



Κεφάλαιο 13: Πώς η κίνηση διασχίζει το διαδίκτυο

Καθηγητής Χρήστος Δουληγέρης
E-mail: cdoulig@unipi.gr
Γραφείο: 302



Τώρα στο διαδίκτυο

- ❑ Είναι παρακινδυνευμένο να συζητηθεί η ιστορική εξέλιξη των τεχνολογιών, όπως το Διαδίκτυο.
- ❑ Μερικά στοιχεία τα οποία θα θέλαμε να πιστέψουμε ότι είναι αναπόφευκτα αποτελέσματα ενός προσεκτικού σχεδιασμού, στην πραγματικότητα είναι είτε:
 - ιστορική κληρονομιά κάποιων ατυχημάτων ή
 - των αδόμητων απαιτήσεων για οπισθόδρομη συμβατότητα ή
 - της ανάγκης για βαθμιαία ανάπτυξη και οικονομικών κινήτρων

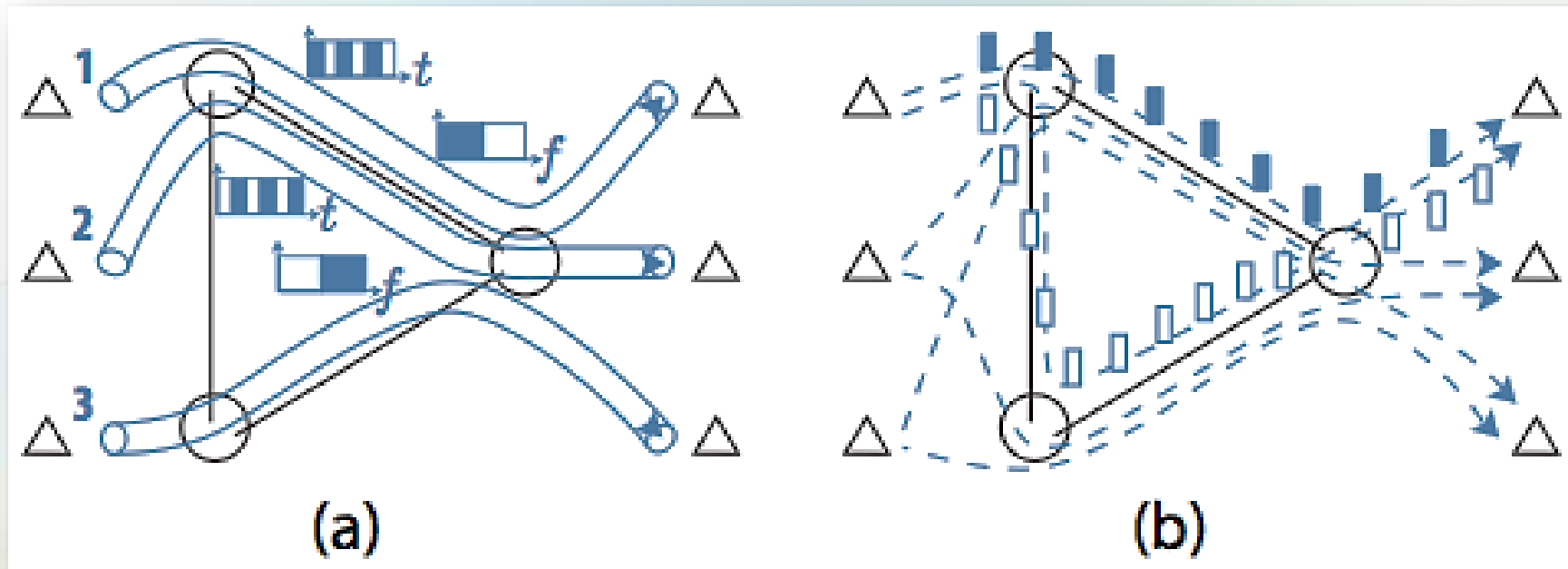
Το Ιστορικό του διαδικτύου

- ❑ 1969: APRANET
- ❑ 1974: TCP/IP
- ❑ 1985: NSFNET
- ❑ 1990: WWW
- ❑ 1992: φυλλομετρητές, διαδικτυακές πύλες, υπηρεσίες
- ❑ 2020: 6 φορές περισσότερες συνδεδεμένες συσκευές από ότι άνθρωποι.

Μεταγωγή πακέτου

- ❑ Όταν οι τυπικοί σας χρήστες δεν απαιτούν πραγματικά κάποιο “αφοσιωμένο πόρο” τότε πρέπει να επιτρέπεται στους χρήστες ο διαμοιρασμός των πόρων.
- ❑ Σε αυτή την διάλεξη ισχύει ότι:
 - ο χρήστης = σύνοδος = απλή συνεδρία = μονή (unicast) συνεδρία
- ❑ Πριν τη δεκαετία του 1960, δικτύωση ήταν η σύνδεση τηλεφωνικών κλήσεων τύπου PSTN.
- ❑ Τις δεκαετίες 1960 και 1970:
 - μια μετατόπιση στη μεταγωγή πακέτου ως θεμελιώδες πρότυπο της δικτύωσης
 - ο τεμαχισμός των μηνυμάτων μιας συνόδου σε μικρά πακέτα και της αποστολής τους με διαφορετικές πιθανές διαδρομές, με κάθε διαδρομή να μοιράζεται με άλλες συνόδους.

Μεταγωγή πακέτου (συνέχεια)



Αντιπαραβολή: Ένα απλό δίκτυο με 3 διασυνδεδεμένους δρομολογητές και 3 συνόδους

(a) Μεταγωγή κυκλώματος: κάθε σύνοδος καταλαμβάνει ένα αφοσιωμένο κύκλωμα, είτε μία μερίδα από κάθε χρονοθυρίδα ή ένα μέρος της ζώνης συχνότητας, ακόμα κι όταν δε χρησιμοποιείται.

(b) Μεταγωγή πακέτου: κάθε σύνοδος στέλνει πακέτα κατά μήκος μίας ή περισσότερων διαδρομών και όλες οι διαδρομές μοιράζονται μεταξύ χρονοθυρίδων και ζωνών συχνοτήτων.

Μεταγωγή πακέτου (συνέχεια)

Συζήτηση:

- ❑ Σύγκριση μεταγωγής κυκλώματος και της μεταγωγής πακέτων
- ❑ Σύγκριση ορθογώνιας με τη μη-ορθογώνια κατανομή πόρων
- ❑ Επιλογή σχεδιασμού: πελάτη-εξυπηρετητή σε σχέση μεταξύ ομοτίμων (peer-to-peer)
- ❑ Τοπική αποθήκευση σε σχέση με υπηρεσίες νέφους
- ❑ Χρονοδρομολόγηση χωρίς ανταγωνισμό (contention-free scheduling) σε σχέση με τυχαία προσπέλαση

Μεταγωγή πακέτου (συνέχεια)

Ερώτηση : Γιατί μεταγωγή κυκλώματος;

Απάντηση: Εγγύηση ποιότητας

- ❑ Δεδομένου ότι σε κάθε σύνοδο παρέχεται ένα κύκλωμα αφοσιωμένο σε αυτή, η ικανότητα διαβίβασης και η απόδοση καθυστέρησης είναι εγγυημένη και υπάρχει πολύ μικρό τρεμόπαιγμα (jitter) (οι διαφορές της καθυστέρησης).
- ❑ Σε αντίθεση, στη μεταγωγή πακέτων, η κυκλοφορία μίας συνόδου (ενδεχομένως) επιμερίζεται σε διαφορετικές διαδρομές, κάθε μία από τις οποίες μοιράζεται με άλλες συνόδους. Τα πακέτα φτάνουν εκτός σειράς και πρέπει να ανασυνταχθούν στον παραλήπτη. Οι ζεύξεις μπορεί να κορεστούν. Η ικανότητα διαβίβασης δεδομένων και οι επιδόσεις καθυστέρησης γίνονται αβέβαιες (**υπηρεσία καλύτερης προσπάθειας (best-effort)**).

Μεταγωγή πακέτου (συνέχεια)

Ερώτηση : Γιατί μεταγωγή πακέτου;

**Απάντηση: Ευκολία της συνδεσιμότητας
Κλιμάκωση λόγω της αποδοτικότητας**

- ❑ **Ευκολία της συνδεσιμότητας:** Δεν υπάρχει καμία ανάγκη να αναζητηθεί, καθιερωθεί, διατηρηθεί και τελικά να καταστραφεί ένα από άκρου εις άκρο κύκλωμα για κάθε σύνοδο.
- ❑ **Κλιμάκωση λόγω της αποδοτικότητας:** Ικανότητα υποστήριξης όσο το δυνατόν περισσότερων διαφορετικών τύπων συνεδριών, μερικές από τις οποίες είναι μακράς διάρκειας, ενώ άλλες είναι βραχείας.

