

# Δίκτυα Υπολογιστών

---



*Επίπεδο Ζεύξης  
(link layer)*

---

Κ. Βασιλάκης

# Περίγραμμα – ενότητες που εξετάζονται

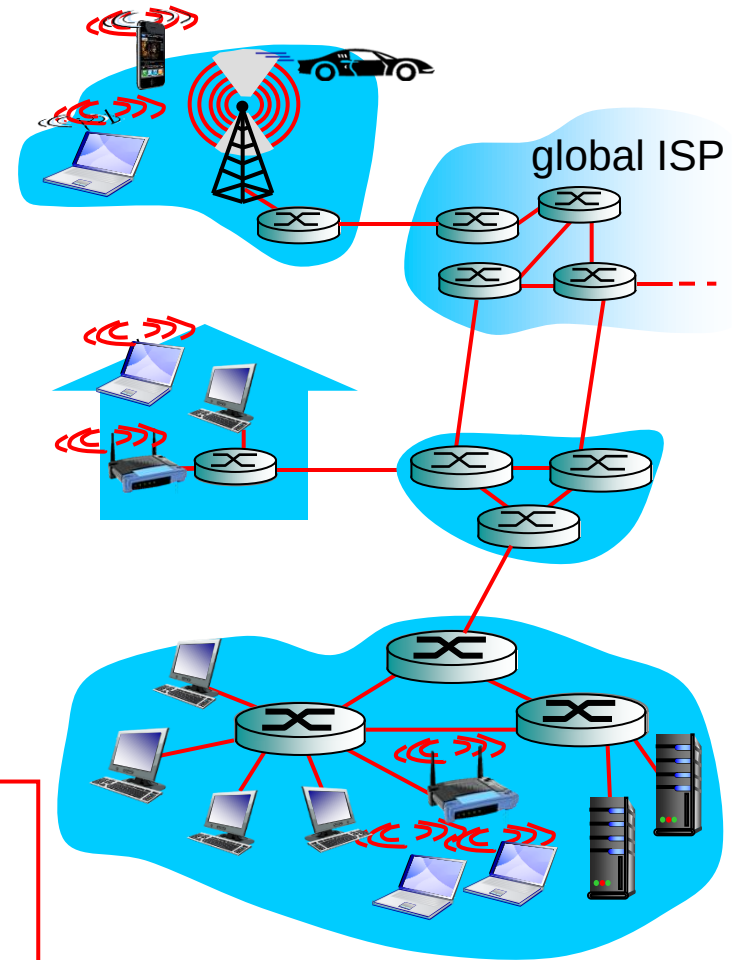
- Εισαγωγή - ορολογία
- Υπηρεσίες επιπέδου ζεύξης
- Ανίχνευση σφαλμάτων
  - Έλεγχος ισοτιμίας
  - Άθροισμα ελέγχου (checksum) Διαδικτύου
  - Κυκλικός Έλεγχος Πλεονασμού
- Πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης



# Ορολογία

- Οι υπολογιστές και οι δρομολογητές ονομάζονται **κόμβοι**.
- Τα κανάλια επικοινωνίας που ενώνουν γειτονικούς κόμβους κατά μήκος της διαδρομής επικοινωνίας είναι οι **ζεύξεις** (links).
- Έχουμε:
  - ενσύρματες ζεύξεις,
  - ασύρματες ζεύξεις,
  - LANs.
- Το πακέτο επιπέδου 2 ονομάζεται **πλαίσιο** (frame) και ενθυλακώνει datagram.

Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων έχει την ευθύνη μεταφοράς των datagrams από έναν κόμβο σε ένα φυσικά γειτονικό κόμβο πάνω από μία ζεύξη.



# Επίπεδο ζεύξης: πλαίσιο

- Ένα datagram κατά τη διάρκεια της διαδρομής του από άκρο-σε-άκρο είναι δυνατόν να διέλθει από μια σειρά από διακριτές ζεύξεις.
- Το datagram μεταφέρεται από διαφορετικά πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης μέσω διαφορετικών ζεύξεων:
  - π.χ. Ethernet στην πρώτη ζεύξη, frame relay σε ενδιάμεσες ζεύξεις, 802.11 στην τελευταία ζεύξη.
- Κάθε πρωτόκολλο ζεύξης παρέχει διαφορετικές υπηρεσίες:
  - π.χ. ενδέχεται να παρέχει ή να μην παρέχει αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων (reliable data transmission - rdt) πάνω από τη ζεύξη.

