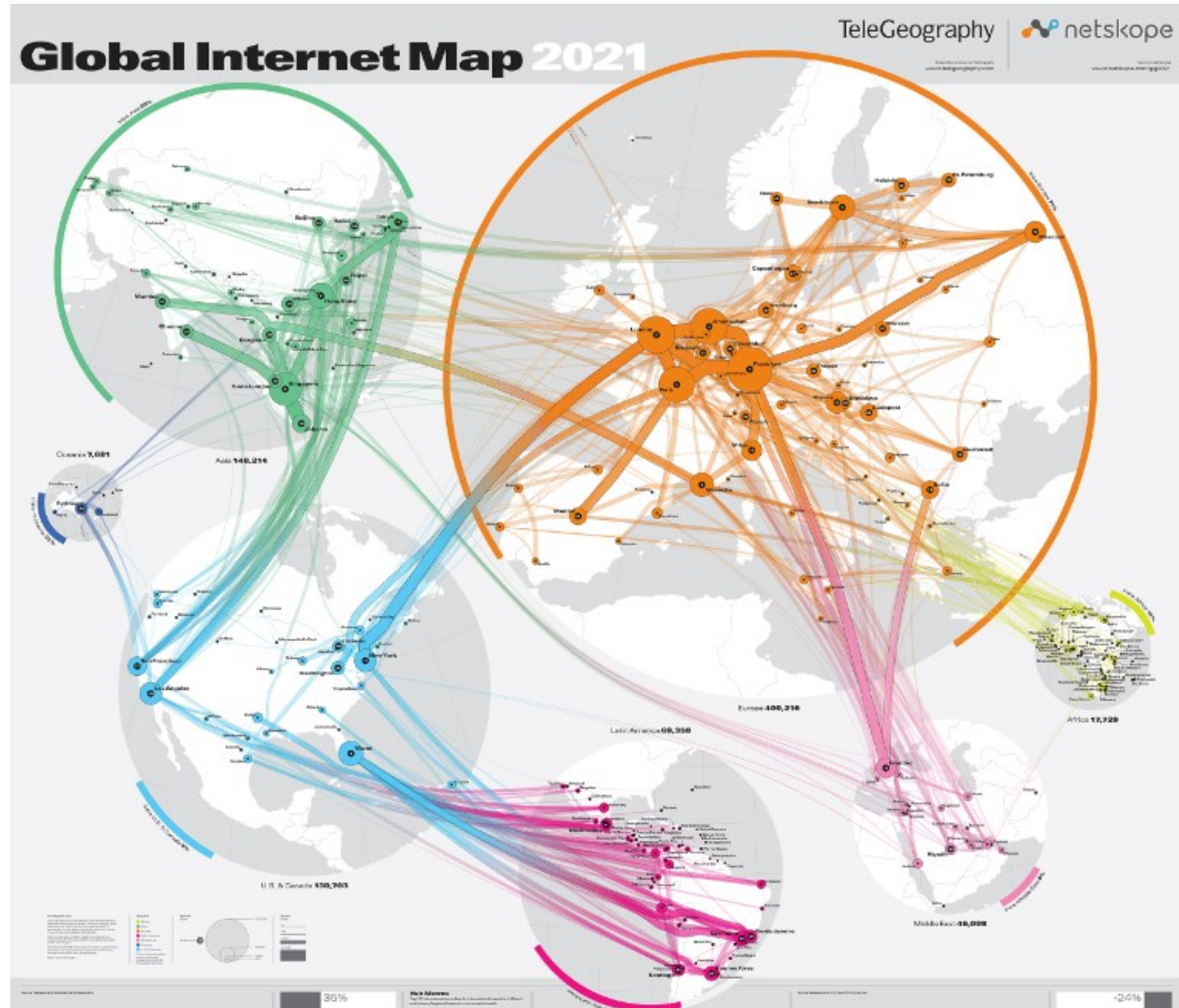


Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων - Εισαγωγή

- Διαδίκτυο – στατιστικά
- Δομή του Διαδικτύου
- Τεχνικές μεταγωγής
- Στοίβα πρωτοκόλλων Διαδικτύου
- Επίπεδο Δικτύου
- Επίπεδο Ζεύξης



The Internet



- Το Internet έκλεισε τα 40 χρόνια
- 5.5 δισεκατομμύρια χρήστες, 68% του πληθυσμού της γης
- >15 δισ συσκευές
- Ένας μέσος χρήστης περνάει περίπου 7 ώρες κάθε μέρα στο Internet

Τι συμβαίνει σε 1 λεπτό στο Internet



Ένας μέσος χρήστης περνάει περίπου 7 ώρες κάθε μέρα στο Internet

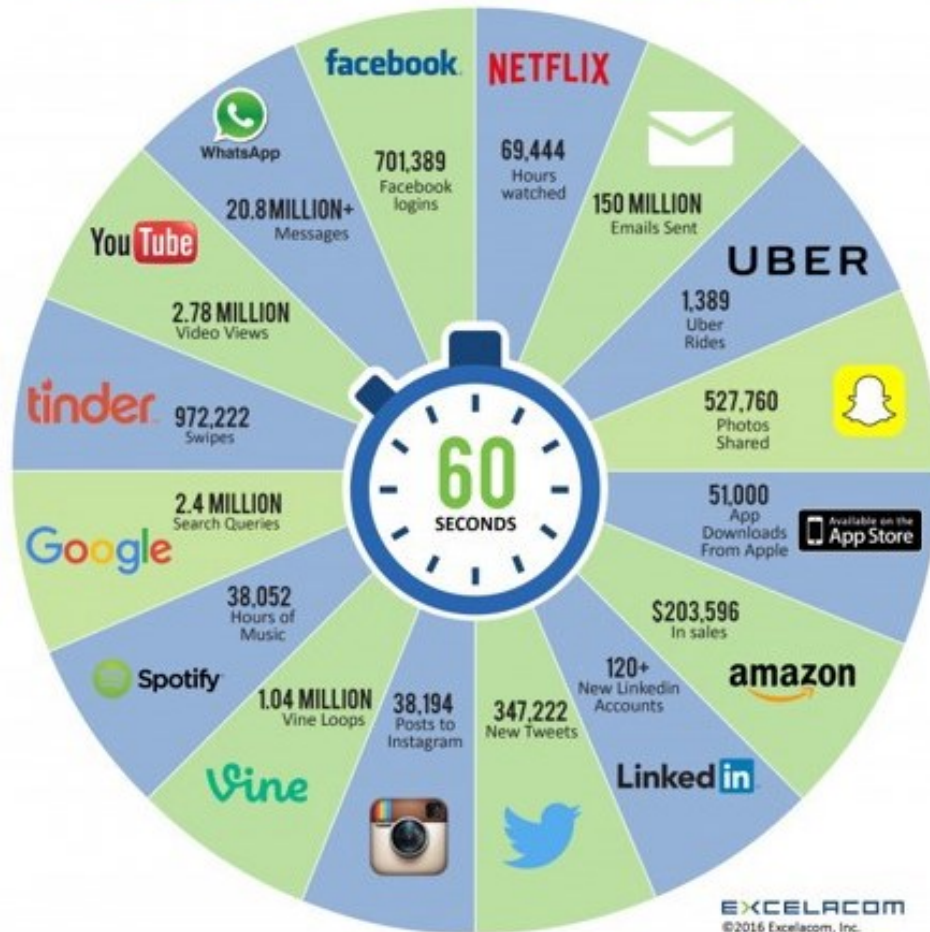
Κάθε λεπτό

- ~200 million emails
- >2.4 million Google searches
- YouTube uploads >500 hours of video
- >100 million instant messages (whatsapp, messenger, iMessage, ...)
- \$1.6 million spent online

...

2016 vs 2021

2016 What happens in an INTERNET MINUTE?



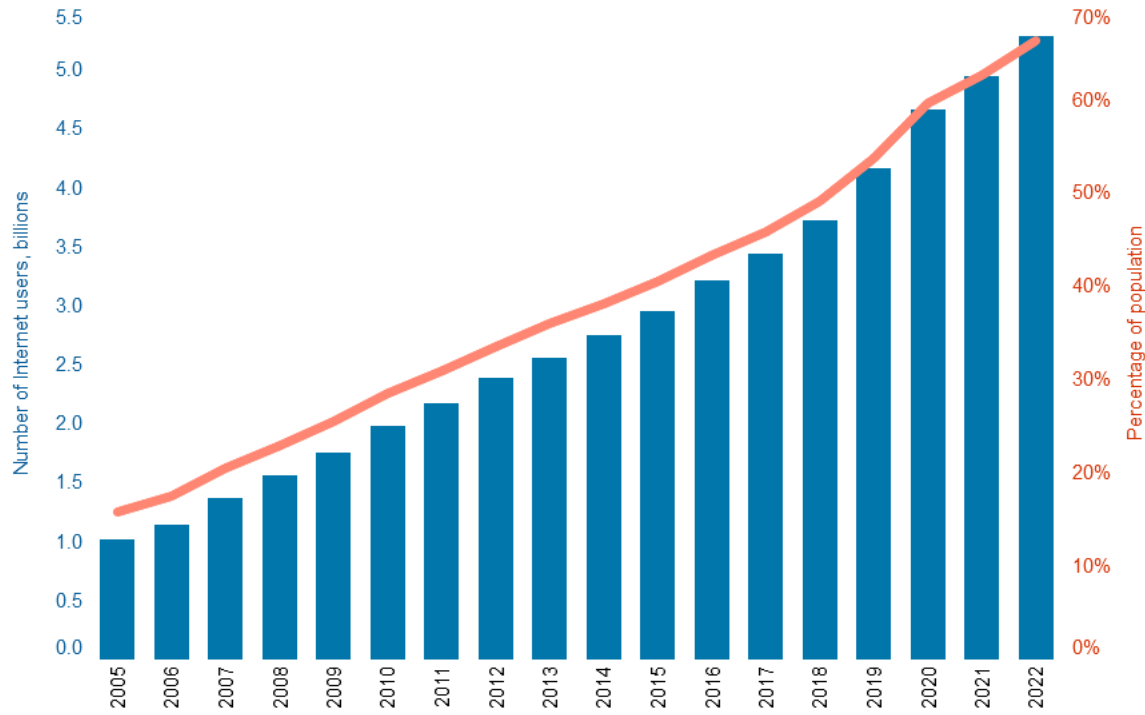
2021 This Is What Happens In An Internet Minute



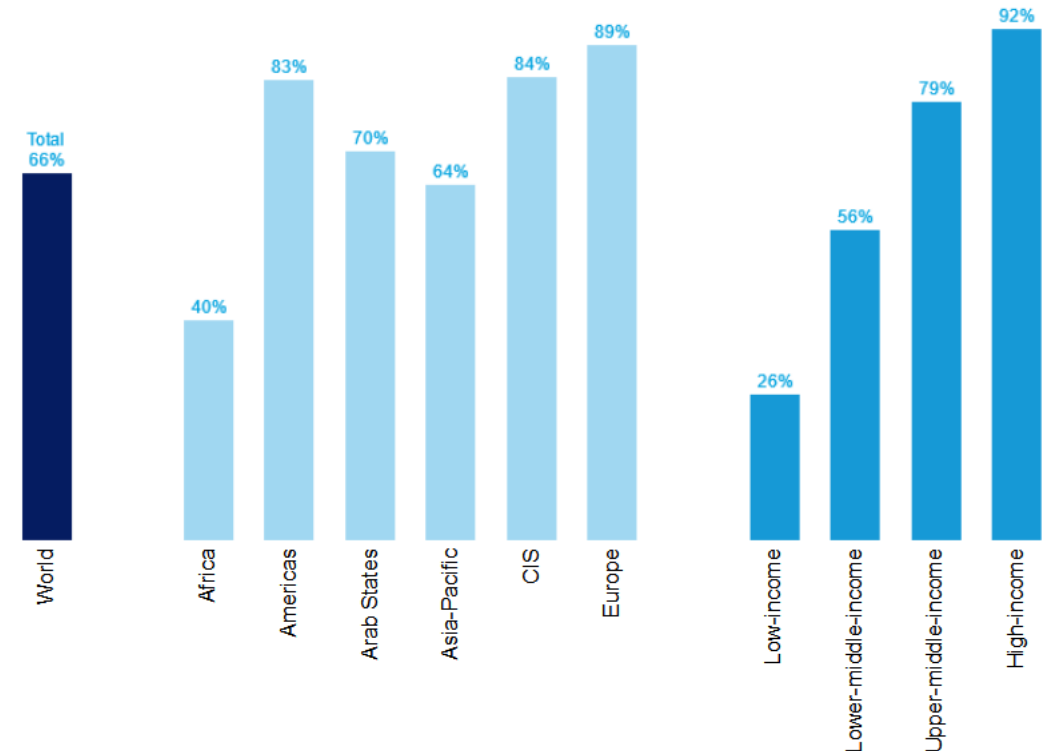
Ποσοστό πληθυσμού που χρησιμοποιεί το Internet

Two-thirds of the world's population uses the Internet, but 2.7 billion people remain offline

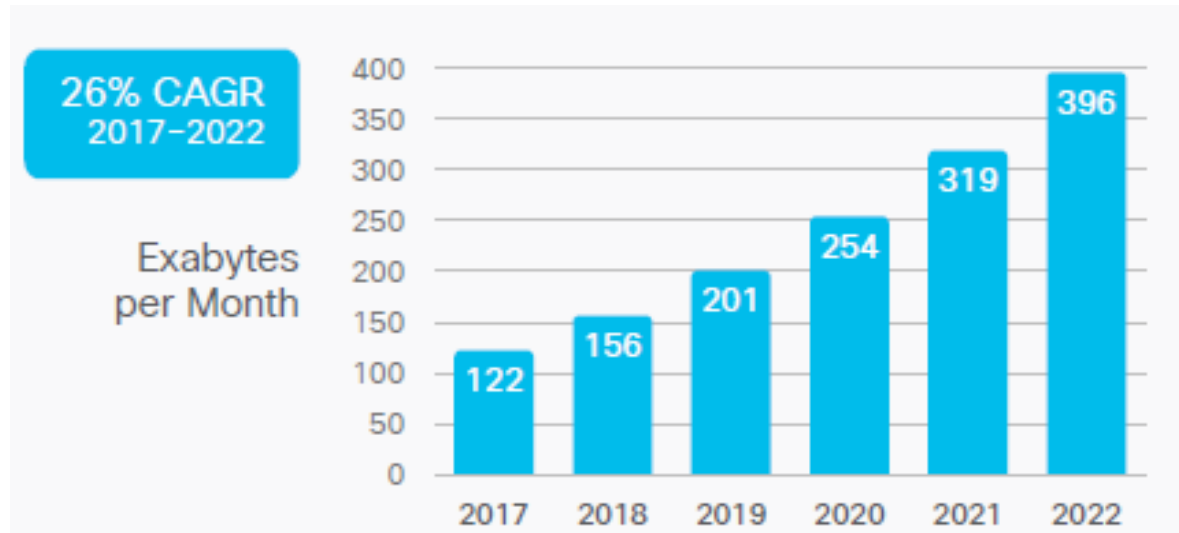
Individuals using the Internet



Percentage of individuals using the Internet by region, 2022

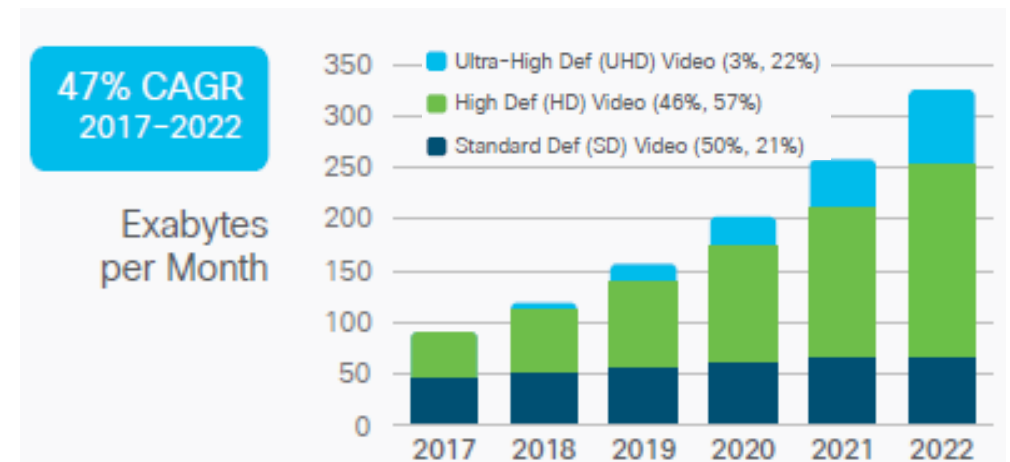
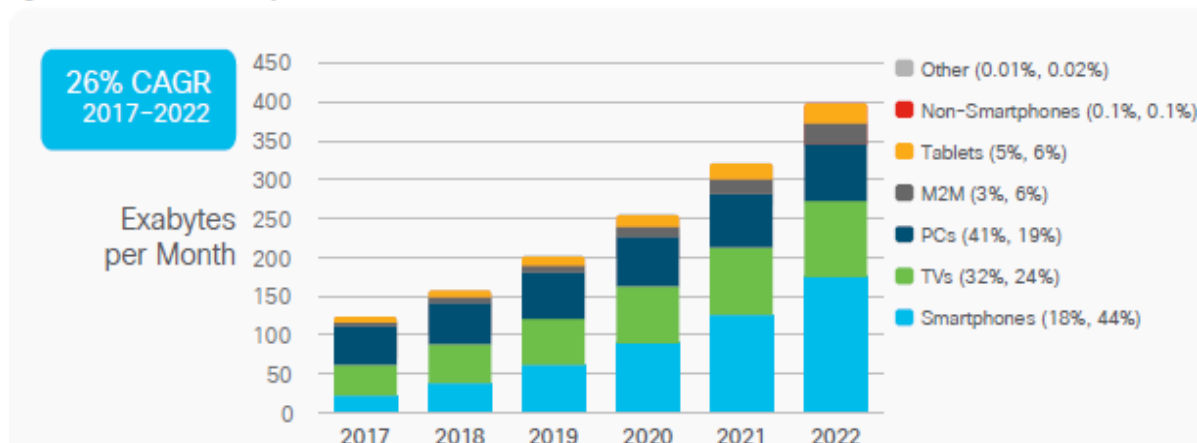


Ποσότητα δεδομένων στο Internet



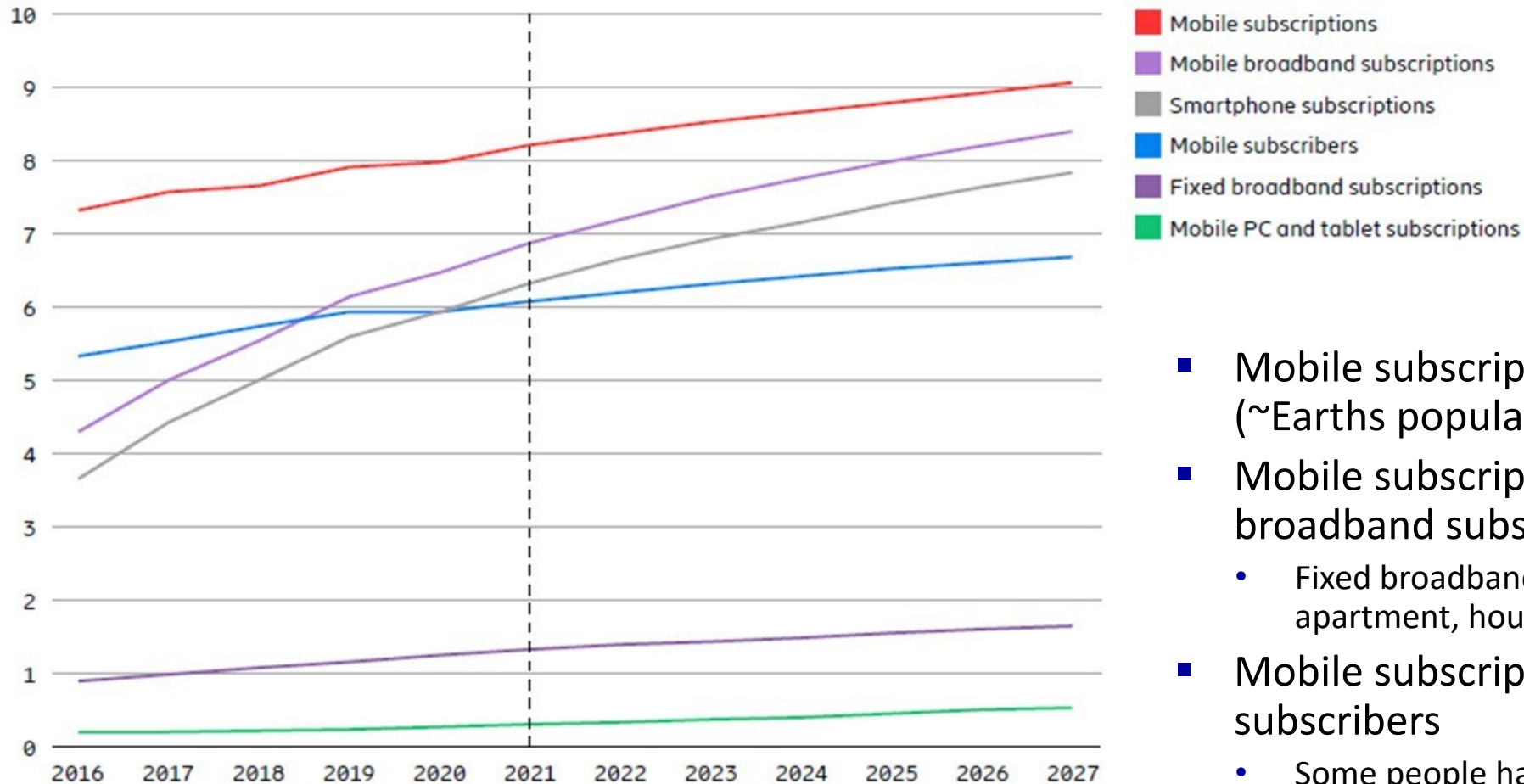
- Η cisco εκτιμά την κίνηση του 2022 σε 396 EByte (10^{18} bytes) ανά μήνα
= 1.220 Pb/s = 32 χιλιάδες DVDs ανά sec
- 44% της κίνησης από έξυπνα κινητά
- 340 Ebyte (85%) είναι βίντεο!

Figure 4. Global IP traffic by devices



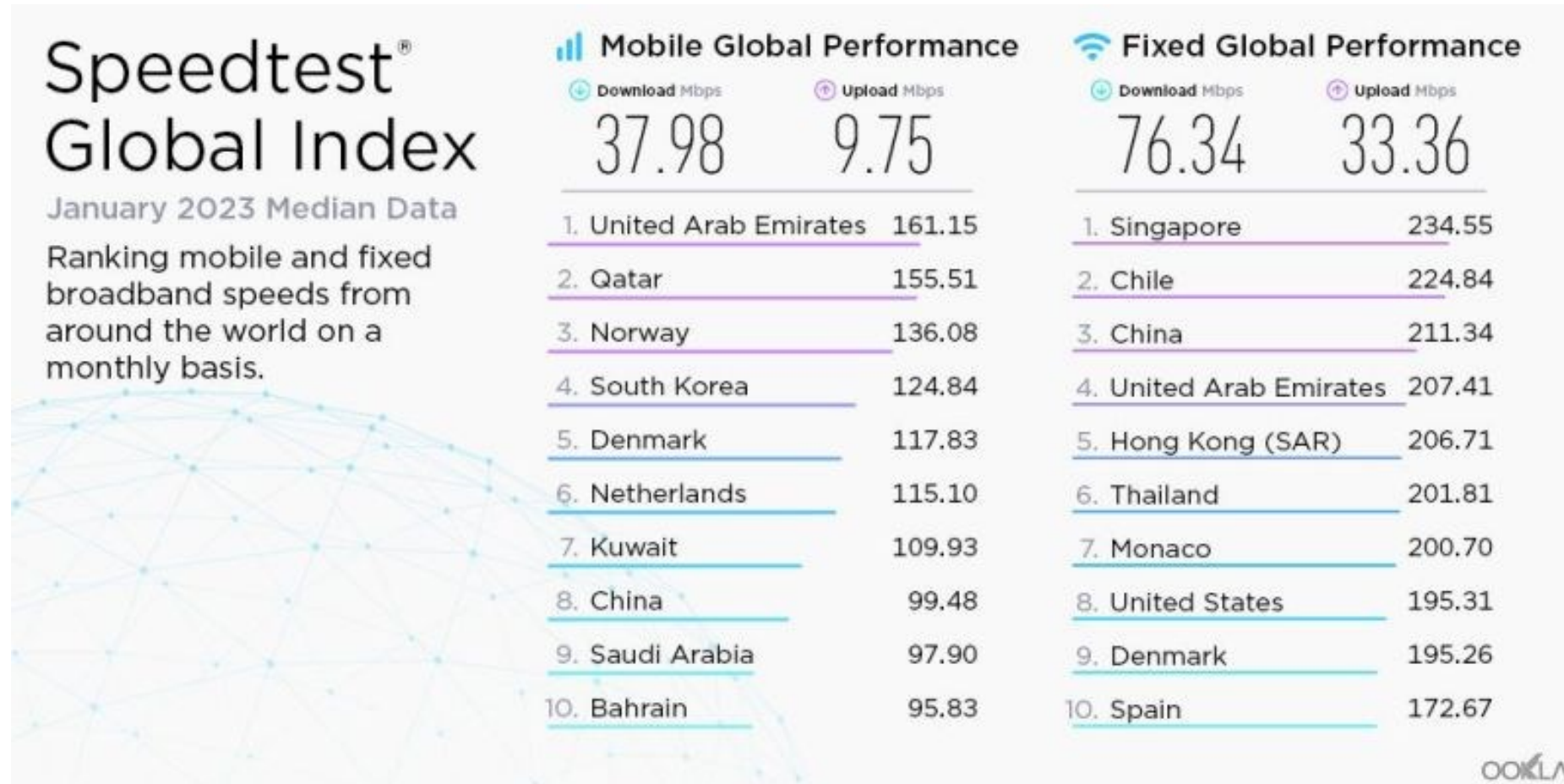
Πρόσβαση χρηστών στο Internet

Figure 3: Subscriptions and subscribers (billion)



- Mobile subscriptions > 8 Billions (~Earth's population)
- Mobile subscriptions ~8x fixed broadband subscriptions
 - Fixed broadband is for all users in an apartment, house, small office, etc
- Mobile subscriptions > mobile subscribers
 - Some people have many smartphones !

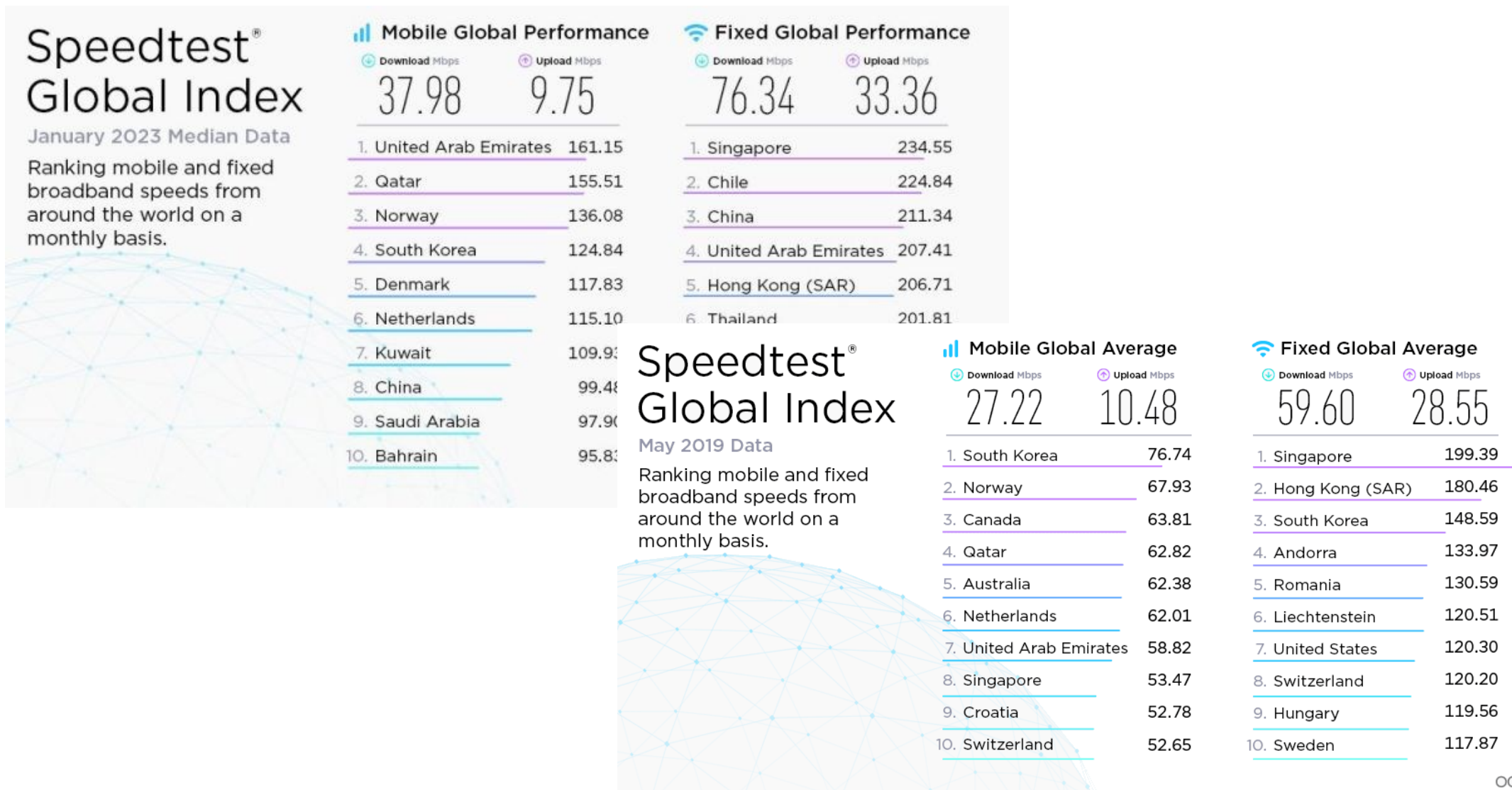
Ταχύτητες πρόσβασης στο Internet



Υποθαλάσσια καλώδια (πολλές οπτικές ίνες) μεταφέρουν πάνω από 200 Tb/s σε χιλιάδες km

The Grace Hopper cable (Google) connects USA (New York) with the UK (Bude) and Spain (Bilbao) and has 16 fiber pairs (32 fibers) of 22 Tbit/s each (352 Tbit/s total)

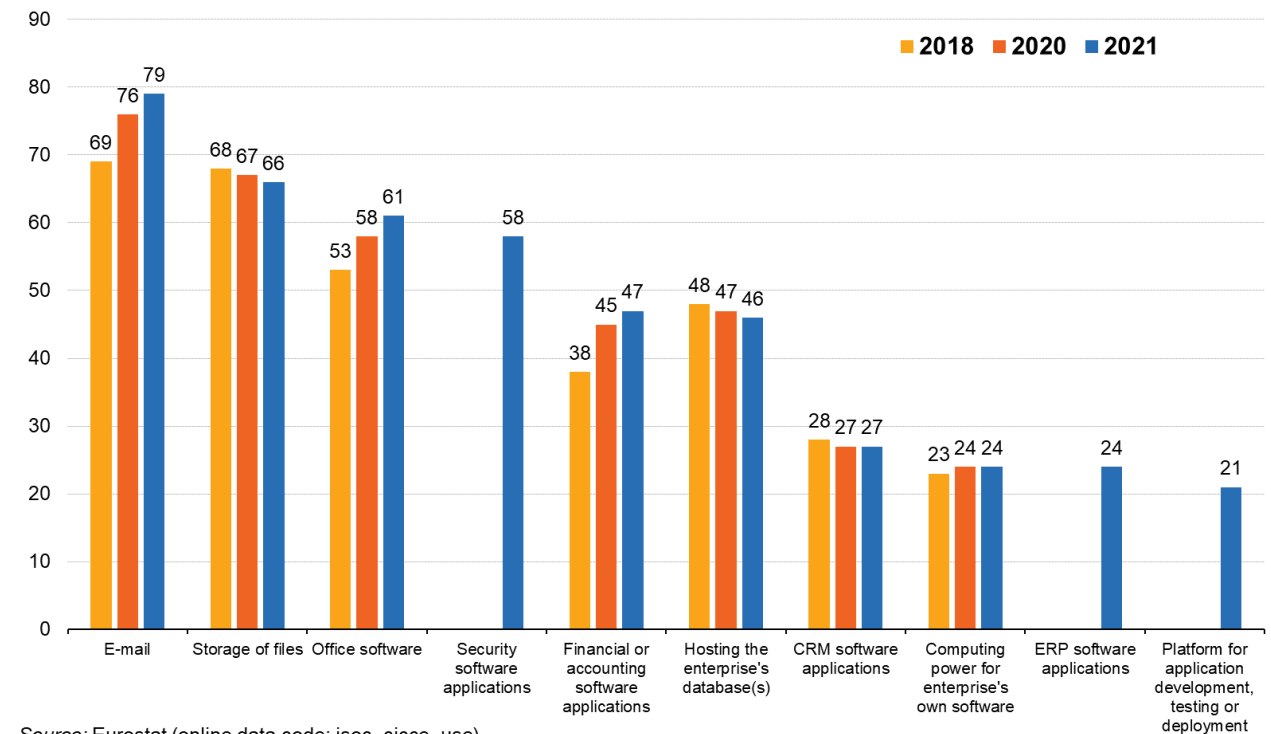
2024 vs 2019



Υπολογιστικά νέφη (Cloud computing)

- Τα υπολογιστικά νέφη (Cloud Computing) συμμετέχουν σε κάθε πτυχή των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών (ICT)
- Οι υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους είναι διαθέσιμες **μέσω του Διαδικτύου**
- Αντικαθιστούν τον τοπικό υπολογιστικό εξοπλισμό, μειώνουν τις δαπάνες, τα λειτουργικά έξοδα και αυξάνουν την αποδοτικότητα και την ευελιξία

Use of cloud computing services in enterprises, by type of cloud service, EU, 2020 and 2021
(% of enterprises using the cloud)



Source: Eurostat (online data code: isoc_cicce_use)

Γνωστές υπηρεσίες υπολογιστικών νεφών

Οικιακοί χρήστες

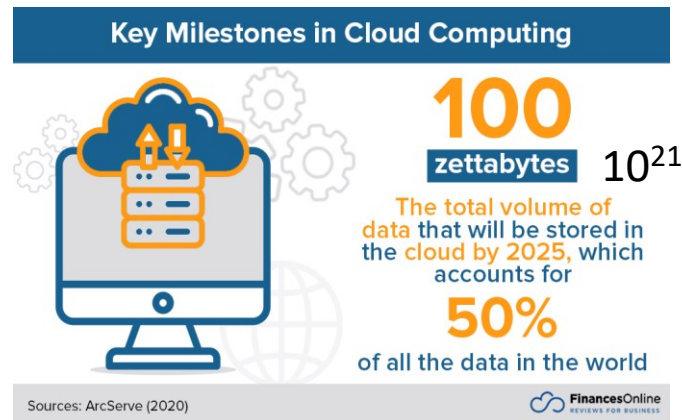
Υπηρεσίες video streaming



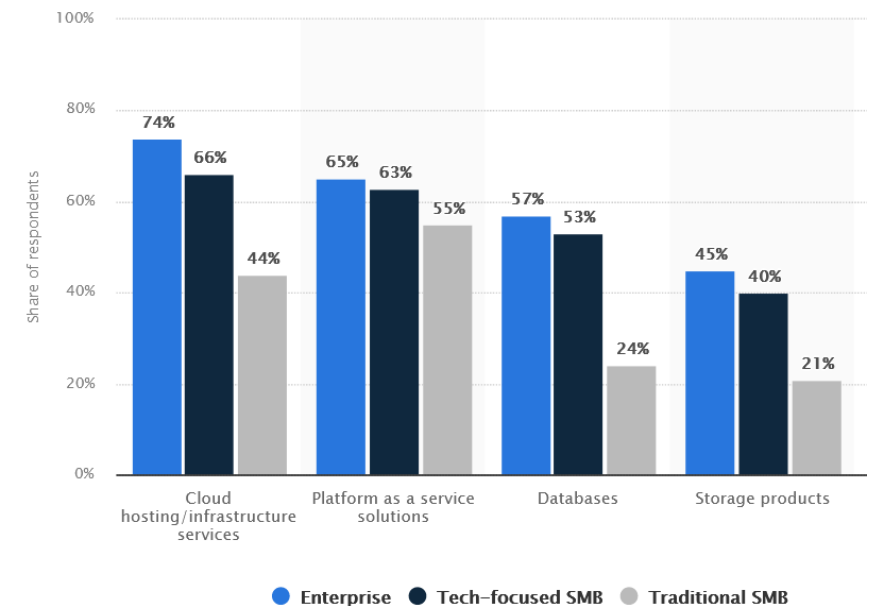
Κοινωνικά δίκτυα



Αποθηκευτικά νέφη



Εταιρίες

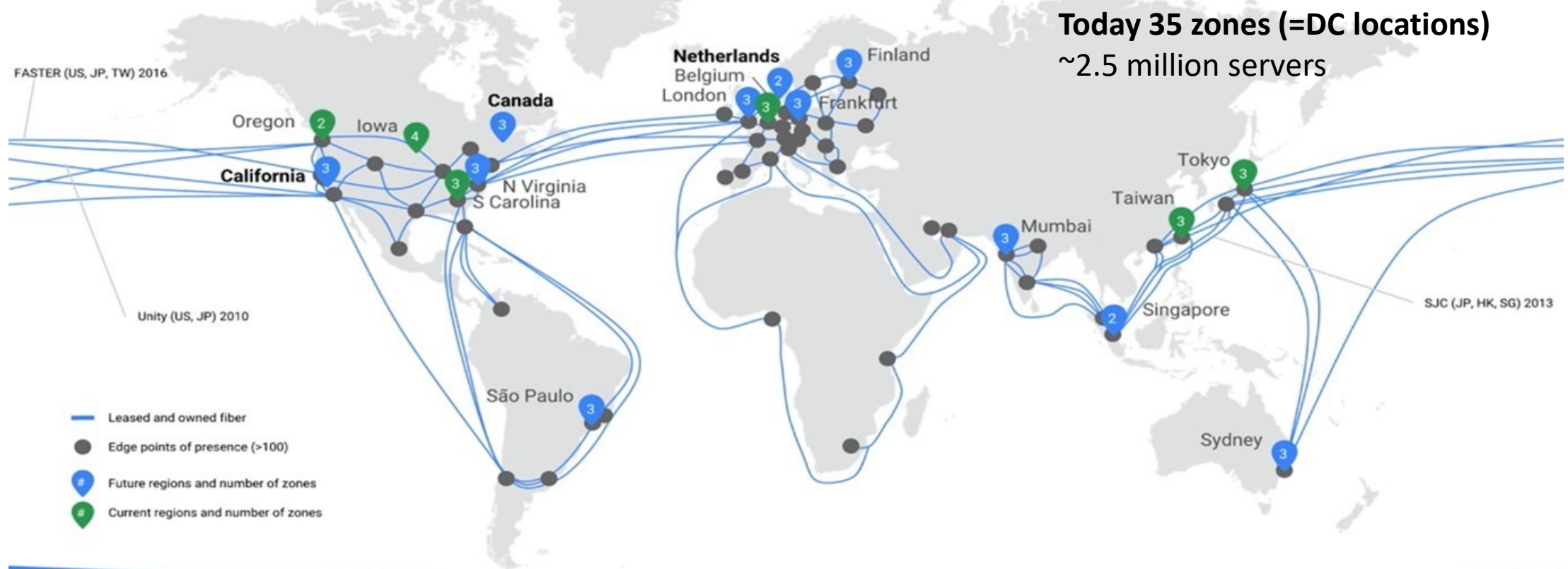


<https://www.statista.com/statistics/1276747/cloud-services-usage-by-type-business-size/>

Cloud computing – Δικτυακή υποδομή

GCP Infrastructure

6 regions, 18 zones, over 100 points of presence, and a well-provisioned global network comprised of hundreds of thousands of miles of fiber optic cable.