Διαστρωμένη Αρχιτεκτονική

- ❑ Είναι μία φυσική πρακτική όταν σχεδιάζουμε ένα τόσο σύνθετο σύστημα να το σπάμε σε μικρότερα κομμάτια.
- ❑ Η διαδικασία της αρθρωτής προσέγγισης:
 - δημιουργείται από τη στοίβα διαστρωματωμένων πρωτοκόλλων για το Διαδίκτυο.
 - δεν παρακινείται από την αποδοτικότητα της κατανομής των πόρων, αλλά από την οικονομική βιωσιμότητα μέσω των επιχειρησιακών μοντέλων διαφορετικών εταιριών, που ειδικεύονται σε διαφορετικά επίπεδα, και από την ανθεκτικότητα στις απρόβλεπτες καινοτομίες, που μπορεί να προκύψουν στο Διαδίκτυο.

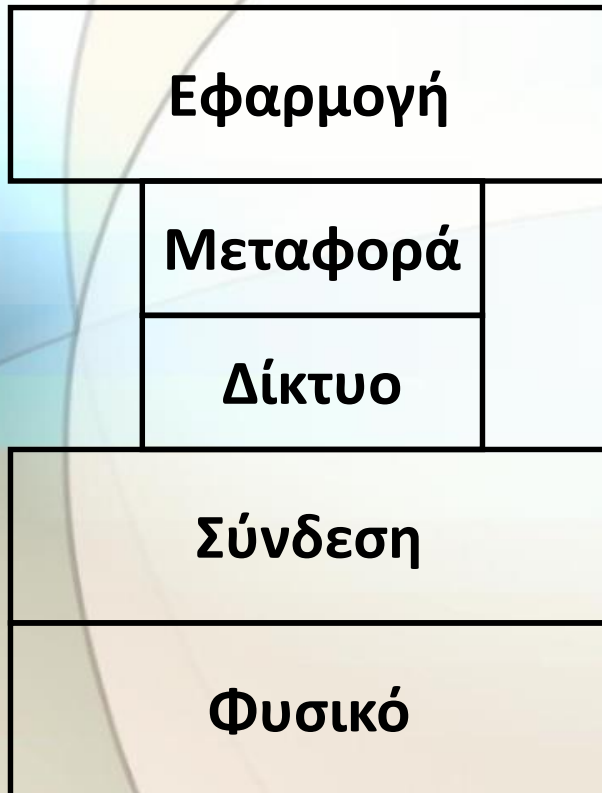
Διαστρωμένη Αρχιτεκτονική (συνέχεια)



Μία αρθρωτή προσέγγιση στη δικτύωση: Ένα τυπικό μοντέλο μιας στοίβας διαστρωματωμένων πρωτοκόλλων.

- ❑ Κάθε επίπεδο (στρώμα) είναι υπεύθυνο για ένα συγκεκριμένο σύνολο εργασιών, χρησιμοποιώντας την υπηρεσία που παρέχεται από το επίπεδο που βρίσκεται από κάτω και με τη σειρά του παρέχοντας μία υπηρεσία στο επίπεδο που βρίσκεται από πάνω.
- ❑ Οι οριζόντιες γραμμές που χωρίζουν τα επίπεδα αντιπροσωπεύουν κάποιου είδους περιορισμό από το τι το κάθε επίπεδο μπορεί να δει και να κάνει.
- ❑ Οι τεχνολογίες του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου συνδέσεων έχουν εξελιχθεί από το μόντεμ των 32 kbps στις οπτικές ίνες των 10 Gbps και το ασύρματο δίκτυο των 100 Mbps.
- ❑ Τα δύο μεσαία επίπεδα, ωστόσο, κυριαρχημένα από το TCP/IP, παρέμειναν κατά ένα μεγάλο μέρος αμετάβλητα με τα χρόνια.
- ❑ Τα δύο ενδιάμεσα επίπεδα είναι η «λεπτή μέση» του μοντέλου της στοίβας πρωτοκόλλων του τύπου «κλεψύδρα».

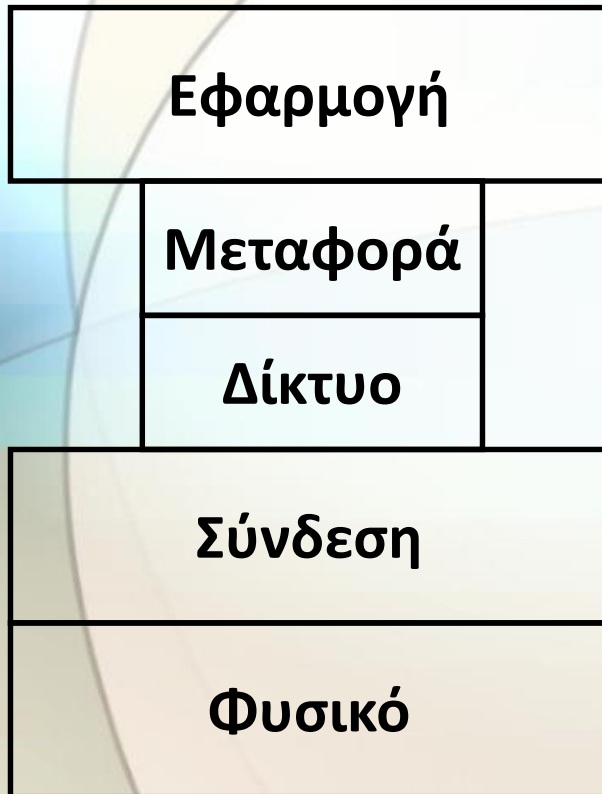
Διαστρωμένη Αρχιτεκτονική (συνέχεια)



Λειτουργικές επικαλύψεις στα επίπεδα – Έλεγχος Σφαλμάτων

- ❑ **Φυσικό επίπεδο:** Κωδικοποίηση ελέγχου σφαλμάτων
- ❑ **Επίπεδο σύνδεσης:** αναμετάδοση κατά άλματα (hop-by-hop)
- ❑ **Επίπεδο δικτύου:** δρομολόγηση πολλαπλών διαδρομών
- ❑ **Επίπεδο μεταφοράς:** απ' άκρη σε άκρη (end-to-end)
- ❑ **Επίπεδο εφαρμογής:** κωδικοποίηση βίντεο

Διαστρωμένη Αρχιτεκτονική (συνέχεια)



Αρχιτεκτονική Δικτύου

- ❑ Η κάθε οριζόντια γραμμή αντιπροσωπεύει ένα περιορισμό του:
 - τι κάθε επίπεδο **μπορεί να δει** και
 - τι κάθε επίπεδο **μπορεί να ελέγξει**

- ❑ Πώς θα αποφασίσουμε “**ποιος κάνει τι**” και πώς θα “**κολλήσουμε**” πάλι τις ενότητες μαζί;

Διαστρωμένη Αρχιτεκτονική (συνέχεια)

Επίπεδα 4/3

□ Επίπεδο 4 (TCP):

- Προσανατολισμένο προς τη σύνδεση (για παράδειγμα πραγματοποίηση μιας τηλεφωνικής κλήσης)
- Φέρει εις πέρας τη διαχείριση της ζήτησης στους τελικούς κόμβους, ανταποκρινόμενος στα φορτία των συνδέσεων

□ Επίπεδο 3 (IP):

- Χωρίς σύνδεση (για παράδειγμα αποστολή ενός μηνύματος).
- Είναι ανεξάρτητο από τις συνθήκες φόρτου στις συνδέσεις.