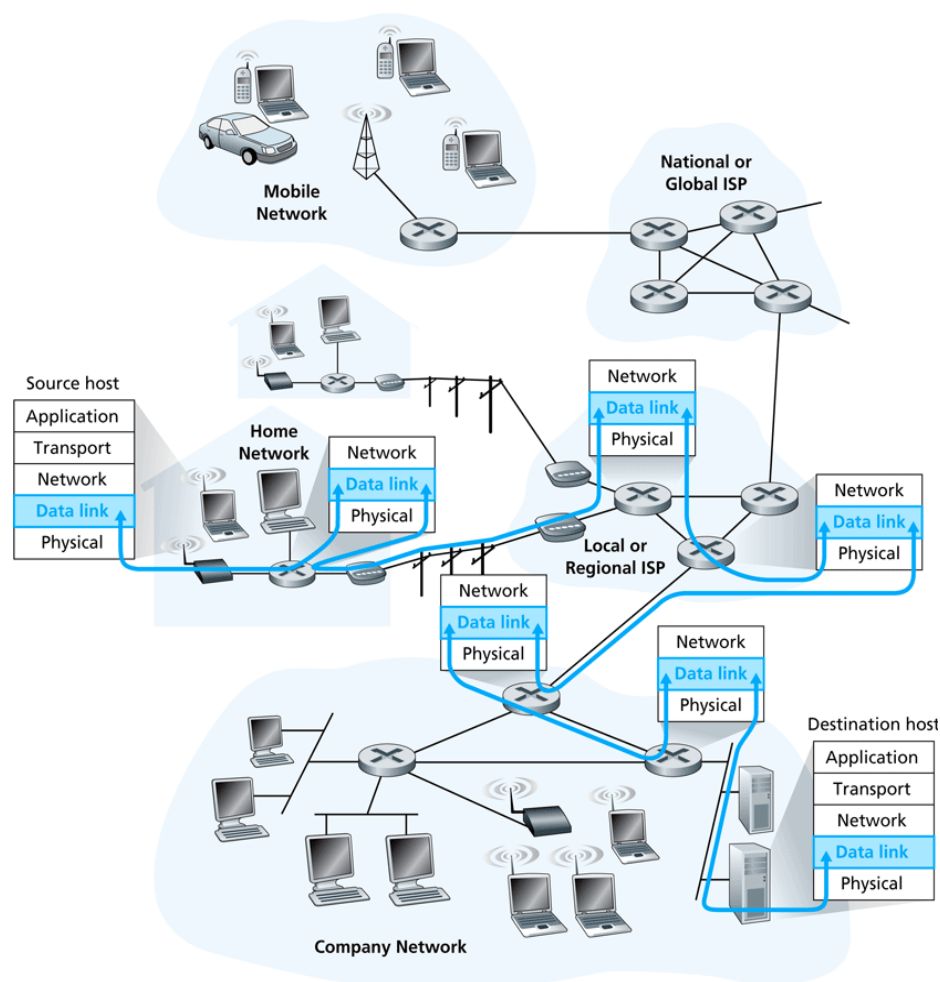


Figure 5.1 ♦ The link layer



# Επίπεδο ζεύξης: αναλογία με ταξίδι

- Οργάνωση του ταξιδιού ενός **τουρίστα** από το Ηράκλειο στη Κοζάνη (άκρο-σε-άκρο).
- Ο **ταξιδιωτικός πράκτορας** σχεδιάζει το ταξίδι ως εξής:
  - **με ταξί**: από Ηράκλειο ως αεροδρόμιο Ν. Καζαντζάκη,
  - **με αεροπλάνο**: από αεροδρόμιο Ν. Καζαντζάκη ως αεροδρόμιο Μ. Αλεξάνδρου,
  - **με ταξί**: από αεροδρόμιο Μ. Αλεξάνδρου ως Θεσσαλονίκη,
  - **με λεωφορείο**: από Θεσσαλονίκη στη Κοζάνη.
- Χρησιμοποιούνται 3 μέσα (ταξί, αεροπλάνο, λεωφορείο)
- Αναλογίες:
  - **τουρίστας** = datagram
  - Τμήμα μεταφοράς = ζεύξη επικοινωνίας
  - **Τρόπος μεταφοράς** = πρωτόκολλο επιπέδου ζεύξης
  - **Ταξιδιωτικός πράκτορας** = αλγόριθμος δρομολόγησης



# Υπηρεσίες επιπέδου ζεύξης – Πλαισίωση, προσπέλαση

- Η βασική υπηρεσία είναι η μετακίνηση ενός datagram από ένα κόμβο σε ένα άλλο (point-to-point, σημείο-σε-σημείο και όχι από-άκρο-σε άκρο).
- **Πλαισίωση** (framing):
  - Ενθυλάκωση του datagram σε πλαίσιο, προσθέτοντας κεφαλίδα πριν μεταδοθεί μέσω της ζεύξης.
- Προσπέλαση στη ζεύξη:
  - Οι κανόνες μετάδοσης ορίζονται από πρωτόκολλα **Ελέγχου Προσπέλασης Μέσου** (Medium Access Control – MAC).
  - Συντονισμός μεταδόσεων όταν πολλοί κόμβοι μοιράζονται μια ζεύξη εκπομπής (πρόβλημα πολλαπλής προσπέλασης).
  - Χρησιμοποιούνται “MAC” διευθύνσεις στις κεφαλίδες των πλαισίων για την αναγνώριση πηγής, προορισμού που είναι διαφορετικές από τις διευθύνσεις IP!



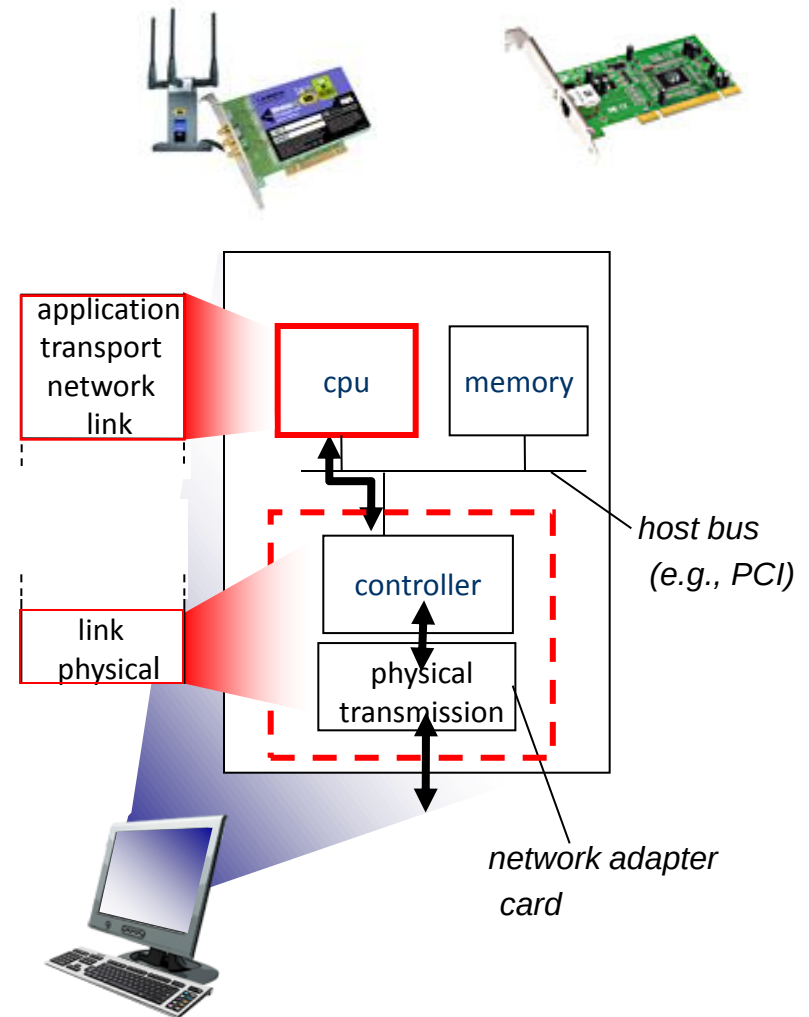
# Αξιόπιστη παράδοση, διαχείριση σφαλμάτων