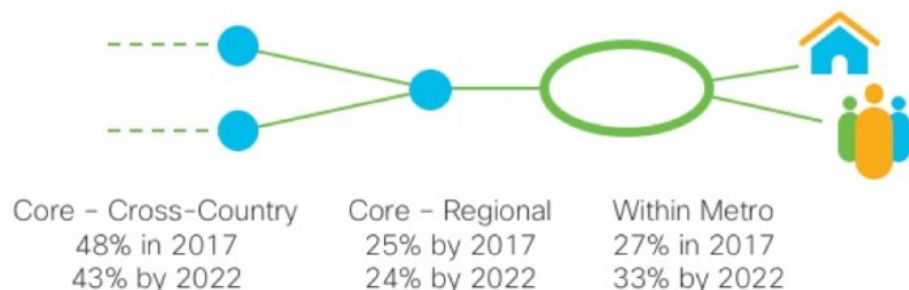
Next

Google Cloud

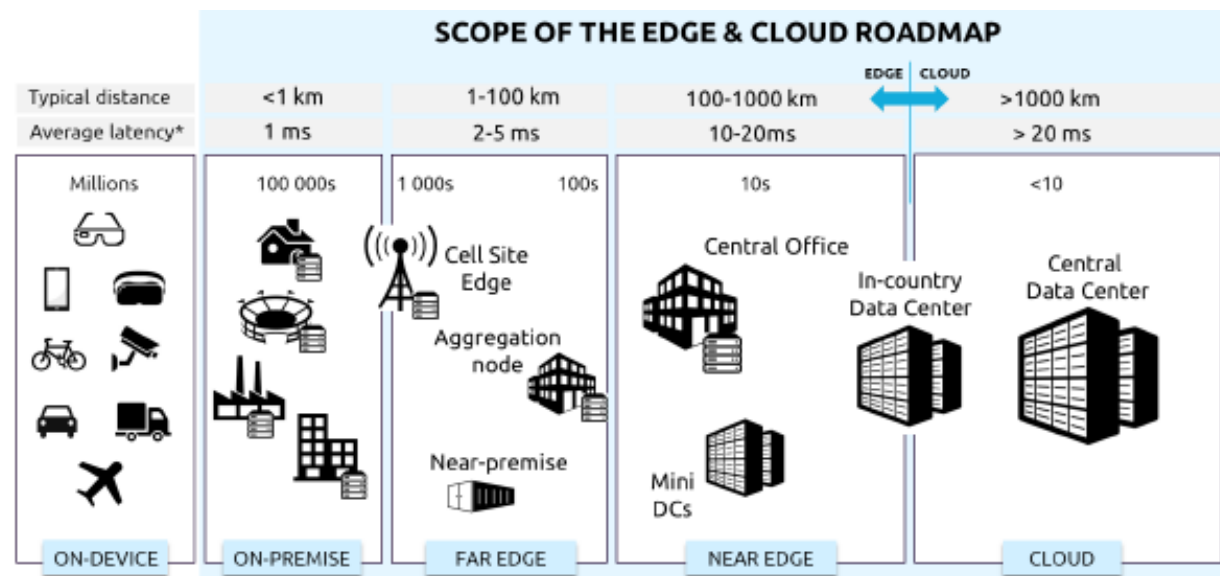
Edge Cloud

- (Core) Cloud: Ως πρόσφατα το cloud υλοποιούνταν σε σχετικά λίγα και τεράστια (100 K servers) κέντρα δεδομένων (DC), συνδεδεμένα σε δίκτυα κορμού
- Edge Cloud: το cloud έρχεται στις παρυφές του Διαδικτύου
 - Μικρές και μεγάλες εταιρίες λειτουργούν μικρότερα DC στις άκρες του Διαδικτύου
 - Κύριος λόγος: πληθώρα δεδομένων – η υπολογιστική ισχύ πρέπει να είναι κοντά στην παραγωγή, εφαρμογές που ζητούν χαμηλή καθυστέρηση (AR/VR, gaming, industrial)

SP Network Capacity Moving Closer to the Edge
Over one-third of capacity will bypass core completely by 2022

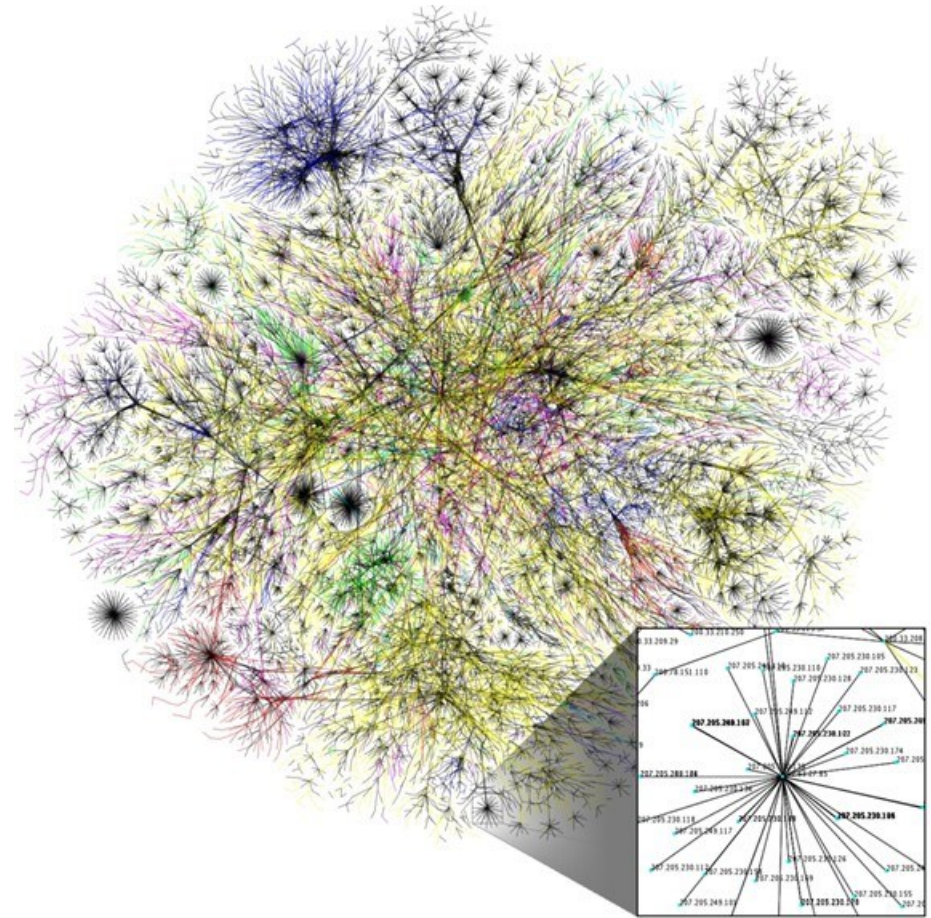


Source: Cisco VNI Global IP Traffic forecast, 2017-2022



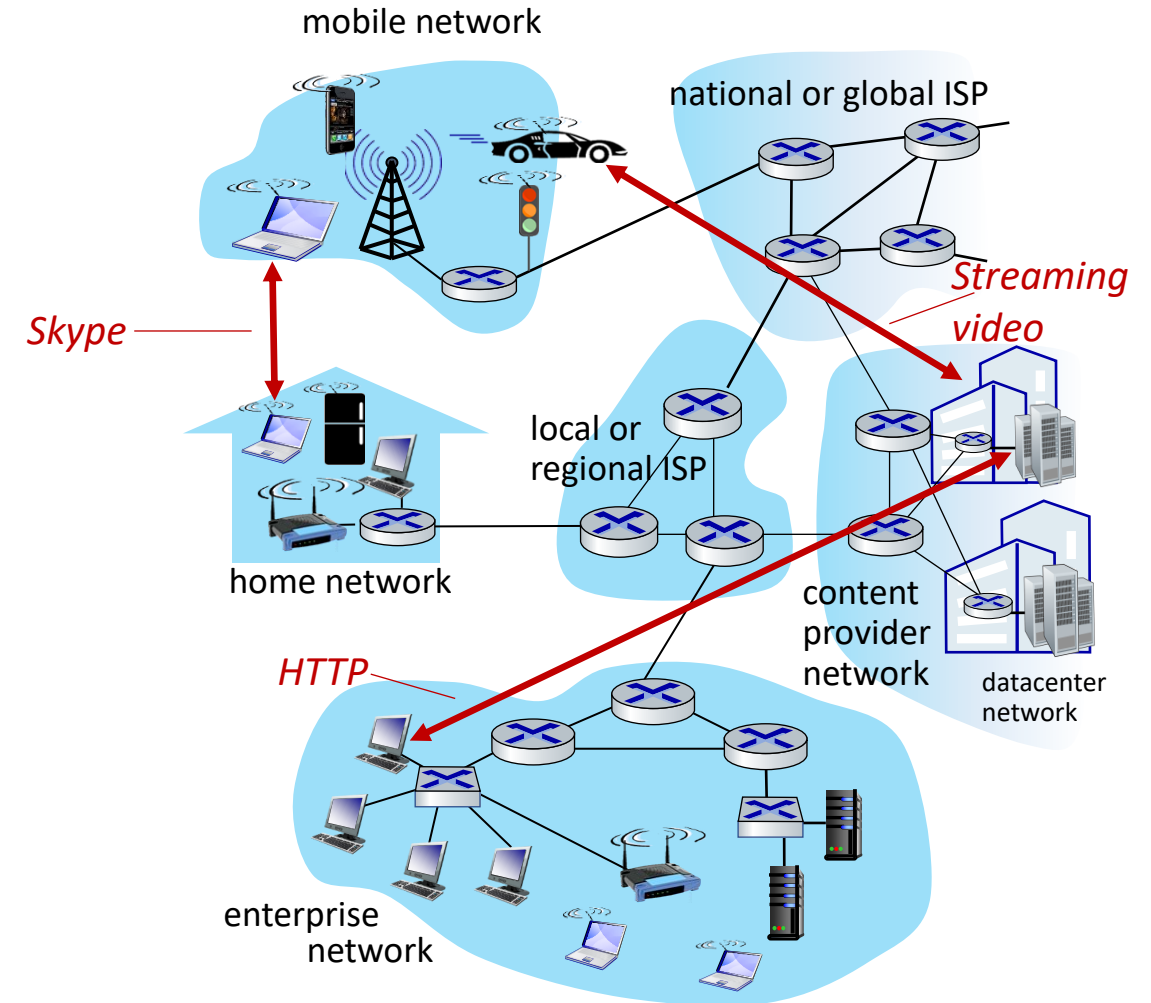
Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων - Εισαγωγή

- Διαδίκτυο – στατιστικά
- Δομή του Διαδικτύου
- Τεχνικές μεταγωγής
- Στοίβα πρωτοκόλλων Διαδικτύου
- Επίπεδο Δικτύου
- Επίπεδο Ζεύξης



Γιατί χρησιμοποιούμε το Διαδίκτυο

- Άνθρωποι που θέλουν να επικοινωνήσουν
 - Μέσω συσκευών / τερματικών
- Τερματικά (*hosts*) που τρέχουν **κατανεμημένες** εφαρμογές:
 - Web, streaming video, email, teleconferencing, games, e-commerce, social media, inter-connected appliances, ...



Διασυνδεδεμένες συσκευές



Amazon Echo



Διαδικτυακό ψυγείο



IP picture frame



Pacemaker & Monitor



Tweet-a-watt:
Μετρητής ενεργειακής
κατανάλωσης

bikes



Security Camera



Slingbox: remote
control cable TV



Web-enabled toaster +
weather forecaster



AR devices



cars



scooters



Internet phones



Gaming devices



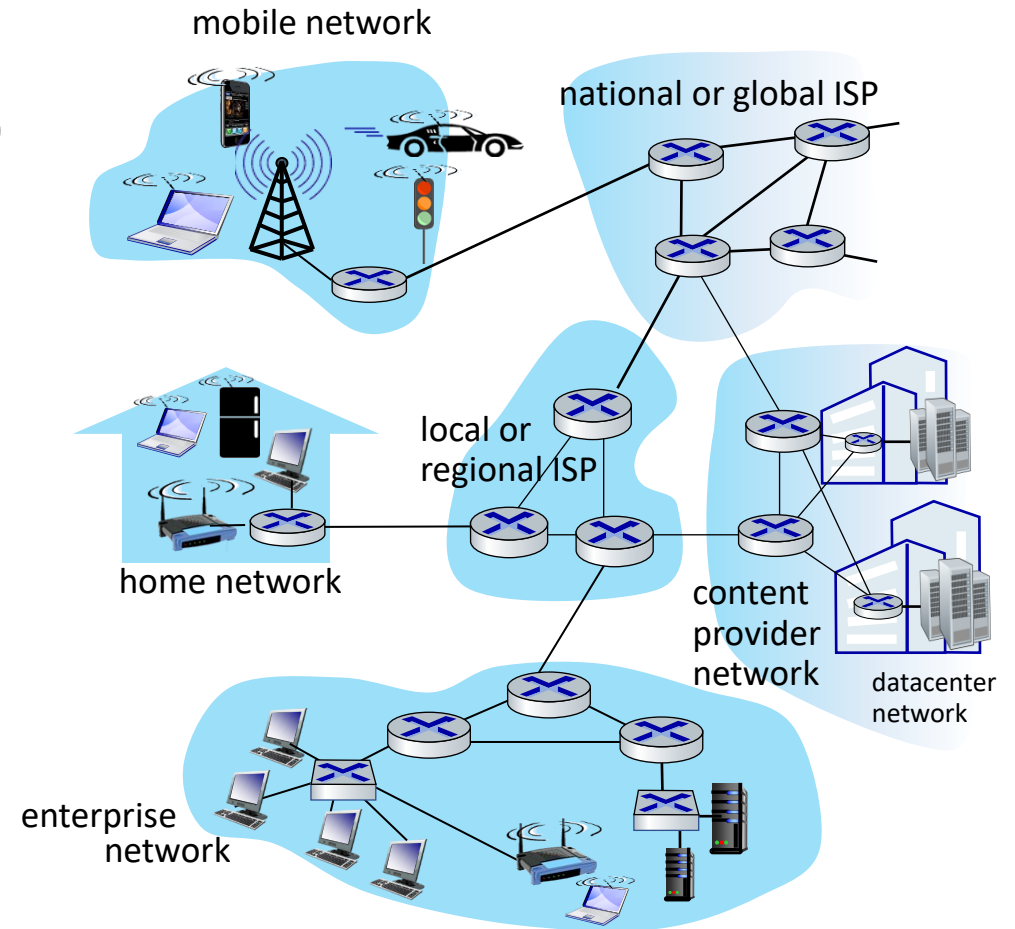
sensorized,
bed
mattress



Fitbit

Δομή του Διαδικτύου: δίκτυο δικτύων

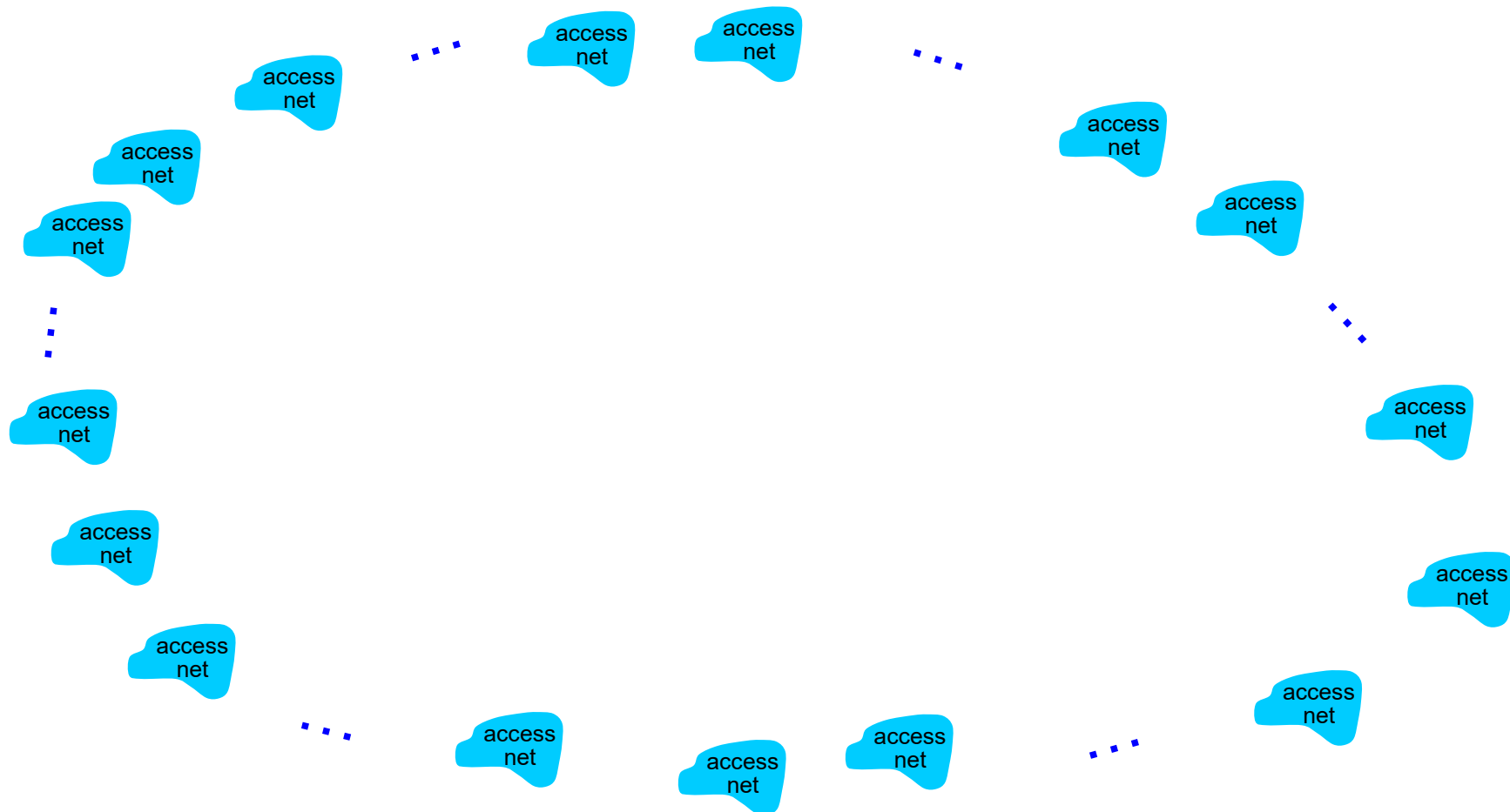
- Τερματικά συνδέονται στο Διαδίκτυο μέσω των **ISPs** (Internet Service Providers) **πρόσβασης**
- Οι ISPs πρόσβασης με τη σειρά τους πρέπει να διασυνδεθούν
 - ώστε όλα τα τερματικά να μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους
- Το **δίκτυο των δικτύων (Διαδίκτυο)** που προκύπτει είναι πολύπλοκο



Ας περιγράψουμε την δομή του Διαδικτύου βήμα-βήμα

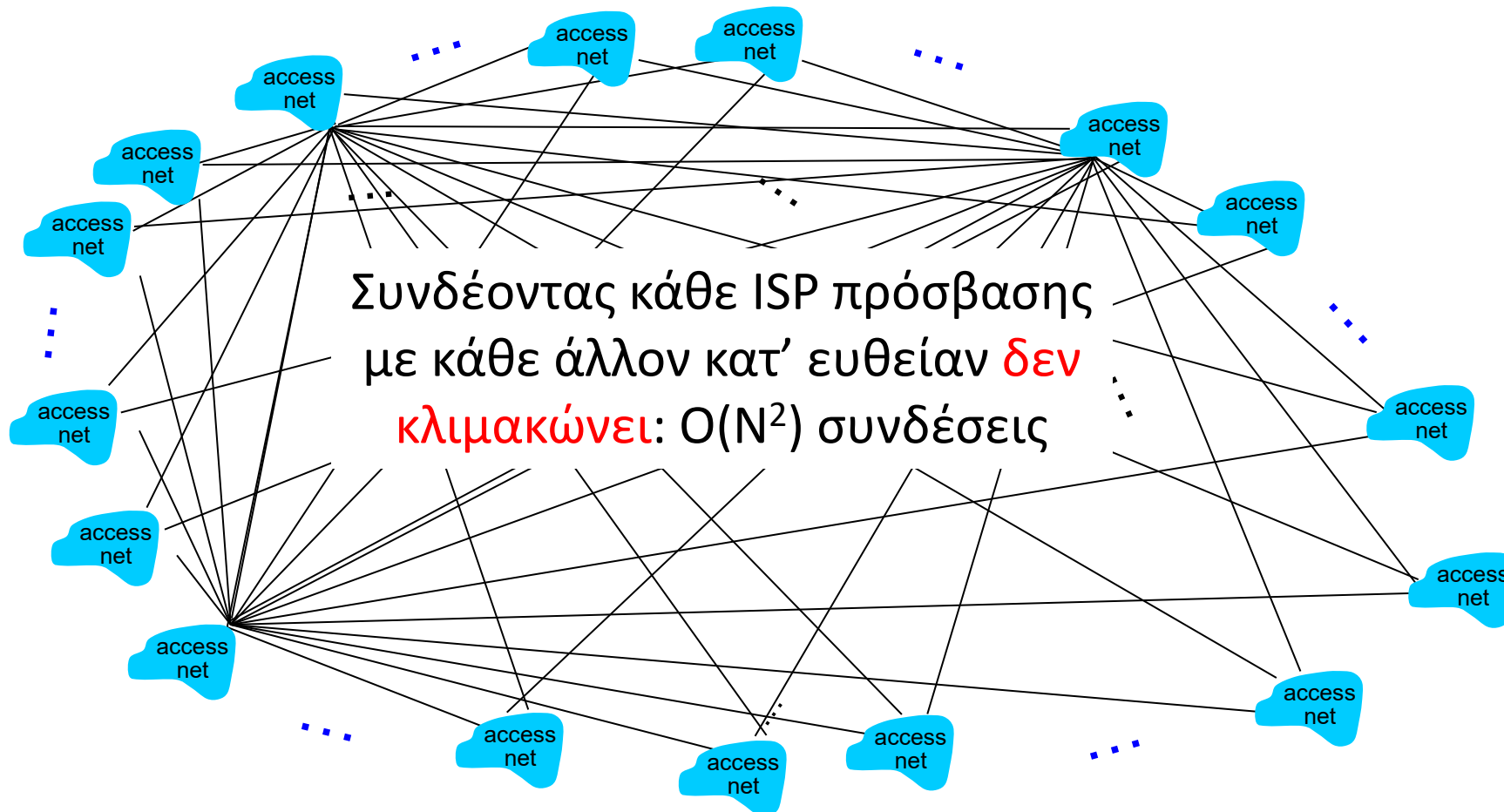
Δομή του Διαδικτύου: δίκτυο δικτύων

Ερώτηση: Δεδομένου ότι έχουμε εκατομμύρια ISPs πρόσβασης, πώς τους διασυνδέουμε;



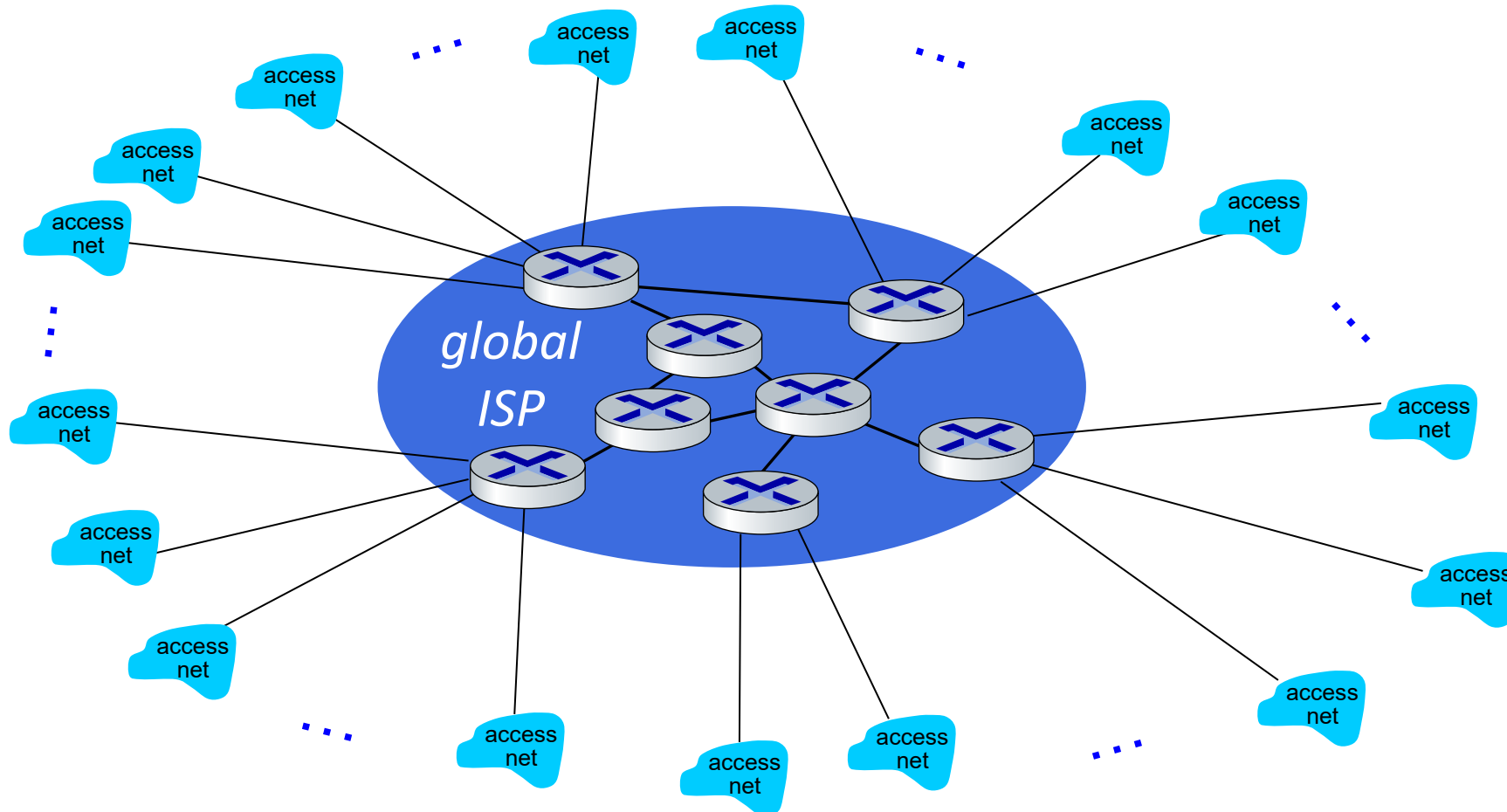
Δομή του Διαδικτύου: δίκτυο δικτύων

Ερώτηση: Δεδομένου ότι έχουμε εκατομμύρια ISPs πρόσβασης, πώς τους διασυνδέουμε;



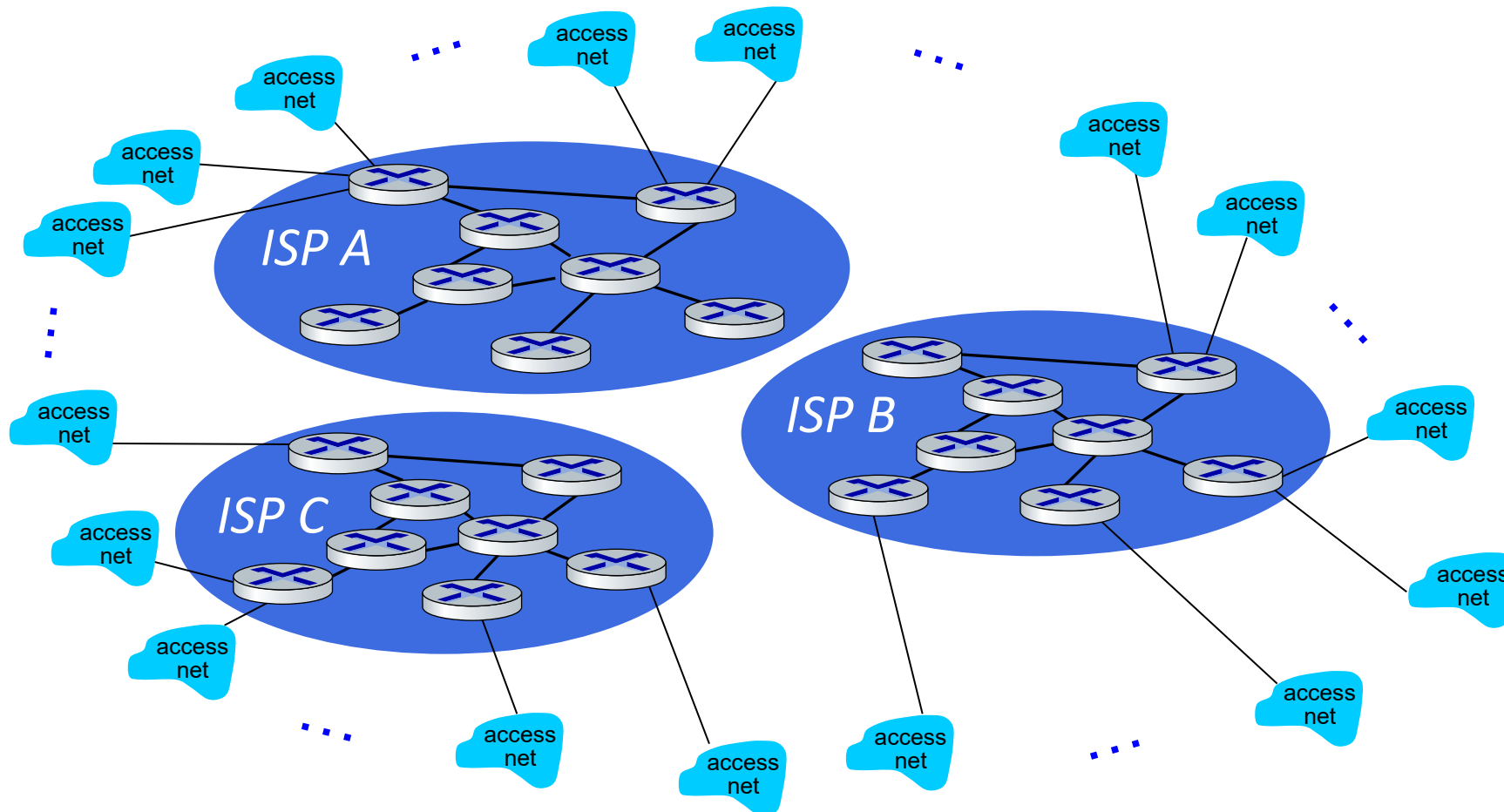
Δομή του Διαδικτύου: δίκτυο δικτύων

Επιλογή: σύνδεσε κάθε ISP πρόσβασης με ένα παγκόσμιο ISP;
Πελάτης και πάροχος ISP έχουν οικονομική συμφωνία



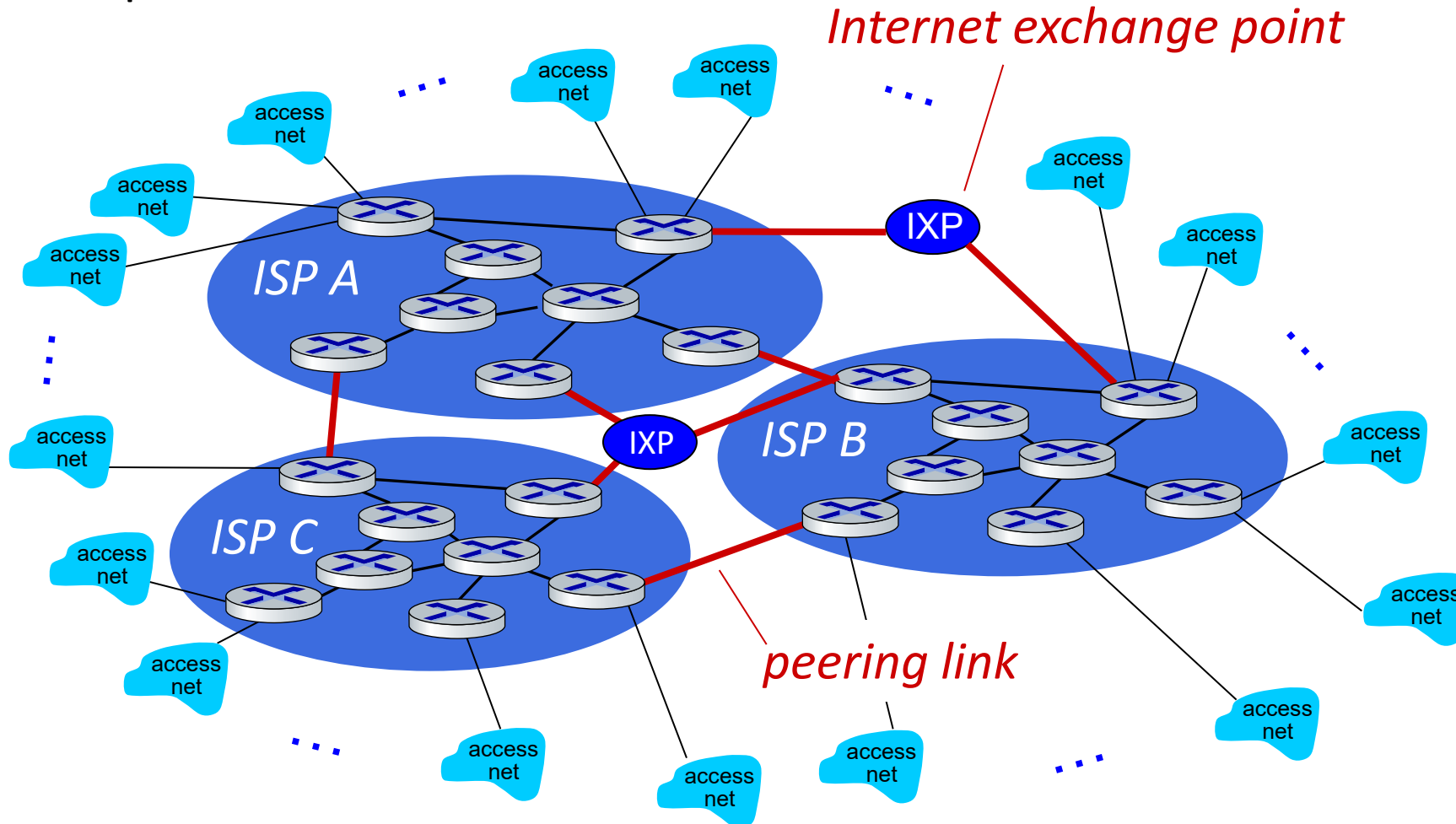
Δομή του Διαδικτύου: δίκτυο δικτύων

Αλλά αν ένας παγκόσμιος ISP είναι βιώσιμη επιχείρηση, θα υπάρξουν ανταγωνιστές ...



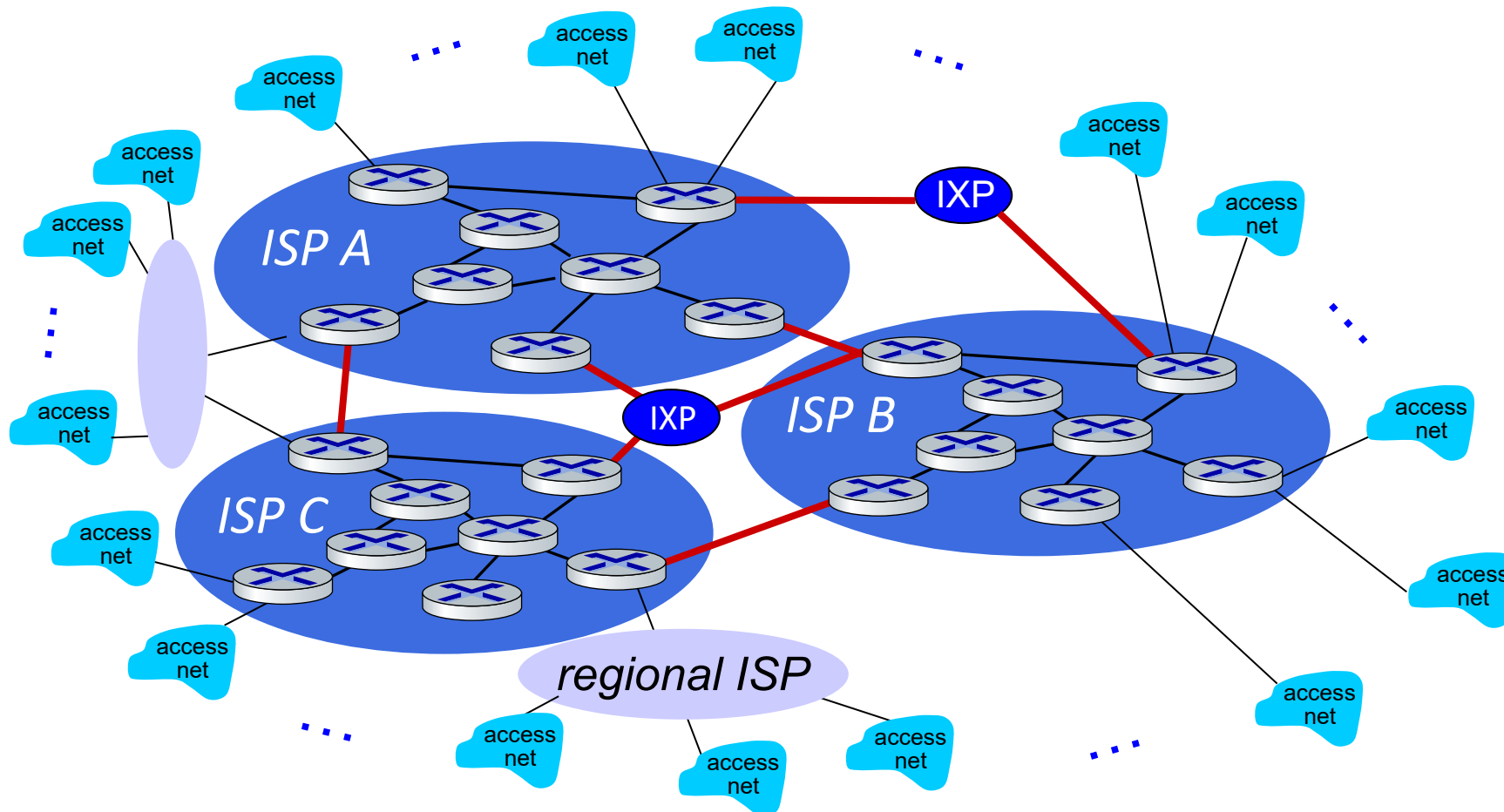
Δομή του Διαδικτύου: δίκτυο δικτύων

Αλλά αν ένας παγκόσμιος ISP είναι βιώσιμη επιχείρηση, θα υπάρξουν ανταγωνιστές ... οι οποίοι θα πρέπει να διασυνδεθούν



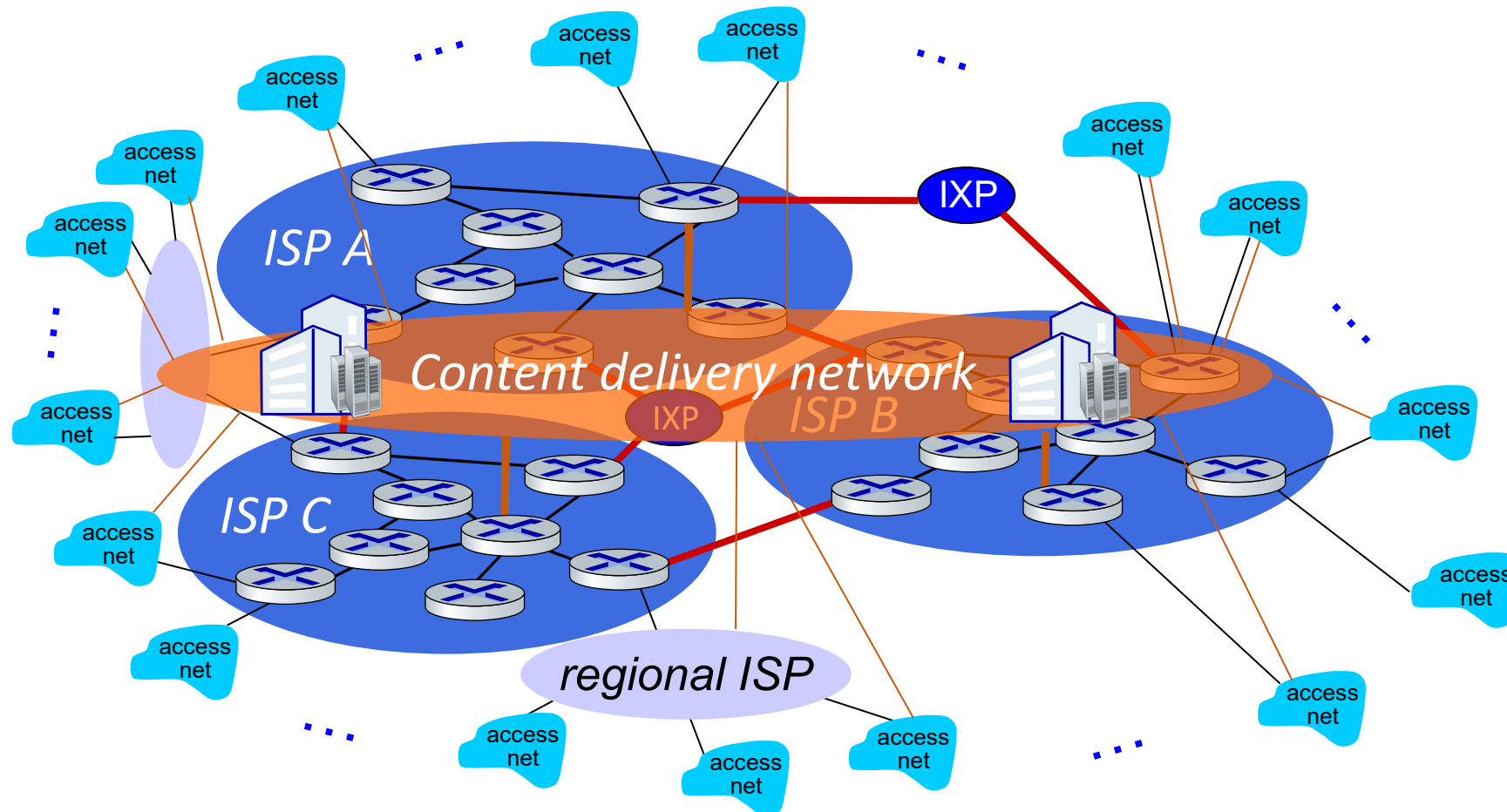
Δομή του Διαδικτύου: δίκτυο δικτύων

... και περιφερειακά δίκτυα μπορεί να αναδυθούν για τη διασύνδεση των δικτύων πρόσβασης στους ISPs