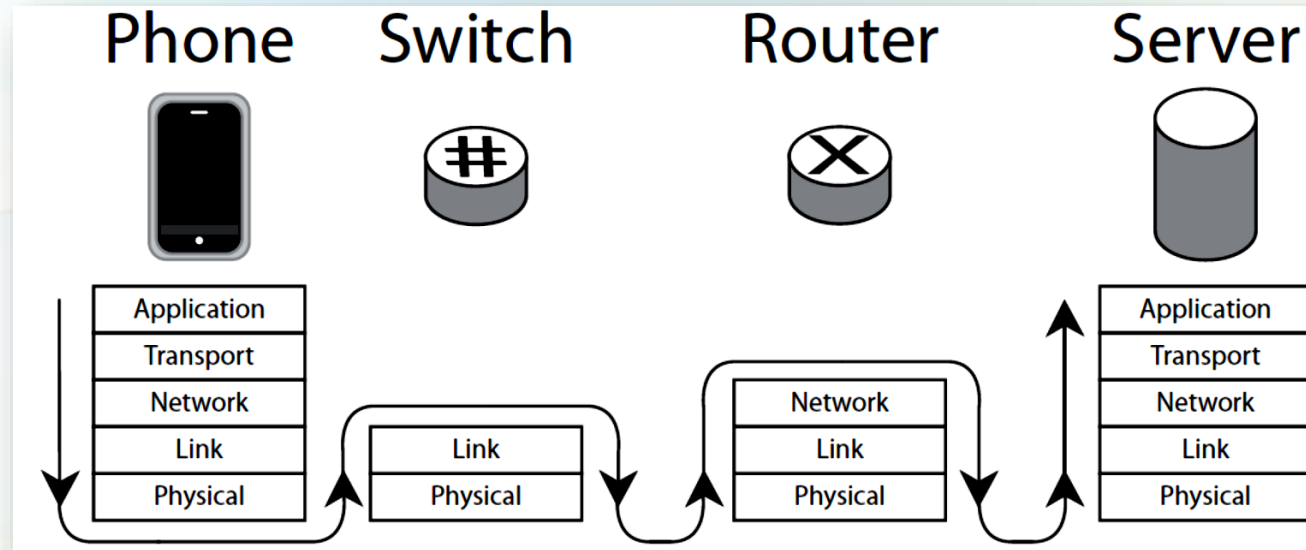
Διαστρωμένη Αρχιτεκτονική (συνέχεια)

Επιβαρύνσεις

- Το επίπεδο εφαρμογής τρέχει εφαρμογές που παράγουν μία ακολουθία **μηνυμάτων** με μία επικεφαλίδα **επιπέδου 5**.
- Κάθε ένα από αυτά διαιρείται σε **τμήματα** στο επίπεδο μεταφοράς, με μία επικεφαλίδα **επιπέδου 4** να προστίθεται μπροστά από το πραγματικό περιεχόμενο, το αποκαλούμενο ωφέλιμο φορτίο.
- Κατόπιν περνάει στο επίπεδο δικτύου, το οποίο διαιρεί και ενώνει τα τμήματα ως αυτόνομα πακέτα, δεδομενογραφήματα ή **πακέτα** (packets), με μία επικεφαλίδα **επιπέδου 3** μπροστά.
- Κάθε πακέτο μεταφέρεται περαιτέρω στο επίπεδο σύνδεσης, το οποίο προσθέτει ακόμα μία επικεφαλίδα **επιπέδου 2**, για να διαμορφώσει ένα **πλαίσιο**. Αυτό τελικά περνάει στο φυσικό επίπεδο για μεταφορά.

Διαστρωμένη Αρχιτεκτονική (συνέχεια)

Κάθεται vs Οριζόντια



Διαφορετικά στοιχεία δικτύου επεξεργάζονται τα διαφορετικά στρώματα στη λίστα πρωτόκολλων.

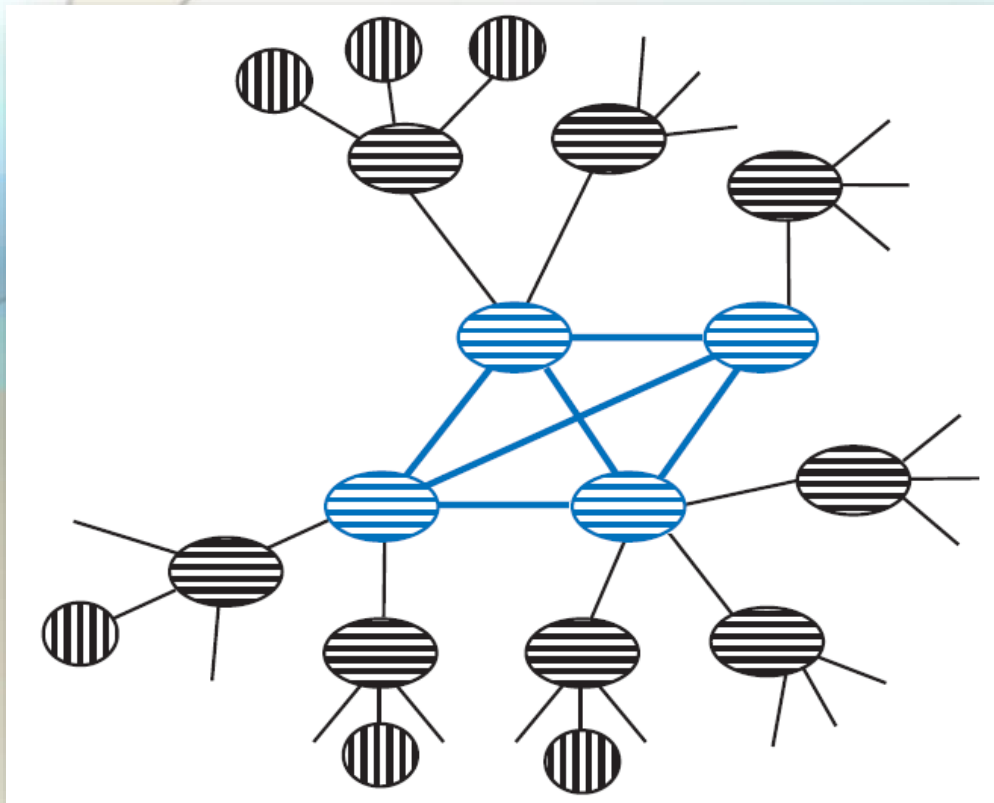
- Οι τελικοί **κόμβοι (end-hosts)** επεξεργάζονται όλα προς τα πάνω μέχρι το επίπεδο εφαρμογής.
- Οι **μεταγωγείς (switches)**, που προωθούν τα πλαίσια, επεξεργάζονται μέχρι το επίπεδο σύνδεσης.
- Οι **δρομολογητές (routers)**, που μετακινούν τα πακέτα στο δίκτυο, επεξεργάζονται μέχρι το επίπεδο δικτύου.

Κατανεμημένη Ιεραρχία

- ❑ Το Διαδίκτυο δεν είναι σύνθετο μόνο από την άποψη του αριθμού των εργασιών που πρέπει να διαχειριστεί, αλλά και από την άποψη του αριθμού των χρηστών.
- ❑ Η ύπαρξη μίας ιεραρχίας είναι απαραίτητη.
- ❑ Μία από-άκρο-προς-άκρο σύνοδος, για παράδειγμα μία σύνοδος συνεχούς ροής στο YouTube από τους εξυπηρετητές του Google στο iPhone σας, μπορεί να διασχίσει:
 1. μία ασύρματη εναέρια διασύνδεση,
 2. μερικές συνδέσεις στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας και μετά
 3. μία ακολουθία από ακόμα περισσότερες συνδέσεις σε πιθανόν πολλαπλούς Παρόχους Υπηρεσιών Διαδικτύου (ISPs) στο δημόσιο Διαδίκτυο.

Κατανεμημένη Ιεραρχία (συνέχεια)

Ιεραρχία των Παρόχων Διαδικτύου



Χωρική ιεραρχία στη δικτύωση - Πολλαπλά επίπεδα παρόχων και οι σχέσεις τους:

- Κάθε κόμβος σε αυτό το γράφημα είναι ένας πάροχος και κάθε σύνδεση αντιπροσωπεύει μία επιχειρησιακή σχέση και φυσικές συνδέσεις μεταξύ δύο παρόχων.
- Οι τέσσερις πάροχοι στο κέντρο είναι πάροχοι βαθμίδας-1, με ομότιμες συνδέσεις μεταξύ τους. Καθένας από αυτούς παρέχει συνδεσιμότητα σε αρκετούς πελάτες παρόχους.
- Οι πάροχοι στελέχη στα άκρα δεν παρέχουν υπηρεσία μεταφοράς σε κανέναν άλλον πάροχο.
- Ένας πάροχος οποιασδήποτε βαθμίδας μπορεί επίσης να παρέχει συνδέσεις σε τελικούς χρήστες, οι συνδέσεις αυτές δεν εμφανίζονται εδώ.