- Αξιόπιστη παράδοση μεταξύ 2 κόμβων:
  - Εγγύηση παράδοσης χωρίς σφάλματα (όπως το TCP, επανεκπομπές, επιβεβαιώσεις).
  - Σπάνια χρησιμοποιείται σε ζεύξεις με χαμηλό ρυθμό σφαλμάτων bit (ίνες, μερικά συνεστραμμένα ζεύγη).
  - Ασύρματες ζεύξεις: επιρρεπείς σε υψηλούς ρυθμούς σφαλμάτων.
- Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων επιπέδου bit
  - Σφάλματα που προκαλούνται από εξασθένιση του σήματος, θόρυβο.
  - Ο δεκτής ανιχνεύει την ύπαρξη σφαλμάτων (ειδοποιεί τον αποστολέα για αναμετάδοση ή απορρίπτει το πλαίσιο).
  - Ο δέκτης αναγνωρίζει και διορθώνει σφάλματα bit χωρίς να καταφεύγει στην αναμετάδοση.
- Ημιαμφίδρομη (half-duplex) και αμφίδρομη (full-duplex)
- Έλεγχος ροής (ρύθμιση ρυθμού αποστολής και λήψης μεταξύ γειτονικών κόμβων).



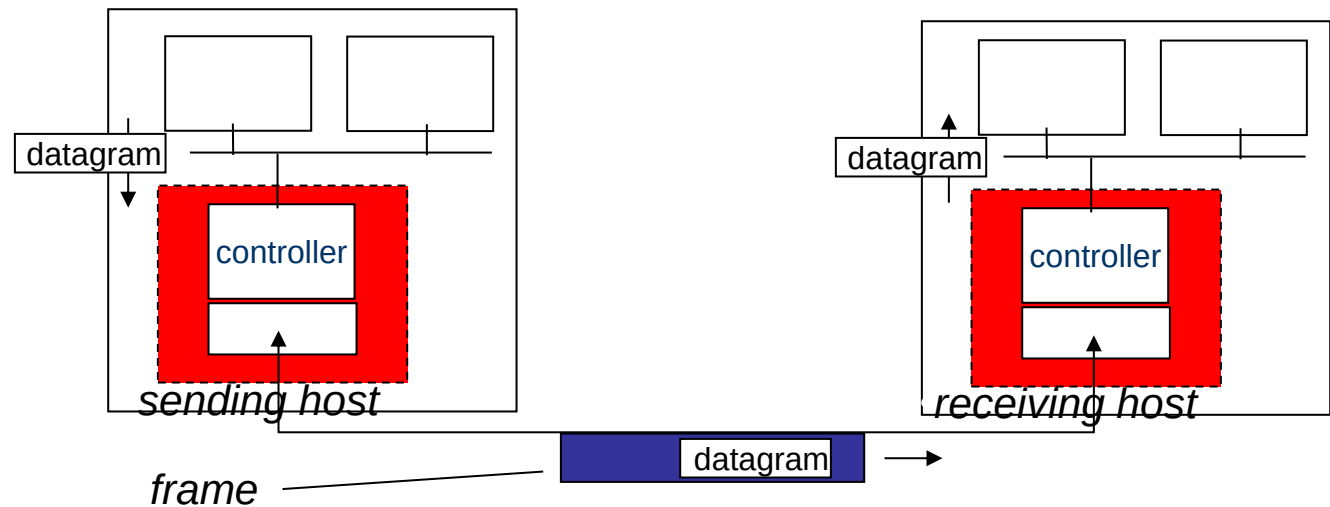
# Που υλοποιείται το επίπεδο ζεύξης;

- Σε ένα «προσαρμογέα» δικτύου (δηλ. κάρτα δικτύου) ενός υπολογιστή (network interface card - NIC) ή σε chip:
  - κάρτα Ethernet, κάρτα 802.11, με ειδικό chipset (πχ για Ethernet)
  - υλοποιεί τη ζεύξη, φυσικό επίπεδο.
- Συνδέεται στο δίαυλο (bus) συστήματος του υπολογιστή (σήμερα ενσωματωμένη στη μητρική του υπολογιστή).
- Συνδυασμός hardware, firmware και software (λιγότερο).





# Προσαρμογείς που επικοινωνούν



- Πλευρά αποστολής. Ο ελεγκτής της κάρτας δικτύου:
  - ενθυλακώνει το datagram σε πλαίσιο (frame)
  - προσθέτει bits ελέγχου σφάλματος, αξιόπιστης μεταφοράς δεδομένων (rdt), ελέγχου ροής, κ.τ.λ.
- Πλευρά λήψης. Ο ελεγκτής του της κάρτας δικτύου :
  - ελέγχει για σφάλματα, rdt, έλεγχο ροής, κ.τ.λ.
  - εξάγει το datagram, το παραδίδει στο ανώτερο επίπεδο στην πλευρά λήψης.