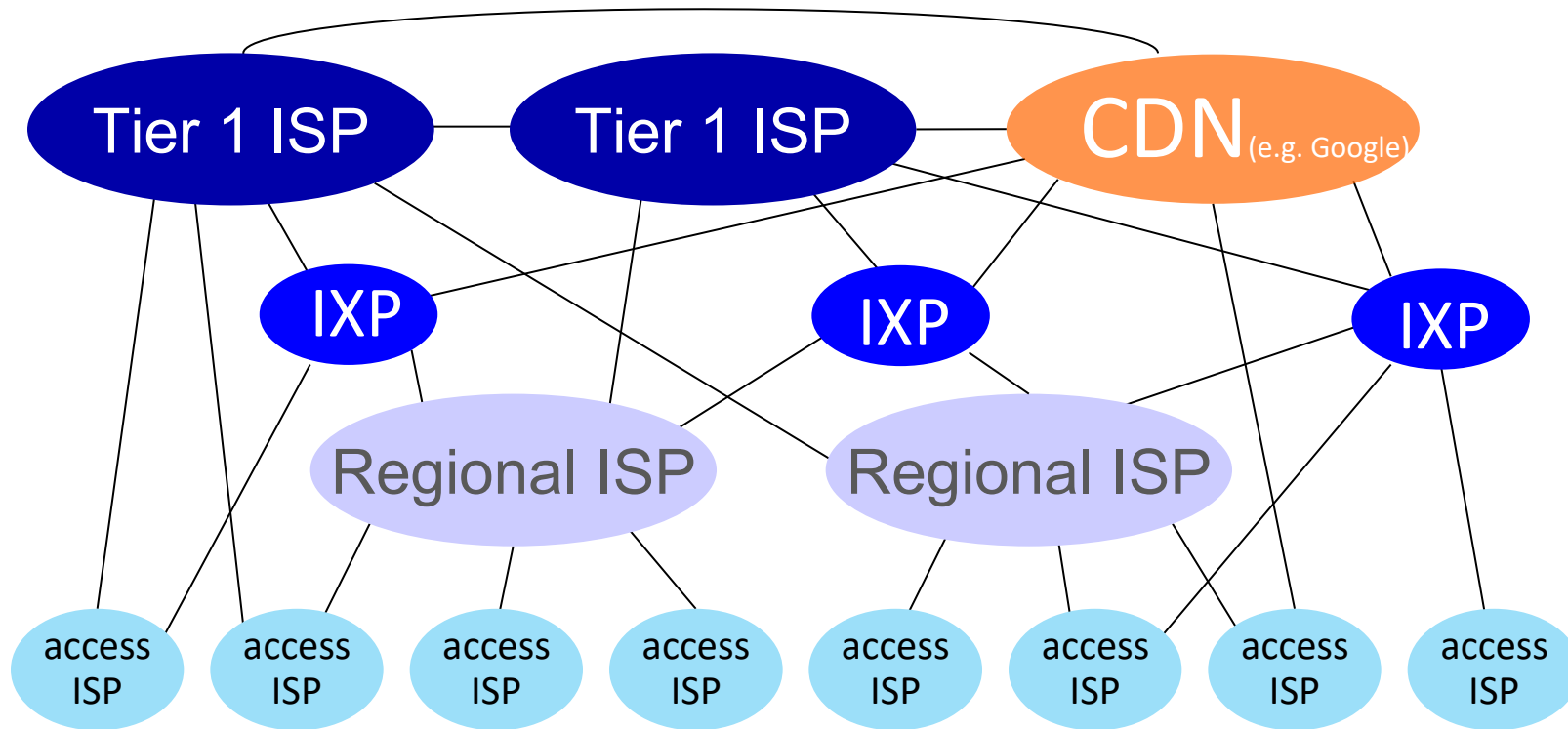


Δομή του Διαδικτύου: δίκτυο δικτύων

... και πάροχοι περιεχομένου (πχ, Google, Microsoft, Akamai) λειτουργούν τα δικά τους δίκτυα, για να φέρουν τις υπηρεσίες και περιεχόμενο πλησιέστερα στους χρήστες



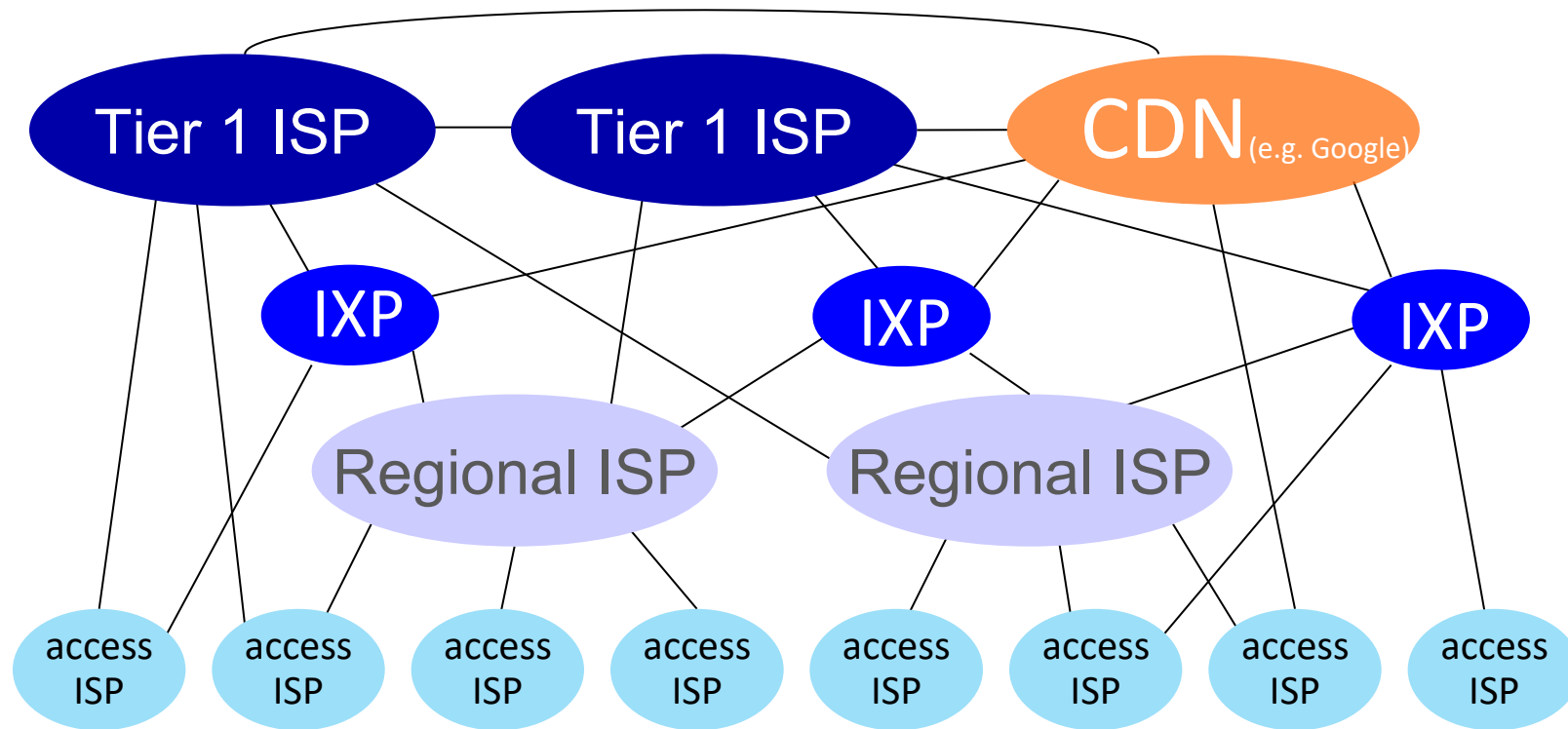
Δομή του Διαδικτύου: δίκτυο δικτύων



Στο κέντρο του Διαδικτύου: μικρός αριθμός διασυνδεδεμένων “Tier-1” δικτύων

- **“Tier-1” ISPs** (e.g., AT&T, Level 3, Sprint, NTT), διεθνή και εθνική κάλυψη
- **δίκτυα παρόχων περιεχομένου – CDN** (πχ, Google, Facebook): εταιρίες με κέντρα δεδομένων και ιδιωτικά δίκτυα που συνδέουν τα κέντρα δεδομένων τους στο Διαδίκτυο, παρακάμπτοντας μερικές φορές τους tier-1 και κάποιους περιφερειακούς ISPs

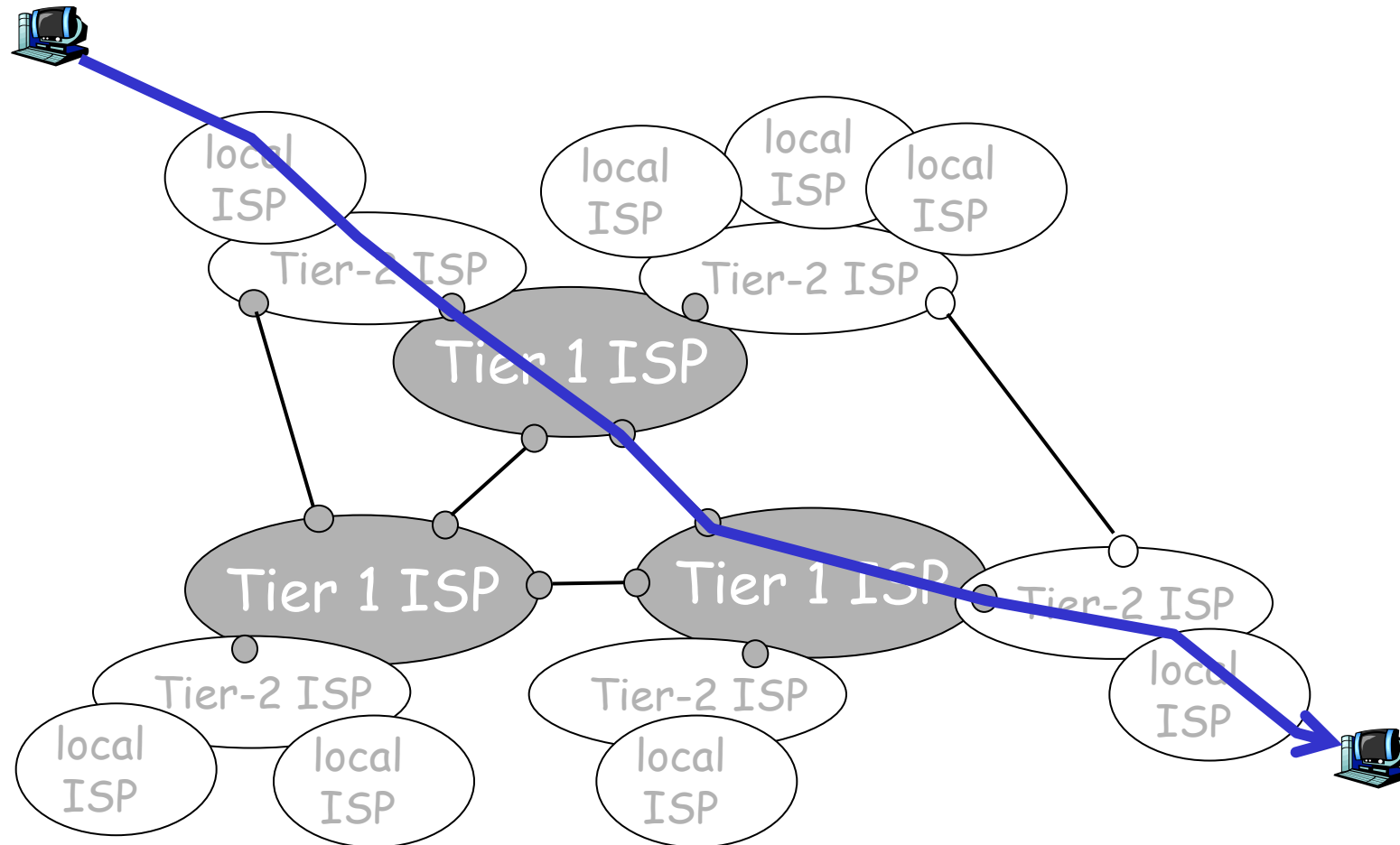
Δομή του Διαδικτύου: δίκτυο δικτύων



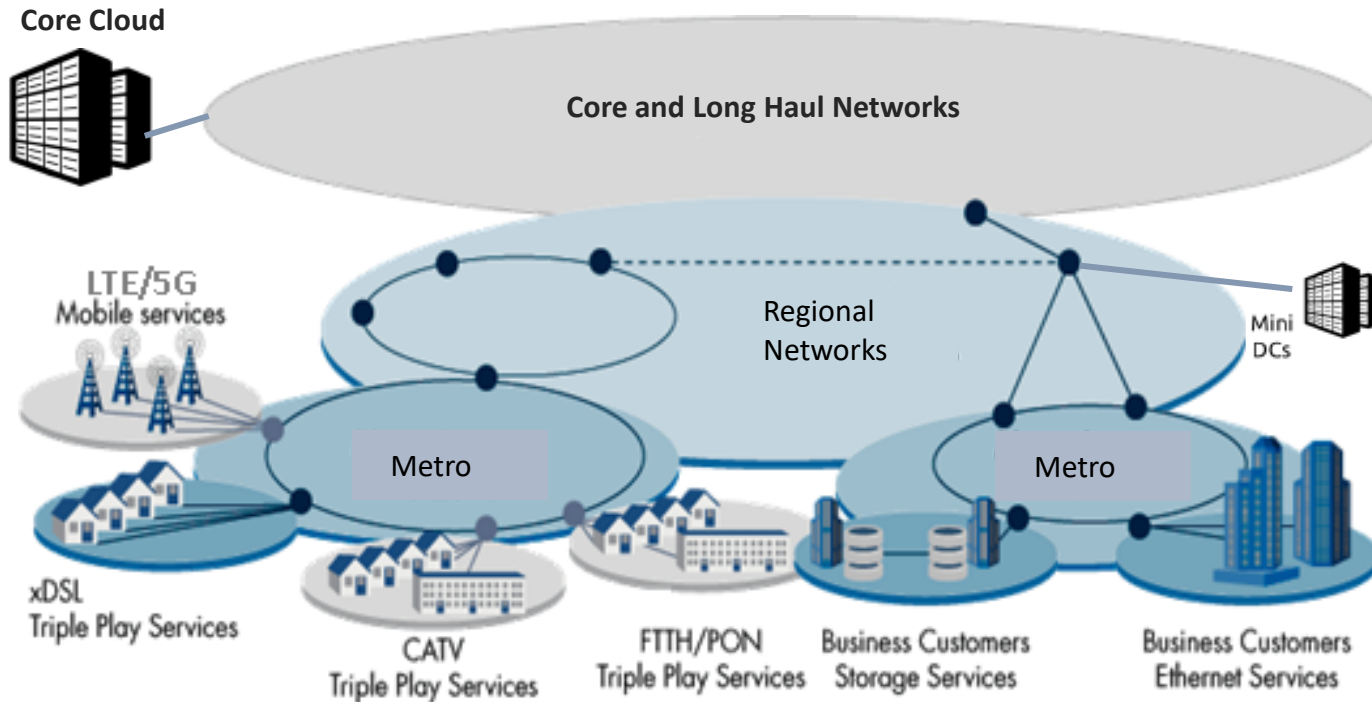
- Η ταξινόμηση σε Tiers είναι περισσότερο μια σύμβαση, δεν ορίζεται από κάποιον ρυθμιστικό φορέα, δεν υπάρχει επίσημος κατάλογος
- Υπάρχουν όμως **οικονομικές συμφωνίες μεταξύ ISPs** (που ορίζουν **ισοδυναμία ή σχέση πελάτη/παρόχου**)
- Ένας ISP μπορεί να έχει διαφορετικά δίκτυα και να λειτουργεί σε διαφορετικά tier
π.χ. η AT&T έχει παγκόσμιο δίκτυο (Tier1), ηπειρωτικό στις ΗΠΑ (regional), access σε πόλεις των ΗΠΑ και αλλού

Δομή του Διαδικτύου: δίκτυο δικτύων

Ένα πακέτο περνάει μέσα από πολλά δίκτυα!



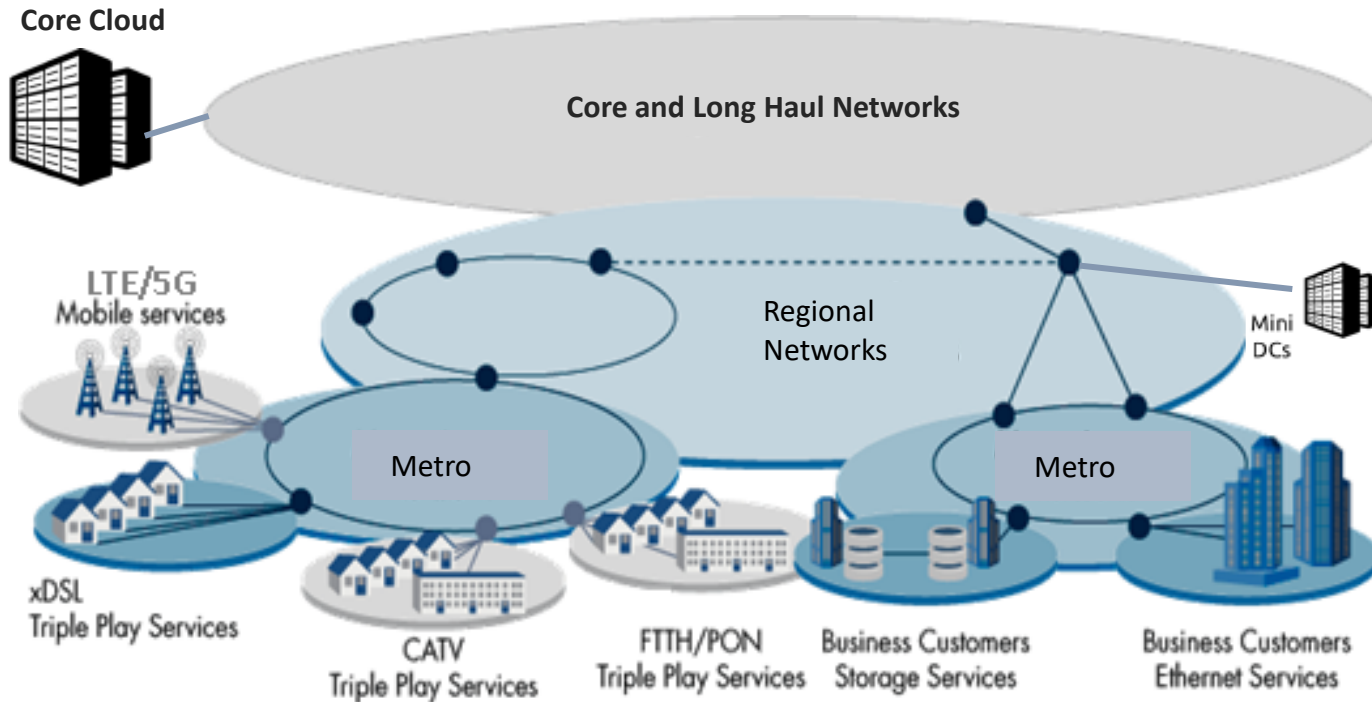
Δομή του διαδικτύου – Τμήματα



- Τα δίκτυα στα διαφορετικά επίπεδα ISP χρησιμοποιούν **διαφορετικές δικτυακές τεχνολογίες**
- **Δίκτυα κορμού** (core, backbone)
- **Περιφερειακά** (regional)
- **Μητροπολιτικά** (metro)
- **Δίκτυα πρόσβασης** (από χρήστη ως τον πρώτο δρομολογητή)

- Παγκόσμια Δίκτυα κορμού - Tier 1 ISPs
- Περιφερειακά δίκτυα και μικρότερα δίκτυα κορμού – Regional ISPs
- Μητροπολιτικά και πρόσβασης – Access ISPs

Δομή του διαδικτύου – Τμήματα

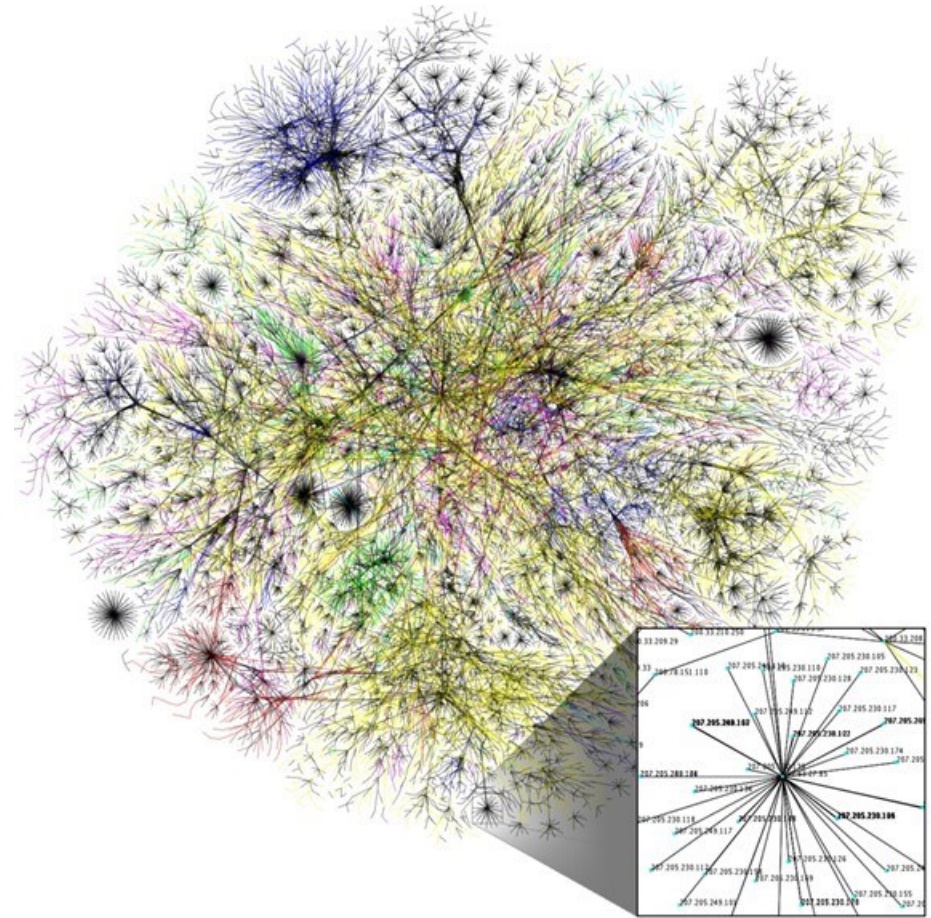


- Τα δίκτυα στα διαφορετικά επίπεδα ISP χρησιμοποιούν **διαφορετικές δικτυακές τεχνολογίες**
- **Δίκτυα κορμού** (core, backbone)
- **Περιφερειακά** (regional)
- **Μητροπολιτικά** (metro)
- **Δίκτυα πρόσβασης** (από χρήστη ως τον πρώτο δρομολογητή)

Στο μάθημα Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων θα μελετήσουμε τις **αρχιτεκτονικές των διαφορετικών δικτύων** που απαρτίζουν το Διαδίκτυο

Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων - Εισαγωγή

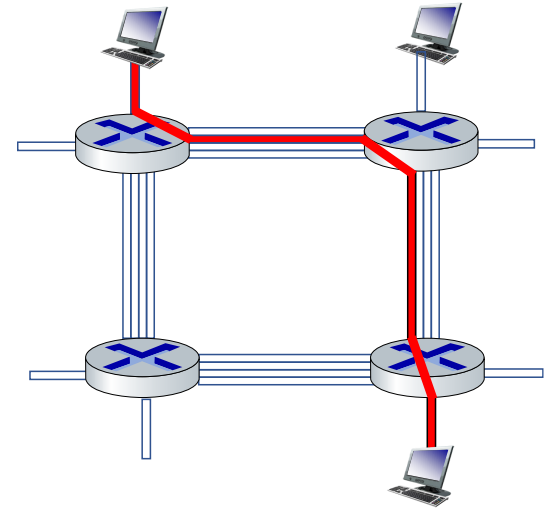
- Διαδίκτυο – στατιστικά
- Δομή του Διαδικτύου
- Τεχνικές μεταγωγής
- Στοίβα πρωτοκόλλων Διαδικτύου
- Επίπεδο Δικτύου
- Επίπεδο Ζεύξης



Τεχνικές μεταγωγής (switching techniques)

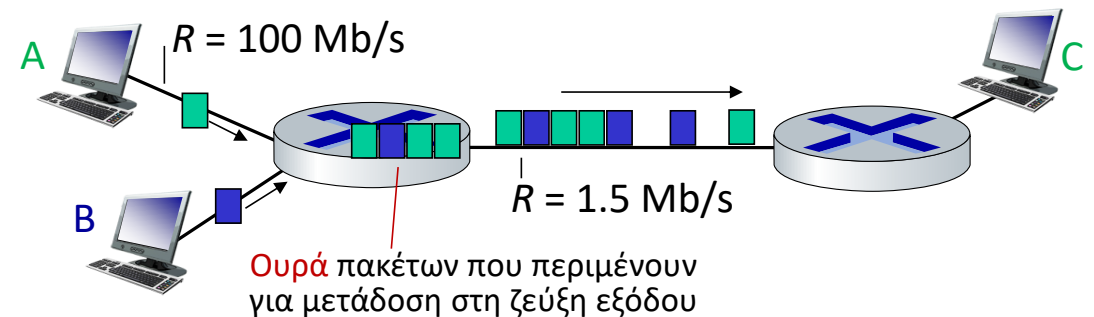
■ Μεταγωγή κυκλώματος (Circuit Switching)

- Κάθε σύνδεσμος 'σπάει' σε μικρότερα κομμάτια, κάθε κομμάτι δεσμεύεται αποκλειστικά για μία κλήση (call)
- Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε κλασσικά τηλεφωνικά δίκτυα
- Αλλά και σε οπτικά δίκτυα - μητροπολιτικά και κορμού, όπου η κίνηση δεν είναι δυναμική / έχει συναθροιστεί



■ Μεταγωγή πακέτου (Packet switching)

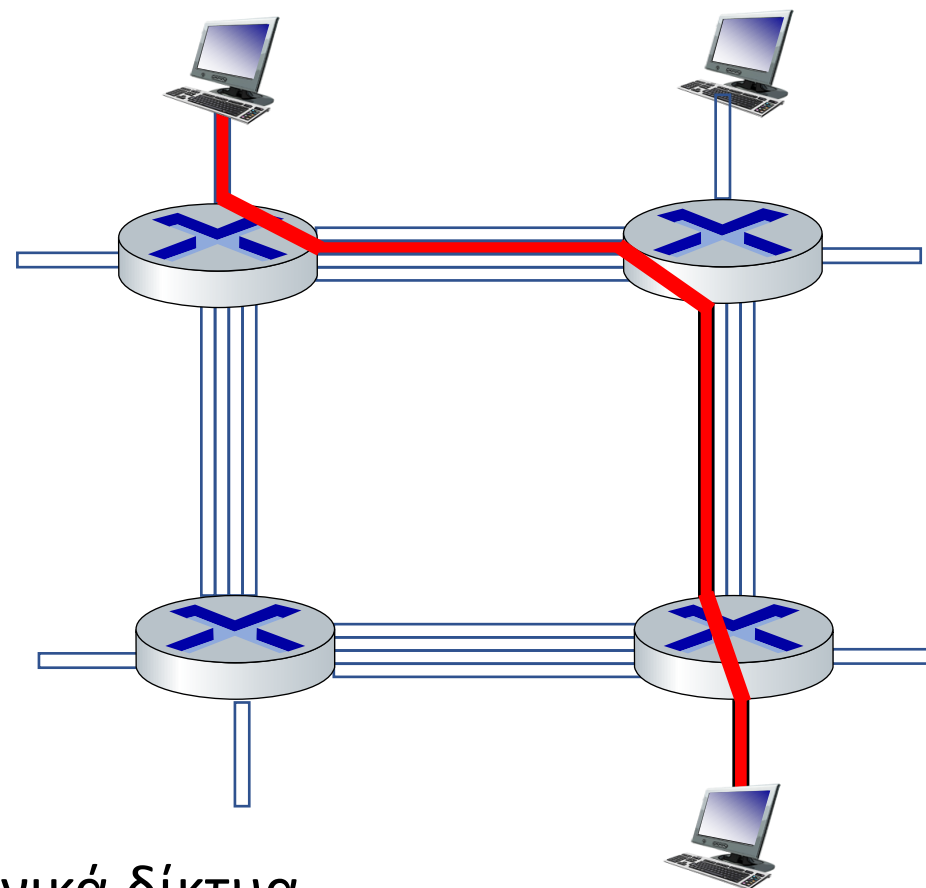
- Αυτοδύναμα πακέτα (με πληροφορίες για να φτάσουν στον προορισμό τους), αποθηκεύονται και προωθούνται σε κάθε ενδιάμεσο δρομολογητή
- Η βασική τεχνική του Διαδικτύου



Μεταγωγή κυκλώματος

Πόροι από άκρο-σε-άκρο δεσμεύονται και χρησιμοποιούνται για την «κλήση» μεταξύ πηγής και προορισμού:

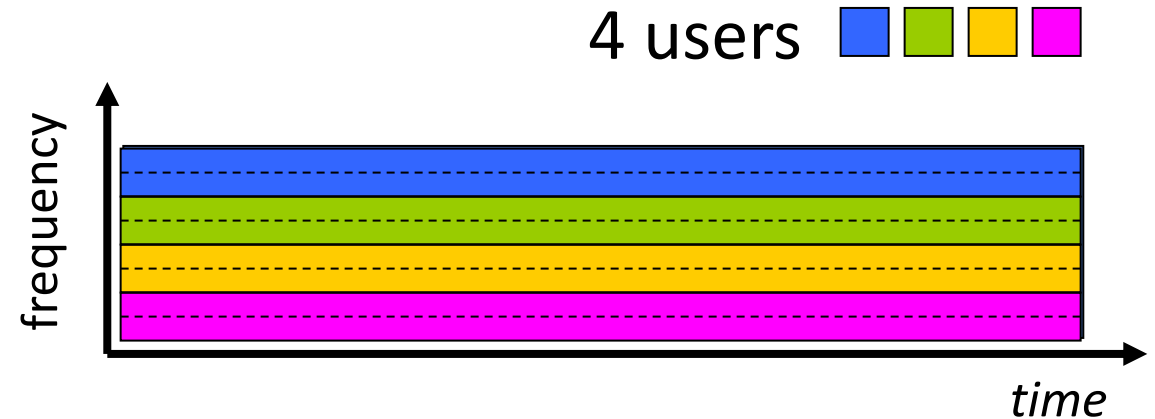
- στο σχήμα, κάθε ζεύξη έχει 4 κυκλώματα
 - η κλήση παίρνει το 2ο κύκλωμα στην πάνω ζεύξη και το 1ο κύκλωμα στη δεξιά ζεύξη
- αποκλειστική χρήση πόρων: όχι μοίρασμα
 - εγγυημένη απόδοση
- κύκλωμα **αδρανές** εάν δεν χρησιμοποιείται από την κλήση (**no sharing**)
- χρησιμοποιείται ευρύτατα σε κλασσικά τηλεφωνικά δίκτυα και στα δίκτυα κορμού



Διαμοιρασμός καναλιού: FDM, TDM, CDM

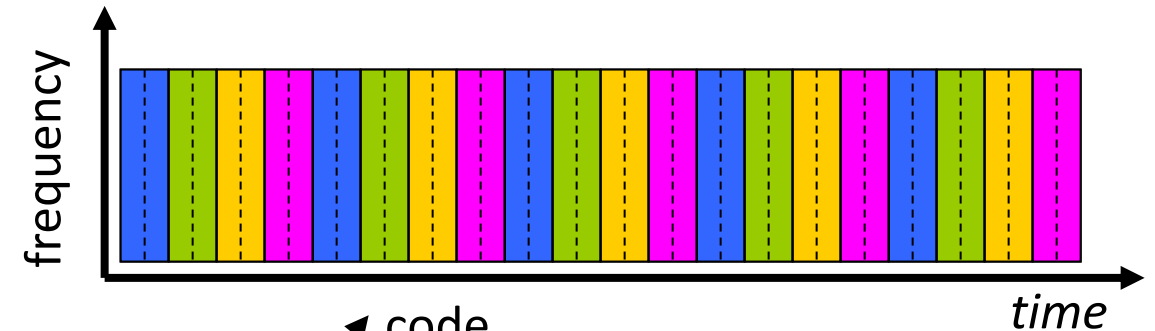
Frequency Division Multiplexing (FDM)

- Το φάσμα συχνοτήτων κατάλληλων για μετάδοση διαιρείται σε (στενές) ζώνες συχνοτήτων
- Σε κάθε κλήση δίδεται η δική της ζώνη και μπορεί να μεταδώσει με το μέγιστο ρυθμό της ζώνης



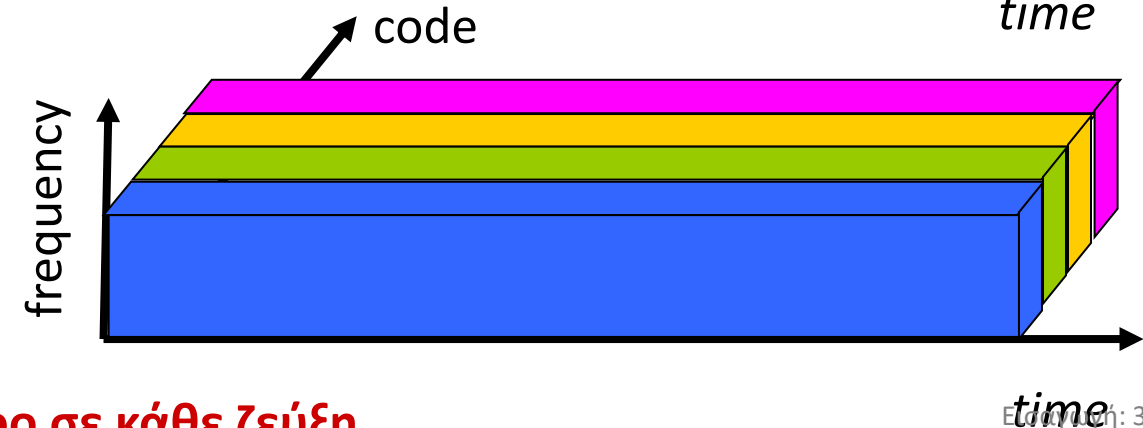
Time Division Multiplexing (TDM)

- Ο χρόνος διαιρείται σε χρονοθυρίδες (timeslots)
- Σε κάθε κλήση δίδονται περιοδικές χρονοθυρίδες, και μπορεί να μεταδώσει με το μέγιστο ρυθμό του όλου του φάσματος μόνο στις χρονοθυρίδες της



Code Division Multiplexing (CDM)

- Η κάθε κλήση χρησιμοποιεί ξεχωριστό κώδικα, 'ορθογώνιοι' κώδικες χωρίς παρεμβολή μεταξύ τους
- Χρησιμοποιεί όλο τον χρόνο και το φάσμα

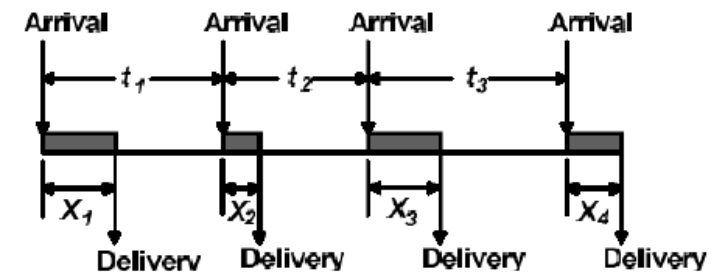
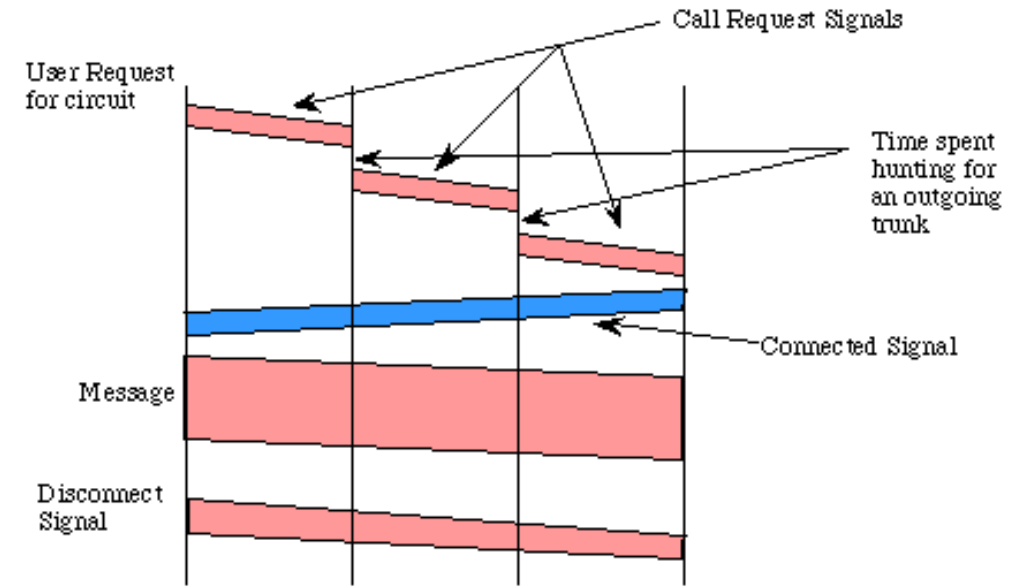


Χρήσιμα και στη μεταγωγή πακέτου

Μεταγωγή κυκλώματος: **Δέσμευση από-άκρο-σε άκρο σε κάθε ζεύξη**

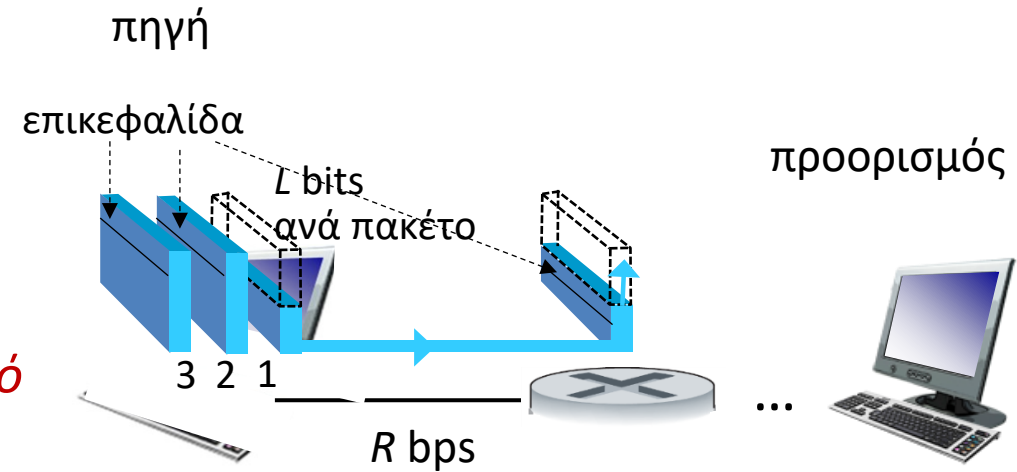
Μεταγωγή κυκλώματος

- Απαιτεί 3 φάσεις
 - Εγκατάσταση κυκλώματος (κλήσης)
 - Μεταφορά δεδομένων
 - Τερματισμός κυκλώματος
- Ενδέχεται μια κλήση να μπλοκαριστεί (blocking – busy signal)
- Μη αποδοτική χρήση πόρων (κυρίως αν υπάρχει εκρηκτική bursty κίνηση)
- Χρειάζεται χρόνος για την εγκατάσταση της σύνδεσης, αλλά στη συνέχεια τα δεδομένα περνάνε χωρίς (ή με μικρή και σταθερή) καθυστέρηση



Μεταγωγή πακέτου

- Τερματικό - λειτουργία αποστολής πακέτων
 - παίρνει το μήνυμα της εφαρμογής
 - το σπάει σε μικρότερα κομμάτια, γνωστά ως **πακέτα**, **μήκους L bits**
 - μεταδίδει το πακέτο στο δίκτυο πρόσβασης με **ρυθμό μετάδοσης R bits/sec**
 - Στα δίκτυα: **ρυθμός μετάδοσης = χωρητικότητα = εύρος ζώνης ζεύξης**
 - Στο φυσικό επίπεδο: **χωρητικότητα $\neq$ εύρος ζώνης ζεύξης**
- **Καθυστέρηση μετάδοσης πακέτου: L/R**
- Κάθε πακέτο είναι **αυτοδύναμο**, έχει πληροφορία (σε επικεφαλίδα) ώστε να φτάσει στον προορισμό