Κατανεμημένη Ιεραρχία (συνέχεια)

Περιοχή

- Μία άλλη χρήσιμη έννοια στην κατανεμημένη ιεραρχία είναι αυτή της “περιοχής” (domain).
 - Κάθε επιχειρησιακή οντότητα σχηματίζει μία περιοχή, που ονομάζεται Αυτόνομο Σύστημα (ΑΣ).
 - Συχνά υπάρχει ένας κεντρικός ελεγκτής μέσα σε κάθε ΑΣ.
- * Όπως θα δούμε αργότερα σε αυτό το κεφάλαιο, η δρομολόγηση μέσα σε ένα ΑΣ και η δρομολόγηση ανάμεσα στα ΑΣ ακολουθούν πολύ διαφορετικές προσεγγίσεις.

Δρομολόγηση IP

- ❑ Τα δίκτυα μεταφοράς συχνά προσφέρουν ενδιαφέρουσες αναλογίες για την επικοινωνία και τα κοινωνικά δίκτυα.
- ❑ Σε αυτή την περίπτωση, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια χρήσιμη αναλογία από την ταχυδρομική υπηρεσία.
- ❑ Για να δρομολογήσουμε ένα γράμμα από τον αποστολέα στον παραλήπτη χρειαζόμαστε τρεις βασικές λειτουργίες.
 - Ανάθεση διευθύνσεων
 - Δρομολόγηση
 - Προώθηση

Δρομολόγηση IP (συνέχεια)

Ανάθεση διευθύνσεων

- Καταρχάς πρέπει να συνδέσουμε μία μοναδική ετικέτα σε κάθε κόμβο στο δίκτυο, αλλιώς δεν θα μπορούμε ούτε να προσδιορίσουμε τις πηγές και τους προορισμούς.
- Στο ταχυδρομικό σύστημα η ετικέτα είναι η ταχυδρομική διεύθυνση, όπως η διεύθυνση με χρήση οδών ή ο αριθμός ταχυδρομικής θυρίδας. Οι ταχυδρομικοί κώδικες μπορούν γρήγορα να σας εστιάσουν σε ένα υποδίκτυο της χώρας.
- Στο Διαδίκτυο χρησιμοποιούμε τη **διεύθυνση IP**, που είναι ένας αριθμός 32-bit που συχνά απεικονίζεται ως τέσσερα δεκαδικά νούμερα, χωρισμένα με τελείες. Καθένα από αυτά τα τέσσερα νούμερα εκτείνεται από το 0 ως το 255, δεδομένου ότι προσδιορίζεται από $32/4=8$ bit, για παράδειγμα το **127.12.5.88**.
- Οι “**ταχυδρομικοί κώδικες**” εδώ ονομάζονται **μάσκες υποδικτύου**, π.χ. το 127.12.5.0/24 σημαίνει ότι τα πρώτα 24 bits δίνουν το πρόθεμα από όλες τις διευθύνσεις IP του υποδικτύου: κάθε διεύθυνση IP σε αυτό το υποδίκτυο πρέπει να ξεκινά με 127.12.5 και να τελειώνει σε οποιαδήποτε 8 bit. Ωστόσο, στο ταχυδρομικό σύστημα μια **διεύθυνση** και η **ταυτότητα (ID)** ενός ατόμου είναι ξεχωριστή.

Δρομολόγηση IP (συνέχεια)

Ανάθεση διευθύνσεων (συνέχεια)

- Υπάρχουν δύο εκδόσεις του IP: η έκδοση 4 και η έκδοση 6.
- Το IPv4 χρησιμοποιεί 32 bit για διευθύνσεις, οι οποίες εξαντλήθηκαν στις αρχές του 2011.
- Το IPv6 χρησιμοποιεί 4 φορές περισσότερα bit, 128 bit, τα οποία μεταφράζονται σε 2^{128} , γύρω στις 10^{39} διαθέσιμες διευθύνσεις.
- **Ερώτηση: Πώς διατίθενται αυτές οι διευθύνσεις IP;**

Απάντηση: Δίνονταν σε μπλοκ, με διαφορετικά μεγέθη μπλοκ που καθορίζονταν από την “κλάση”.

Για παράδειγμα, κάθε μπλοκ διεύθυνσης κλάσης A έχει ένα σταθερό πρόθεμα 8-bit, έτσι υπάρχουν διαθέσιμες $2^{32}-8=2^{24}$ διευθύνσεις στο μπλοκ κλάσης A. Αυτό συνήθως δίνεται σε έναν εθνικό πάροχο Διαδικτύου ή έναν μεγάλο προμηθευτή εξοπλισμού. Οι χαμηλότερες κλάσεις έχουν λιγότερες διευθύνσεις ανά μπλοκ. Αλλά το μπλοκ αυτό των 8-bit έφερε μεγάλη σπατάλη σε διαθέσιμες, αλλά αχρησιμοποίητες διευθύνσεις IP.

Για τον λόγο αυτό η κοινότητα του Διαδικτύου μετατοπίστηκε στην **Αταξική Δρομολόγηση Δικτυακών Περιοχών (Classless Inter Domain Routing – CIDR)**, όπου το μπλοκ δεν χρειάζεται να είναι σε πολλαπλάσια των 8 bits.

Δρομολόγηση IP (συνέχεια)

Ανάθεση διευθύνσεων (συνέχεια)

- Σαν συσκευή, μπορείτε να έχετε είτε μία σταθερή, στατική διεύθυνση IP ορισμένη σε εσάς, ή πρέπει να πάρετε μία δυναμική, που θα σας την αναθέσει ένας ελεγκτής (controller) ο οποίος βρίσκεται στο τοπικό δίκτυο.
- Αυτός ο ελεγκτής ονομάζεται εξυπηρετητής Πρωτοκόλλου Δυναμικής Διάρθρωσης Υποδοχέων (**Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)**).
- Μία συσκευή έρχεται σε επαφή με τον εξυπηρετητή DHCP, λαμβάνει μία τρέχουσα αχρησιμοποίητη διεύθυνση IP και την επιστρέφει στη δεξαμενή των διευθύνσεων IP, όταν δεν τη χρειάζεται πλέον.
- Μερικές φορές η διεύθυνση που δίνεται σε μία συσκευή σε ένα τοπικό δίκτυο, π.χ. είναι εταιρικό ενδοδίκτυο, είναι διαφορετική από αυτή που φαίνεται στον εξωτερικό κόσμο και ένας δρομολογητής **Μετάφρασης Διευθύνσεων Δικτύου (Network Address Translation (NAT))** κάνει αυτή τη μετάφραση και στις δύο κατευθύνσεις.

Δρομολόγηση IP (συνέχεια)

Δρομολόγηση

- ❑ Μετά πρέπει να αποφασίσουμε τις διαδρομές, είτε:
 - μία διαδρομή για κάθε σύνοδο (δρομολόγηση μονής διαδρομής) ή
 - πολλαπλές διαδρομές για κάθε σύνοδο (δρομολόγηση πολλαπλών διαδρομών).
- ❑ Υπάρχουν δύο μεγάλου εύρους κατηγορίες μεθόδων δρομολόγησης:
 - δρομολόγηση βασισμένη σε μετρικές και
 - δρομολόγηση βασισμένη σε πολιτικές.
- ❑ Μέσα σε ένα **Αυτόνομο Σύστημα (ΑΣ)** η δρομολόγηση βασίζεται σε κάποιου είδους μετρική, είτε διαλέγοντας τη συντομότερη διαδρομή ανάμεσα στη δεδομένη πηγή και τον προορισμό, είτε κατανέμοντας την κυκλοφορία σε διαδρομές, ώστε καμία διαδρομή να μην είναι πολύ φορτωμένη. Ωστόσο, ανάμεσα στα ΑΣ, η δρομολόγηση βασίζεται σε πολιτικές.

Για παράδειγμα, το ΑΣ1 μπορεί να υποπτεύεται ότι υπάρχουν εισβολείς συνδεδεμένοι στο ΑΣ2, και γι' αυτό αποφεύγει να δρομολογεί πακέτα κατά μήκος οποιασδήποτε διαδρομής που διασχίζει το ΑΣ2.