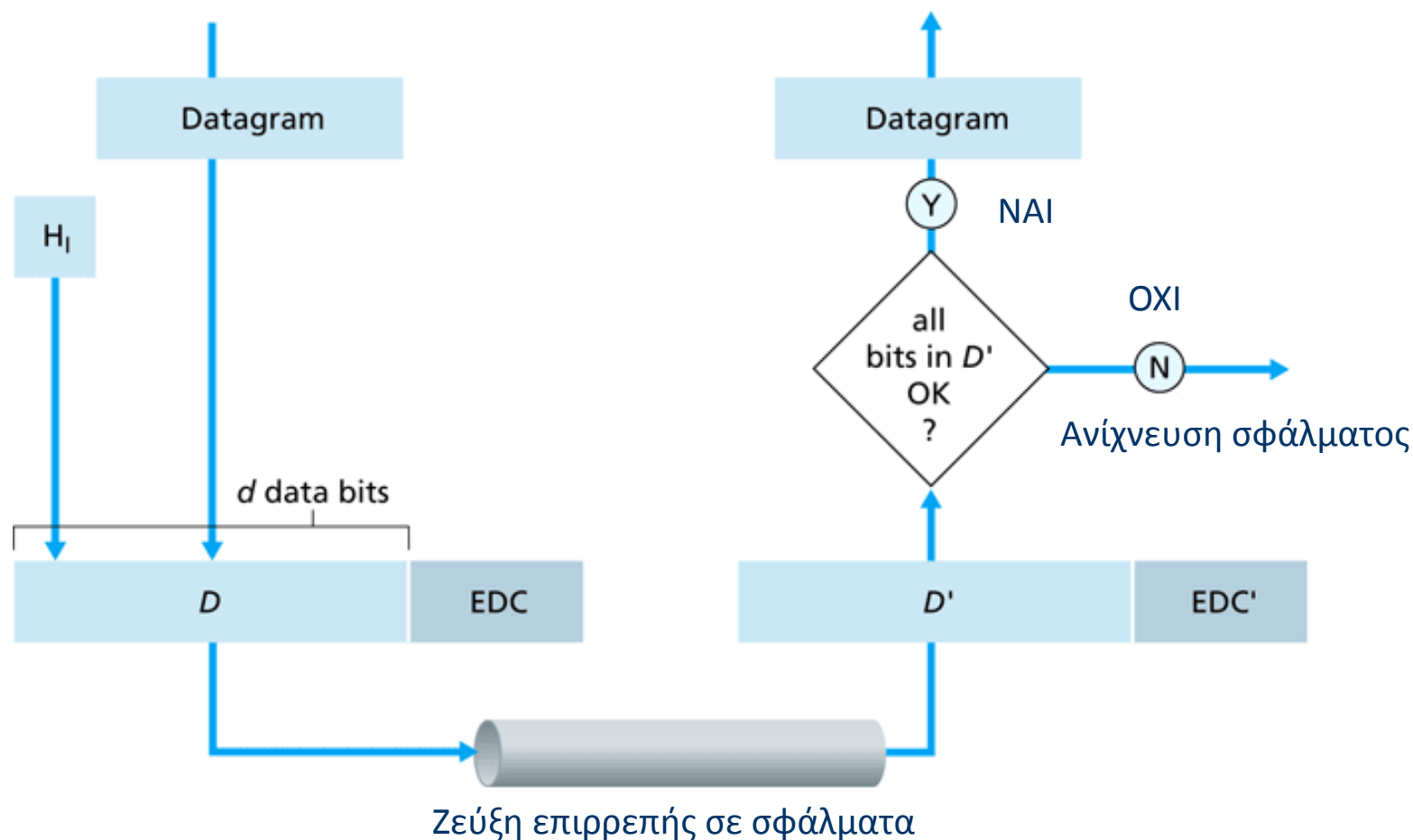
# Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων επιπέδου bit

- **EDC= Error Detection and Correction bits** (bits ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων – πλεονασμός)
- **D** = τα δεδομένα που πρόκειται να προστατευτούν με τον έλεγχο σφαλμάτων (ενδέχεται να περιλαμβάνουν πεδία της κεφαλίδας).
- Τα D εμπλουτίζονται με τα EDC και στέλνονται στο απέναντι κόμβο (λήψης) μέσα σ' ένα πλαίσιο επιπέδου ζεύξης.
- Στο κόμβο λήψης φτάνει μια ακολουθία από bits **D'** και **EDC'** που ενδέχεται να διαφέρουν από τα D και EDC ως αποτέλεσμα σφαλμάτων κατά τη μεταφορά.
- Ο κόμβος λήψης θα πρέπει να διαπιστώσει αν το **D'** που παρέλαβε είναι ακριβώς το ίδιο με το D.
- Εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων που επιτρέπουν στον λήπτη να ανιχνεύει σφάλματα bit.
- Η ανίχνευση σφαλμάτων δεν είναι 100% αξιόπιστη!
  - Το πρωτόκολλο μπορεί να «χάσει» μερικά σφάλματα (σπάνια).
  - Υπάρχει πάντα η πιθανότητα να παραδοθεί εσφαλμένο datagram.
  - Μεγαλύτερο πεδίο EDC οδηγεί σε καλύτερη ανίχνευση και διόρθωση.



# Σενάριο ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων

Ελέγχουμε αν *ανιχνεύτηκε* σφάλμα και όχι αν υπάρχει σφάλμα!

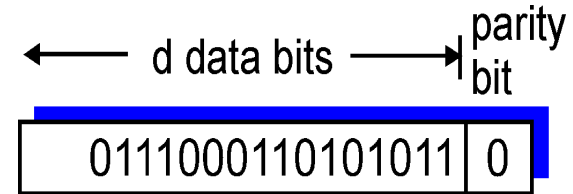


# Έλεγχος ισοτιμίας μονού bit

- Ο αποστολέας προσθέτει ένα επιπλέον bit για να δημιουργήσει άρτιο ή περιττό αριθμό **άσων** (bit=1) ανάλογα τι έχει συμφωνηθεί (άρτια ή περιττή ισοτιμία).
- Ανιχνεύεται ο αριθμός σφαλμάτων bit που **είναι περιττός** (γιατί?).
- Τα σφάλματα δεν μπορούν να διορθωθούν.