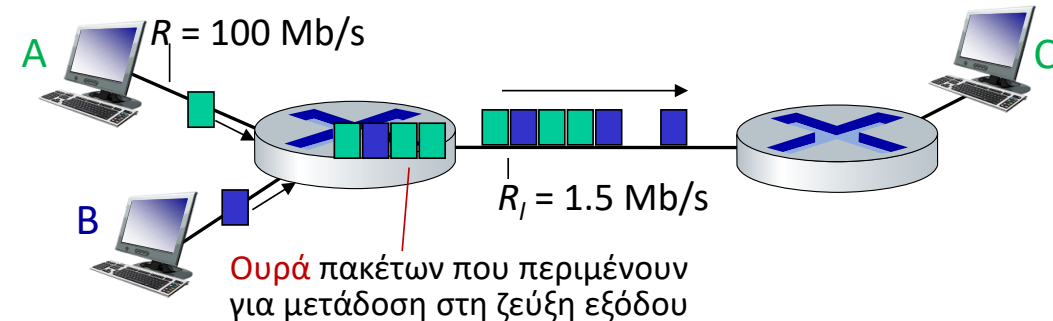
Παράδειγμα:

- $L = 10$ Kbits
- $R = 100$ Mbps
- Καθυστέρηση μετάδοσης (ενός άλματος) = 0.1 msec

Μεταγωγή πακέτου – αποθήκευση και προώθηση

■ Αποθήκευση και προώθηση (store and forward)

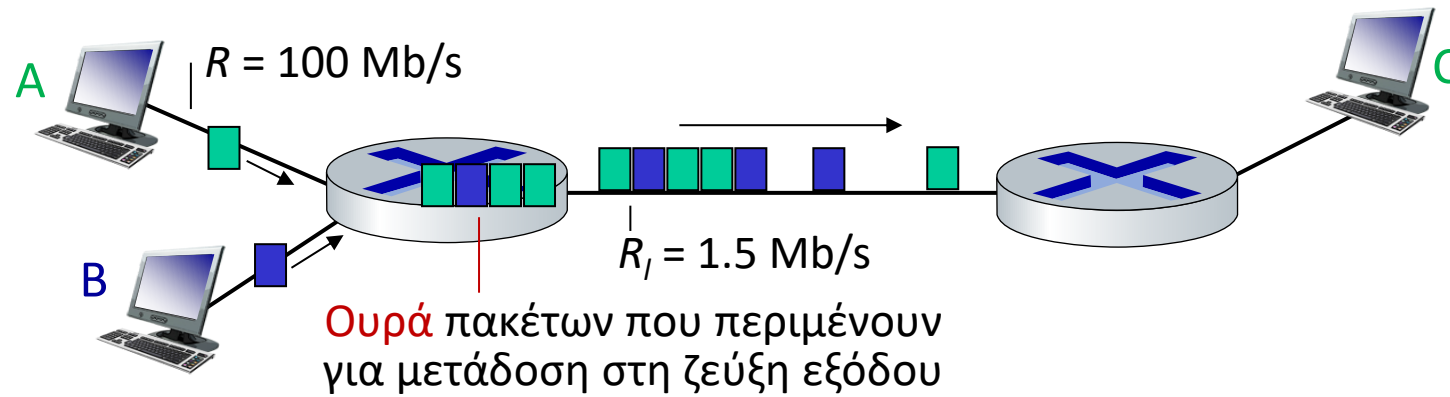
- Όλο το πακέτο πρέπει να φτάσει/ αποθηκευτεί στον δρομολογητή
- Ο δρομολογητής κοιτάζει την επικεφαλίδα για να αποφασίσει την έξοδο/ζεύξη
- Το πακέτο αποθηκεύεται στην **ουρά** εξόδου
- Στην ουρά **συναθροίζονται πακέτα από πολλές εισερχόμενες ζεύξεις** που προωθούνται στη ζεύξη
- Το πρώτο πακέτο μεταδίδεται με τον ρυθμό της ζεύξης R , καθυστέρηση μετάδοσης (transmission) $= L/R$
- Καθυστέρηση μετάδοσης = χρόνος αποθήκευσης και προώθησης στον επόμενο (=store & forward)
- $N-1$ ενδιάμεσοι δρομολογητές: N store&forward



Παράδειγμα:

- $L = 10 \text{ Kbits}$
- 9 ενδιάμεσοι δρομολογητές
- $R = 100 \text{ Mbps}$ (σε όλες τις ζεύξεις)
- Καθυστέρηση μετάδοσης (χωρίς αναμονή κλπ) $= 1 \text{ msec}$

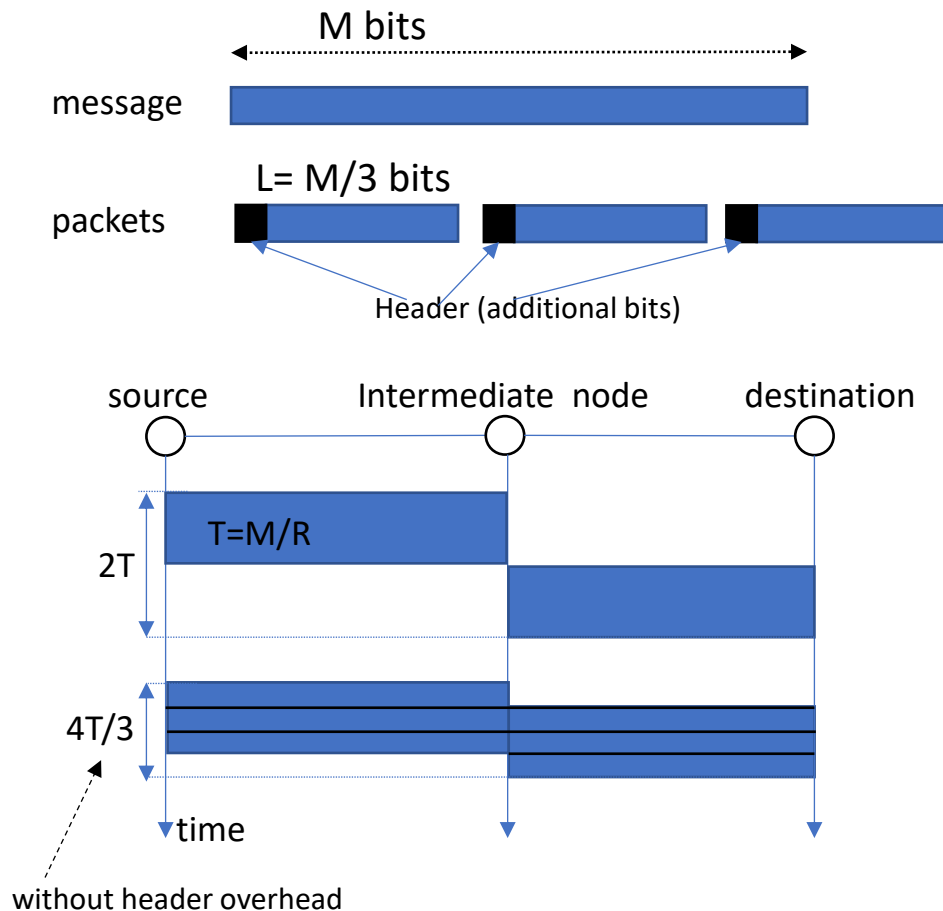
Μεταγωγή πακέτου: στατιστική πολυπλεξία (statistical multiplexing) και αναμονή (queueing)



- **Στατιστική πολυπλεξία:** συγχώνευση πακέτων από πολλές εισόδους, η εξερχόμενη ζεύξη **μοιράζεται δυναμικά** σε όποιον την χρειάζεται $\rightarrow$ **αποδοτική χρήση**
- Φαινόμενα **αναμονής** συμβαίνουν όταν το φορτίο φθάνει γρηγορότερα από ότι μπορεί να εξυπηρετηθεί για κάποια χρονική περίοδο
 - τα πακέτα δημιουργούν ουρά περιμένοντας να μεταδοθούν
 - πακέτα μπορεί να **πεταχτούν** (απωλεσθούν) εάν η μνήμη (buffer) γεμίσει



Μεταγωγή πακέτου - Πακετοποίηση



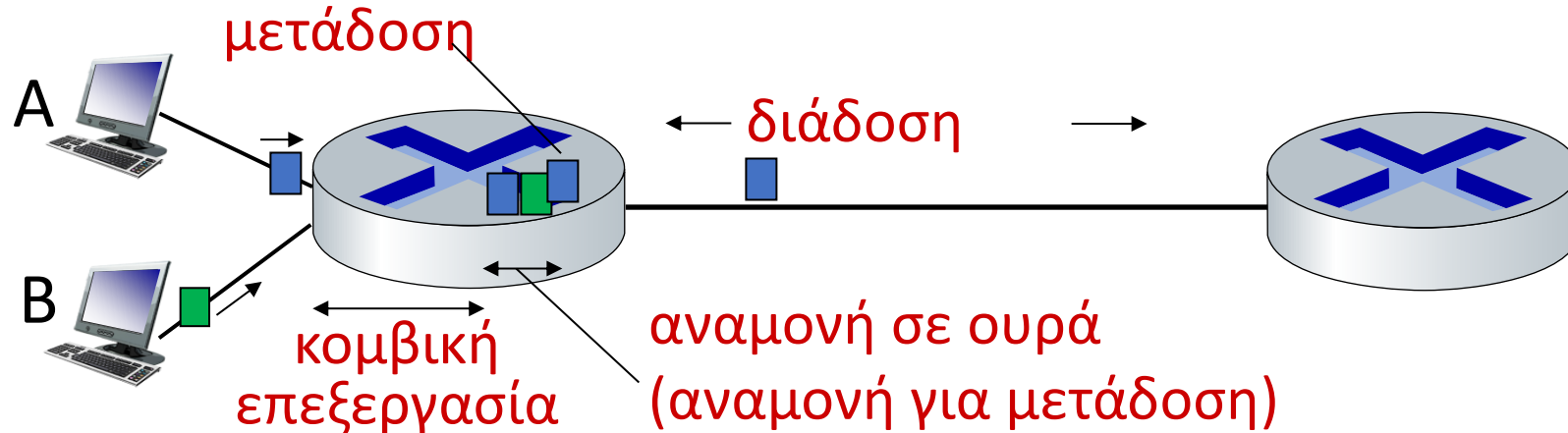
■ Πλεονεκτήματα:

- Μικρότερη καθυστέρηση
- Ευκολότερη διαχείριση μνήμης
- Ευελιξία στη δρομολόγηση

■ Μειονεκτήματα

- Μεγαλύτερος επικοινωνιακός (επιπλέον bits για την επικεφαλίδα) και υπολογιστικός φόρτος (εξέταση επικεφαλίδων σε κάθε πακέτο)
- Χρειάζεται επανασυναρμολόγηση του μηνύματος στον προορισμό

Καθυστέρηση πακέτου: Τέσσερις συνιστώσες



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

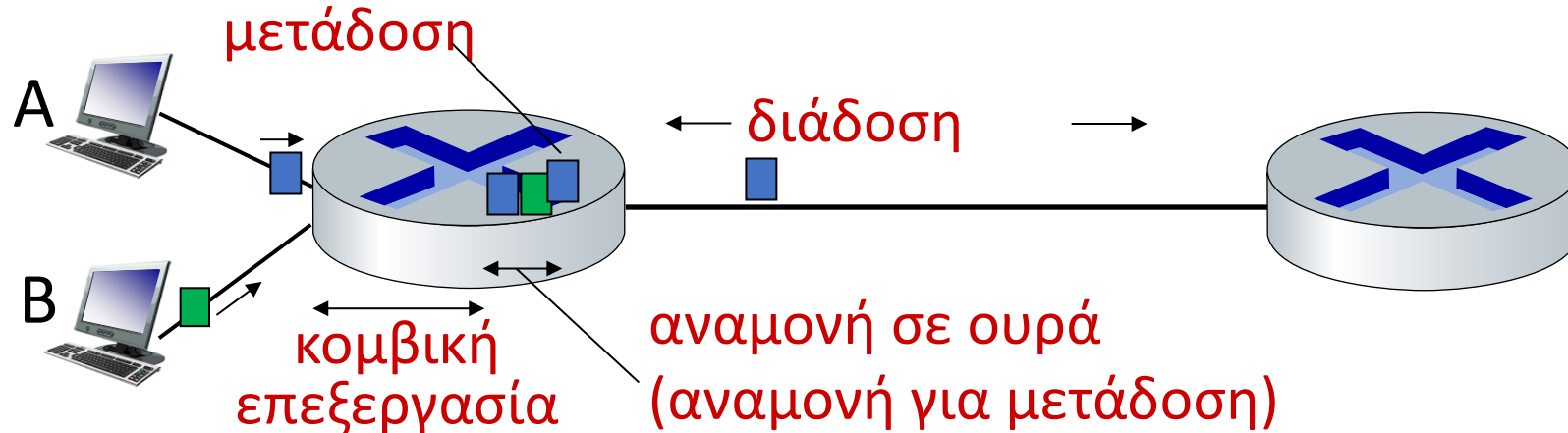
d_{proc} : καθυστέρηση κομβικής επεξεργασίας

- έλεγχος σφαλμάτων
- καθορισμός ζεύξης εξόδου (ταίριασμα)
- συνήθως < microsecs

d_{queue} : καθυστέρηση αναμονής

- χρόνος αναμονής στη ζεύξη εξόδου για μετάδοση
- εξαρτάται από το βαθμό συμφόρησης του δρομολογητή

Καθυστέρηση πακέτου: Τέσσερις συνιστώσες



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

d_{trans} : καθυστέρηση μετάδοσης
(= χρόνος αποθήκευσης στον επόμενο κόμβο)

- L = μήκος πακέτου (bits),
- R = εύρος ζώνης ζεύξης (bps)
- $d_{\text{trans}} = L/R$

d_{prop} : καθυστέρηση διάδοσης

- d = μήκος της φυσικής ζεύξης
- s = ταχύτητα διάδοσης στο μέσο ($\sim 2 \times 10^8$ m/s)
- $d_{\text{prop}} = d/s$

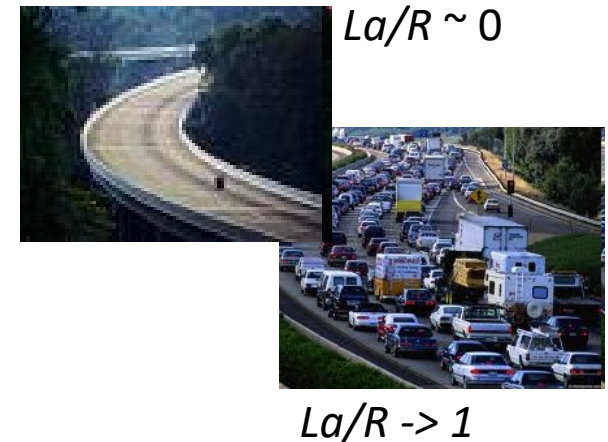
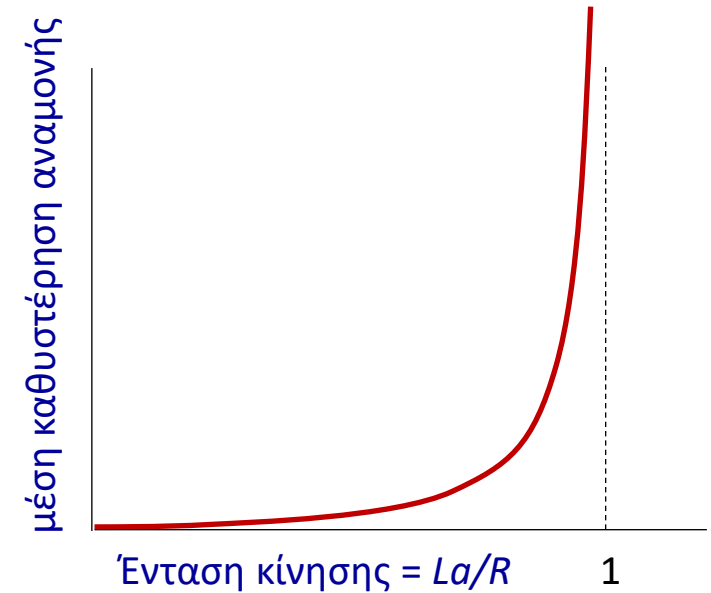
d_{trans} και d_{prop}
Εντελώς διαφορετικά!

Καθυστέρηση αναμονής

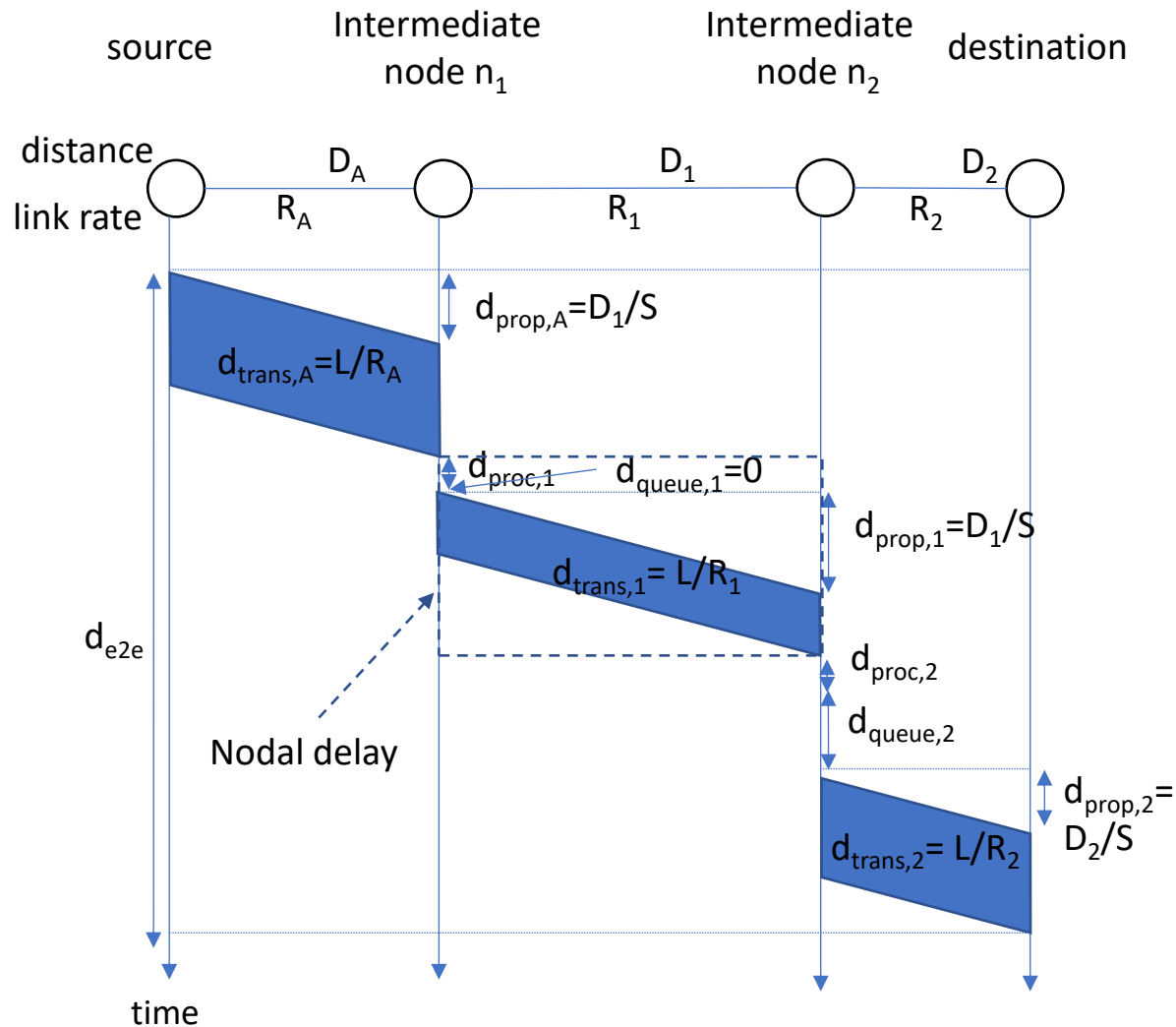
- a : μέσος ρυθμός άφιξης πακέτων (pkt/sec)
- L : μήκος πακέτου (bits)
- R : χωρητικότητα ζεύξης (ρυθμός μετάδοσης - bps)

$$\frac{L \cdot a}{R} : \frac{\text{ρυθμός άφιξης bits}}{\text{ρυθμός εξυπηρέτησης bits}} \quad \text{“ένταση κίνησης”}$$

- $La/R \sim 0$: μικρή μέση καθυστέρηση αναμονής
- $La/R \rightarrow 1$: μεγάλη μέση καθυστέρηση αναμονής
- $La/R > 1$: εμφανίζεται περισσότερη «δουλειά» από όση μπορεί να εξυπηρετηθεί – μέση καθυστέρηση άπειρη!



Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο



- Καθυστέρηση κόμβου i

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

- Καθυστέρηση των ενδιάμεσων κόμβων

$$\sum_{\text{node } i \text{ in path}} d_{\text{nodal},i} =$$

$$\sum_{\text{node } i \text{ in path}} d_{\text{proc},i} + d_{\text{queue},i} + d_{\text{trans},i} + d_{\text{prop},i}$$

- Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο

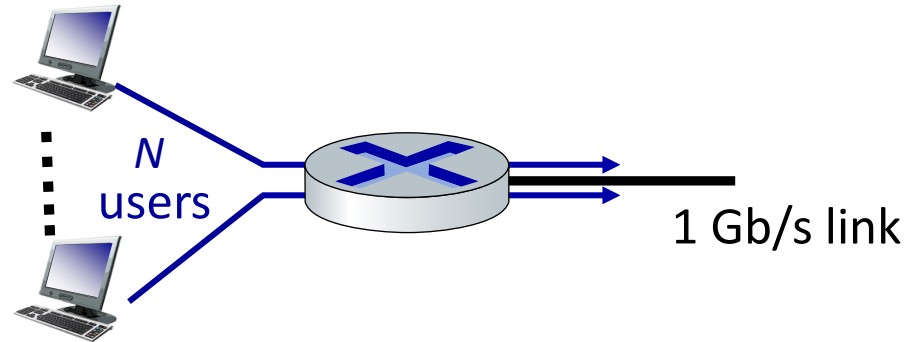
$$d_{e2e} = d_{\text{trans},A} + d_{\text{prop},A} + \sum_{\text{node } i \text{ in path}} d_{\text{nodal},i}$$

(A: access/first link)

Μεταγωγή πακέτου έναντι μεταγωγής κυκλώματος

Παράδειγμα:

- Ζεύξη 1 Gb/s
- Κάθε χρήστης:
 - 100 Mb/s όταν «ενεργός»
 - ενεργός 10% του χρόνου



E: πόσοι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο με μεταγωγή πακέτου και πόσοι με μεταγωγή κυκλώματος?

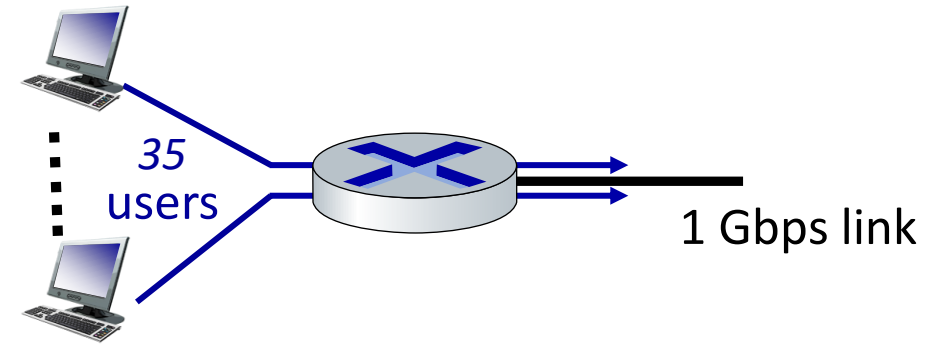
- **μεταγωγή κυκλώματος:** 10 χρήστες
- **μεταγωγή πακέτου:** με 35 χρήστες, η πιθανότητα > 10 ενεργοί χρήστες ταυτόχρονα είναι μικρότερη από 0.0004

E: πώς προκύπτει το 0.0004?

A: απαιτεί βασική γνώση θεωρίας πιθανοτήτων

Μεταγωγή πακέτου έναντι μεταγωγής κυκλώματος

E: πώς προκύπτει το 0.0004?



Πιθανότητα > 10 ενεργοί χρήστες από τους 35 =

$\sum \left\{ k \text{ επιτυχίες σε } n=35 \text{ ανεξάρτητες απόπειρες, με πιθανότητα επιτυχίας κάθε απόπειρας } p=0.1 \right\}$

$k=11 \dots 35$

$\{ \dots \} \rightarrow$ Διωνυμική κατανομή

$$f(k, n, p) = \Pr(k; n, p) = \Pr(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k}$$

for $k = 0, 1, 2, \dots, n$, where

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

Μεταγωγή πακέτου έναντι μεταγωγής κυκλώματος

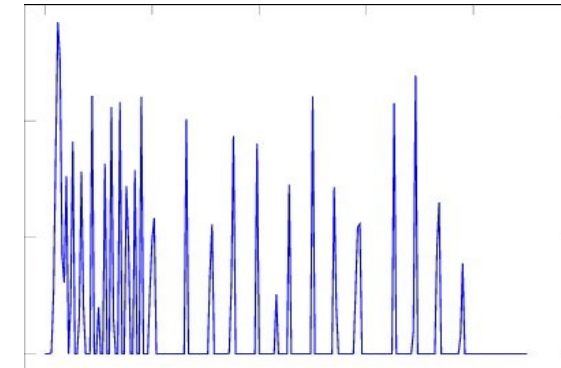
Κίνηση με εκρηκτικότητα - Bursty traffic



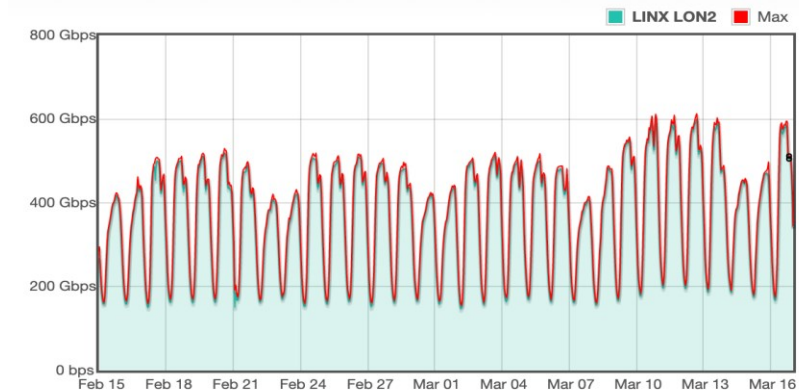
Κίνηση χωρίς εκρηκτικότητα (ακραίο παράδειγμα: περιοδική κίνηση)



1 χρήστης – web browsing



πολλοί χρήστες – πολλές εφαρμογές



Άξονας σε ημέρες, χαμηλή εκρηκτικότητα σε μικρό χρονικό διάστημα
Πιο **φτηνό** να έχουμε χοντρούς σωλήνες παρά δυναμικό διαμοιρασμό

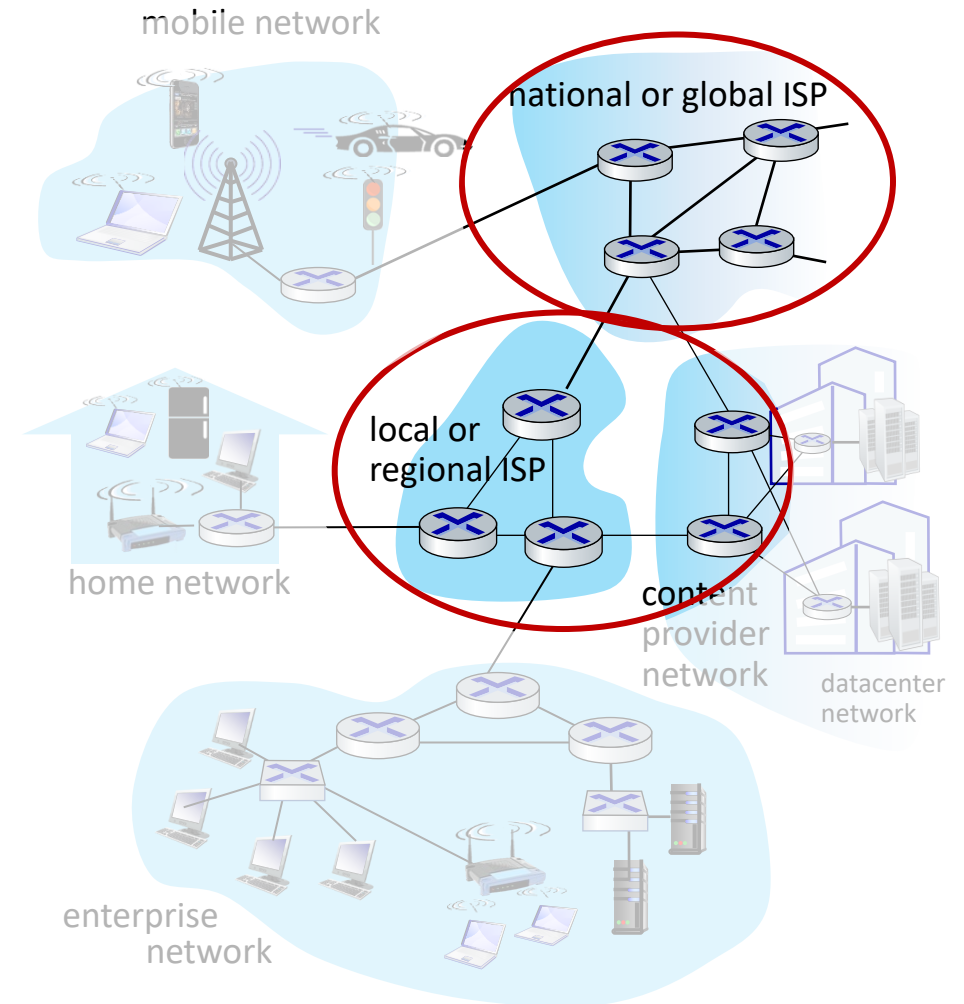
Μεταγωγή πακέτου έναντι μεταγωγής κυκλώματος

Είναι πάντα καλύτερη η μεταγωγή πακέτου;

- **Ιδανική** για δεδομένα που χαρακτηρίζονται από **εκρηκτικότητα** (bursty data)
 - διαμοιρασμός πόρων, σχετικά απλούστερη, δεν απαιτεί εγκαθίδρυση κλήσης
- **Πιθανή η υπερβολική συμφόρηση:** καθυστέρηση και απώλειες πακέτων
 - πρωτόκολλα για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων, έλεγχο συμφόρησης (TCP)
- **Μεταγωγή κυκλώματος αποδοτική (και φτηνή) σε μεγάλη συνάθροιση κίνησης, επίσης προσφέρει εγγυήσεις**
- **Ε: Υπάρχει τρόπος να πάρουμε τα θετικά και των 2;**
 - Εικονική μεταγωγή κυκλώματος - Virtual Circuit Switching – MPLS, κάνει την μεταγωγή πακέτου να συμπεριφέρεται σαν μεταγωγή κυκλώματος → δίνει εγγυήσεις ποιότητας
 - Οπτικά μονοπάτια (optical lightpaths)=οπτικές ζεύξεις από-άκρο-σε-άκρο, σε οπτικά δίκτυα κορμού και μέτρο, μεταγωγή κυκλώματος, μεταφορά IP πακέτων πάνω από κυκλώματα, φτηνή λύση για δημιουργία 'χοντρών σωλήνων'
- Το **Διαδίκτυο βασίζεται στη μεταγωγή πακέτου**, αλλά αρκετά τμήματα του (κυρίως κορμός, μέτρο) **χρησιμοποιούν μεταγωγή κυκλώματος ή εικονική μεταγωγή κυκλώματος**

Ο πυρήνας του δικτύου

- Πλέγμα διασυνδεδεμένων δρομολογητών
- **Μεταγωγή πακέτου:** το τερματικό σπάει τα μηνύματα της εφαρμογής σε **πακέτα**
 - το δίκτυο **προωθεί** πακέτα από δρομολογητή σε δρομολογητή μέσω των ζεύξεων στο μονοπάτι από **πηγή** σε **προορισμό**
 - δρομολόγηση **ανά πακέτο**



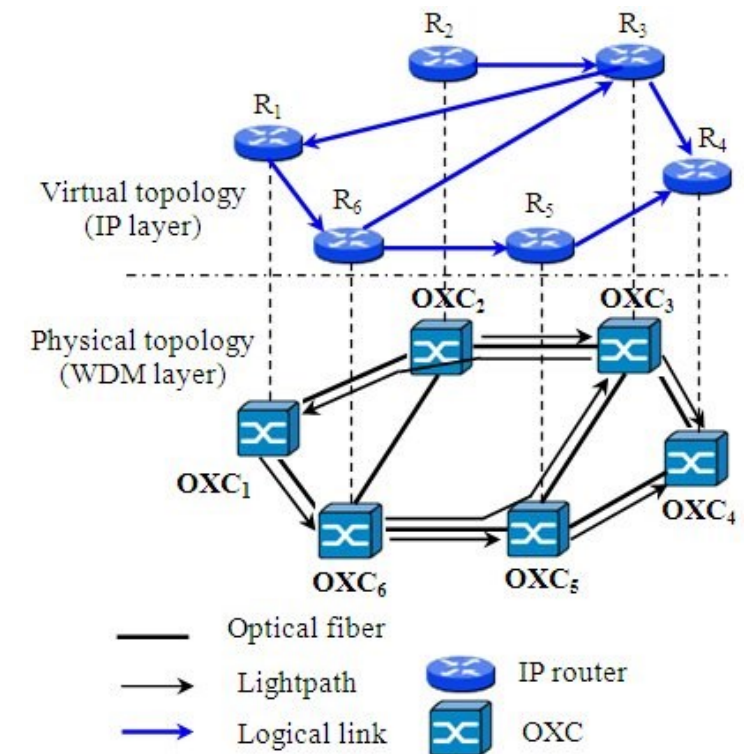
Πως υλοποιείται ο πυρήνας του Διαδικτύου

■ Οπτικά δίκτυα

- Μεγάλη χωρητικότητα: πολλαπλά κανάλια ταυτόχρονα στην ίδια ίνα με πολυπλεξία μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM) – παραλλαγή του FDM
- Μεγάλες αποστάσεις: χαμηλή εξασθενήσεις, οπτικοί ενισχυτές

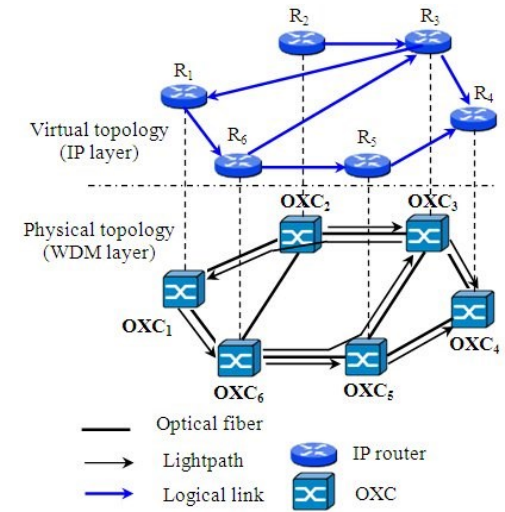
■ Μεταγωγή κυκλώματος

- Οι οπτικοί κόμβοι μετάγουν μήκη κύματος (wavelength switching), δεν επεξεργάζονται πακέτα → ‘εικονικοί’ σύνδεσμοι/ ζεύξεις
- Οι δρομολογητές νομίζουν ότι έχουν απευθείας ζεύξεις μεταξύ τους

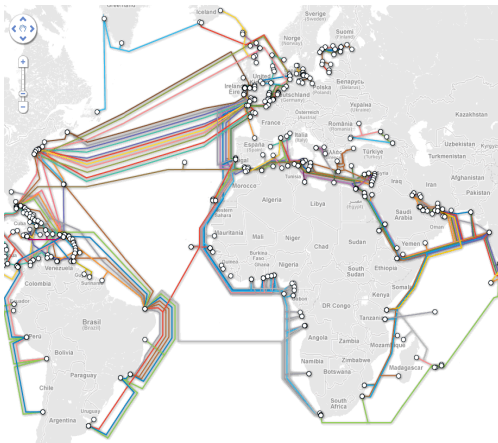


Πυρήνας Διαδικτύου – οπτικά δίκτυα

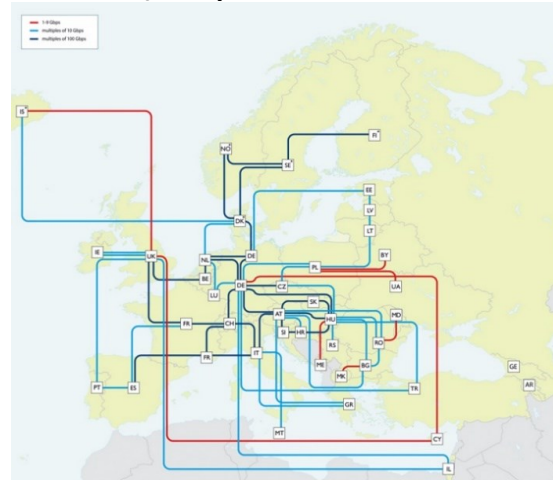
- Δρομολογητές διασυνδεδεμένοι μέσω οπτικών δικτύων
- Οπτικά δίκτυα με πολυπλεξία WDM και μεταγωγή μηκών κύματος
- Πυρήνας: υποθαλάσσια (από σημείο σε σημείο), ηπειρωτικά, εθνικά
- Μητροπολιτικά (επίσης οπτικά WDM και μεταγωγή μηκών κύματος)
 - Συνάθροιση κίνησης από άκρα/δίκτυα πρόσβασης στον πυρήνα
 - Συνήθως σε δακτυλίους ή πέταλα σε ένα ή 2 επίπεδα



υποθαλάσσια



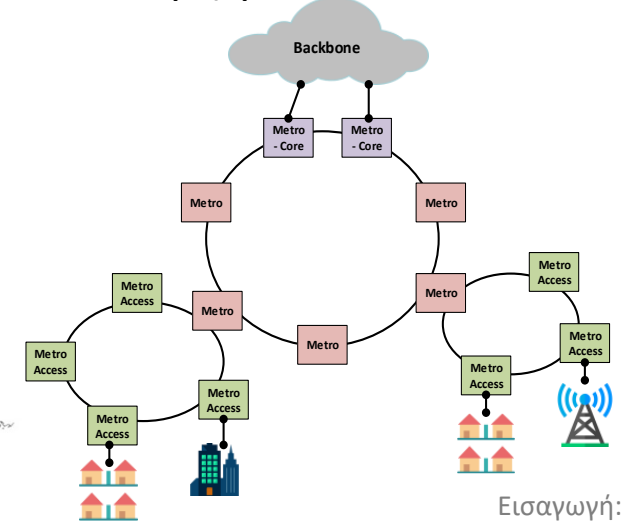
ηπειρωτικά



εθνικά



μητροπολιτικά



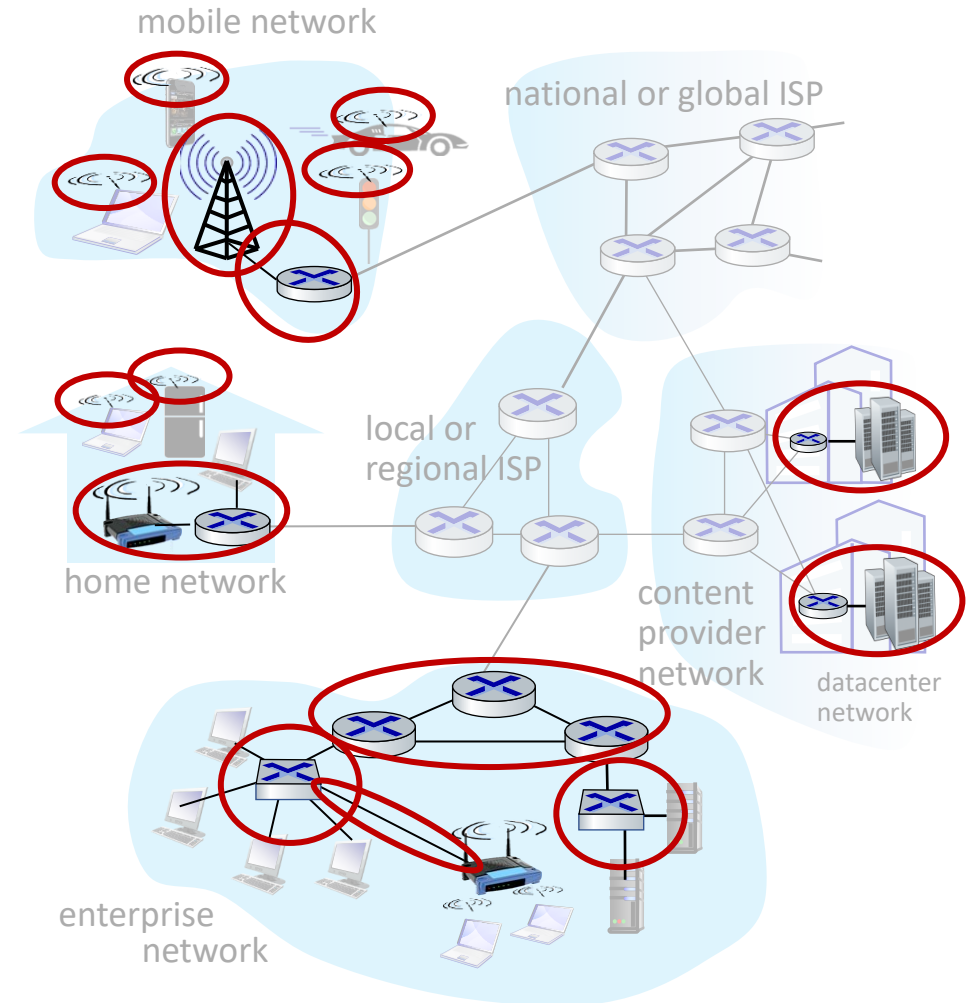
Δίκτυα πρόσβασης

Συνδέουν κάθε τερματικό σύστημα με τον περιφερειακό δρομολογητή

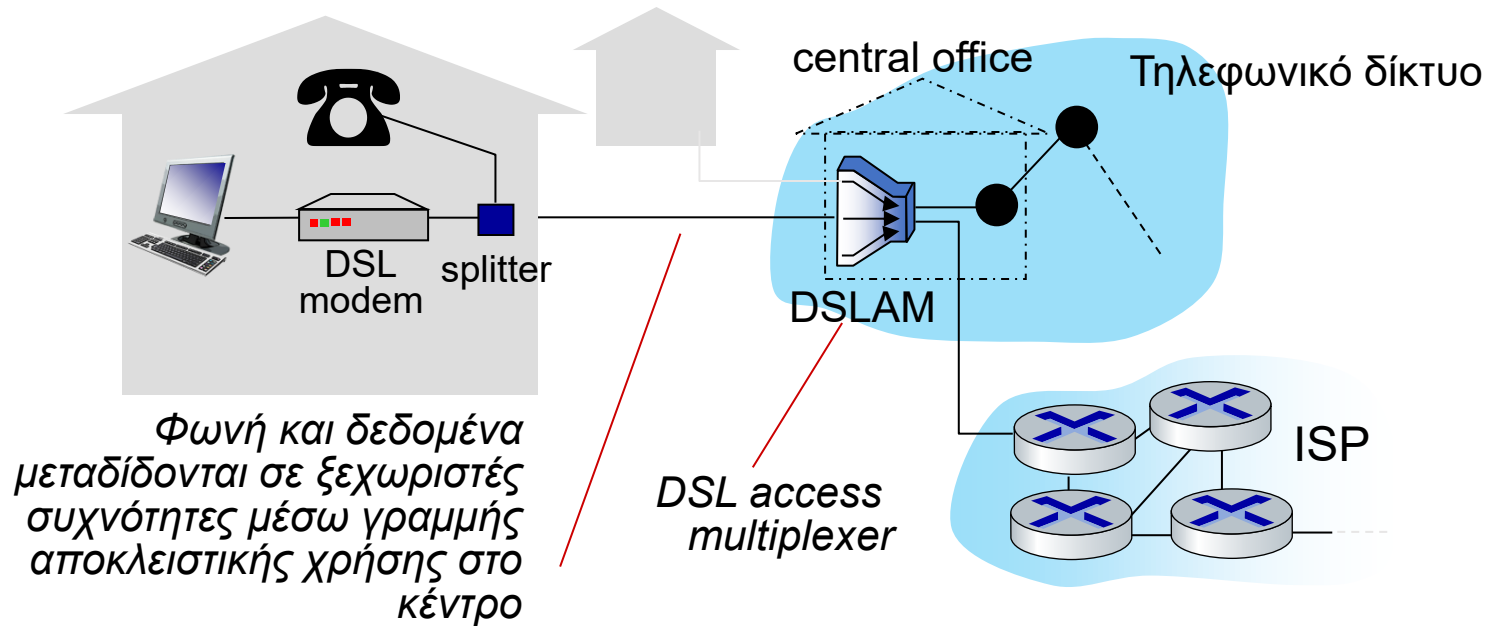
- δίκτυα οικιακής πρόσβασης
 - DSL, Cable, Fiber to the Home FTTH/PON
- δίκτυα πρόσβασης οργανισμών (εταιρίες, πανεπιστήμιο)
- δίκτυα πρόσβασης κινητών (4G/5G)

Προσοχή:

- Ρυθμός μετάδοσης (bits per second) του δικτύου πρόσβασης
- Διαμοιραζόμενη ή αποκλειστική πρόσβαση χρηστών?