Δρομολόγηση IP (συνέχεια)

Δρομολόγηση (συνέχεια)

- ❑ Το Πρωτόκολλο Συνοριακής Πύλης (**Border Gateway Protocol (BGP)**) είναι το κυρίαρχο πρωτόκολλο για την ανακάλυψη διευθύνσεων και την επίτευξη συνδεσιμότητας στην ενδο-ΑΣ δρομολόγηση. «Κολλάει» μαζί το Διαδίκτυο. Ωστόσο, ως πρωτόκολλο δρομολόγησης βασισμένο σε τακτική, είναι ένα περίπλοκο, ακατάστατο πρωτόκολλο, με πολλές γκρίζες ζώνες.
- ❑ Μέσα σε ένα ΑΣ, υπάρχουν δύο κύριοι τύποι πρωτοκόλλων δρομολόγησης βασισμένα σε μετρικές:
 - το **Πρωτόκολλο Πληροφοριών Δρομολόγησης (Routing Information Protocol (RIP))** χρησιμοποιεί τη μέθοδο διανύσματος απόστασης, όπου ο κάθε κόμβος συλλέγει πληροφορίες σχετικά με τις αποστάσεις μεταξύ του ίδιου και άλλων κόμβων, και
 - το **Πρωτόκολλο του Πρώτου Συντομότερου Ανοικτού Μονοπατιού (Open Shortest Path First (OSPF))** χρησιμοποιεί τη μέθοδο συνδεδεμένης κατάστασης, όπου κάθε κόμβος προσπαθεί να κατασκευάσει μία σφαιρική άποψη της τοπολογίας ολόκληρου του δικτύου

Δρομολόγηση IP (συνέχεια)

Πρώθηση

- ❑ Η πρώθηση υλοποιεί την πολιτική της δρομολόγησης.
- ❑ Η πραγματική ενέργεια της πρώθησης συμβαίνει κάθε φορά που ένα πακέτο λαμβάνεται σε έναν δρομολογητή ή κάποια επιστολή λαμβάνεται σε ένα ενδιάμεσο ταχυδρομικό γραφείο.
- ❑ Μερικοί μηχανισμοί πρώθησης κοιτούν μόνο τη διεύθυνση προορισμού και αποφασίζουν το επόμενο άλμα, ενώ άλλοι, όπως το **ΠολυΠρωτόκολο Μεταγωγής Ετικέτας (MultiProtocol Label Switching (MPLS))**, διαβάζουν ορισμένες ετικέτες επισυναπτόμενες στο πακέτο, που δείχνουν ρητά το επόμενο άλμα.
- ❑ Σε κάθε περίπτωση, λαμβάνεται μία απόφαση πρώθησης και επιλέγεται μία από τις συνδέσεις εξόδου για να σταλεί το πακέτο.

Δρομολόγηση IP (συνέχεια)

Δρομολογητής

- ❑ Όταν ένα πακέτο φτάνει σε μία διεπαφή δρομολόγησης, αυτή η διεπαφή ενεργεί ως πύλη εισόδου για το πακέτο, ενώ μία άλλη διεπαφή ενεργεί ως πύλη εξόδου.
- ❑ Αν τα πακέτα φτάνουν πολύ γρήγορα, εμφανίζεται συμφόρηση μέσα στο δρομολογητή.
- ❑ **Ερώτηση:** Ποια πύλη εξόδου είναι η «σωστή»;

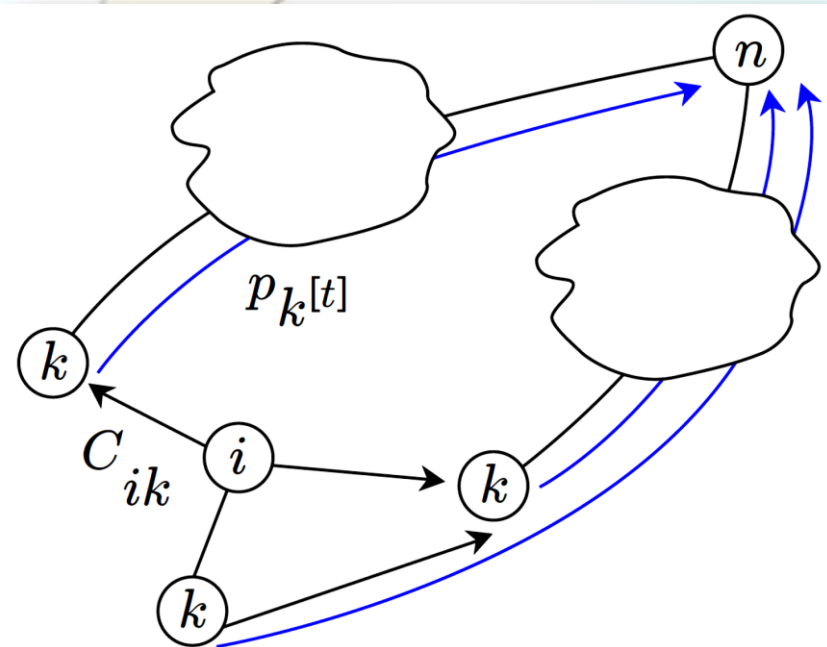
Απάντηση: Αυτό αποφασίζεται κοιτώντας τον **πίνακα προώθησης**, ο οποίος είναι ή αποθηκευμένος κεντρικά στο δρομολογητή ή αντιγραμμένος με ένα αντίγραφο σε κάθε πύλη εισόδου.

- Ο **πίνακας προώθησης** συνδέει τις αποφάσεις δρομολόγησης με πραγματικές δράσεις προώθησης. Ένας κοινός τύπος πίνακα προώθησης απαριθμεί όλες τις διευθύνσεις προορισμού IP στο Διαδίκτυο και προσδιορίζει σε ποια πύλη εξόδου, κατά συνέπεια τον επόμενο δρομολογητή στο μονοπάτι, πρέπει να μεταβεί ένα πακέτο, με βάση τη διεύθυνση προορισμού που είναι γραμμένη στην επικεφαλίδα.
- Επειδή υπάρχουν πάρα πολλές διευθύνσεις IP, ο πίνακας δρομολόγησης συχνά ομαδοποιεί κάποιες διευθύνσεις σε μία ισοδύναμη κλάση εισαγωγής.

Το πρόβλημα της συντομότερης διαδρομής

- Θεωρήστε ένα κατευθυνόμενο γράφημα $G = (V, E)$ που αναπαριστά την τοπολογία μέσα σε ένα ΑΣ, όπου κάθε κόμβος στο σύνολο των κόμβων V είναι ένας δρομολογητής και κάθε σύνδεση στο σύνολο συνδέσεων E είναι μια φυσική σύνδεση από έναν δρομολογητή i σε ένα δρομολογητή j .
- Κάθε σύνδεση έχει ένα κόστος c_{ij} (συχνά ένας αριθμός περίπου ανάλογος με το μήκος της σύνδεσης).
- Θα πρέπει να βρούμε μια διαδρομή για το κάθε ζεύγος αφετηρίας-προορισμού με το χαμηλότερο δυνατόν κόστος.

Το πρόβλημα της συντομότερης διαδρομής



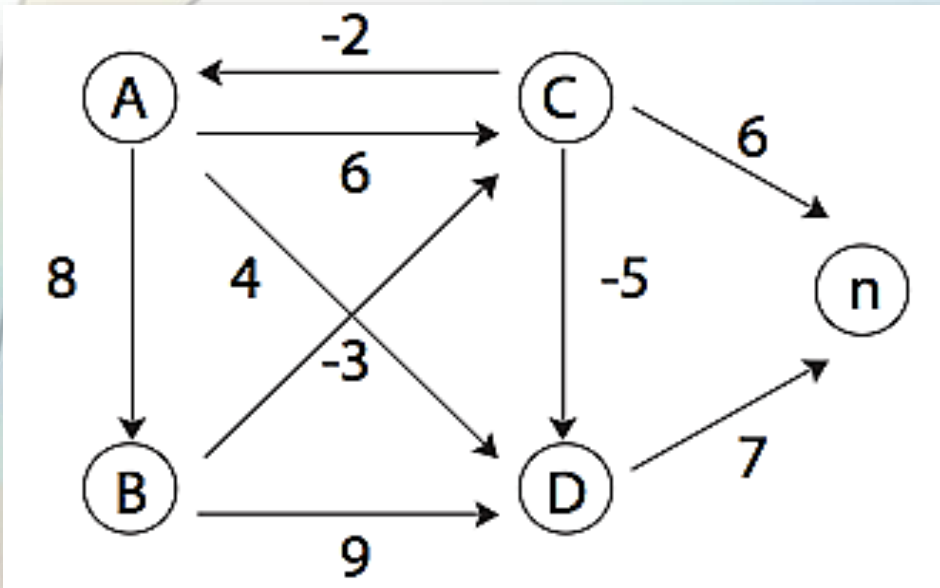
Η εξίσωση του Bellman για την δρομολόγηση ελάχιστου κόστους.