## Άρτια ισοτιμία:

| Δεδομένα | αριθμός 1's  | ισοτιμία | τι θα σταλθεί |
|----------|--------------|----------|---------------|
| 0110110  | 4 (άρτιος)   | 0        | 01101100      |
| 0011111  | 5 (περιττός) | 1        | 00111111      |
| 0000000  | 0 (άρτιος)   | 0        | 00000000      |
| 1010100  | 3 (περιττός) | 1        | 10101001      |
| 1111111  | 7 (περιττός) | 1        | 11111111      |



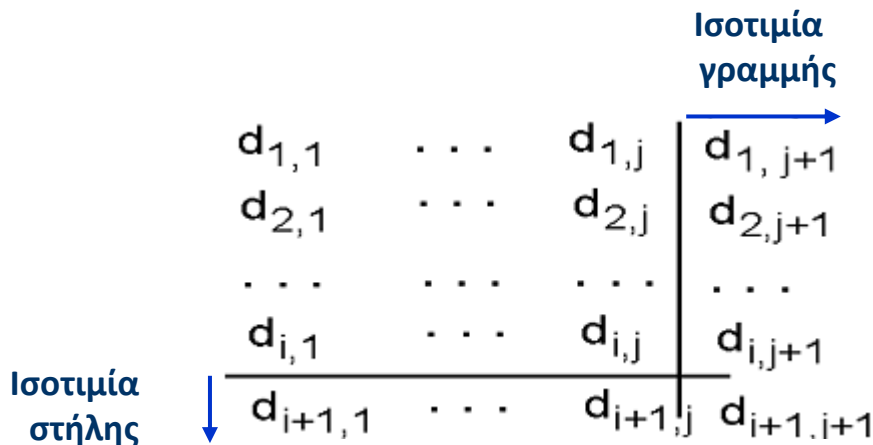
## Περιττή ισοτιμία:

| Δεδομένα | αριθμός 1's  | ισοτιμία | τι θα σταλθεί |
|----------|--------------|----------|---------------|
| 0110110  | 4 (άρτιος)   | 1        | 01101101      |
| 0011111  | 5 (περιττός) | 0        | 00111110      |
| 0000000  | 0 (άρτιος)   | 1        | 00000001      |
| 1010100  | 3 (περιττός) | 0        | 10101000      |
| 1111111  | 7 (περιττός) | 0        | 11111110      |



# Δισδιάστατη ισοτιμία bit

- Εφαρμόζουμε δισδιάστατα (οριζόντια και κάθετα) τον έλεγχο ισοτιμίας.
- Ανιχνεύει πάντα τον περιττό αριθμό λαθών, ενώ καλύπτει ικανοποιητικά τον άρτιο αριθμό σφαλμάτων (όχι πάντα, γιατί;).
- Διορθώνει σφάλματα ενός μόνο bit.



```
1 0 1 0 1 | 1
1 1 1 1 0 | 0
0 1 1 1 0 | 1
-----
0 0 1 0 1 | 0
```

Χωρίς  
λάθη

```
1 0 1 0 1 | 1
1 0 1 1 0 | 0
0 1 1 1 0 | 1
-----
0 0 1 0 1 | 0
```

Λάθος  
ισοτιμίας

Λάθος ισοτιμίας

Μπορεί να  
διορθωθεί!



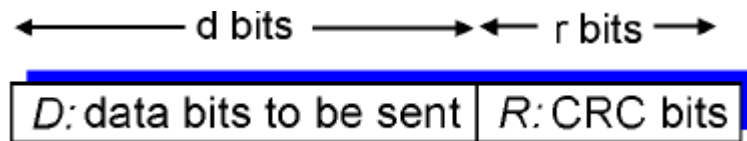
# Άθροισμα ελέγχου (checksum) Διαδικτύου (επανάληψη)

- Ανίχνευση «σφαλμάτων» (π.χ., αλλοιωμένα bits) στο πακέτο που μεταδίδεται.
- Ο αποστολέας:
  - χειρίζεται το περιεχόμενο του πακέτου ως ακολουθία 16 bits ακεραίων.
  - **checksum**: συμπλήρωμα ως προς το 1 του αθροίσματος του περιεχομένου (που είναι εκφρασμένο σε 16-bit λέξεις).
  - Στα πρωτόκολλα UDP και TCP ο υπολογισμός γίνεται σε όλο το segment, στο IP μόνο στην επικεφαλίδα του datagram.
  - Ο αποστολέας τοποθετεί την τιμή του checksum στο πεδίο checksum του πακέτου.
- Ο δέκτης:
  - Υπολογίζει το checksum του λαμβανομένου πακέτου.
  - Έλεγχος αν το υπολογισμένο checksum ισούται με την τιμή του πεδίου checksum (στη πραγματικότητα προσθέτει όλες τις 16-bit λέξεις και ελέγχει αν το αποτέλεσμα είναι όλοι άσσοι).



# Κυκλικός Έλεγχος Πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check)

- Περισσότερο ισχυρή κωδικοποίηση ανίχνευσης σφαλμάτων.
- Τα  $d$  bits δεδομένων ( $D$ ) αντιμετωπίζονται σαν δυαδικός αριθμός.
- Επιλέγεται ένα μοτίβο  $r+1$  bits (γεννήτρια -generator),  $G$
- Στόχος: επιλογή  $r$  CRC bits,  $R$ , έτσι ώστε:
  - το  $\langle D, R \rangle$  να διαιρείται ακριβώς από το  $G$  (modulo 2)
  - ο δέκτης γνωρίζει το  $G$ , διαιρεί το  $\langle D, R \rangle$  με το  $G$ . Αν μη μηδενικό υπόλοιπο: ανιχνεύτηκε σφάλμα!
  - Μπορεί να ανιχνεύσει όλες τις ριπές σφαλμάτων με λιγότερα από  $r+1$  bits
- Χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη (Ethernet, 802.11 WiFi, ATM).