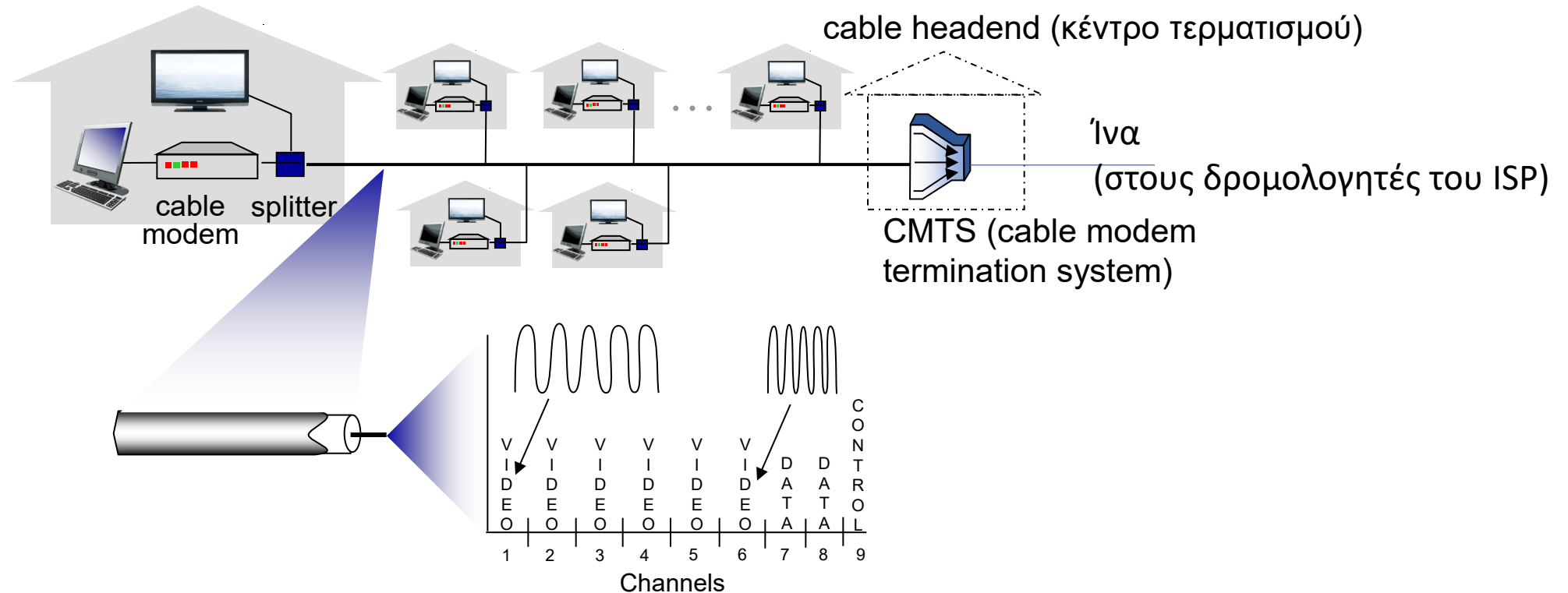


Δίκτυα πρόσβασης: digital subscriber line (DSL)



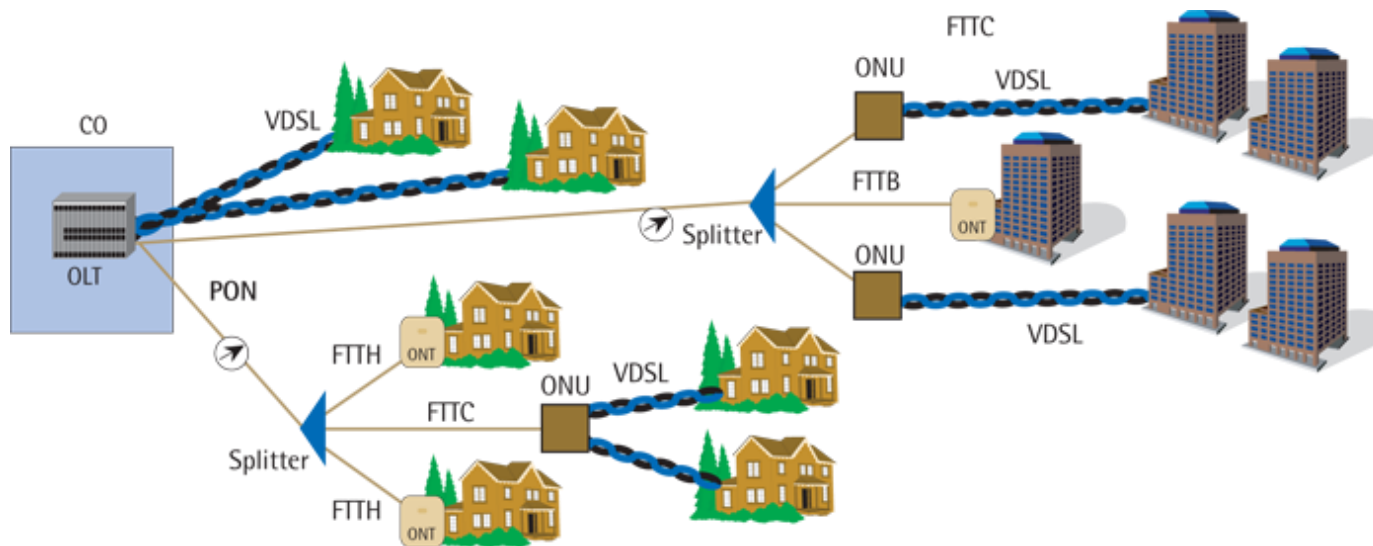
- Χρήση **υπάρχουσας** τηλεφωνικής γραμμής (συνεστραμμένο ζεύγος χαλκού) προς το DSLAM του κέντρου
 - τα δεδομένα πάνω από τη γραμμή DSL πάνε στο Διαδίκτυο
 - η φωνή πάνω από τη γραμμή DSL πάει στο τηλεφωνικό δίκτυο
- Μη διαμοιραζόμενο μέσο (ως το DSLAM)

Δίκτυα πρόσβασης: καλωδιακό δίκτυο

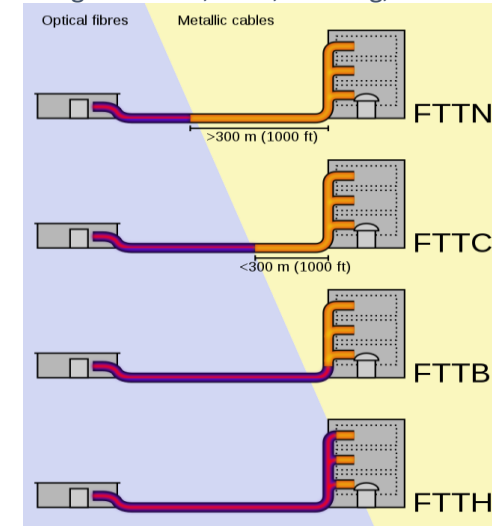


- **HFC: hybrid fiber coax** (ομοαξονικό καλώδιο και οπτική ίνα από το CAB στον ISP)
 - ασύμμετρο: ταχύτητα μετάδοσης μέχρι 40Mbps - 1.2Gbps downstream, 100 Mbps upstream
 - Τα σπίτια **μοιράζονται το δίκτυο πρόσβασης (ομοαξονικό)** μέχρι το κέντρο τερματισμού καλωδίου (CMTS)
- **FDM**: διαφορετικά κανάλια (π.χ. Video, Data) μεταδίδονται σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων
- **TDM**: σε ένα κανάλι δεδομένων (data) αναθέτουμε χρονοθυρίδες σε διαφορετικούς χρήστες

Δίκτυα πρόσβασης: Παθητικό οπτικό δίκτυο (Passive optical network - PON)



Fiber to the x (FTTx)
x = ανάλογα με τον τερματισμό της ίνας
Neighborhood, Curb, Building, Home



- Τοπολογία δέντρο, **από-σημείο-σε-πολλαπλά σημεία** (point-to-multipoint – PTMP), έως 128 ONUs (συνήθως 32)
- Optical line terminal (OLT) - κοινή **οπτική ίνα** - παθητικός οπτικός διαχωριστής – (μεμονωμένες) **ίνες** – Optical network units (ONUs)
- Κοινή ίνα - Διαμοιραζόμενο μέσο (TDM- χρονοθυρίδες) αλλά υψηλή χωρητικότητα: 10Gb/s, επερχόμενο standard 50 Gb/s

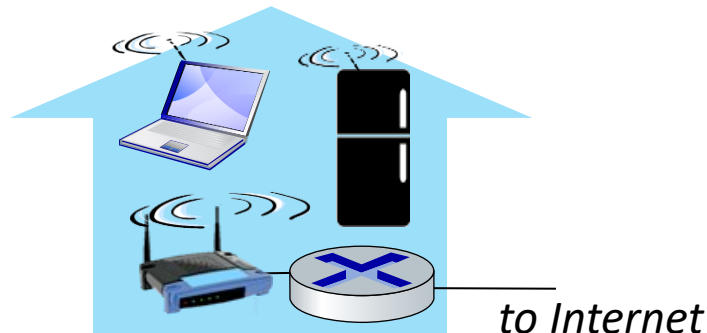
Δίκτυα πρόσβασης: ασύρματα

Διαμοιραζόμενο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης συνδέει τα (κινητά) τερματικά με (τον πρώτο) δρομολογητή

- Μέσω σταθμού βάσης / σημείου πρόσβασης

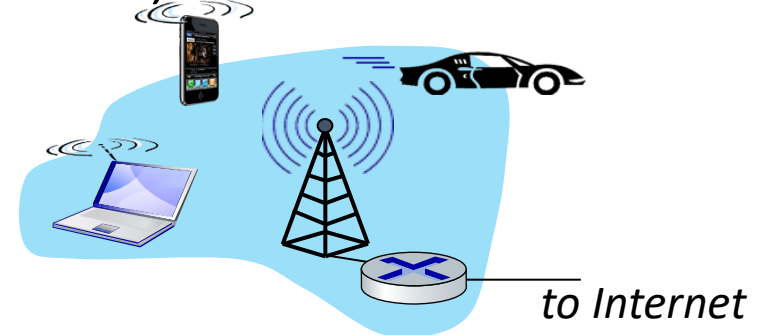
Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (WLANs)

- Συνήθως εντός ή γύρω από κτήρια (~30 m)
- 802.11b/g/n (WiFi): 11, 54, 450 Mbps ταχύτητα μετάδοσης

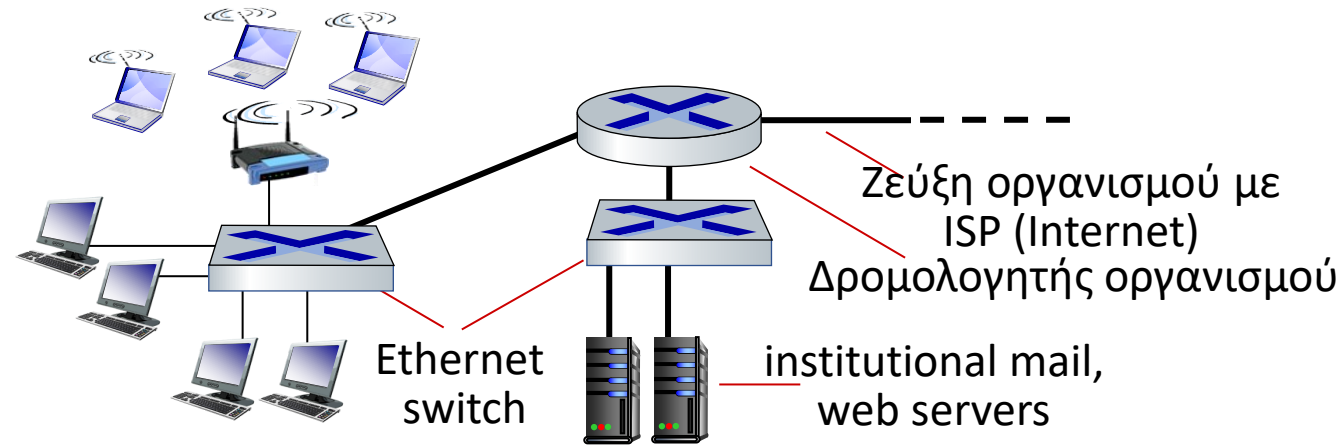


Κυψελωτά δίκτυα πρόσβασης ευρείας περιοχής

- Από παρόχους κινητών/ κυψελωτών δικτύων (10's km)
- 10's Mbps
- 4G, 5G



Δίκτυα πρόσβασης: δίκτυα επιχειρήσεων



- Τυπική χρήση σε εταιρίες, πανεπιστήμια, κλπ
- Συνδυασμός τεχνολογιών ασύρματων και ενσύρματων ζεύξεων, συνδέοντας μεταγωγούς και δρομολογητές
 - **Ethernet**: ενσύρματη πρόσβαση στα 100Mbps, 1Gbps, 10Gbps
 - **WiFi**: ασύρματο σημείο πρόσβασης στα 11, 54, 450 Mbps

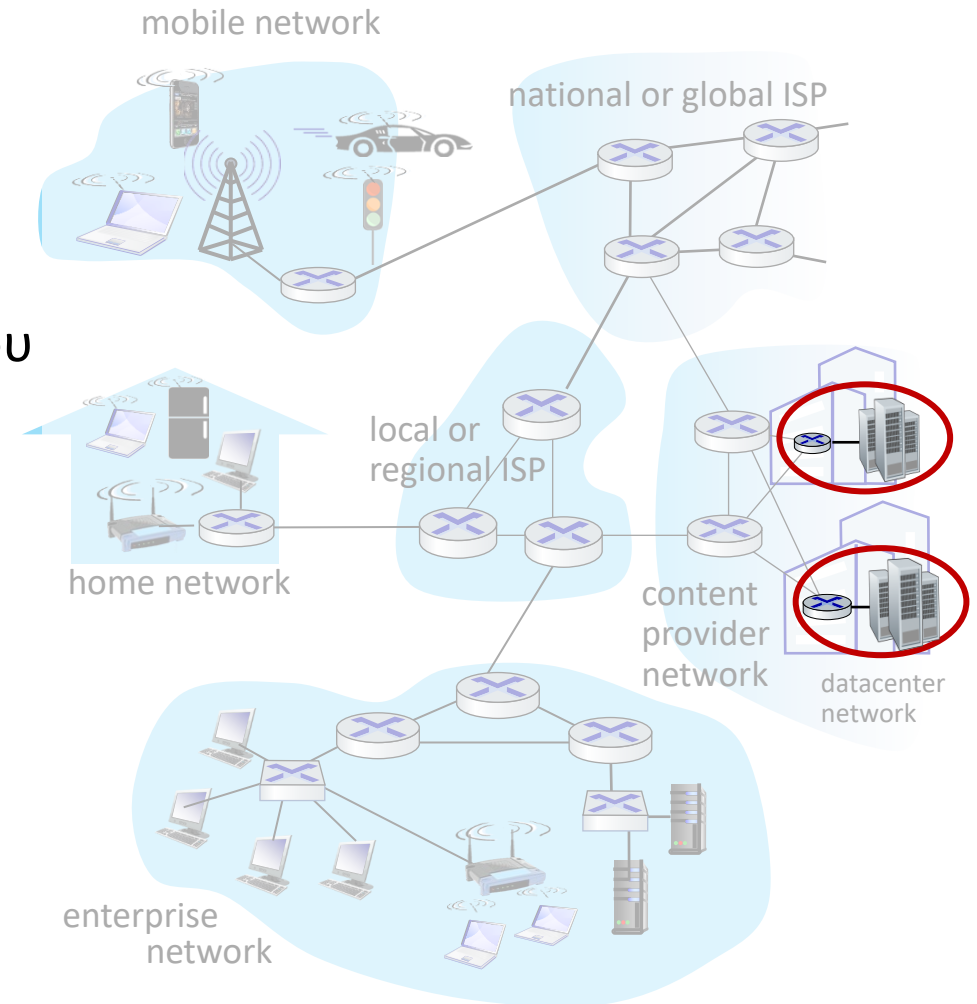
Δίκτυα κέντρων δεδομένων

Πολλαπλές ζεύξεις υψηλής χωρητικότητας (100s Gbps) συνδέουν ένα κέντρο δεδομένων στο Διαδίκτυο (σύνδεση σε ένα δίκτυο κορμού)

Μέσα στο κέντρο δεδομένων: 100 K εξυπηρετές διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός 'τοπικού' δικτύου

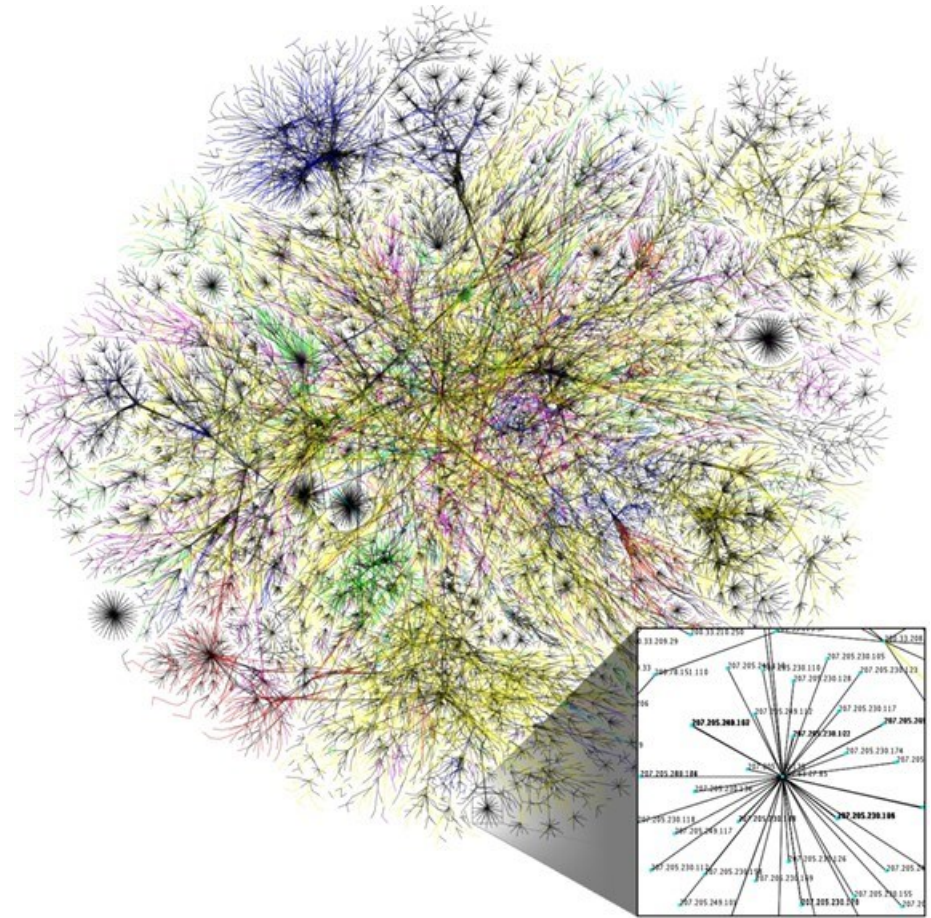


Courtesy: Massachusetts Green High Performance Computing Center (mghpcc.org)



Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων - Εισαγωγή

- Διαδίκτυο – στατιστικά
- Δομή του Διαδικτύου
- Τεχνικές μεταγωγής
- Στοίβα πρωτοκόλλων Διαδικτύου
- Επίπεδο Δικτύου
- Επίπεδο Ζεύξης



“Επίπεδα” Δικτύου – στοίβα πρωτοκόλλων

Τα δίκτυα είναι πολύπλοκα με πολλά «κομμάτια»:

- τερματικά συστήματα (hosts)
- δρομολογητές (routers)
- ζεύξεις διαφόρων φυσικών μέσων
- εφαρμογές
- πρωτόκολλα
- υλικό (hardware), λογισμικό (software)

Ερώτημα:

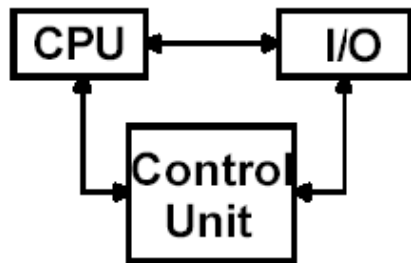
Πως οργανώνουμε τις λειτουργίες των διαφορετικών οντοτήτων, πως τα υλοποιούμε; και πως συζητάμε και μαθαίνουμε;

Οργάνωση ενός δικτύου

Το δίκτυο οργανώνεται σαν ένα **τμηματικό**, **ιεραρχικό** και **κατανεμημένο** σύστημα

Τμηματικό (modular):

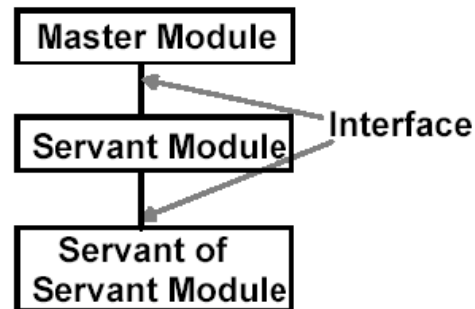
- αποτελείται από απλούστερα συστατικά στοιχεία/τμήματα με συγκεκριμένους κανόνες επικοινωνίας (interfaces)



- Πλεονεκτήματα: ανεξάρτητη λειτουργία των τμημάτων, τυποποίηση

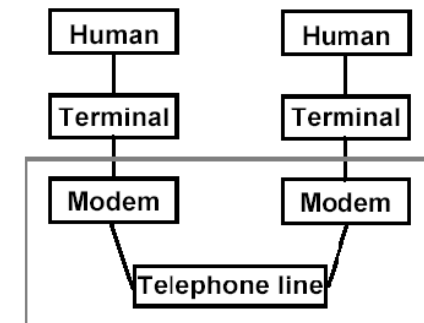
Ιεραρχικό (hierarchical):

- Σε επίπεδα
- Ένα τμήμα/επίπεδο προσφέρει υπηρεσίες (services) στο υψηλότερο

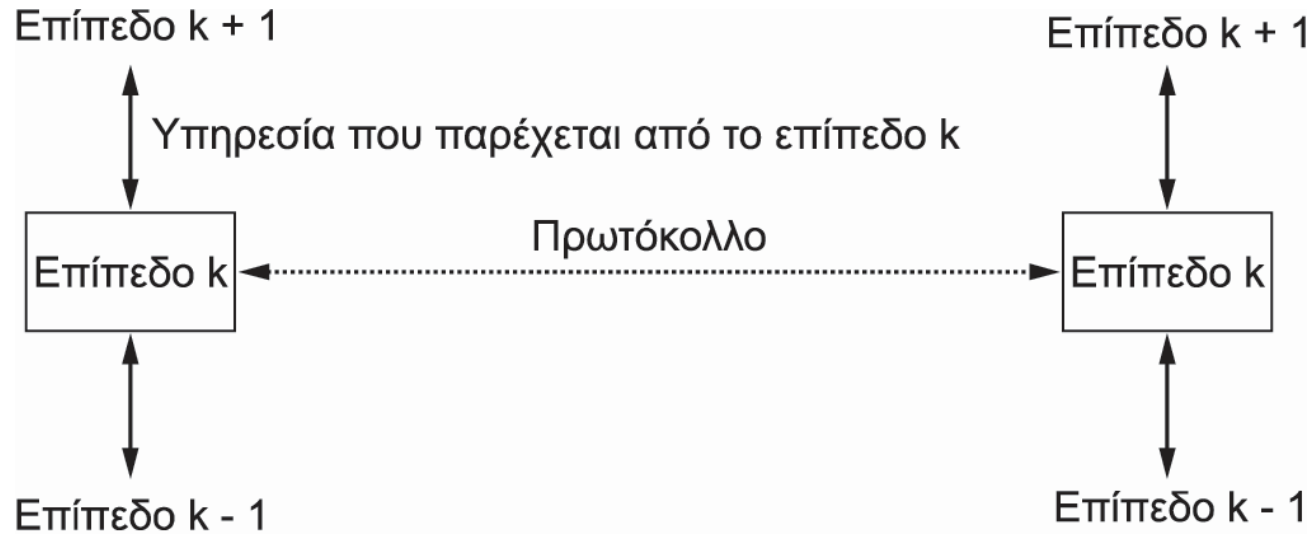


Κατανεμημένο (distributed):

- Το κάθε τμήμα/επίπεδο υλοποιείται κατανεμημένα
- **Πρωτόκολλα** τρέχουν μεταξύ των κατανεμημένων τμημάτων του ίδιου επιπέδου



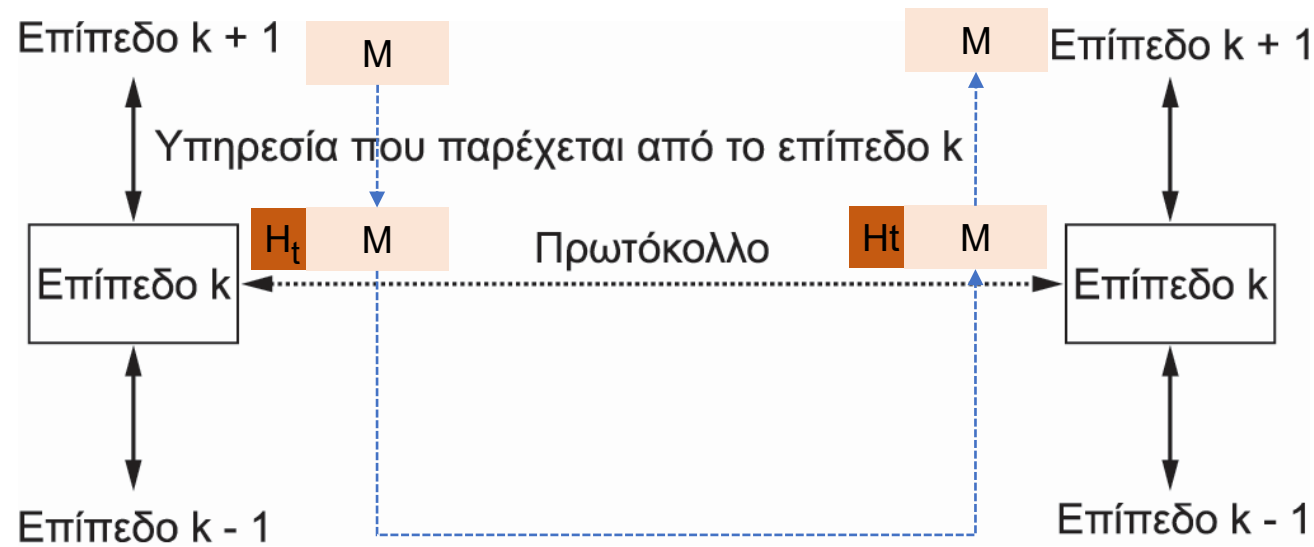
Δικτυακό Πρωτόκολλο



- Τα κατανεμημένα τμήματα του ίδιου επιπέδου επικοινωνούν με πρωτόκολλα για να υλοποιήσουν τις υπηρεσίες τους (που τις προσφέρουν στο υπερκείμενο επίπεδο)
- Για την μεταφορά των μηνυμάτων που υλοποιούν ένα πρωτόκολλο χρησιμοποιών υπηρεσίες του υποκείμενου επιπέδου

Ένα **πρωτόκολλο** καθορίζει τη **μορφή**, τη **σειρά των μηνυμάτων που στέλνονται και λαμβάνονται** μεταξύ των κατανεμημένων οντοτήτων, καθώς και τις **ενέργειες** που γίνονται κατά τη λήψη και αποστολή των μηνυμάτων

Ενθυλάκωση



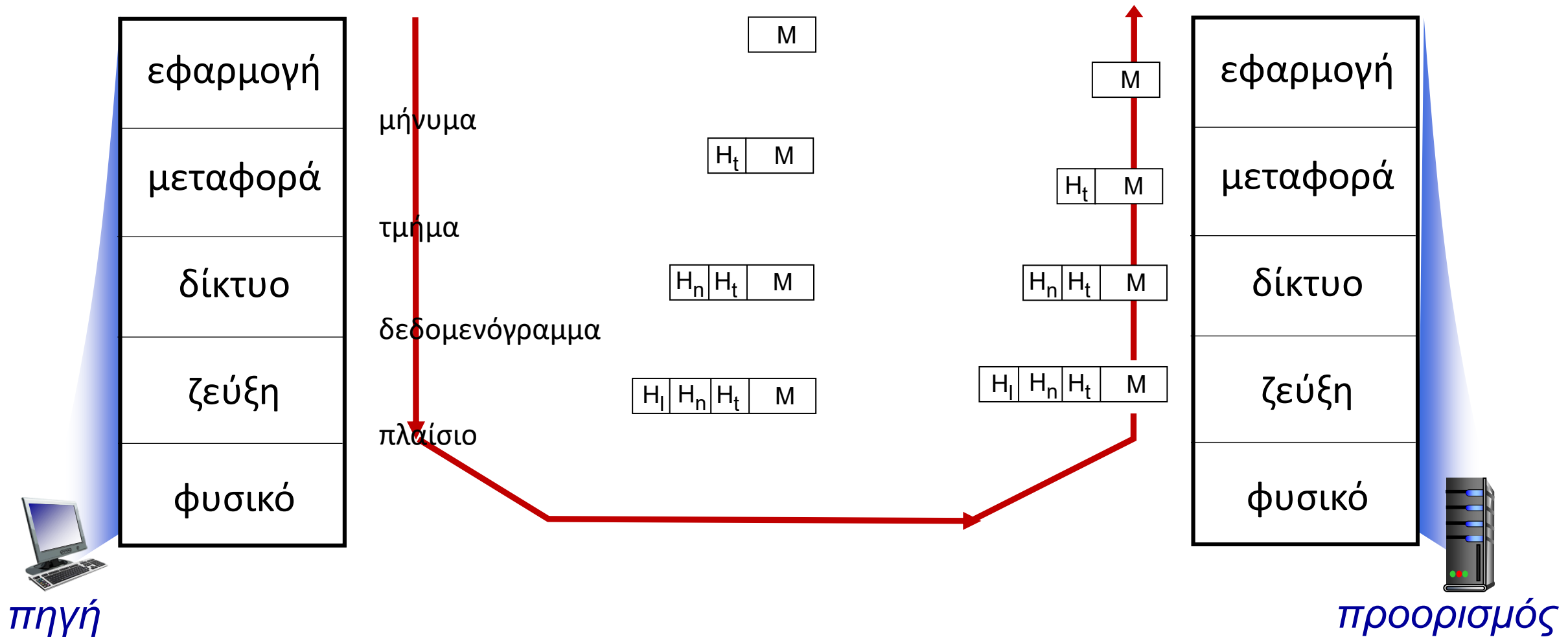
- Για να υλοποιήσει το πρωτόκολλο, το ένα τμήμα του επιπέδου k στέλνει πληροφορίες στο άλλο.
- Παίρνει το μήνυμα από το υπερκείμενο επίπεδο $k+1$, το **ενθυλακώνει με επικεφαλίδα** που περιέχει σχετικές πληροφορίες και το μεταφέρει μέσω των υπηρεσιών του υποκείμενου επιπέδου $k-1$

Στοιβά πρωτοκόλλου Διαδικτύου

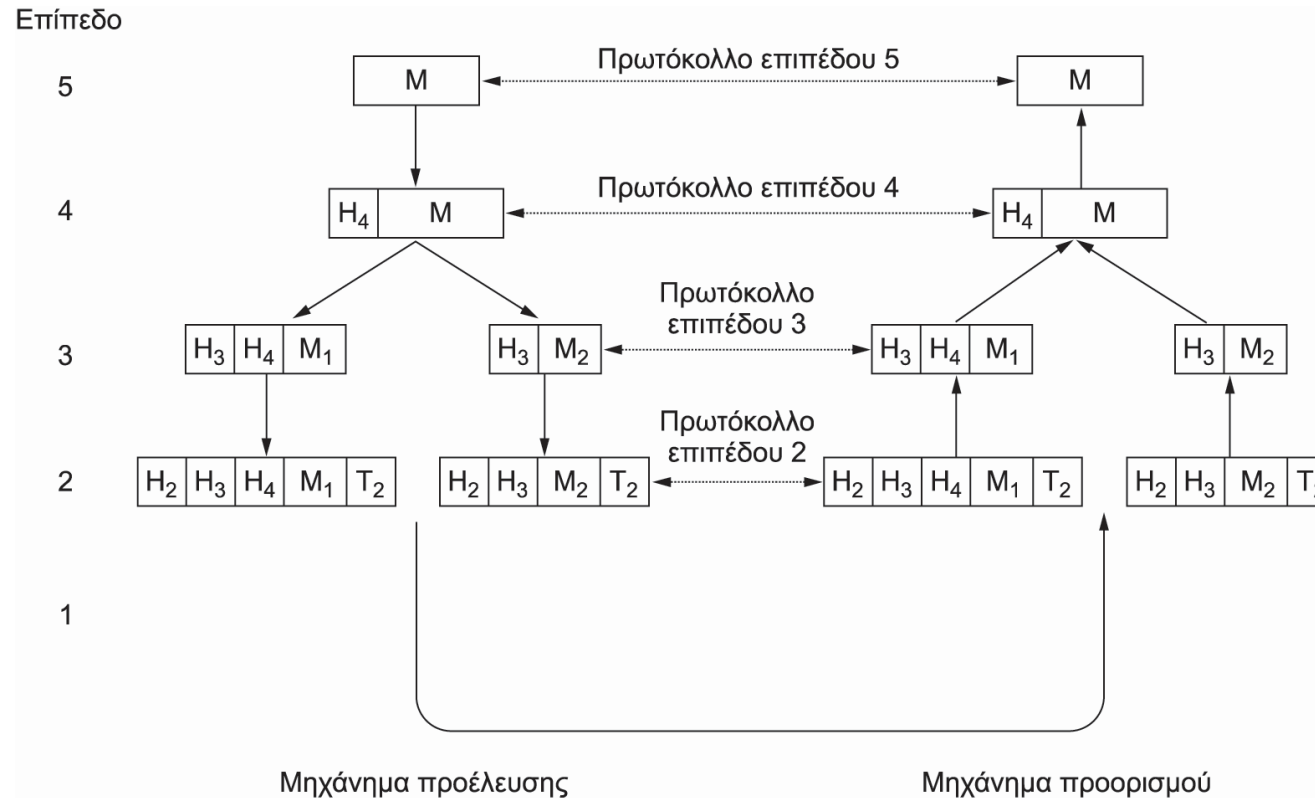
- **εφαρμογής (application):** υποστήριξη δικτυακών εφαρμογών
 - HTTP, IMAP, SMTP, DNS
- **μεταφοράς (transport):** μεταφορά δεδομένων από διεργασία σε διεργασία
 - TCP, UDP
- **δικτύου (network):** δρομολόγηση δεδομενογραμμάτων (datagrams) από πηγή σε προορισμό
 - IP, πρωτόκολλα δρομολόγησης
- **ζεύξης (link):** μεταφορά δεδομένων μεταξύ γειτονικών στοιχείων δικτύου
 - Ethernet, 802.11 (WiFi), PPP
- **φυσικό (physical):** bits “πάνω στη γραμμή”