- Το ελάχιστο κόστος από έναν κόμβο i σε έναν προορισμό n είναι το μικρότερο, ανάμεσα σε όλους τους γείτονές του, του αθροίσματος του κόστους από τον i σε έναν γείτονα και του κόστους από αυτόν το γείτονα στον n .
- Ο κόμβος i δεν χρειάζεται να γνωρίζει πώς οι γείτονές του πηγαίνουν στο n , μόνο το κόστος της προσπέλασης στον n , μέσω κάθε γείτονα.

$$p_i[t + 1] = \min_{k \in O(i)} \{c_{ik} + p_k[t]\}$$

- c_{ik} : Το κόστος για να πάει από τον κόμβο i σε έναν από τους εξερχόμενους γείτονές του k . Ένας εξερχόμενος γείτονας είναι ένας κόμβος, όπου υπάρχει μία σύνδεση που δείχνει από τον i σε αυτόν και συμβολίζουμε το σύνολο αυτών των γειτόνων για τον κόμβο i ως $O(i)$.
- $p_k[t]$: Το ελάχιστο κόστος για να πάμε από τον αυτόν το γείτονα k στον προορισμό n , χρησιμοποιώντας το πολύ t βήματα.

Παραδείγματα: Ο αλγόριθμος Bellman Ford



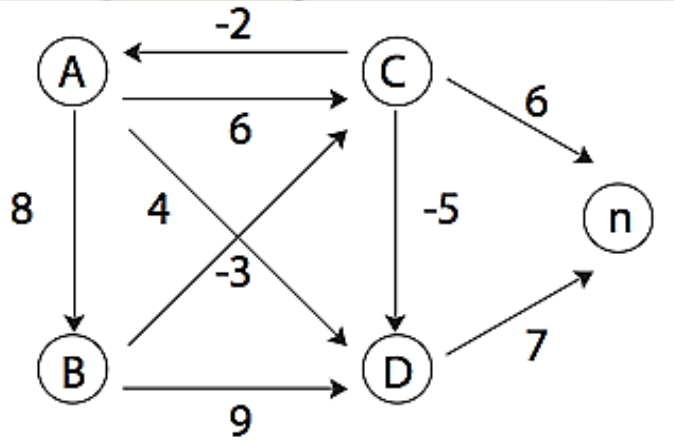
- Ένα παράδειγμα για να απεικονίσουμε τον αλγόριθμο Bellman-Ford. **Εδώ θέλουμε να βρούμε τη συντομότερη διαδρομή από τους κόμβους A, B, C και D σε έναν κοινό κόμβο προορισμού n.**
- Υπάρχουν συνδέσεις με αρνητικά βάρη μόνο για να απεικονίσουμε ότι ο αλγόριθμος μπορεί να τις χειριστεί.
- Αλλά δεν υπάρχουν κύκλοι με αρνητικά βάρη, γιατί θα καθιστούσαν το πρόβλημα συντομότερης διαδρομής εσφαλμένα καθορισμένο.

Αρχικοποιούμε τις αποστάσεις:

$$p_A[0] = p_B[0] = p_C[0] = p_D[0] = \infty$$

Και φυσικά δεν υπάρχει κόστος για να φτάσει τον εαυτό του: $p_n[t] = 0$

Παραδείγματα: Ο αλγόριθμος Bellman Ford (συνέχεια)



Για $t = 1$, με την εξίσωση Bellman, έχουμε

$$p_A[1] = \min\{c_{AB} + p_B[0], c_{AC} + p_C[0], c_{AD} + p_D[0]\} = \min\{8 + \infty, 6 + \infty, 4 + \infty\} = \infty,$$

$$p_B[1] = \min\{c_{BC} + p_C[0], c_{BD} + p_D[0]\} = \min\{-3 + \infty, 9 + \infty\} = \infty,$$

$$p_C[1] = \min\{c_{Cn} + p_n[0], c_{CD} + p_D[0], c_{CA} + p_A[0]\} = \min\{6 + 0, -5 + \infty, -2 + \infty\} = 6,$$

$$p_D[1] = \min\{c_{Dn} + p_n[0]\} = 7 + 0 = 7.$$

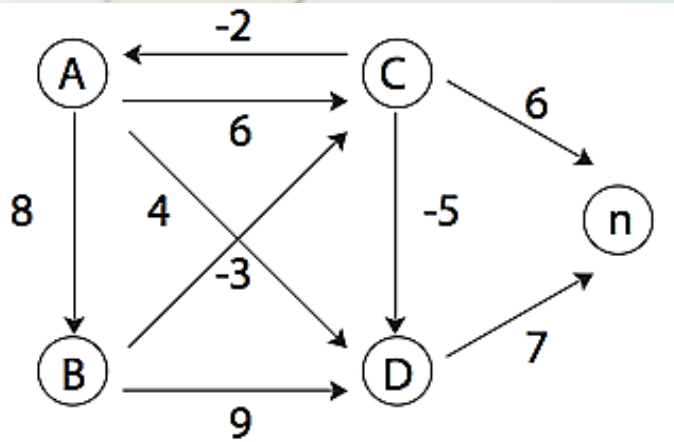
Ομοίως, για $t = 2$ έχουμε

$$p_A[2] = \min\{c_{AB} + p_B[1], c_{AC} + p_C[1], c_{AD} + p_D[1]\} = \min\{8 + \infty, 6 + 6, 4 + 7\} = 11,$$

$$p_B[2] = \min\{c_{BC} + p_C[1], c_{BD} + p_D[1]\} = \min\{-3 + 6, 9 + 7\} = 3,$$

$$p_C[2] = \min\{c_{Cn} + p_n[1], c_{CD} + p_D[1], c_{CA} + p_A[1]\} = \min\{6 + 0, -5 + 7, -2 + 8\} = 2.$$

Παραδείγματα: Ο αλγόριθμος Bellman Ford (συνέχεια)



Για $t = 3$,

$$p_A[3] = \min\{c_{AB} + p_B[2], c_{AC} + p_C[2], c_{AD} + p_D[2]\} = \min\{8 + 3, 6 + 2, 4 + 7\} = 8,$$

$$p_B[3] = \min\{c_{BC} + p_C[2], c_{BD} + p_D[2]\} = \min\{-3 + 2, 9 + 7\} = -1,$$

$$p_C[3] = \min\{c_{Cn} + p_n[2], c_{CD} + p_D[2], c_{CA} + p_A[2]\} \\ = \min\{6 + 0, -5 + 7, -2 + 11\} = 2.$$

Για $t = 4$,

$$p_A[4] = \min\{c_{AB} + p_B[3], c_{AC} + p_C[3], c_{AD} + p_D[3]\} = \min\{8 - 1, 6 + 2, 4 + 7\} = 7,$$

$$p_B[4] = \min\{c_{BC} + p_C[3], c_{BD} + p_D[3]\} = \min\{-3 + 2, 9 + 7\} = -1,$$

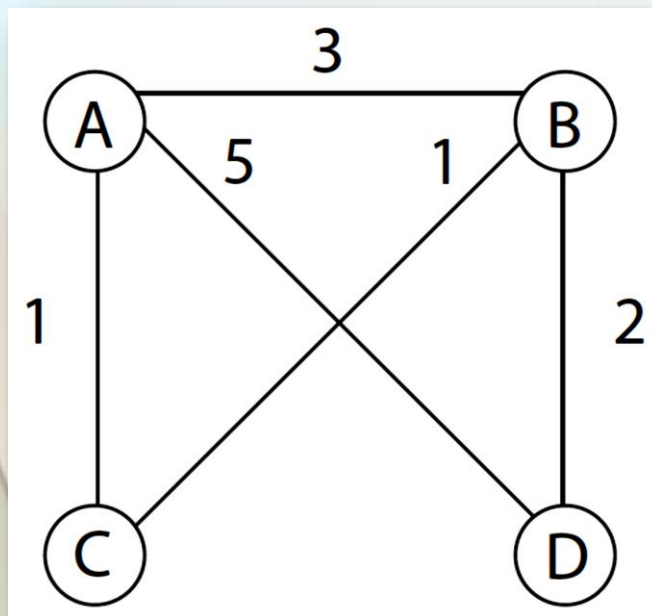
$$p_C[4] = \min\{c_{Cn} + p_n[3], c_{CD} + p_D[3], c_{CA} + p_A[3]\} \\ = \min\{6 + 0, -5 + 7, -2 + 8\} = 2.$$

Μπορούμε επίσης να εύκολα να παρακολουθήσουμε τις πορείες που πάρθηκαν από κάθε κόμβο για να φτάσει το n : το D πηγαίνει απευθείας στο n , το C πηγαίνει μέσω του D στο n , το B πηγαίνει μέσω του C και το A πηγαίνει μέσω του B.