Bit pattern

Μαθηματικός τύπος

$$D * 2^r \text{ XOR } R$$

ολίσθηση



# Η τεχνική

- Θέλουμε:

$$D \cdot 2^r \text{ XOR } R = nG$$

- ισοδύναμα:

$$D \cdot 2^r = nG \text{ XOR } R$$

- ισοδύναμα:

αν διαιρέσουμε το  $D \cdot 2^r$  με  $G$ , θέλουμε το υπόλοιπο  $R$  να ικανοποιεί τη σχέση:

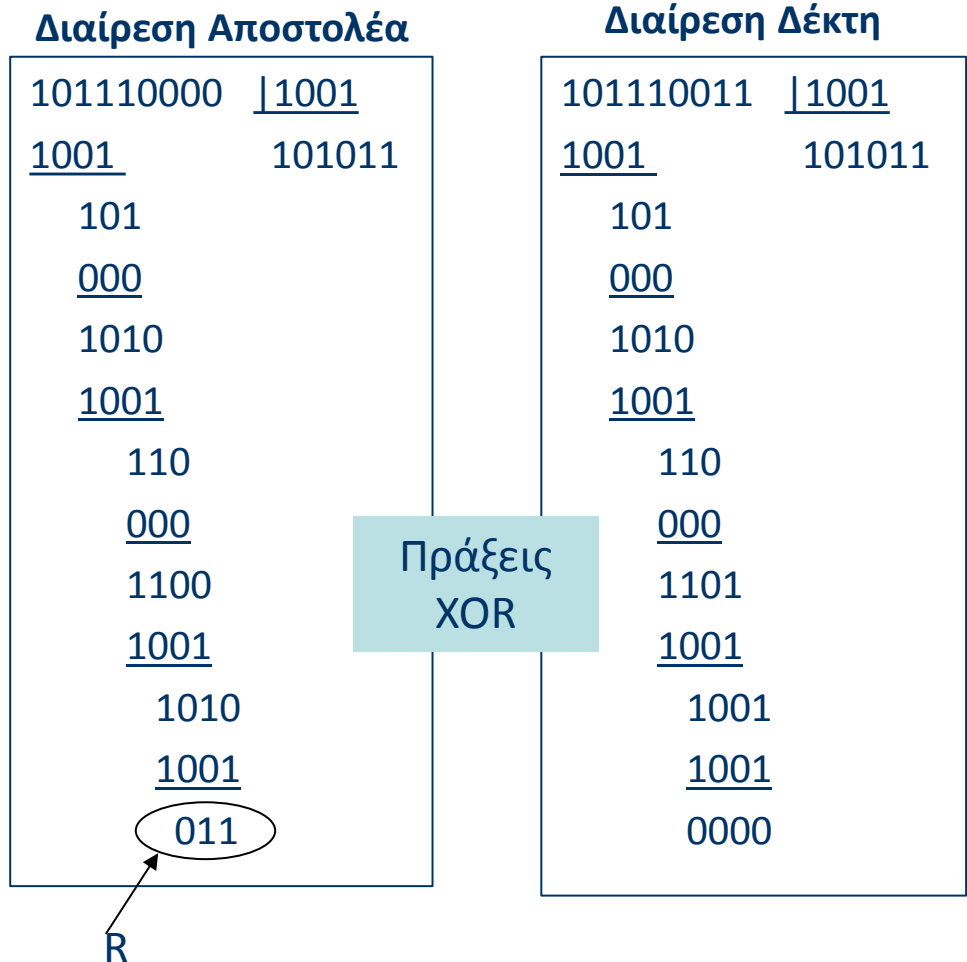
$$R = \text{υπόλοιπο}\left[\frac{D \cdot 2^r}{G}\right]$$





# Παράδειγμα CRC

- Έστω τα d-bits: **101110** (6 bits)  
και ότι  $G=1001$  ( $r=3$ )  
Τότε  $D \cdot 2^r = \mathbf{101110000}$
- Κάνουμε τη διαίρεση (αποστολέα)
- Προσθέτουμε το R στο  $D \cdot 2^r$   
 $101110011 \leftarrow D \cdot 2^r \text{ XOR } R$   
και το στέλνουμε
- Ο παραλήπτης διαιρεί αυτό που παίρνει με το G (διαίρεση δέκτη)
- Αν βρει υπόλοιπο 0  
τότε δεν ανιχνεύτηκαν σφάλματα.  
διαφορετικά το μήνυμα έφτασε λάθος.



# Ζεύξεις πολλαπλής προσπέλασης

- Υπάρχουν 2 τύποι ζεύξεων δικτύου:

- **Σημείου προς σημείο (point-to-point)**

Η ζεύξη ενώνει απ' ευθείας 2 κόμβους (αποστολέα & παραλήπτη).  
Πρωτόκολλα: PPP, HDLC.

- **Ευρυ-εκπομπής (broadcast)**

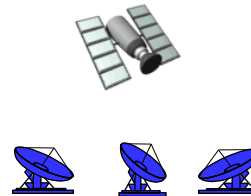
Το μέσο μετάδοσης (καλώδιο) της ζεύξης είναι διαμοιραζόμενο.  
Πολλαπλοί κόμβοι. Όταν μεταδίδεται ένα πλαίσιο το λαμβάνουν όλοι.  
Τεχνολογίες: Ethernet, wireless LAN.