Ενθυλάκωση – από την πλευρά των τερματικών



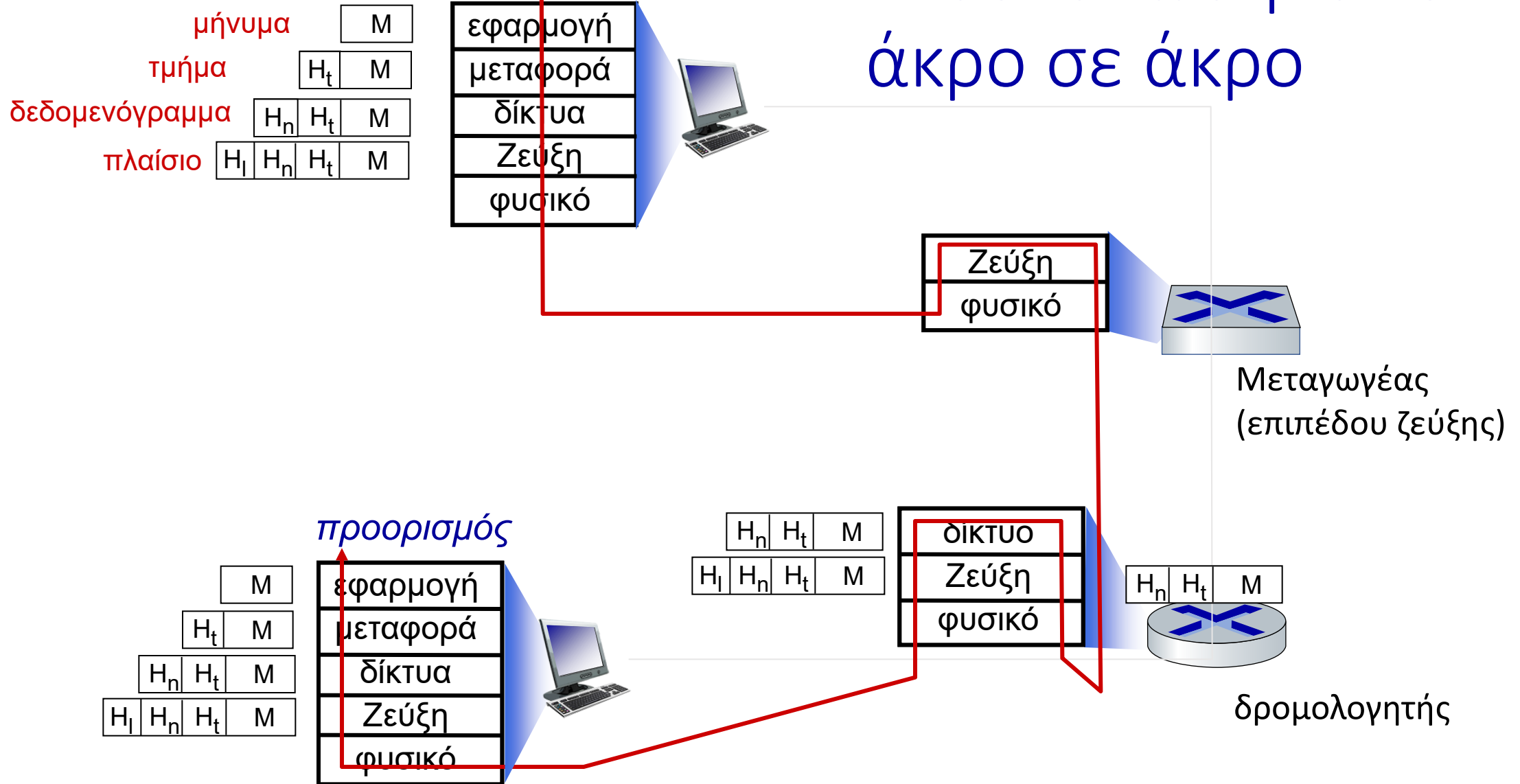
Ροή πληροφορίας στα επίπεδα



Παράδειγμα ροής πληροφορίας για επικοινωνία μεταξύ τμημάτων μιας κατανεμημένης εφαρμογής (επίπεδο 5)

Τα μηνύματα της εφαρμογής σπάνε σε πακέτα στο επίπεδο 3 (επίπεδο δικτύου), αλλά μπορεί να σπάσουν σε κομμάτια και σε άλλα επίπεδα

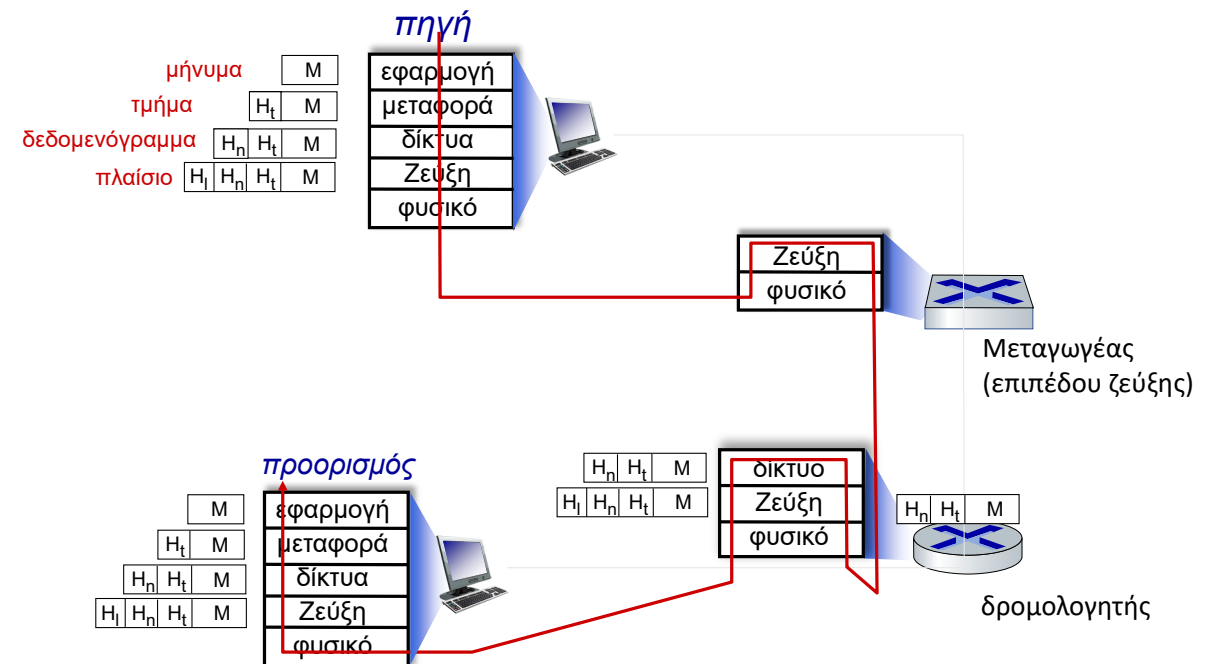
Ενθυλάκωση: από άκρο σε άκρο



Υλοποίηση πρωτοκόλλων - Δικτυακές συσκευές

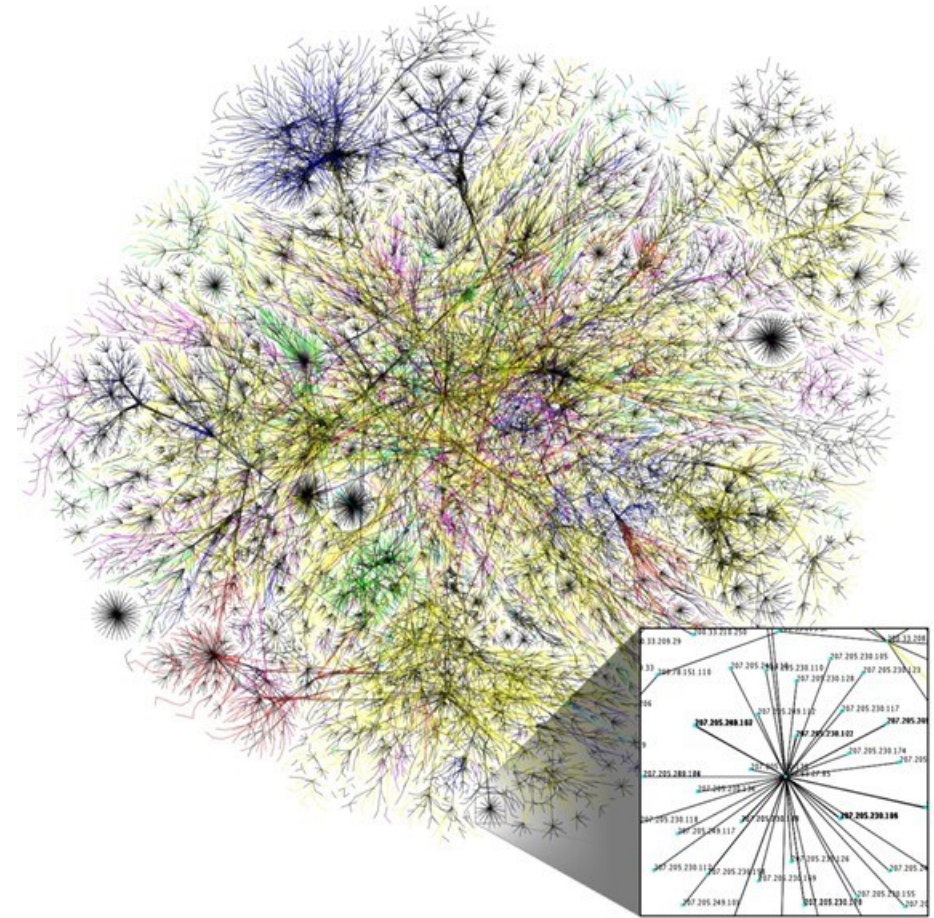
- Επίπεδα 4 & 5 μόνο στα τερματικά
- Επίπεδο 3 από-άκρη-σε-άκρη, (τερματικά και δρομολογητές)
- Επίπεδο 2 και 1 σε κάθε βήμα, σε κάθε δικτυακή συσκευή

Στο μάθημα **Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων** θα μελετήσουμε τα επίπεδα 1-3 που δημιουργούν τα διαφορετικά δίκτυα που υπάρχουν μεταξύ των τερματικών



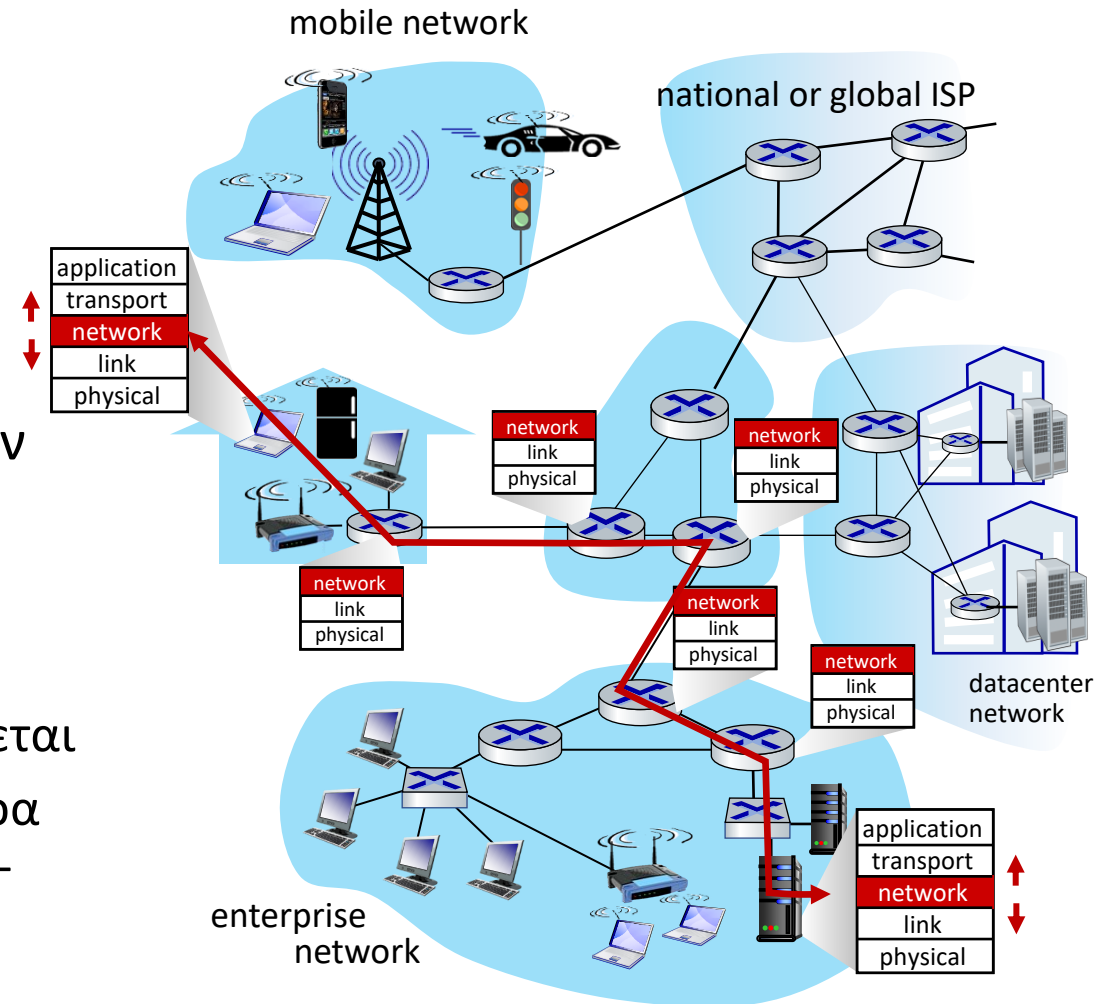
Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων - Εισαγωγή

- Διαδίκτυο – στατιστικά
- Δομή του Διαδικτύου
- Τεχνικές μεταγωγής
- Στοίβα πρωτοκόλλων Διαδικτύου
- Επίπεδο Δικτύου
- Επίπεδο Ζεύξης



Επίπεδο δικτύου: υπηρεσίες και πρωτόκολλα

- Μεταφέρει τμήματα (segment) από το τερματικό αποστολέα στον παραλήπτη
 - αποστολέας: ενθυλακώνει τα τμήματα σε datagrams, τα δίνει στο επίπεδο ζεύξης
 - παραλήπτης: δίνει τα τμήματα στο κατάλληλο πρωτόκολλο του επιπέδου μεταφοράς
- Τα πρωτόκολλα του επιπέδου δικτύου τρέχουν σε *κάθε συσκευή του Internet*: τερματικά, δρομολογητές
- **δρομολογητής**:
 - Εξετάζει τις κεφαλίδες των IP datagrams που δέχεται
 - Προωθεί τα datagrams από θύρα εισόδου σε θύρα εξόδου, ώστε να δημιουργηθεί ένα από-ακρο-σε-ακρο μονοπάτι



Μοντέλο υπηρεσίας επιπέδου δικτύου

Τι υπηρεσίες προσφέρει το IP στη μεταφορά datagram από αποστολέα στον παραλήπτη?

Network Architecture	Service Model	Quality of Service (QoS) Guarantees ?			
		Bandwidth	Loss	Order	Timing
Internet	best effort	none	no	no	no

Internet “best effort” service model

Καμία εγγύηση για:

- i. επιτυχή παράδοση του datagram στον προορισμό
- ii. χρόνο/καθυστέρηση παράδοσης
- iii. διαθέσιμο εύρος ζώνης για τη ροή

Μοντέλο υπηρεσίας επιπέδου δικτύου

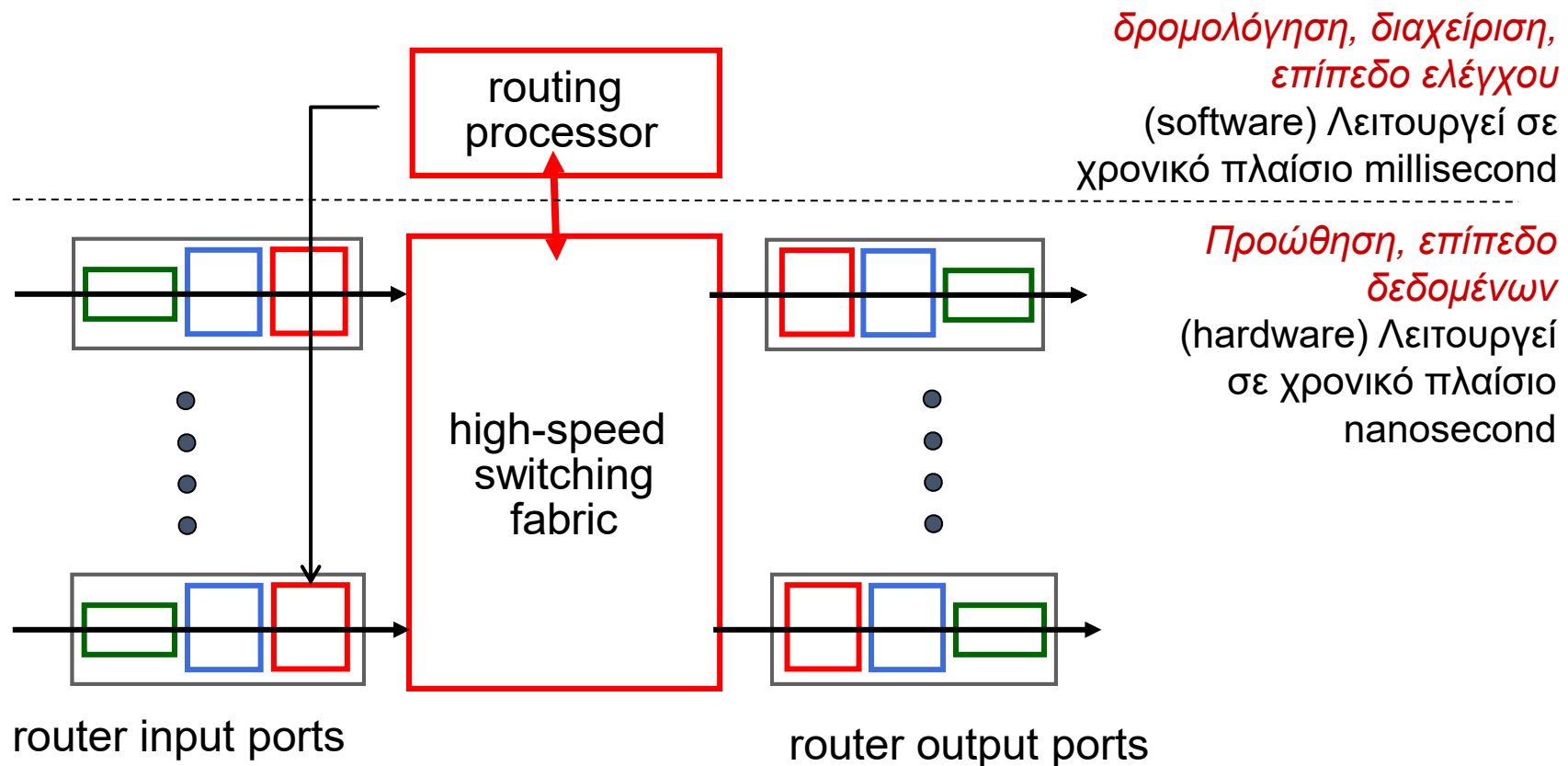
Network Architecture	Service Model	Quality of Service (QoS) Guarantees ?			
		Bandwidth	Loss	Order	Timing
Internet	best effort	none	no	no	no
ATM	Constant Bit Rate	Constant rate	yes	yes	yes
ATM	Available Bit Rate	Guaranteed min	no	yes	no
Internet	Intserv Guaranteed (RFC 1633)	yes	yes	yes	yes
Internet	Diffserv (RFC 2475)	possible	possibly	possibly	no

Σκέψεις για το μοντέλο υπηρεσίας best-effort

- Το Διαδίκτυο/IP πρωτόκολλο συνενώνει δίκτυα που μπορεί να είναι διαφορετικά, είναι δύσκολο το IP να δώσει από-άκρο-σε-άκρο εγγυήσεις
- Η απλότητα του μηχανισμού επέτρεψε την ευρεία ανάπτυξη του Διαδικτύου
- Η δυναμική παροχή εύρους ζώνης κάνει την απόδοση εφαρμογών πραγματικού χρόνου (π.χ. διαδραστική φωνή, βίντεο) να είναι «αρκετά καλή» για «τις περισσότερες φορές»
- Επιτρέπει κατανεμημένες υπηρεσίες σε επίπεδο εφαρμογής (δίκτυα διανομής περιεχομένου CDN, κέντρα δεδομένων), να επιλέγουν την τοποθεσία παροχής υπηρεσίας

Είναι δύσκολο να αμφισβητηθεί η επιτυχία του μοντέλου best-effort

Γενική αρχιτεκτονική δρομολογητή

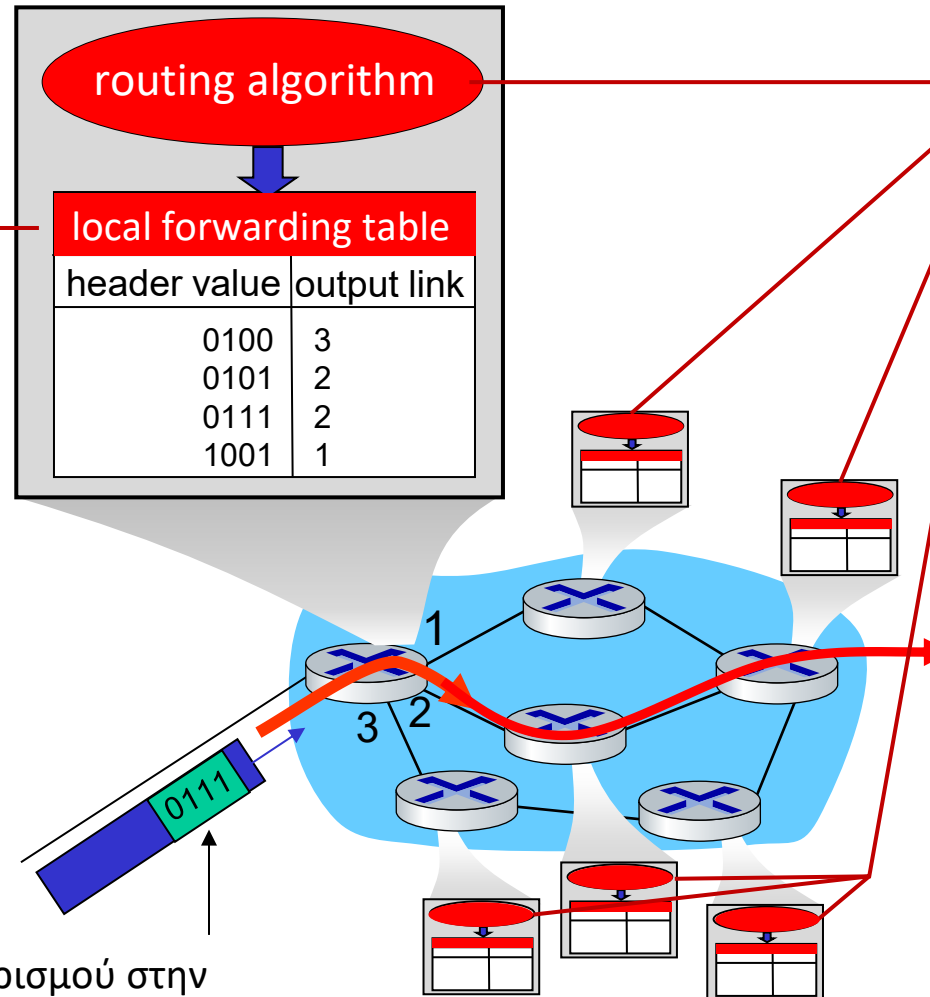


Δύο βασικές λειτουργίες του δικτύου-πυρήνα

Πρώθηση (forwarding)

- Αλλιώς, «μεταγωγή»
- Λειτουργία **τοπικής** εμβέλειας / σημασίας: μεταφέρει εισερχόμενα πακέτα από τη ζεύξη εισόδου στην κατάλληλη ζεύξη εξόδου του δρομολογητή

Διεύθυνση προορισμού στην κεφαλίδα του αφικνούμενου πακέτου



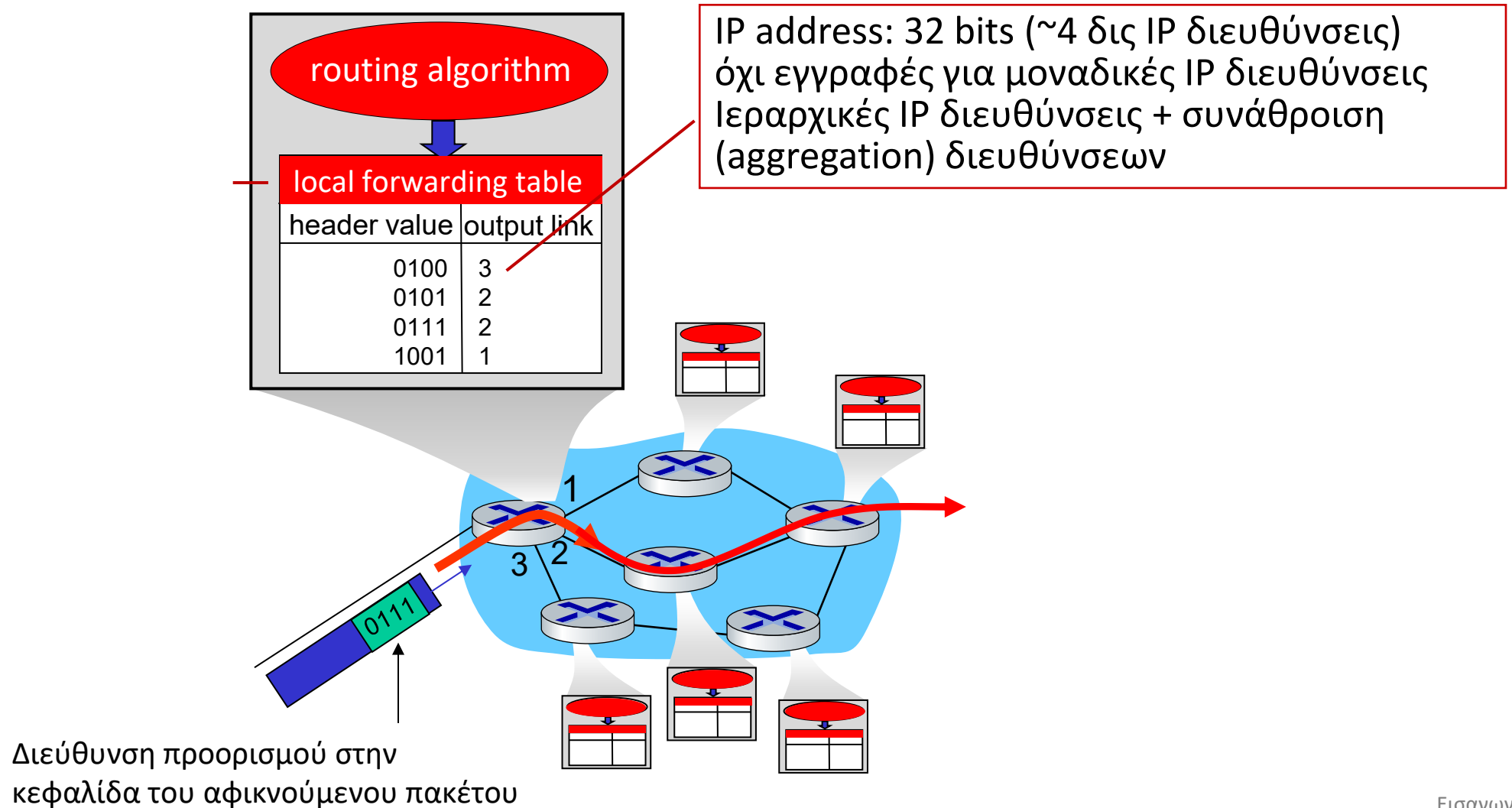
Δρομολόγηση (Routing):

- Λειτουργία **παγκόσμιας** εμβέλειας / σημασίας: καθορίζει το μονοπάτι μεταξύ πηγής και προορισμού που θα ακολουθήσουν τα πακέτα
- Πρωτόκολλα δρομολόγησης



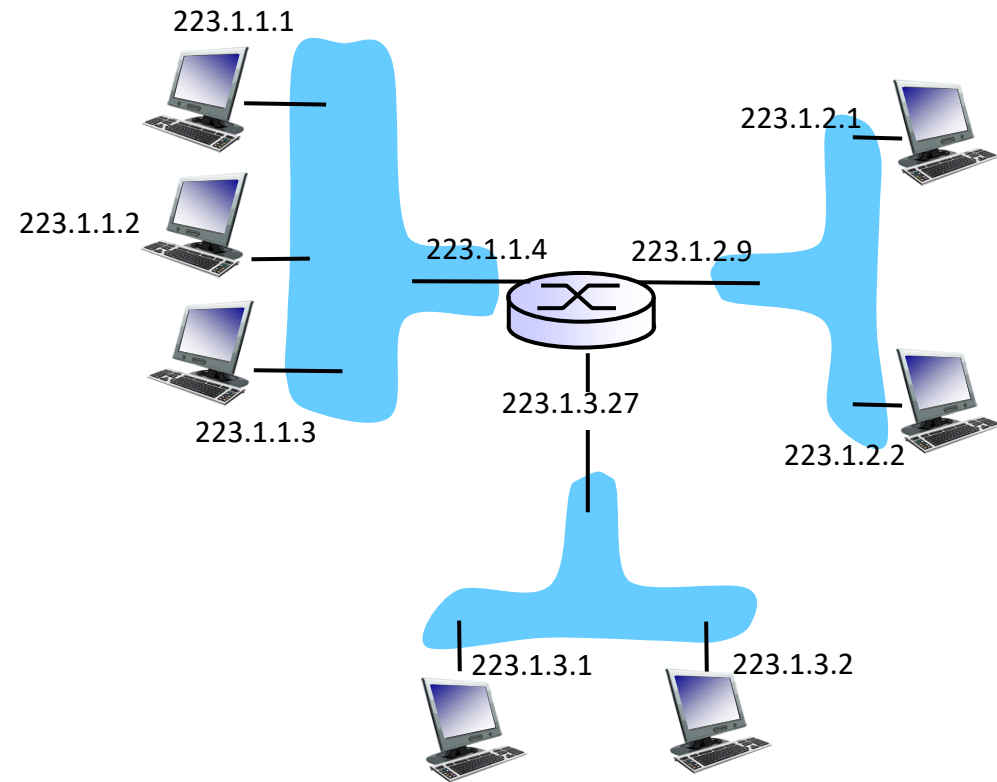


Επίπεδο δικτύου – Πίνακας προώθησης



IP διευθύνσεις: Εισαγωγή

- **IP διευθύνσεις:** 32-bit σε κάθε διεπαφή (interface) σε μια ζεύξη
 - Οι routers έχουν πολλαπλές διεπαφές
 - Οι hosts έχουν μία ενεργή διεπαφή
- Τμήματα IP address
 - subnet: Τα πρώτα bits της IP
 - host: Τα τελευταία bits της IP
- Τι είναι το υποδίκτυο ?
 - διεπαφές με ίδια subnet part
 - Μπορούν να επικοινωνήσουν χωρίς την παρέμβαση του δρομολογητή

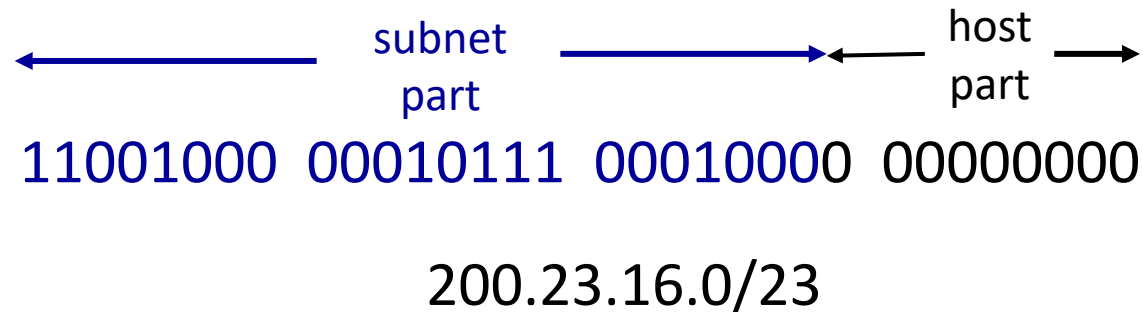


$$223.1.1.1 = \underbrace{11011111}_{223} \underbrace{00000001}_1 \underbrace{00000001}_1 \underbrace{00000001}_1$$

IP διευθύνσεις: CIDR

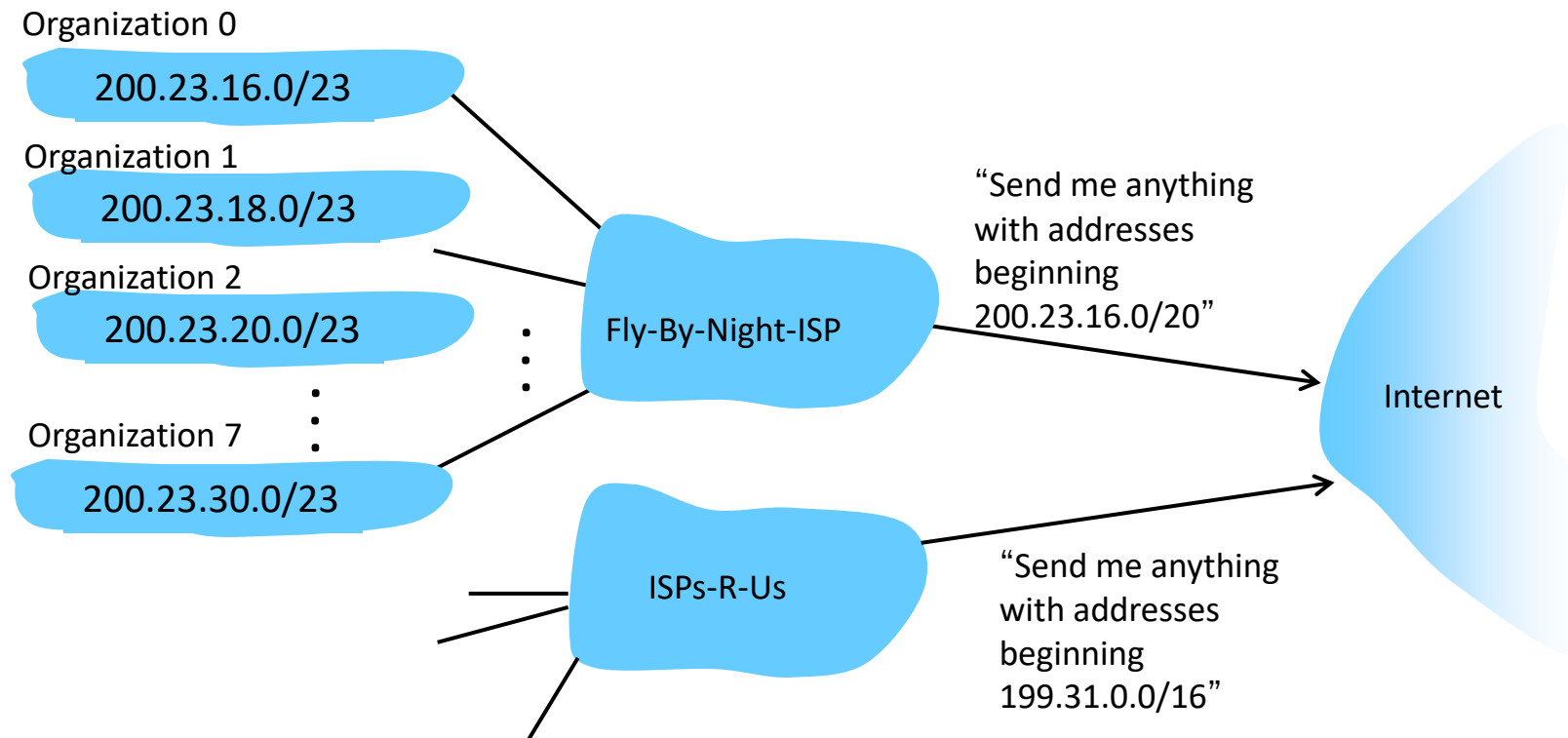
CIDR: Classless InterDomain Routing

- Αυθαίρετου μήκους μέρος διεύθυνσης που υποδεικνύει το υποδίκτυο (subnet)
- Μορφή διεύθυνσης: **a.b.c.d/x**
 - x: ο # bits (από την αρχή) που ορίζει το τμήμα του υποδικτύου (subnet) στη διεύθυνση
 - 32-x: ο # bits (από το τέλος) που ορίζει το τερματικό στο συγκεκριμένο υποδίκτυο



Ιεραρχική διευθυνσιοδότηση: συνάθροιση διευθύνσεων (address aggregation)

Η ιεραρχική διευθυνσιοδότηση επιτρέπει την **αποδοτική** διαφήμιση της πληροφορίας δρομολόγησης (μείωση μηνυμάτων μεταξύ δρομολογητών, μείωση εγγραφών στη μνήμη των δρομολογητών, αύξηση ταχύτητας ταιριάσματος, κ.α.)



Ταίριασμα μεγαλύτερου προθέματος

longest prefix matching

όταν ο δρομολογητής ψάχνει για καταχώρηση στον πίνακα προώθησης για δεδομένη διεύθυνση προορισμού, χρησιμοποιεί το **μεγαλύτερο πρόθεμα** διεύθυνσης που ταιριάζει με τη διεύθυνση προορισμού

Destination Address Range	Link interface
11001000 00010111 00010*** *****	0
11001000 00010111 00011000 *****	1
11001000 00010111 00011*** *****	2
otherwise	3

examples:

DA: 11001000 00010111 00010**110** 10100001

which interface?

DA: 11001000 00010111 00011000 **10101010**

which interface?

IPv6

- *Κύριος λόγος:* Τα 32-bit διευθύνσεων θα εξαντληθούν σύντομα → 128-bit
- Επιπλέον λόγοι:
 - Η μορφή του header επιτρέπει την επιτάχυνση των processing/forwarding
 - Η αλλαγή του header διευκολύνει το QoS

Μορφή του IPv6 datagram:

- Σταθερού μήκους 40 byte header
- Δεν επιτρέπεται fragmentation
- *checksum:* εγκαταλείπεται ώστε να μειωθεί η επεξεργασία σε κάθε κόμβο

IP addressing: Πως αγοράζεις εύρος IPs?

Q: Πως ένας ISP αγοράζει ένα εύρος IP διευθύνσεων?