Παραδείγματα: Κατανεμημένο Πρωτόκολλο Πληροφοριών Δρομολόγησης (RIP)

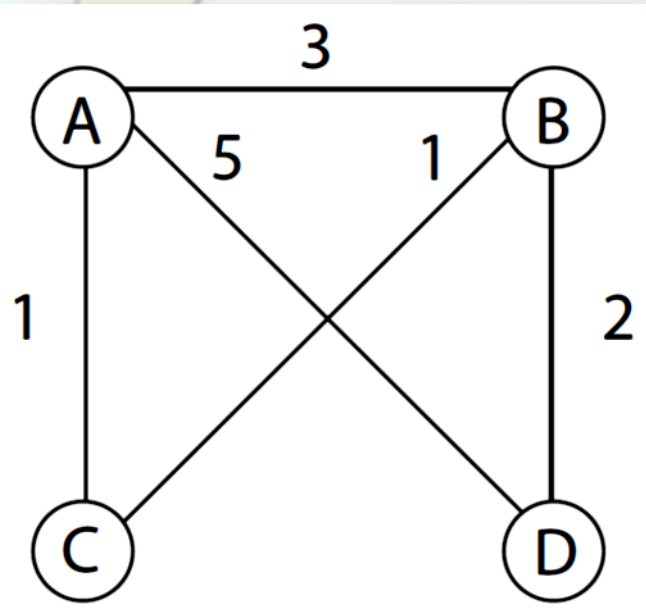
Μέχρι τώρα έχουμε υποθέσει ότι έχουμε κεντροποιημένο υπολογισμό. Αλλά φανταστείτε ότι είστε ένας από τους κόμβους που προσπαθείτε να βρείτε πώς θα φτάσετε σε άλλους κόμβους στο δίκτυο.

Πώς γνωρίζετε το κόστος για να φτάσετε σε άλλους κόμβους και, επίσης, πώς ξεκινάτε;



- Ένα παράδειγμα για να απεικονίσουμε το **κατανεμημένο μήνυμα που περνά το RIP**, όπου **κάθε κόμβος θέλει να βρει μία από τις συντομότερες διαδρομές προς κάθε κόμβο, μέσω της διαβίβασης μηνυμάτων.**
- Πάλι, επιλέγουμε ένα εξαιρετικά μικτό δίκτυο, ώστε να περάσουμε λεπτομερώς από τα αριθμητικά βήματα.
- Μία σημαντική πρόκληση της δρομολόγησης στο Διαδίκτυο είναι στην πραγματικότητα η κλίμακα του δικτύου, ως εκ τούτου προκύπτει και η επιθυμία για τις κατανεμημένες λύσεις κατά πρώτο λόγο.

Παραδείγματα: Κατανεμημένο Πρωτόκολλο Πληροφοριών Δρομολόγησης (RIP) (συνέχεια)



Τώρα θα περιγράψουμε το πρωτόκολλο μεταφοράς μηνύματος στο RIP, το οποίο επιτρέπει την ανακάλυψη και την ανανέωση των c_{ik} και $p_i[t]$ κατά μήκος των κόμβων. Για απλότητα της παρουσίασης, υποθέστε ότι όλες οι συνδέσεις είναι αμφίδρομες: αν ο κόμβος i μπορεί να στείλει μηνύματα στον κόμβο j , έτσι μπορεί και ο j στον i .

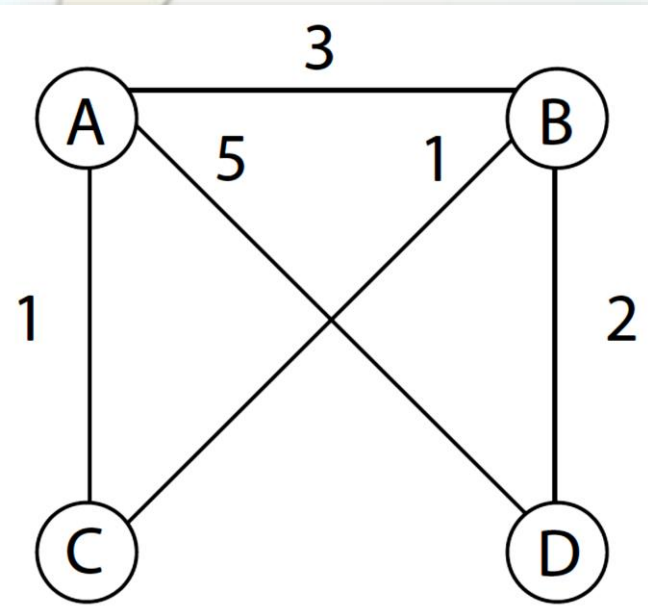
Το μήνυμα που μεταβιβάζεται στα πρωτόκολλα δρομολόγησης διανύσματος απόστασης έχει την ακόλουθη μορφή:

$[NodeID, DestinationID, CostofMinCostPath]$.

Στην αρχή, στο 0, κάθε κόμβος γνωρίζει μόνο την δική του ύπαρξη, έτσι κάθε κόμβος i μπορεί να μεταβιβάσει μόνο σε αυτό το διάνυσμα $[node_i, node_i, 0]$.

Αλλά μόλις κάθε κόμβος λάβει μηνύματα από τους γείτονές του, μπορεί να ανανεώσει τη λίστα με τα διανύσματα.

Παραδείγματα: Κατανεμημένο Πρωτόκολλο Πληροφοριών Δρομολόγησης (RIP) (συνέχεια)



Για τον προορισμό **A** στο $t = 1$:

$$p_A[1] = 0,$$

$$p_B[1] = \min\{c_{BA} + p_A[0], c_{BC} + p_C[0], c_{BD} + p_D[0]\} = \min\{3 + 0, 1 + \infty, 2 + \infty\} = 3,$$

$$p_C[1] = \min\{c_{CA} + p_A[0], c_{CB} + p_B[0]\} = \min\{1 + 0, 1 + \infty\} = 1,$$

$$p_D[1] = \min\{c_{DA} + p_A[0], c_{DB} + p_B[0]\} = \min\{5 + 0, 2 + \infty\} = 5.$$

Για τον προορισμό **B** στο $t = 1$, έχουμε

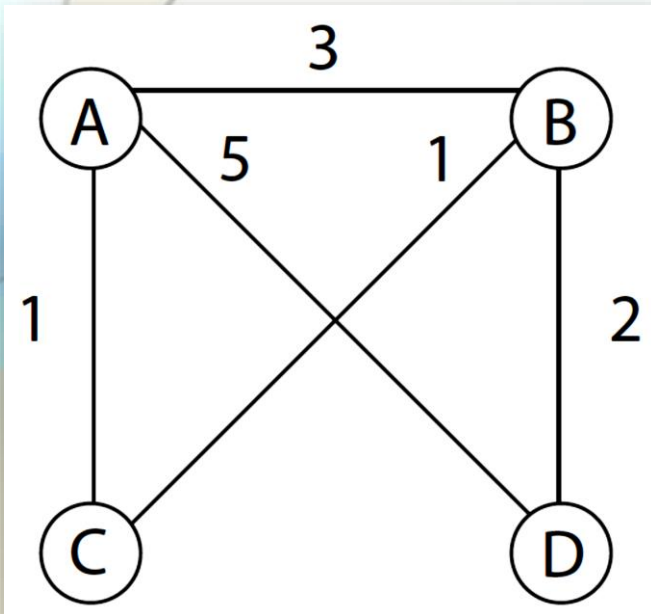
$$p_A[1] = \min\{c_{AB} + p_B[0], c_{AC} + p_C[0], c_{AD} + p_D[0]\} = \min\{3 + 0, 1 + \infty, 5 + \infty\} = 3,$$

$$p_B[1] = 0,$$

$$p_C[1] = \min\{c_{CA} + p_A[0], c_{CB} + p_B[0]\} = \min\{1 + \infty, 1 + 0\} = 1,$$

$$p_D[1] = \min\{c_{DA} + p_A[0], c_{DB} + p_B[0]\} = \min\{5 + \infty, 2 + 0\} = 2.$$

Παραδείγματα: Κατανεμημένο Πρωτόκολλο Πληροφοριών Δρομολόγησης (RIP) (συνέχεια)