Διαμοιραζόμενο  
Καλώδιο,  
-πχ Ethernet



Διαμοιραζόμενη  
συχνότητα (RF)  
-πχ 802.11 WiFi)



Διαμοιραζόμενη  
συχνότητα (RF)  
- πχ δορυφόρος



Ανθρώπινη αναλογία:  
ένα πάρτι  
(διαμοιραζόμενος αέρας)



# Πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης

- Έχουμε ένα μοναδικό κανάλι εκπομπής (broadcast) κοινής χρήσης.
- Πρόβλημα πολλαπλής προσπέλασης (multiple access problem):  
πως θα επιτευχθεί η προσπέλαση πολλαπλών κόμβων εκπομπής και λήψης σε ένα κοινό κανάλι (μέσο μετάδοσης)?
- Όταν υπάρχουν δύο ή περισσότερες ταυτόχρονες μεταδόσεις από τους κόμβους, τότε έχουμε *παρεμβολές*:
  - **Σύγκρουση (collision)**: όταν ένας κόμβος λάβει δύο ή περισσότερα πλαίσια ταυτόχρονα (τα σήματα των διαφορετικών πλαισίων μπλέκονται).
- Πρωτόκολλο πολλαπλής προσπέλασης (**multiple access protocol**)
  - κατανεμημένος αλγόριθμος που καθορίζει πώς οι κόμβοι μοιράζονται το κανάλι (π.χ. καθορίζει πότε ο κόμβος μπορεί να μεταδώσει).
  - Οι επικοινωνίες μεταξύ των κόμβων χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι (κοινή χρήση του μέσου):

δεν υπάρχει άλλο κανάλι για συντονισμό των εκπομπών.



# Ιδανικό πρωτόκολλο πολλαπλής προσπέλασης

- Υποθέτουμε ότι έχουμε ένα κανάλι εκπομπής (broadcast) ρυθμού  $R$  bps.
- Επιθυμητά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου:
  - Όταν ένας κόμβος θέλει να μεταδώσει να μπορεί να στείλει bits με ρυθμό  $R$  bps.
  - Όταν  $M$  κόμβοι θέλουν να μεταδώσουν, ο καθένας να μπορεί να στείλει bits με μέσο ρυθμό  $R/M$  bps.
  - Πλήρως αποκεντρωμένο:
    - χωρίς κάποιος ειδικός κόμβος να συντονίζει τις μεταδόσεις.
    - χωρίς συγχρονισμό ρολογιών, θυρίδων κλπ.
  - Απλό, για να είναι φτηνό στη υλοποίηση.



# Ταξινόμηση των πρωτοκόλλων πολλαπλής προσπέλασης

- **Κατάτμησης καναλιού** (channel partitioning)
  - διαίρεση του καναλιού σε μικρότερα “μονάδες” (χρονοθυρίδες, συχνότητα, κώδικες).
  - εκχώρηση μονάδας σε κόμβο για αποκλειστική χρήση.
- **Τυχαίας πρόσβασης** (random access)
  - το κανάλι δε διαιρείται, επιτρέπονται συγκρούσεις.
  - μηχανισμοί “ανάνηψης” μετά από συγκρούσεις.
- **Εκ περιτροπής λειτουργία** (“taking turns”)
  - Οι κόμβοι μεταδίδουν εναλλάξ (με κάποια σειρά), αλλά για τους κόμβους που έχουν να στείλουν περισσότερα, η μετάδοση μπορεί να διαρκέσει παραπάνω.

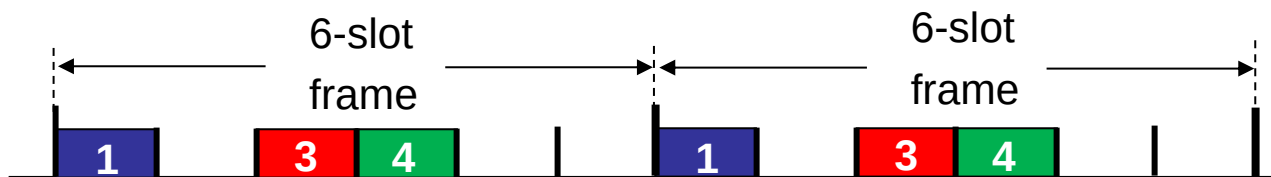
**Πρωτόκολλα Ελέγχου Προσπέλασης Μέσου  
(Medium Access Control – MAC).**



# Πολλαπλής προσπέλασης με διαίρεση χρόνου

- **Πρωτόκολλα MAC, TDMA** (Time Division Multiple Access)
- Ο χρόνος χρήσης του καναλιού επιμερίζεται σε ίσα χρονικά διαστήματα (χρονοπλαίσια - time frames).
- Κάθε χρονοπλαίσιο επιμερίζεται περαιτέρω σε μικρότερα σταθερά χρονικά διαστήματα (χρονοθυρίδες – time slots). Ένα για κάθε κόμβο.
- Σε κάθε γύρο, κάθε κόμβος παίρνει μια χρονοθυρίδα (= χρόνος μετάδοσης ενός πλαισίου επιπέδου ζεύξης).
- Θυρίδες που δεν χρησιμοποιούνται παραμένουν αδρανείς.