A: ICANN: Internet Corporation for Assigned Names and Numbers

<http://www.icann.org/>

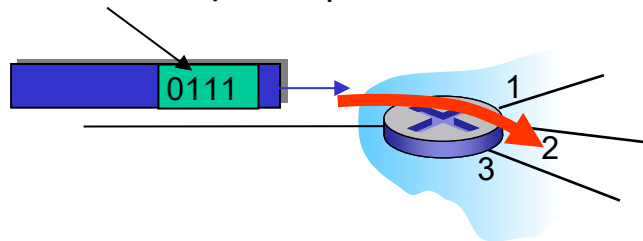
- Αναθέτει διευθύνσεις
- Αναθέτει domain names, επιλύει προβλήματα
- Διαχειρίζεται DNS

Επίπεδο δικτύου: data plane, control plane

Επίπεδο δεδομένων (Data plane)

- *τοπικό*, σε κάθε router
- καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο το datagram που φτάνει στη θύρα εισόδου του router προωθείται στη θύρα εξόδου

Διεύθυνση προορισμού στην κεφαλίδα του αφικνούμενου πακέτου



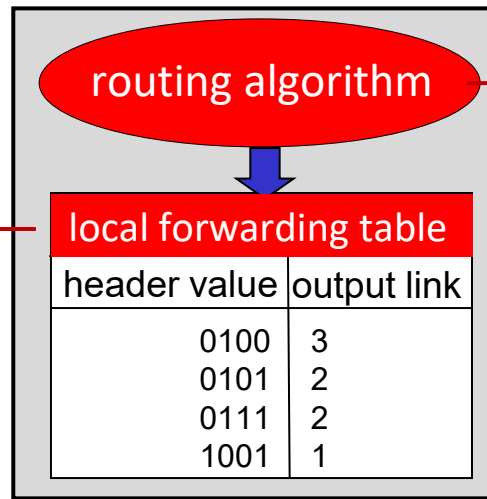
Επίπεδο ελέγχου (Control plane)

- *σε όλο το δίκτυο (network-wide)*
- καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο το datagram δρομολογείται μεταξύ των routers κατά μήκος του μονοπατιού από τον αποστολέα στον παραλήπτη
- δύο προσεγγίσεις:
 - *Παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης*: υλοποιημένα στους routers
 - *software-defined networking (SDN)*: σε (απομακρυσμένο) server

Παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης

Πρώθηση (forwarding)

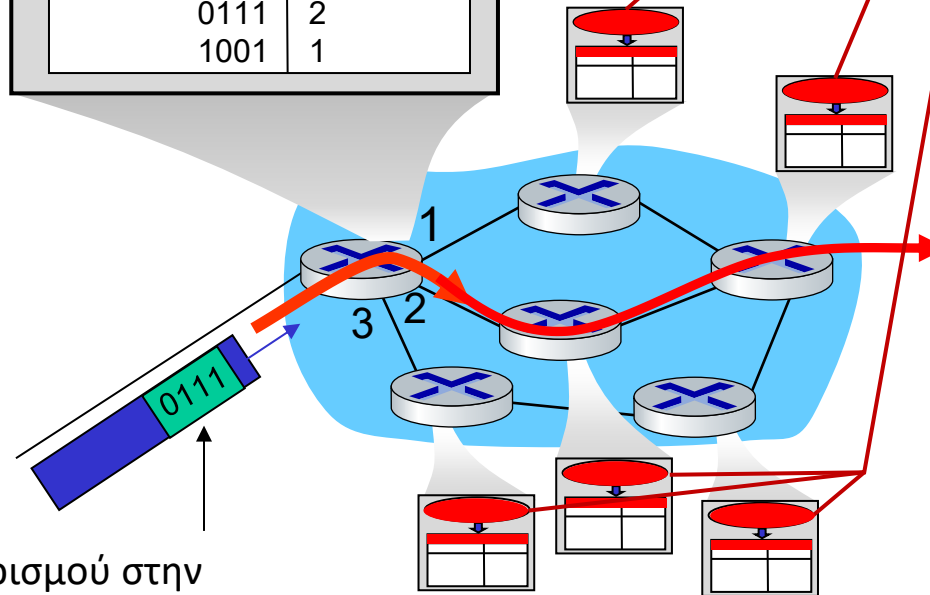
- Αλλιώς, «μεταγωγή»
- Λειτουργία **τοπικής** εμβέλειας / σημασίας: μεταφέρει εισερχόμενα πακέτα από τη ζεύξη εισόδου στην κατάλληλη ζεύξη εξόδου του δρομολογητή



Διεύθυνση προορισμού στην κεφαλίδα του αφικνούμενου πακέτου

Δρομολόγηση (Routing):

- Λειτουργία **παγκόσμιας** εμβέλειας / σημασίας: καθορίζει το μονοπάτι μεταξύ πηγής και προορισμού που θα ακολουθήσουν τα πακέτα
- **Πρωτόκολλα δρομολόγησης**



Διαδίκτυο - κλιμάκωση δρομολόγησης

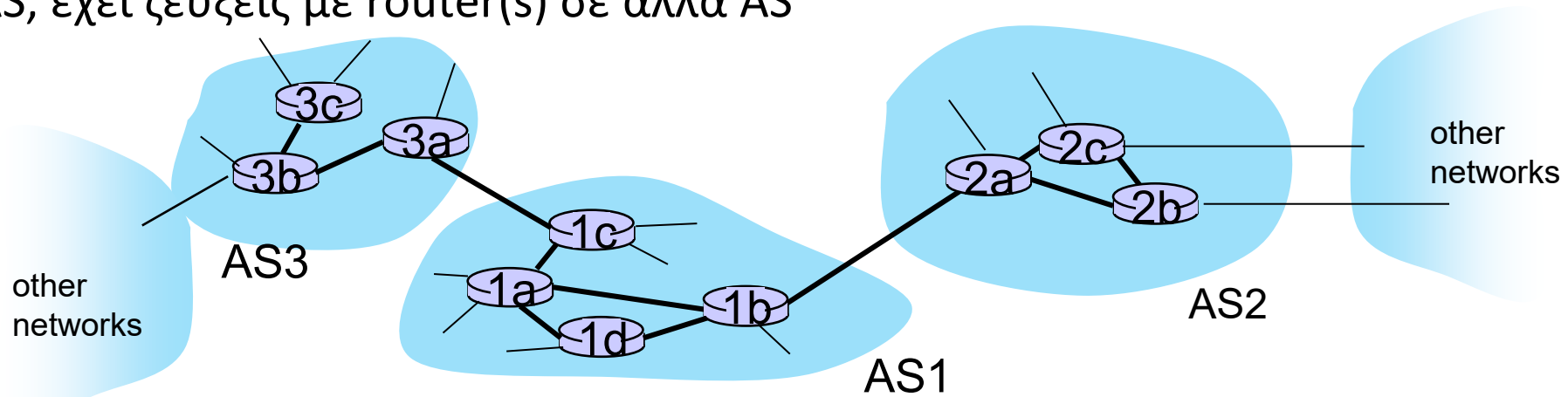
Ομαδοποίηση δρομολογητών σε “αυτόνομα συστήματα” “autonomous systems” (AS) (or “domains”) – κάθε AS ανήκει σε έναν πάροχο

intra-AS (“intra-domain”): μέσα στο AS

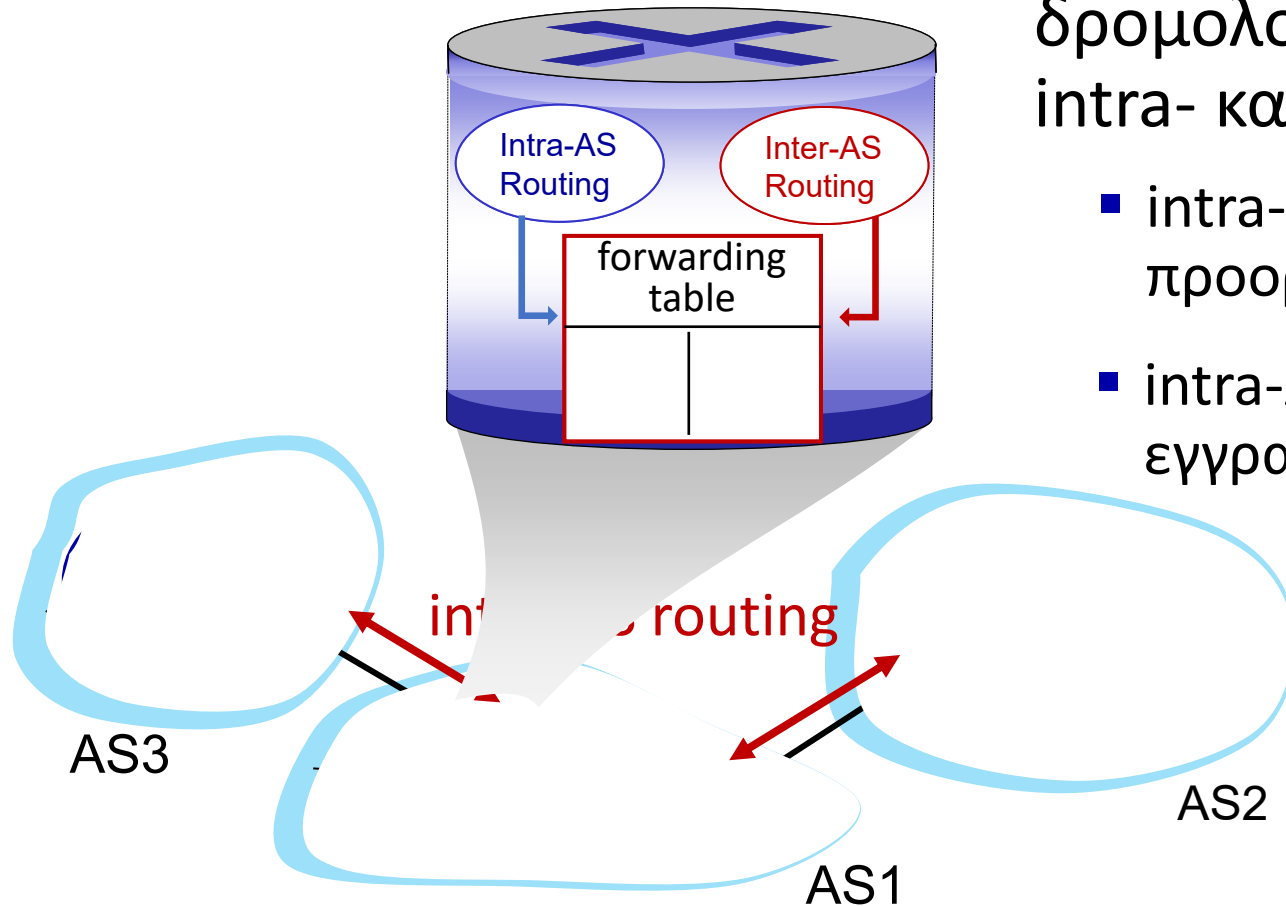
- όλοι οι routers στο AS τρέχουν το ίδιο intra-domain πρωτόκολλο δρομολόγησης
- routers σε διαφορετικά AS μπορούν να τρέχουν διαφορετικά intra-AS πρωτόκολλα
- **Δρομολογητής πύλη (gateway)**: στην άκρη του AS, έχει ζεύξεις με router(s) σε άλλα AS

inter-AS (“inter-domain”): μεταξύ των AS

- Όλοι οι δρομολογητές πύλης (gateways) τρέχουν το ίδιο inter-domain πρωτόκολλο δρομολόγησης (τρέχουν και intra-domain πρωτόκολλο δρομολόγησης της επιλογής του AS)



Interconnected ASes



Ο πίνακας προώθησης (του δρομολογητή) διαμορφώνεται από intra- και inter-AS routing protocols

- intra-AS routing καθορίζει εγγραφές για προορισμούς μέσα στο AS
- intra-AS και inter-AS routing καθορίζουν εγγραφές για προορισμούς εκτός του AS

Intra-AS routing: routing within an AS

Αλλιώς γνωστά ως **interior gateway protocols (IGP)**:

- **RIP: Routing Information Protocol** [RFC 1723]
 - classic Distance Vector: DVs exchanged every 30 secs
 - no longer widely used
- **EIGRP: Enhanced Interior Gateway Routing Protocol**
 - Distance Vector based
 - formerly Cisco-proprietary for decades (became open in 2013 [RFC 7868])
- **OSPF: Open Shortest Path First** [RFC 2328]
 - link-state based
 - IS-IS protocol (ISO standard, not RFC standard) essentially same as OSPF

Internet inter-AS routing: BGP

- **BGP (Border Gateway Protocol): the de facto** inter-domain routing protocol
 - η κόλλα που ενώνει το Διαδίκτυο - “the glue that holds the Internet together”
- Επιτρέπει στο υποδίκτυο να διαφημίσει την ύπαρξή του στο υπόλοιπο Διαδίκτυο: *“Είμαι εδώ, έτσι μπορείς να φτάσεις σε εμένα”*
- Το BGP δίνει σε κάθε AS τη δυνατότητα:
 - **eBGP**: Να αποκτήσει πληροφορία προσβασιμότητας των άλλων δικτύων από τα γειτονικά AS's
 - **iBGP**: Να διαδώσει την πληροφορία προσβασιμότητας στους AS-internal routers
 - Να καθορίσει “καλές” διαδρομές σε άλλα δίκτυα με κριτήριο την πληροφορία προσβασιμότητας και συναφείς **πολιτικές**

Why different Intra-, Inter-AS routing ?

Πολιτικές (policies):

- inter-AS: Ο admin θέλει να ελέγχει την κίνηση που περνάει από το δίκτυο του, ποιος δρομολογεί μέσω του δικτύου του
- intra-AS: Υπάρχει ένας admin, έτσι δεν απαιτούνται πολιτικές

Κλιμάκωση (scale):

- Η ιεραρχική δρομολόγηση εξοικονομεί μεγέθη πινάκων και μειώνει την πληροφορία των ενημερώσεων

Απόδοση (performance):

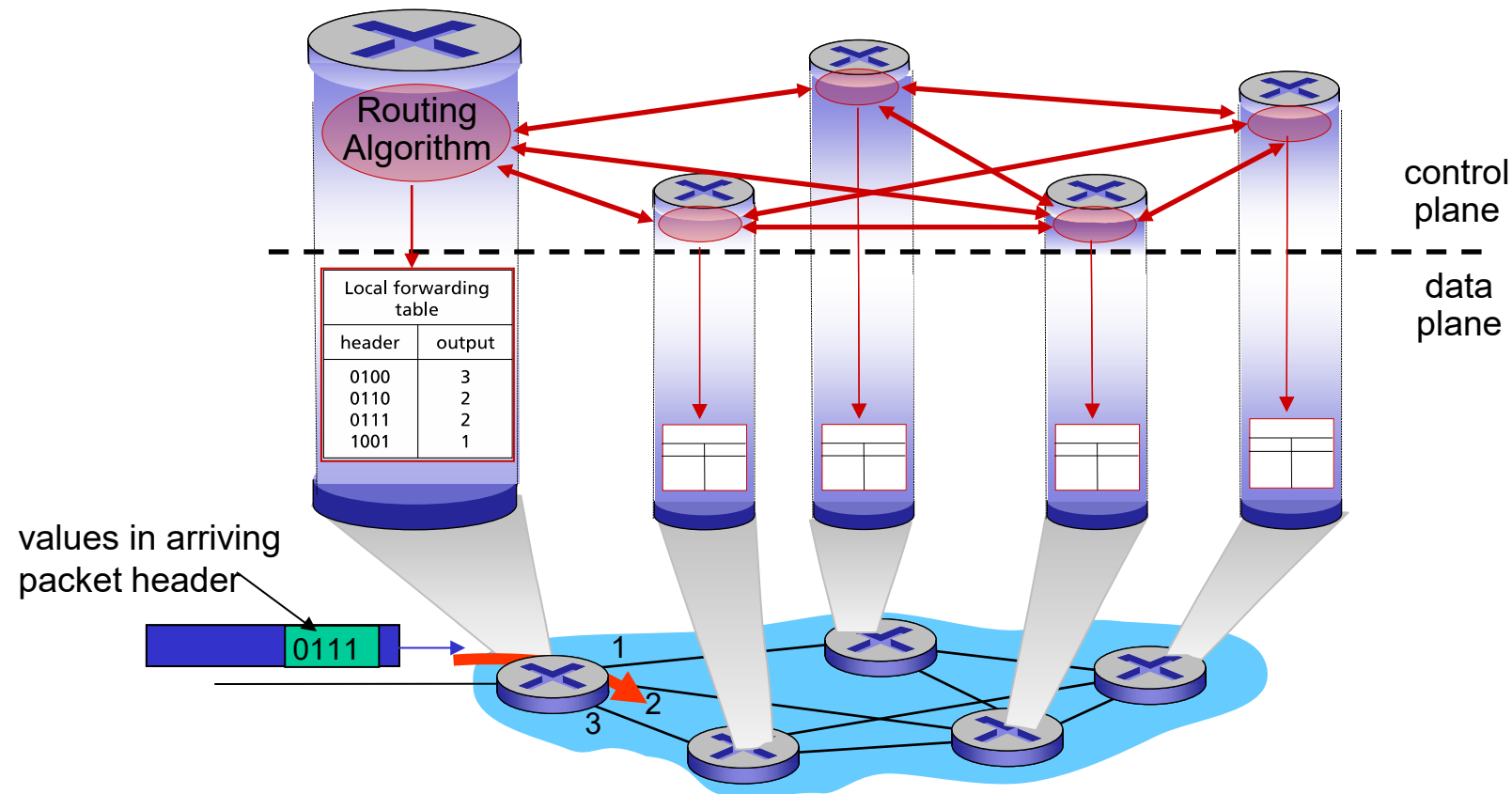
- inter-AS: Η πολιτική μπορεί να κυριαρχεί των επιδόσεων
- intra-AS: Εστιάζει στις επιδόσεις

Δίκτυα βασιζόμενα σε λογισμικό Software defined networking (SDN)

- Επίπεδο δικτύου Διαδικτύου: ιστορικά υλοποιείται με κατανεμημένο έλεγχο ανά δρομολογητή:
 - Ο «μονολιθικός» δρομολογητής περιέχει υλικό για την μεταγωγή/προώθηση, και τρέχει τυπικά πρωτοκόλλα Διαδικτύου (IP, RIP, IS-IS, OSPF, BGP) σε ιδιοταγές λειτουργικό σύστημα του δρομολογητή (π.χ. Cisco IOS)
 - διαφορετικά "μεσαία κουτιά" για διαφορετικές λειτουργίες επιπέδου δικτύου: τείχη προστασίας (firewall), εξισορροπητές φορτίου, NAT, ..
- ~2005: ανανεωμένο ενδιαφέρον για την επανεξέταση του επιπέδου ελέγχου δικτύου

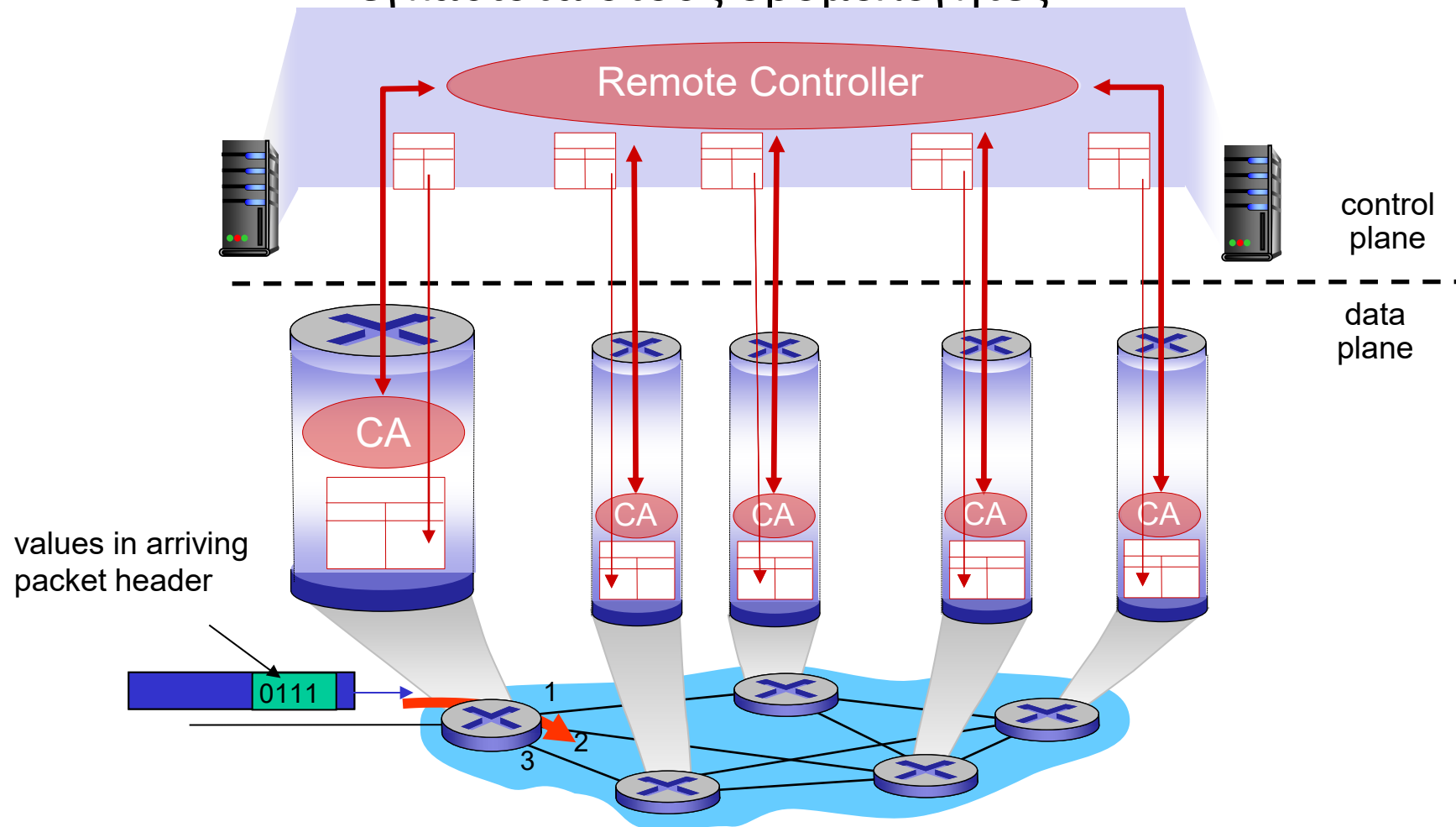
Επίπεδο ελέγχου ανά δρομολογητή

Μεμονωμένες εκφάνσεις του αλγορίθμου δρομολόγησης σε κάθε δρομολογητή αλληλεπιδρούν στο επίπεδο ελέγχου για να υπολογίσουν τους πίνακες προώθησης



Software-Defined Networking (SDN) control plane

Ενας απομακρυσμένος ελεγκτής (SDN controller) υπολογίζει τους πίνακες και τους εγκαθιστά στους δρομολογητές

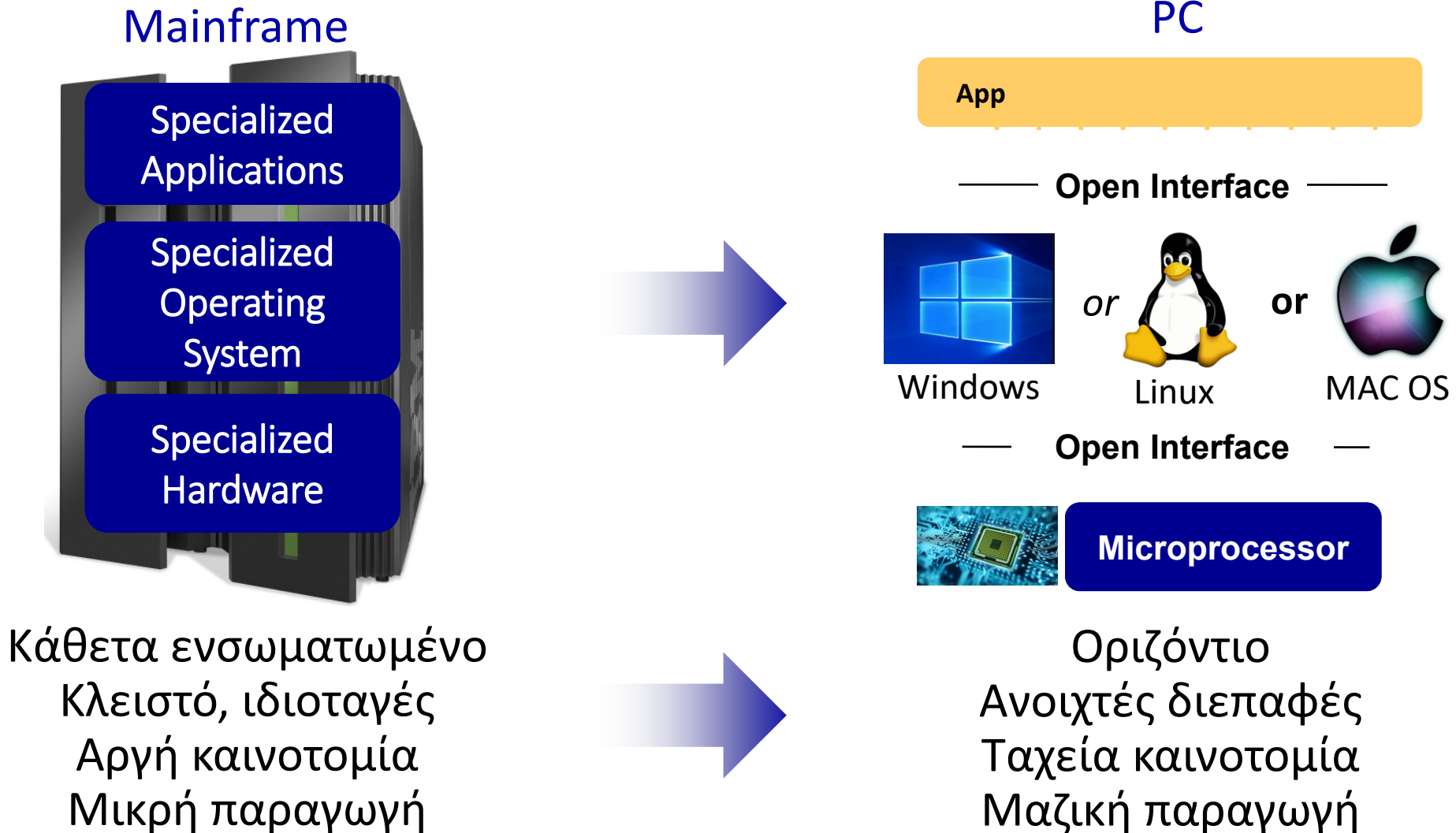


Software defined networking (SDN)

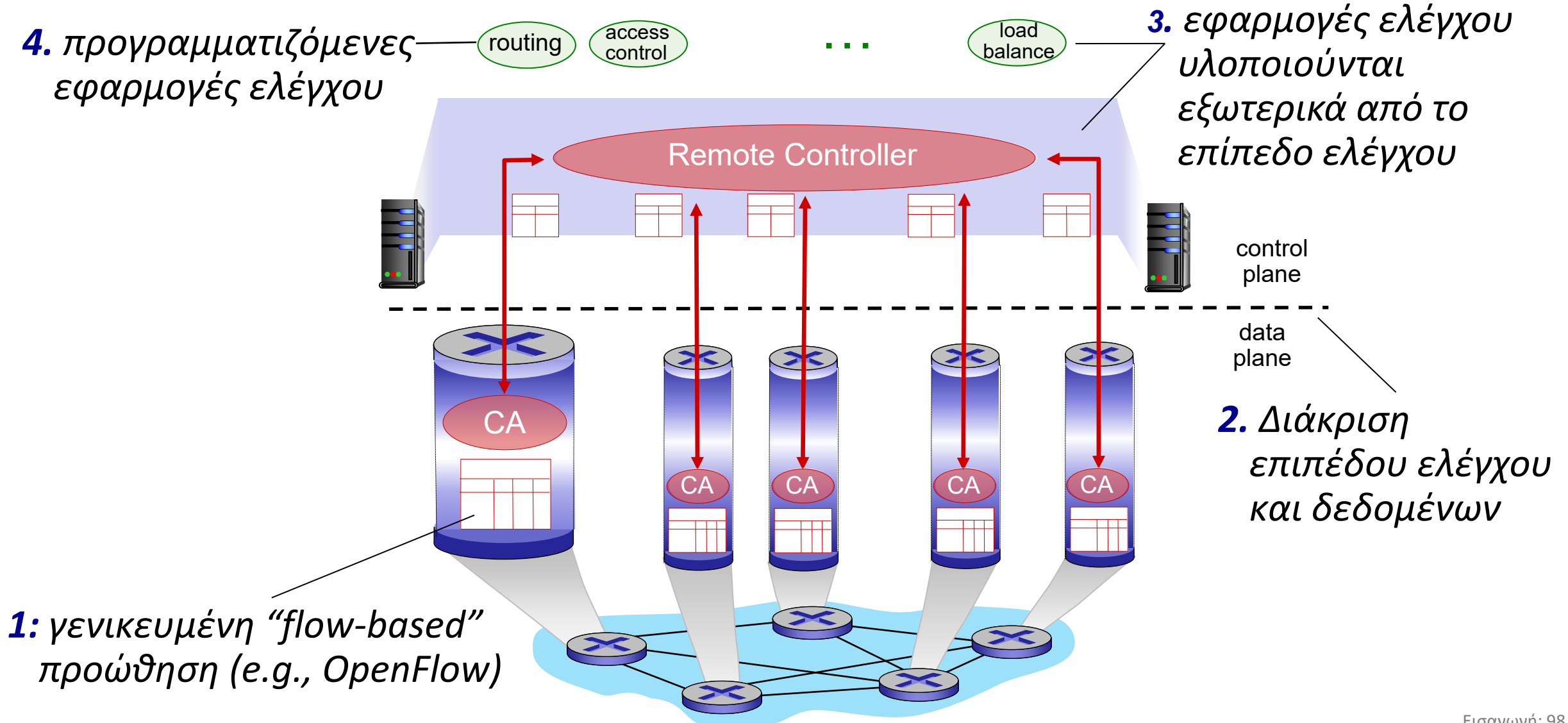
Γιατί ένα λογικά κεντριοποιημένο επίπεδο ελέγχου;

- **Ευκολότερη διαχείριση** δικτύου: αποφυγή σφαλμάτων διαμόρφωσης δρομολογητή, μεγαλύτερη ευελιξία στην δρομολόγηση
- Η γενικευμένη προώθηση (OpenFlow rules) επιτρέπει τον «**προγραμματισμό**» δρομολογητών
 - πιο εύκολος ο κεντρικός «προγραμματισμός»: υπολογισμός πινάκων κεντρικά και μετά διανομή
 - πιο δύσκολος ο κατανεμημένος "προγραμματισμός": υπολογισμός πινάκων ως αποτέλεσμα κατανεμημένου αλγορίθμου (πρωτόκολλου) που εφαρμόζεται σε κάθε δρομολογητή
- Ανοικτή (μη ιδιοταγής) εφαρμογή του επιπέδου ελέγχου
 - προωθεί την καινοτομία

SDN analogy: mainframe to PC revolution

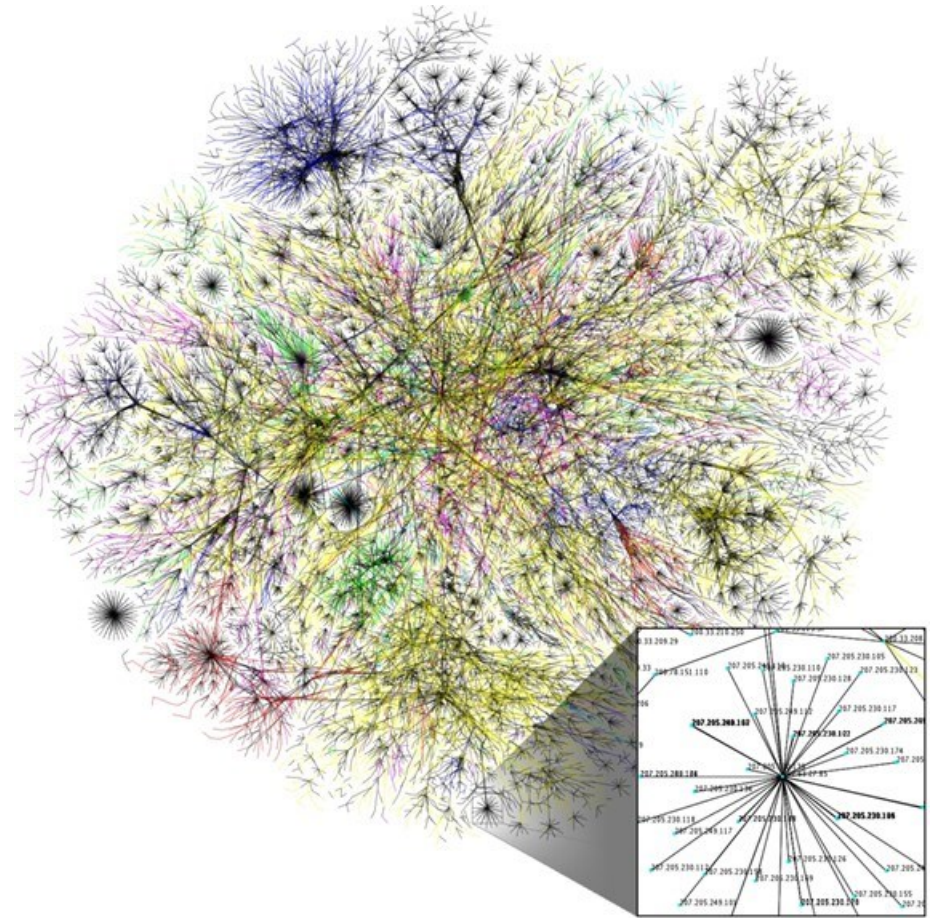


Software defined networking (SDN)



Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων - Εισαγωγή

- Διαδίκτυο – στατιστικά
- Δομή του Διαδικτύου
- Τεχνικές μεταγωγής
- Στοίβα πρωτοκόλλων Διαδικτύου
- Επίπεδο Δικτύου
- Επίπεδο Ζεύξης



Επίπεδο ζεύξης: γενικό πλαίσιο

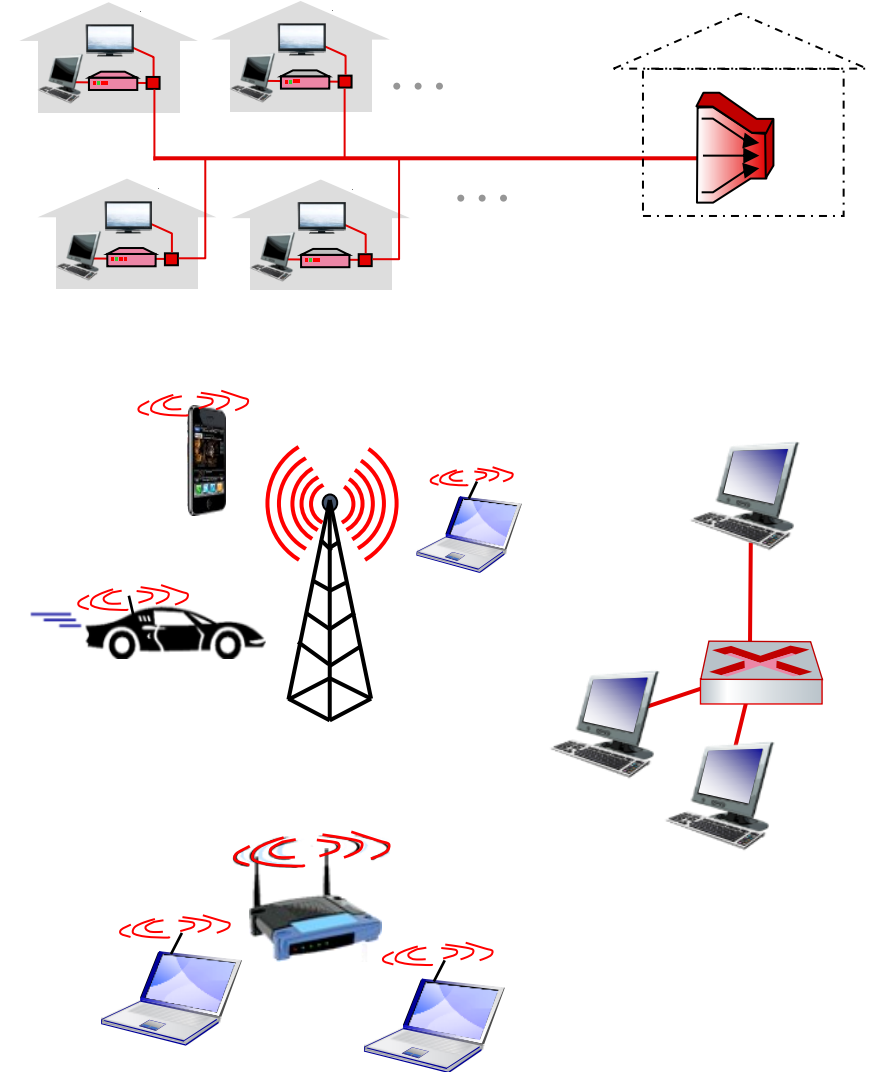
- Ενα datagram μεταφέρεται από διαφορετικά πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης σε διαφορετικές ζεύξεις:
 - e.g., WiFi (802.11) στην πρώτη ζεύξη, Ethernet στην επόμενη
- Κάθε πρωτόκολλο ζεύξης παρέχει διαφορετικές υπηρεσίες
 - π.χ., ενδέχεται να παρέχει ή να μην παρέχει αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων (reliable data transfer - rdt) πάνω από τη ζεύξη

Αναλογία με μεταφορές:

- Ταξίδι Princeton - Lausanne
 - ταξί: Princeton to JFK
 - αεροπλάνο: JFK to Geneva
 - τρένο: Geneva to Lausanne
- Τουρίστας = **datagram**
- Τμήμα μεταφοράς = **ζεύξη επικοινωνίας**
- Τρόπος μεταφοράς = **πρωτόκολλο επιπέδου ζεύξης**
- Ταξιδιωτικός πράκτορας = **αλγόριθμος δρομολόγησης**

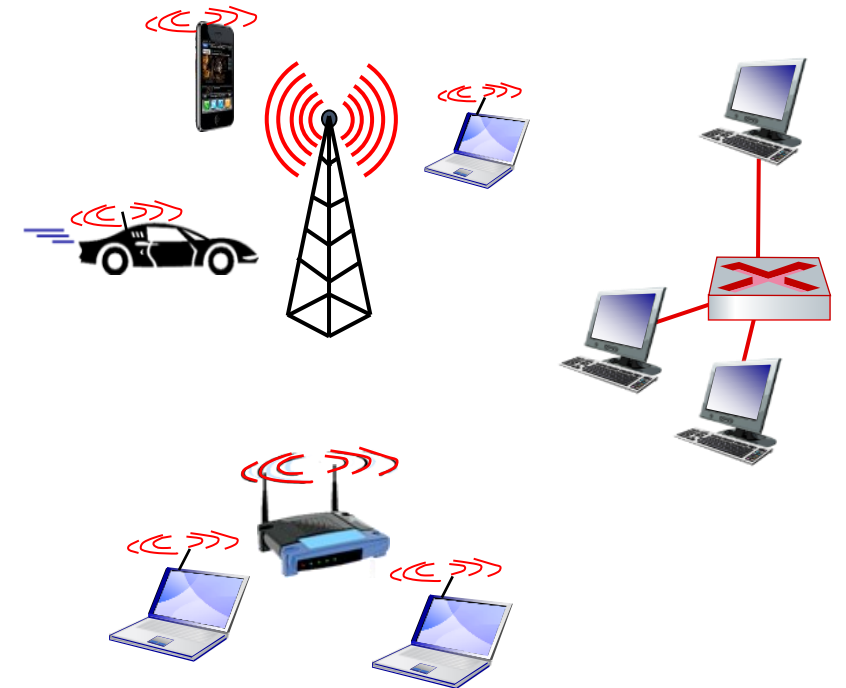
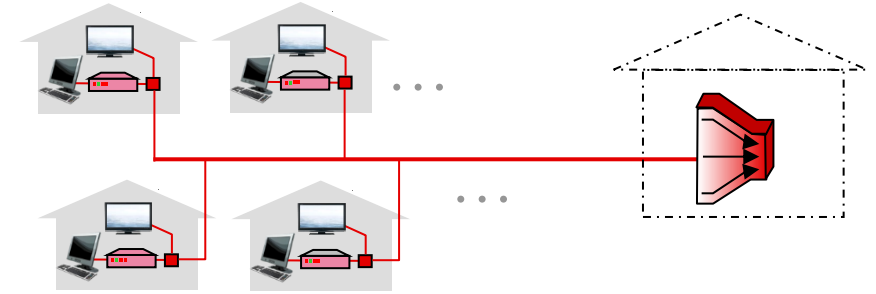
Επίπεδο ζεύξης: υπηρεσίες

- **Πλαισίωση, πρόσβαση στη ζεύξη:**
 - ενθυλακώνει το IP datagram σε πλαίσιο, προσθέτοντας επικεφαλίδα και ουρά (δομή πλαισίου ανάλογη με το πρωτόκολλο ζεύξης)
 - πρόσβαση στο μέσο/κανάλι (για κοινόχρηστα μέσα)
 - χρήση MAC (medium access control) διευθύνσεων πηγής, προορισμού στις επικεφαλίδες των πλαισίων
 - Διαφορετικές από τις IP διευθύνσεις!
- **Αξιόπιστη παράδοση μεταξύ γειτονικών κόμβων**
 - γίνεται ήδη από-ακρο-σε-ακρο (επίπεδο 4 - μεταφοράς)!
 - σπάνια χρησιμοποιείται σε ζεύξεις με χαμηλό ρυθμό σφαλμάτων bit (πχ ίνες, συνεστραμμένα ζεύγη), αλλά σε ζεύξεις με υψηλό ρυθμό σφαλμάτων (πχ ασύρματες)
- Ε: γιατί αξιοπιστία και στο επ. ζεύξης και από-άκρο-σε-άκρο



Επίπεδο ζεύξης: υπηρεσίες (συν.)

- Έλεγχος ροής (flow control):
 - ρύθμιση ρυθμού μεταξύ γειτονικών κόμβων αποστολής και λήψης
- Ανίχνευση σφαλμάτων (error detection):
 - σφάλματα που προκαλούνται από εξασθένιση του σήματος, θόρυβο
 - ο δεκτής ανιχνεύει την ύπαρξη σφαλμάτων, ειδοποιεί τον αποστολέα για αναμετάδοση ή απορρίπτει το πλαίσιο
- Διόρθωση σφαλμάτων (error correction):
 - ο δέκτης αναγνωρίζει και διορθώνει σφάλματα bit χωρίς να καταφεύγει στην αναμετάδοση
- Ημι-αμφίδρομη (half-duplex) και αμφίδρομη (full-duplex) επικοινωνία:
 - half duplex: οι κόμβοι στα δυο άκρα της ζεύξης μπορούν να μεταδώσουν, αλλά όχι ταυτόχρονα



Ζεύξεις: Φυσικά μέσα

Διαφορετικά πρωτόκολλα και διαφορετικές αρχιτεκτονικές για διαφορετικές ζεύξεις

- **Φυσική ζεύξη:** ότι βρίσκεται μεταξύ πομπού και δέκτη
- **Οδηγούμενα μέσα (guided media):**
 - σήματα διαδίδονται σε κυματοδηγούς: χαλκός, οπτική ίνα, ομοαξονικό καλώδιο
- **Μη οδηγούμενα μέσα (unguided media):**
 - σήματα διαδίδονται ελεύθερα, π.χ., ραδιο-κύματα

- **Χαλκός**
 - Συνεστραμμένο ζεύγος (Twisted Pair -TP)
 - Ομοαξονικό καλώδιο δύο μονωμένα σύρματα χαλκού

- **Οπτική ίνα**



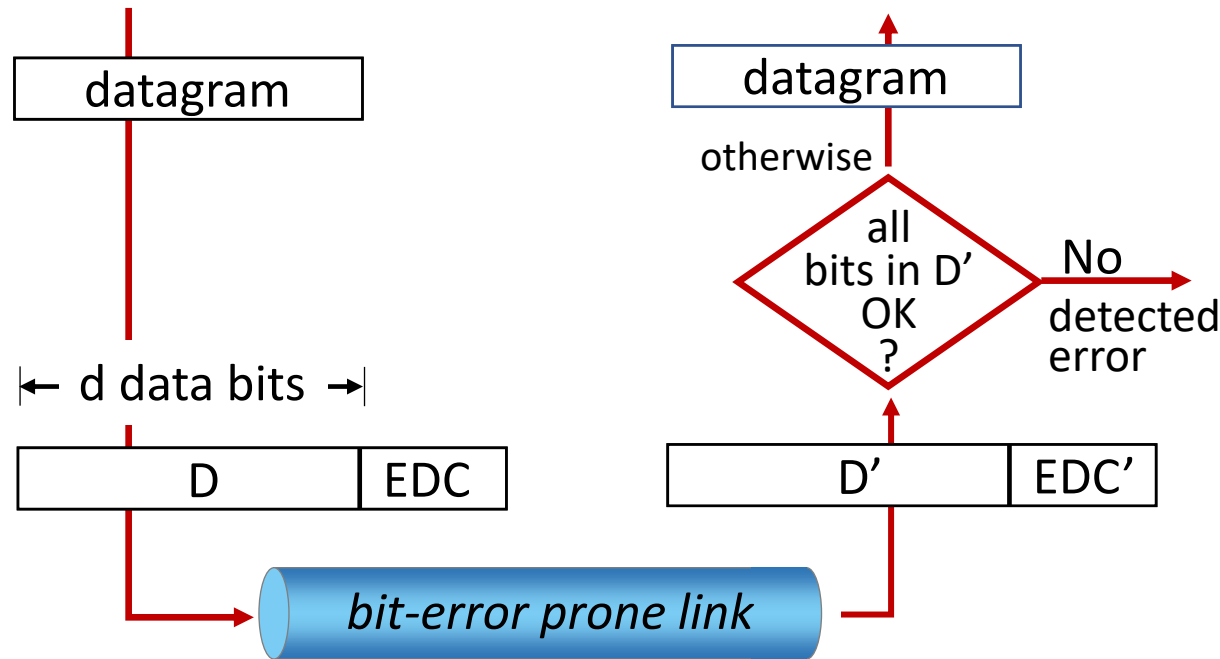
- **Ασύρματα ραδιοκανάλια**
 - Διαφορετικές συχνότητες
 - Ευρη-εκπομπή (broadcast)



Ανίχνευση σφαλμάτων (Error Detection)

EDC: error detection and correction bits - bits ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων (πλεονασμός - redundancy)

D: τα δεδομένα που προστατεύονται από τον έλεγχο σφαλμάτων ενδέχεται να περιλαμβάνουν πεδία της κεφαλίδας του πλαισίου



Η ανίχνευση σφαλμάτων δεν είναι 100% αξιόπιστη!