Για τον **προορισμό C** στο $t = 1$, δεν υπάρχει $p_D[1]$ καθώς ο κόμβος C δεν έχει αντιληφθεί ακόμα την ύπαρξή του:

$$p_A[1] = \min\{c_{AB} + p_B[0], c_{AC} + p_C[0], c_{AD} + p_D[0]\} = \min\{3 + \infty, 1 + 0, 5 + \infty\} = 1,$$

$$p_B[1] = \min\{c_{BA} + p_A[0], c_{BC} + p_C[0], c_{BD} + p_D[0]\} = \min\{3 + \infty, 1 + 0, 2 + \infty\} = 1,$$

$$p_C[1] = 0.$$

Για τον **προορισμό D** στο $t = 1$, δεν υπάρχει $p_C[1]$, καθώς ο κόμβος C δεν έχει αντιληφθεί ακόμα την ύπαρξή του:

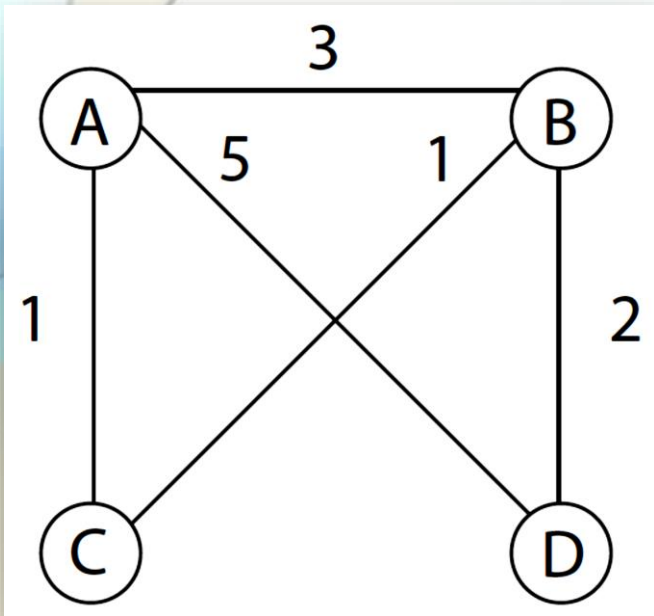
$$p_A[1] = \min\{c_{AB} + p_B[0], c_{AC} + p_C[0], c_{AD} + p_D[0]\} = \min\{3 + \infty, 1 + \infty, 5 + 0\} = 5,$$

$$p_B[1] = \min\{c_{BA} + p_A[0], c_{BC} + p_C[0], c_{BD} + p_D[0]\} = \min\{3 + \infty, 1 + \infty, 2 + 0\} = 2,$$

$$p_D[1] = 0.$$

Παραδείγματα: Κατανεμημένο Πρωτόκολλο Πληροφοριών Δρομολόγησης (RIP) (συνέχεια)

Οι Πίνακες δρομολόγησης για $t = 1$



NodeID	DestinationID	Cost of MinCost Path	Next Node
A	A	0	A
A	B	3	B
A	C	1	C
A	D	5	D

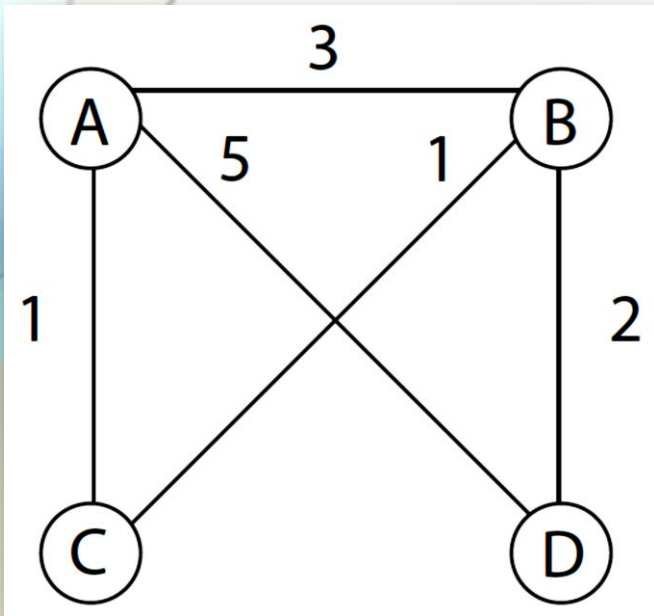
NodeID	DestinationID	Cost of MinCost Path	Next Node
B	A	3	A
B	B	0	B
B	C	1	C
B	D	2	D

NodeID	DestinationID	Cost of MinCost Path	Next Node
C	A	1	A
C	B	1	B
C	C	0	C

NodeID	DestinationID	Cost of MinCost Path	Next Node
D	A	5	A
D	B	2	B
D	D	0	D

Παραδείγματα: Κατανεμημένο Πρωτόκολλο Πληροφοριών Δρομολόγησης (RIP) (συνέχεια)

Οι Πίνακες δρομολόγησης για $t = 2$



NodeID	DestinationID	Cost of MinCost Path	Next Node
A	A	0	A
A	B	2	C
A	C	1	C
A	D	5	B

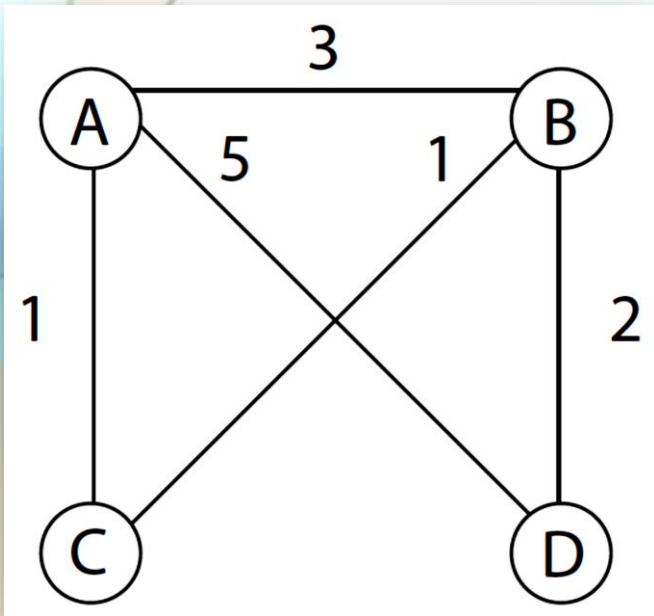
NodeID	DestinationID	Cost of MinCost Path	Next Node
B	A	2	C
B	B	0	B
B	C	1	C
B	D	2	D

NodeID	DestinationID	Cost of MinCost Path	Next Node
C	A	1	A
C	B	1	B
C	C	0	C
C	D	2	D

NodeID	DestinationID	Cost of MinCost Path	Next Node
D	A	5	A
D	B	2	B
D	C	3	B
D	D	0	D

Παραδείγματα: Κατανεμημένο Πρωτόκολλο Πληροφοριών Δρομολόγησης (RIP) (συνέχεια)

Οι Πίνακες δρομολόγησης για $t = 3$



NodeID	DestinationID	Cost of MinCost Path	Next Node
A	A	0	A
A	B	2	C
A	C	1	C
A	D	4	C

NodeID	DestinationID	Cost of MinCost Path	Next Node
B	A	2	C
B	B	0	B
B	C	1	C
B	D	2	D

NodeID	DestinationID	Cost of MinCost Path	Next Node
C	A	1	A
C	B	1	B
C	C	0	C
C	D	3	B

NodeID	DestinationID	Cost of MinCost Path	Next Node
D	A	4	B
D	B	2	B
D	C	3	B

Σύνοψη

- ❑ Η μεταγωγή πακέτου για κλιμακούμενη συνδεσιμότητα, τα αρθρωτά διαστρωματωμένα πρωτόκολλα και η κατανεμημένη ιεραρχία με επικάλυψη είναι τρεις βασικές ιδέες του Διαδικτύου.
- ❑ Η δρομολόγηση με χρήση του IP στο επίπεδο δικτύου γίνεται διαφορετικά, βάσει του αν είναι μέσα σε ένα τομέα ή ανάμεσα σε τομείς.
- ❑ Η δρομολόγηση μέσα σε έναν τομέα έχει δύο κύριους τύπους: του διανύσματος απόστασης ή της κατάστασης σύνδεσης.
- ❑ Η δρομολόγηση διανύσματος απόστασης εφαρμόζει τον αλγόριθμο Bellman-Ford, μέσω του περάσματος κατανεμημένων μηνυμάτων.

Τέλος Κεφαλαίου 13

Ερωτήσεις;;;