- το πρωτόκολλο μπορεί να «χάσει» μερικά σφάλματα (σπάνια)
- μεγαλύτερο πεδίο EDC οδηγεί σε καλύτερη ανίχνευση και διόρθωση

Ζεύξεις και πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης (Multiple access links, protocols)

Δύο είδη ζεύξεων:

- **Σημείο-προς-σημείο (point-to-point protocol - PPP)**
 - PPP ζεύξεις μεταξύ 2 δρομολογητών
 - PPP για πρόσβαση dial-up
- **Εκπομπής (broadcast), μέσο κοινής χρήσης (multiple access)**
 - Παραδοσιακό Ethernet
 - Upstream σε παθητικά οπτικά δίκτυα (passive optical network – PON)
 - Upstream σε δίκτυα καλωδιακής προσπέλασης (cable-based access network)
 - 802.11 wireless LAN, 4G/5G, satellite



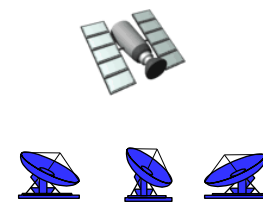
shared wire (e.g.,
cabled Ethernet)



shared radio: 4G/5G



shared radio: WiFi



shared radio: satellite



humans at a cocktail party
(shared air, acoustical)

Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης (Multiple access protocols)

- Κανάλι εκπομπής (broadcast) κοινής χρήσης
- Δύο ή περισσότερες ταυτόχρονες μεταδόσεις δημιουργούν παρεμβολές
 - *Σύγκρουση (collision)* οι κόμβοι λαμβάνουν δύο ή περισσότερα σήματα ταυτόχρονα και δεν μπορούν να αποκωδικοποιήσουν, τα πλαίσια είναι άχρηστα

Πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης

- Κατανεμημένος αλγόριθμος που καθορίζει πώς οι κόμβοι μοιράζονται το κανάλι, π.χ., καθορίζει πότε ο κόμβος μπορεί να μεταδώσει
- Η επικοινωνία για την κοινή χρήση του καναλιού πρέπει να χρησιμοποιήσει το ίδιο το κανάλι!
 - δεν υπάρχει εκτός ζώνης (out-of-band) κανάλι για συντονισμό

Multiple Access (MA) or Medium Access Control (MAC) protocol

Ιδανικό πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης

Δίνεται: κανάλι εκπομπής κοινής χρήσης ρυθμού R bps

Ζητούμενο:

1. όταν ένας κόμβος θέλει να μεταδώσει μπορεί να στείλει με ρυθμό R
2. όταν M κόμβοι θέλουν να μεταδώσουν, ο καθένας μπορεί να στείλει με μέσο ρυθμό R/M
3. πλήρως αποκεντρωμένο:
 - χωρίς κάποιος ειδικός κόμβος να συντονίζει τις μεταδόσεις
 - χωρίς συγχρονισμό ρολογιών, θυρίδων
4. απλό

Πρωτόκολλα MAC: ταξινόμηση

Τρεις ευρείες κατηγορίες:

- **Κατάτμηση καναλιού**

- διαίρεση του καναλιού σε μικρότερα “κομμάτια” (χρονοθυρίδες, συχνότητα, κώδικες)
- εκχώρηση κομματιού σε κόμβο για αποκλειστική χρήση

- **Τυχαία πρόσβαση**

- το κανάλι δεν διαιρείται, επιτρέπονται συγκρούσεις
- μηχανισμός “ανάνηψης” από συγκρούσεις

- **Εκ περιτροπής λειτουργία**

- οι κόμβοι μεταδίδουν με τη σειρά, αλλά οι μεταδόσεις των κόμβων που έχουν να στείλουν περισσότερα μπορεί να διαρκέσουν περισσότερο

Πρωτόκολλα MAC: ταξινόμηση

Τρεις ευρείες κατηγορίες:

- **Κατάτμηση καναλιού**
 - TDM, FDM, CDM (στατικά)
- **Τυχαία πρόσβαση**
 - ALOHA, θυριδωτό (slotted) ALOHA
 - CSMA, CSMA/CD (Ethernet), CSMA/CA (WiFi)
- **Εκ περιτροπής λειτουργία**
 - Token ring, token bus, polling
- **Συνήθως συνδυασμός**
 - π.χ. PON: polling και μετά δυναμική ανάθεση χρονοθυρίδων (TDM)

Διευθύνσεις MAC

- Διευθύνσεις IP 32-bit:

- διεύθυνση επιπέδου δικτύου για τη διεπαφή
- χρησιμοποιείται για προώθηση επιπέδου 3 (επίπεδο δικτύου)
π.χ.: 128.119.40.136

- Διευθύνσεις **MAC** (ή LAN ή φυσική ή Ethernet):

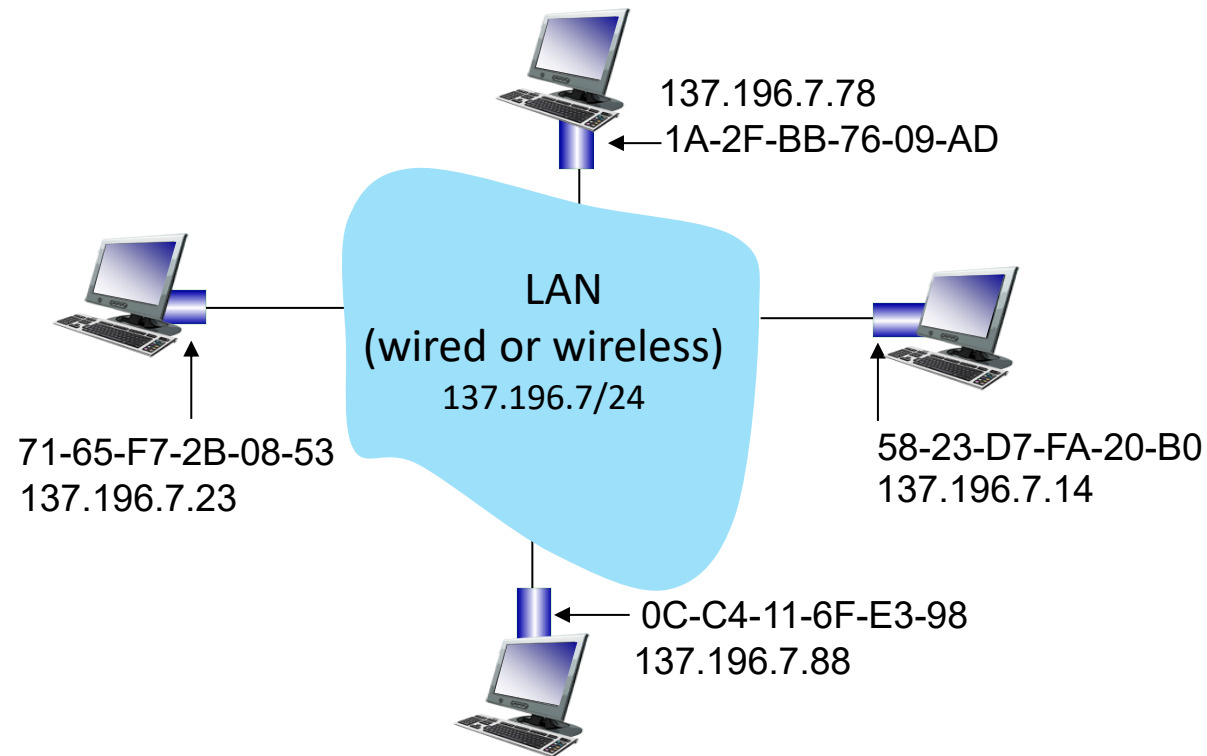
- Λειτουργία: χρησιμοποιείται “τοπικά” για να πάει το πλαίσιο από μια διεπαφή σε μια άλλη φυσικά συνδεδεμένη διεπαφή (ίδιο δίκτυο, υπό την έννοια της IP διευθυνσιοδότησης)
- 48 bit διεύθυνση MAC (για τα περισσότερα LANs) αποθηκευμένη στη ROM του προσαρμογέα (NIC ROM)
- π.χ.: 1A-2F-BB-76-09-AD

δεκαεξαδικός (βάση 16) συμβολισμός
(κάθε “νούμερο” αντιπροσωπεύει 4 bits)

Διευθύνσεις MAC

Κάθε προσαρμογέας (adapter / interface) του LAN

- έχει μοναδική 48-bit **MAC** διεύθυνση
- έχει (τοπικά) μοναδική 32-bit IP διεύθυνση

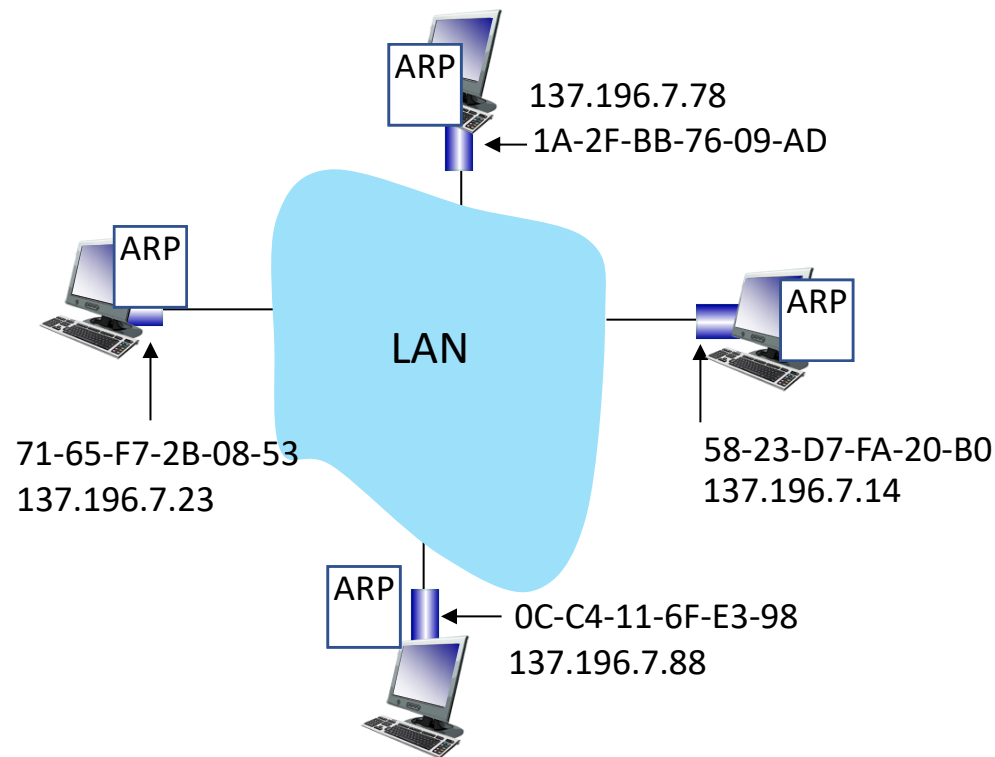


Διευθύνσεις MAC

- Το IEEE διαχειρίζεται την εκχώρηση MAC διευθύνσεων
- Ένας κατασκευαστής αγοράζει τμήμα του χώρου των MAC διευθύνσεων (για να διασφαλιστεί η μοναδικότητα)
- Αναλογία:
 - διεύθυνση MAC: όπως ο αριθμός κοινωνικής ασφάλισης
 - διεύθυνση IP: όπως η ταχυδρομική διεύθυνση
- Επίπεδη διεύθυνση MAC → φορητότητα
 - μπορεί να μετακινηθεί η κάρτα LAN από το ένα LAN στο άλλο
 - η ιεραρχική IP διεύθυνση δεν είναι φορητή: εξαρτάται από το δίκτυο IP στον οποίο ο κόμβος είναι συνδεδεμένος

Πρωτόκολλο διευθέτησης διευθύνσεων - address resolution protocol - ARP

Ερώτηση: πώς να βρούμε τη MAC διεύθυνση μιας διεπαφής γνωρίζοντας την IP διεύθυνση της;

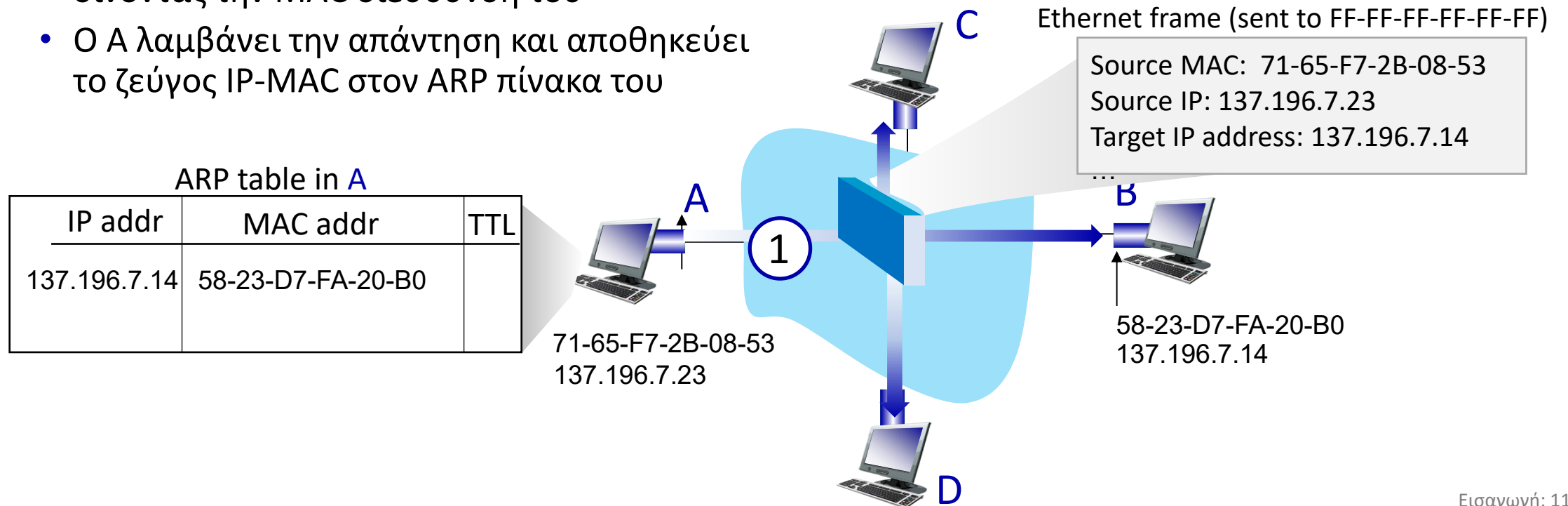


Πίνακας ARP: κάθε IP κόμβος (host, router) στο LAN έχει πίνακα ARP

- αντιστοίχιση IP-MAC διευθύνσεων για κάποιους κόμβους στο LAN:
< IP address; MAC address; TTL >
- TTL (Time To Live): χρόνος μετά τον οποίο η αντιστοίχιση διευθύνσεων θα «ξεχαστεί» (π.χ. 20 λεπτά)

ARP protocol

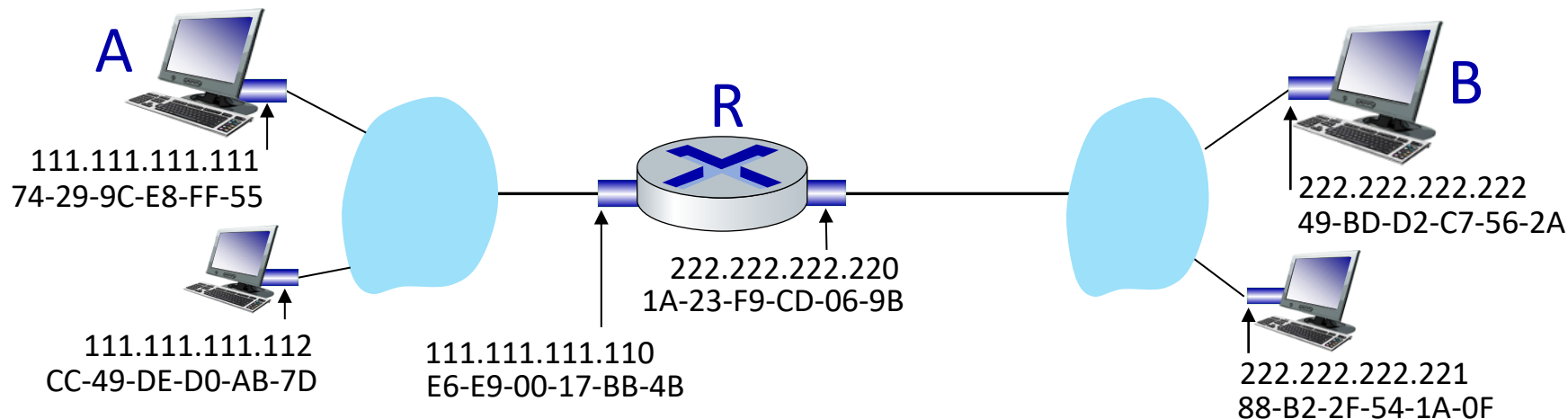
- Αν ο A θέλει να στείλει στον B και δεν έχει στον πίνακα ARP του την MAC του B
- Address Resolution Protocol (ARP)
 - Ο A εκπέμπει (broadcasts) ARP ερώτημα, που περιέχει την IP addr του B
 - Ο B το λαμβάνει και απαντάει στον A δίνοντας την MAC διεύθυνση του
 - Ο A λαμβάνει την απάντηση και αποθηκεύει το ζεύγος IP-MAC στον ARP πίνακα του



Δρομολόγηση σε άλλο υποδίκτυο

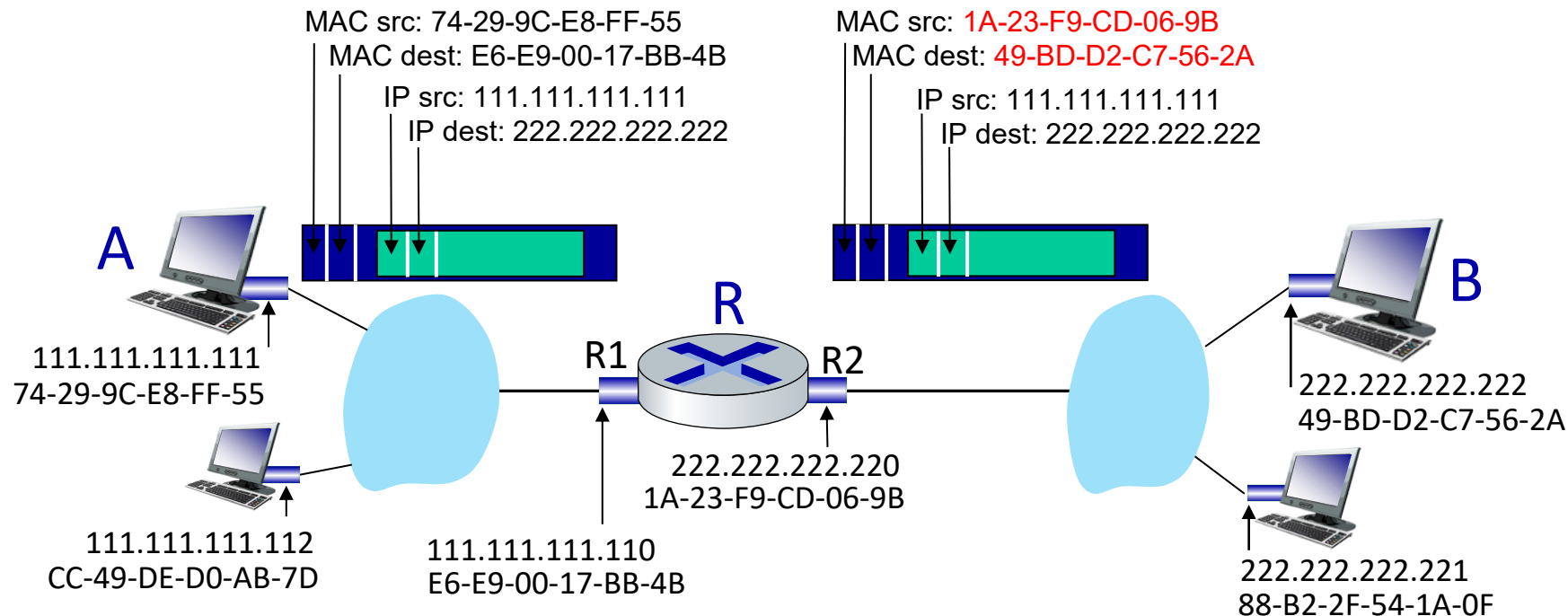
Βήμα-βήμα: **στέλνοντας το datagram από τον A στον B μέσω του R**

- Διευθυνσιοδότηση – IP (datagram) και MAC (frame)
- Υποθέτοντας πως:
 - ο A ξέρει την IP διεύθυνση του B (πως;)
 - ο A ξέρει ότι ο B είναι σε άλλο δίκτυο (πως;)
 - ο A ξέρει την IP διεύθυνση του δρομολογητή πρώτου άλματος (πως;)
 - ο A ξέρει την MAC διεύθυνση του R (πως;)



Δρομολόγηση σε άλλο υποδίκτυο

- IP address end-to-end, MAC hop-by-hop
- Ο Α στέλνει στον R (IP src Α, IP dest Β, MAC src Α, MAC dest R1)
- Ο R το προωθεί στον Β (IP src Α, IP dest Β, MAC src R2, MAC dest Β)
 - Αποθυλακώνει το προηγούμενο πλαίσιο και δημιουργεί καινούργιο με νέες MAC διευθύνσεις



Γιατί διευθύνσεις MAC και IP

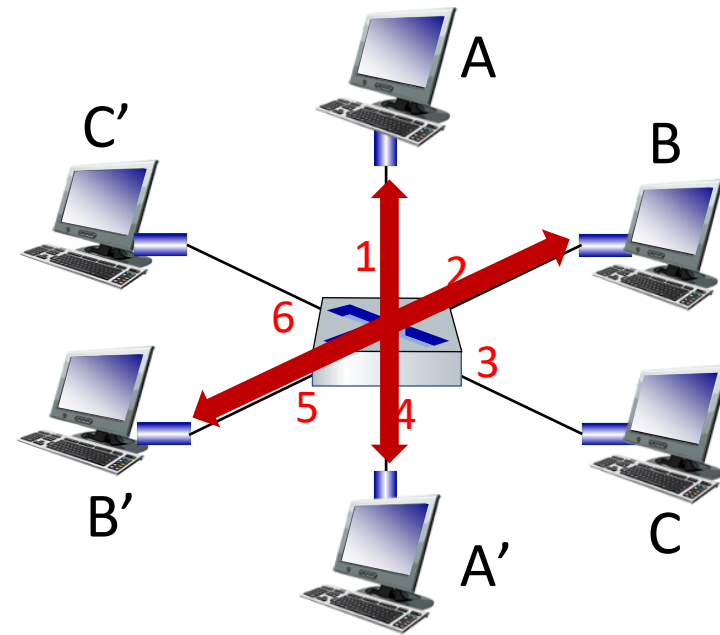
- Είναι η διευθυνσιοδότηση επιπέδου ζεύξης (MAC) αναγκαία;
 - Προώθηση του πακέτου στον επόμενο δρομολογητή
 - Η IP επικεφαλίδα έχει τις IP διευθύνσεις **αρχικής πηγής** και **τελικού προορισμού**
 - Για να φτάσει στον τελικό προορισμό πρέπει να πάει **βήμα-βήμα**, για να γίνει αυτό σε κάθε βήμα χρησιμοποιούμε MAC διευθύνσεις πηγής και προορισμού στο βήμα αυτό
 - Αποφυγή άχρηστων διακοπών της CPU
 - Η NIC (hardware) ελέγχει τα πλαίσια και προωθεί στα υπερκείμενα πρωτόκολλα (τρέχουν στην CPU) μόνο τα datagrams που απευθύνονται στον κόμβο ή είναι πλαίσια εκπομπής (broadcast)
- Γιατί διαφορετικές διευθύνσεις
 - Ιστορικοί λόγοι: (απομονωμένα) δίκτυα με διαφορετικές διευθυνσιοδοτήσεις (που έγιναν διευθύνσεις επιπέδου ζεύξης) ενώθηκαν μέσω του IP στο Διαδίκτυο
 - Ανεξαρτησία επιπέδων: 'ουδέτερες' διευθύνσεις επιπέδου ζεύξης μπορούν να υποστηρίξουν διαφορετικά πρωτόκολλα επιπέδου δικτύου εκτός του IP (πχ IPX, DECnet, Appletalk) και αντίστροφα

Ethernet μεταγωγέας (Ethernet switch)

- Ο μεταγωγέας είναι συσκευή **επιπέδου ζεύξης**: παίζει **ενεργό** ρόλο
 - **Αποθηκεύει και προωθεί** πλαίσια Ethernet
 - Εξετάζει τη διεύθυνση MAC των εισερχόμενων πλαισίων, **επιλεκτικά** προωθεί πλαίσια σε μία ή περισσότερες εξερχόμενες ζεύξεις όταν το πλαίσιο πρέπει να προωθηθεί, χρησιμοποιεί CSMA/CD για πρόσβαση μόνο σε διεπαφές με κανάλι πολλαπλής πρόσβασης
- **Διαφανής (transparent)**
 - οι υπολογιστές δε γνωρίζουν την παρουσία του μεταγωγέα
- **Plug-and-play, μαθαίνει από μόνος του (self-learning)**
 - ο μεταγωγέας δε χρειάζεται να διαμορφωθεί

Μεταγωγέας: πολλαπλές ταυτόχρονες μεταδόσεις

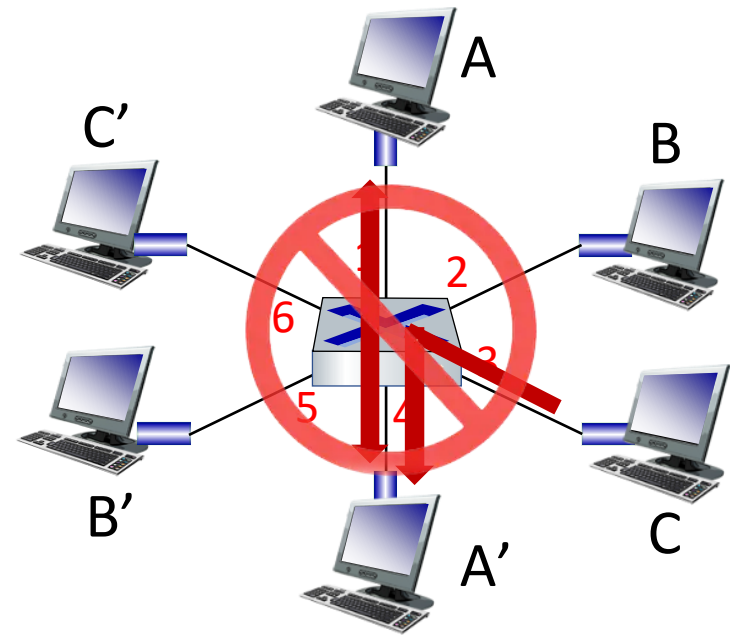
- Τα τερματικά έχουν αποκλειστικές, απευθείας συνδέσεις με τον μεταγωγέα
- Οι μεταγωγείς ενταμιεύουν πακέτα
- Το πρωτόκολλο Ethernet χρησιμοποιείται σε *κάθε* εισερχόμενη ζεύξη
 - αμφίδρομη λειτουργία, χωρίς συγκρούσεις
 - Κάθε ζεύξη είναι από μόνη της ένα ξεχωριστό collision domain
- **μεταγωγή:** Α-προς-Α' και Β-προς-Β' μεταδίδουν ταυτόχρονα, χωρίς συγκρούσεις



Μεταγωγέας (switch) με έξι διεπαφές (1,2,3,4,5,6)

Μεταγωγέας: πολλαπλές ταυτόχρονες μεταδόσεις

- Τα τερματικά έχουν αποκλειστικές, απευθείας συνδέσεις με τον μεταγωγέα
- Οι μεταγωγείς ενταμιεύουν πακέτα
- Το πρωτόκολλο Ethernet χρησιμοποιείται σε *κάθε* εισερχόμενη ζεύξη
 - αμφίδρομη λειτουργία, χωρίς συγκρούσεις
 - Κάθε ζεύξη είναι από μόνη της ένα ξεχωριστό collision domain
- **μεταγωγή:** A-προς-A' και B-προς-B' μεταδίδουν ταυτόχρονα, χωρίς συγκρούσεις
 - Αλλά A-προς-A' και C-προς-A' δεν μπορούν ταυτόχρονα με υψηλό ρυθμό (συμφόρηση στην ουρά)



Μεταγωγέας (switch) με έξι διεπαφές (1,2,3,4,5,6)

Πίνακας προώθησης μεταγωγέα (Switch forwarding table)

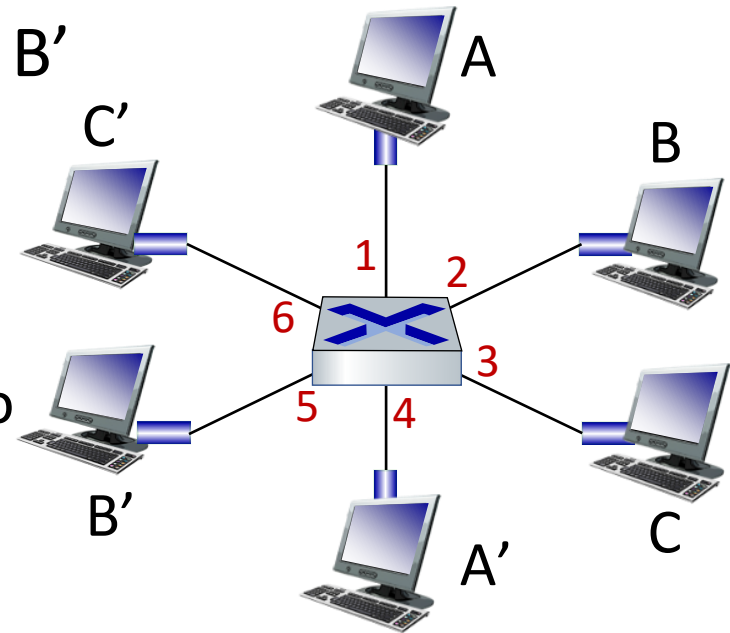
E: πώς γνωρίζει ο μεταγωγέας ότι ο A' είναι προσβάσιμος μέσω της διεπαφής 4 και ο B' μέσω της διεπαφής 5;

A: κάθε μεταγωγέας έχει ένα **πίνακα μεταγωγής (switch table)**

- καταχώριση: (MAC address of host, interface to reach host, time stamp)
- μοιάζει με πίνακα δρομολόγησης των δρομολογητών (routers)!

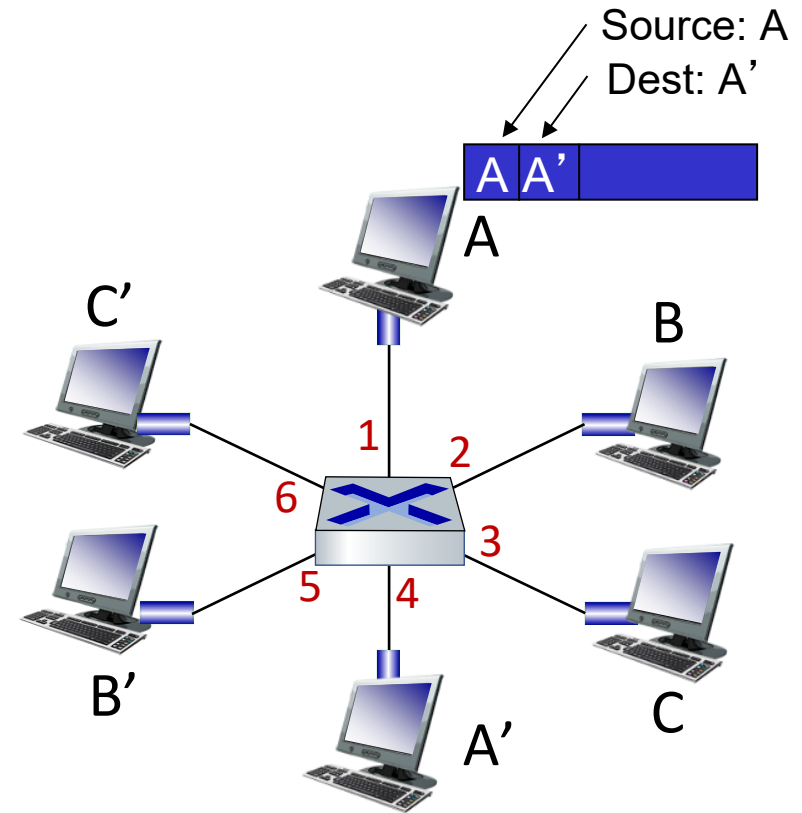
E: πώς δημιουργούνται, διατηρούνται οι καταχωρίσεις στον πίνακα μεταγωγής;

- κάτι σαν πρωτόκολλο δρομολόγησης;



Μεταγωγέας: αυτοεκμάθηση (self-learning)

- Ο μεταγωγέας *μαθαίνει* ποιούς υπολογιστές είναι προσβάσιμοι μέσω ποιών διεπαφών
 - όταν λαμβάνεται ένα πλαίσιο, ο μεταγωγέας “μαθαίνει” τη θέση του αποστολέα: εισερχόμενη διεπαφή / τμήμα του LAN
 - καταγράφει το ζεύγος αποστολέας/διεπαφή στον πίνακα μεταγωγής του

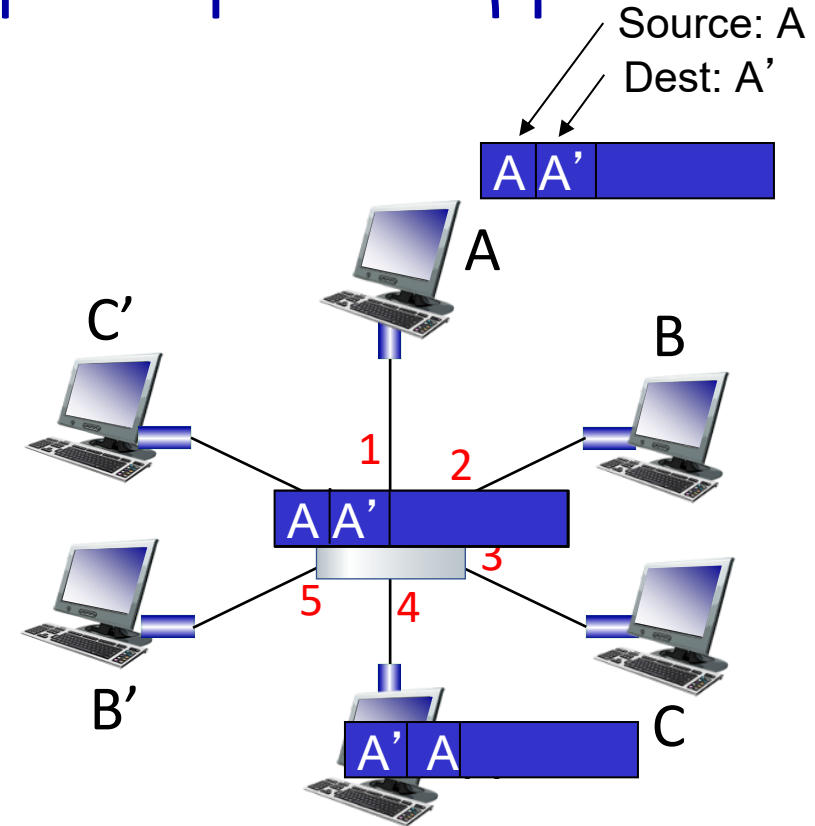


MAC addr	interface	TTL
A	1	60

*Switch table
(αρχικά άδειος)*

Αυτοεκμάθηση, προώθηση: παράδειγμα

- Άγνωστη θέση προορισμού A': **πλημύρα (flood)**
- Η θέση προορισμού του A είναι γνωστή : **επιλεκτική αποστολή (μόνο μια ζεύξη)**



MAC addr	interface	TTL
A	1	60
A'	4	60

*switch table
(initially empty)*

Μεταγωγέας: φιλτράρισμα/προώθηση πλαισίων

Όταν λαμβάνεται πλαίσιο στον μεταγωγέα:

1. Κατέγραψε MAC διεύθυνση αποστολέα - εισερχόμενη διεπαφή
2. Ψάξε τον πίνακα μεταγωγής για τη διεύθυνση MAC προορισμού
3. **Εάν** βρεθεί καταχώριση για τον προορισμό

Τότε {

Εάν ο προορισμός είναι στο τμήμα (διεπαφή) από το οποίο έφτασε το πλαίσιο

Τότε απέρριψε το πλαίσιο

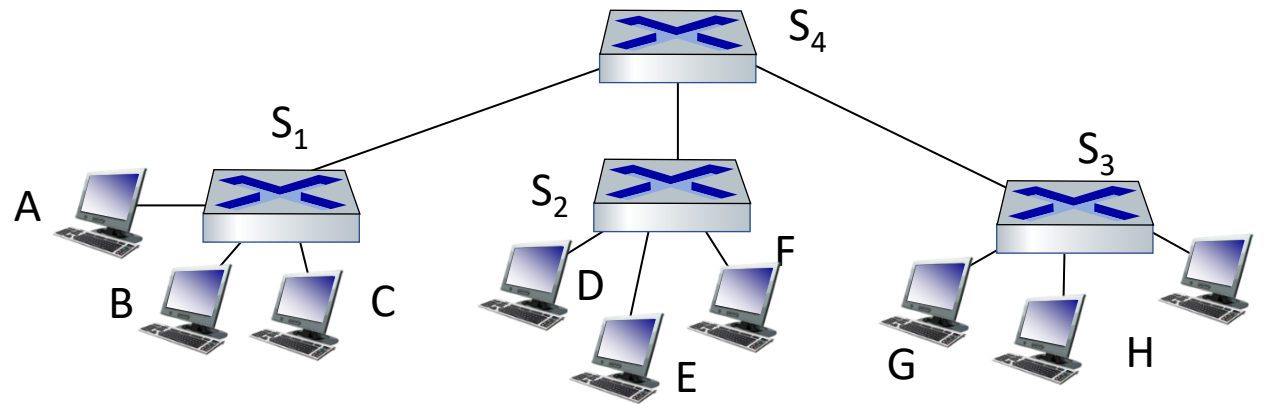
Αλλιώς προώθησε το πλαίσιο στη διεπαφή που υποδεικνύει η καταχώριση

}

Αλλιώς πλημύρα (flood) /* προώθηση σε όλες τις διεπαφές εκτός από αυτή από την οποία έφτασε το πλαίσιο*/

Διασυνδέοντας μεταγωγείς

Οι μεταγωγείς αυτοεκμάθησης μπορούν να διασυνδεθούν μεταξύ τους



E: κατά την αποστολή από A προς G – πώς γνωρίζει ο S_1 ότι πρέπει να προωθήσει πλαίσιο που προορίζεται για τον G μέσω των S_4 και S_3 ;

A: αυτοεκμάθηση!

(λειτουργεί ακριβώς όπως και στην περίπτωση ενός μόνο μεταγωγέα)

Μεταγωγείς έναντι δρομολογητών (Switches vs. Routers)

και οι 2 είναι συσκευές αποθήκευσης και προώθησης (store-and-forward):

- **δρομολογητές:** συσκευές επιπέδου δικτύου (εξετάζουν τις κεφαλίδες επιπέδου δικτύου)
- **μεταγωγείς:** συσκευές επιπέδου ζεύξης (εξετάζουν τις κεφαλίδες επιπέδου ζεύξης)

και οι 2 έχουν πίνακες προώθησης:

- **δρομολογητές:** υπολογίζουν τους πίνακες χρησιμοποιώντας αλγόριθμους δρομολόγησης, πίνακες με IP διευθύνσεις
- **μεταγωγείς:** μαθαίνουν τον πίνακα προώθησης χρησιμοποιώντας flooding και μάθηση, πίνακες με MAC διευθύνσεις