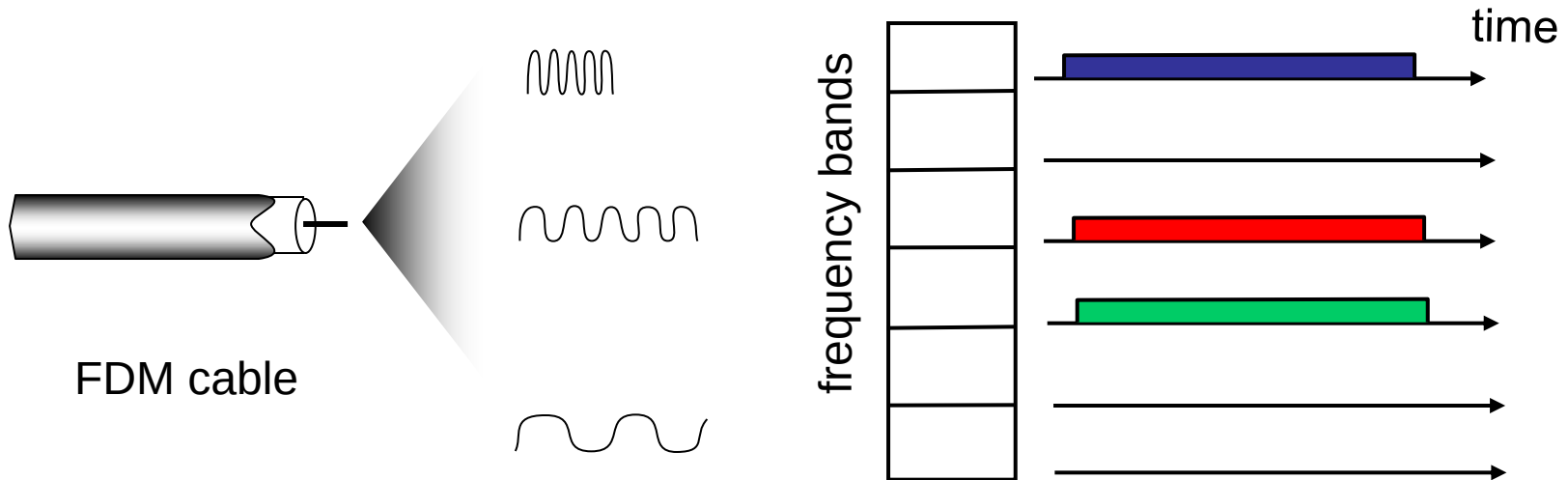
Παράδειγμα: 6 κόμβοι LAN, οι κόμβοι 1,3 και 4 έχουν πλαίσια, θυρίδες 2,5,6 ανενεργές



# Πολλαπλής προσπέλασης με διαίρεση συχνότητας

- **Πρωτόκολλα MAC, FDMA** (Frequency Division Multiple Access)
- Το φάσμα συχνοτήτων του καναλιού χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες συχνοτήτων, κάθε μια από τις οποίες αφιερώνεται σε ένα κόμβο.
- Στις ζώνες συχνοτήτων που δεν υπάρχει μετάδοση παραμένουν αδρανείς (έχουμε αδρανή χρόνο).

παράδειγμα: 6 κόμβοι LAN, οι 1,3 και 4 έχουν πλαίσια, οι ζώνες συχνοτήτων 2,5,6 αδρανείς



# Πολλαπλής προσπέλασης με διαίρεση κώδικα

- **Πρωτόκολλα MAC, CDMA** (Code Division Multiple Access)
- Σε κάθε κόμβο εκχωρείται ένας διαφορετικός (μοναδικός) κώδικας.
- Ο κώδικας αυτό χρησιμοποιείται για τη κωδικοποίηση των bits των δεδομένων.
- Με αυτό τον τρόπο, διαφορετικοί κόμβοι μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα κωδικοποιώντας τα bits.
- Οι παραλήπτες, γνωρίζοντας τις αντίστοιχες κωδικοποιήσεις, να λαμβάνουν τα bits των δεδομένων, χωρίς να ενοχλούνται από τις παρεμβάσεις.
- Τα πρωτόκολλα CDMA χρησιμοποιήθηκαν αρχικά σε στρατιωτικές εφαρμογές.
- Τώρα έχουν ευρεία χρήση στη κινητή τηλεφωνία.





# Πρωτόκολλα MAC τυχαίας προσπέλασης

- Όταν ένας κόμβος έχει πλαίσιο για μετάδοση:
  - το μεταδίδει με τον πλήρη ρυθμό του καναλιού  $R$  bps
  - δεν υπάρχει εκ των προτέρων συντονισμός μεταξύ των κόμβων.
- Όταν μεταδίδουν πάνω από 2 κόμβοι τότε έχουμε συγκρούσεις.
- Στις συγκρούσεις κάθε εμπλεκόμενος κόμβος επανεκπέμπει συνεχώς το πλαίσιο μέχρι το στείλει χωρίς σύγκρουση.
- Οι επανεκπομπές δεν γίνονται κατ' ανάγκη αμέσως, αλλά με τυχαίες καθυστερήσεις.
- Ένα πρωτόκολλο MAC τυχαίας προσπέλασης καθορίζει:
  - πώς να ανιχνεύονται οι συγκρούσεις και
  - πώς να γίνεται η ανάνηψη από συγκρούσεις (π.χ. αναμεταδόσεις με κάποια καθυστέρηση).
- Παραδείγματα πρωτοκόλλων MAC τυχαίας προσπέλασης:
  - θυριδωτό ALOHA, ALOHA, CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA.



# Θυριδωτό (slotted) ALOHA

## ■ Υποθέσεις:

- όλα τα πλαίσια έχουν το ίδιο μέγεθος,
- ο χρόνος διαιρείται σε ίσου μεγέθους θυρίδες (χρόνος μετάδοσης 1 πλαισίου),
- οι κόμβοι ξεκινούν να μεταδίδουν πλαίσια μόνο στην αρχή των θυρίδων,
- οι κόμβοι είναι συγχρονισμένοι,
- αν 2 ή περισσότεροι κόμβοι μεταδώσουν σε μια θυρίδα, όλοι οι κόμβοι ανιχνεύουν τη σύγκρουση.

## ■ Λειτουργία:

- όταν ο κόμβος έχει νέο πλαίσιο, το μεταδίδει στην επόμενη θυρίδα,
- αν όχι σύγκρουση: ο κόμβος μπορεί να στείλει νέο πλαίσιο στην επόμενη θυρίδα,
- αν σύγκρουση: ο κόμβος αναμεταδίδει το πλαίσιο σε κάθε επόμενη θυρίδα με πιθανότητα  $p$ , μέχρι την επιτυχία.



# Θυριδωτό ALOHA: πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα

## ■ Πλεονεκτήματα:

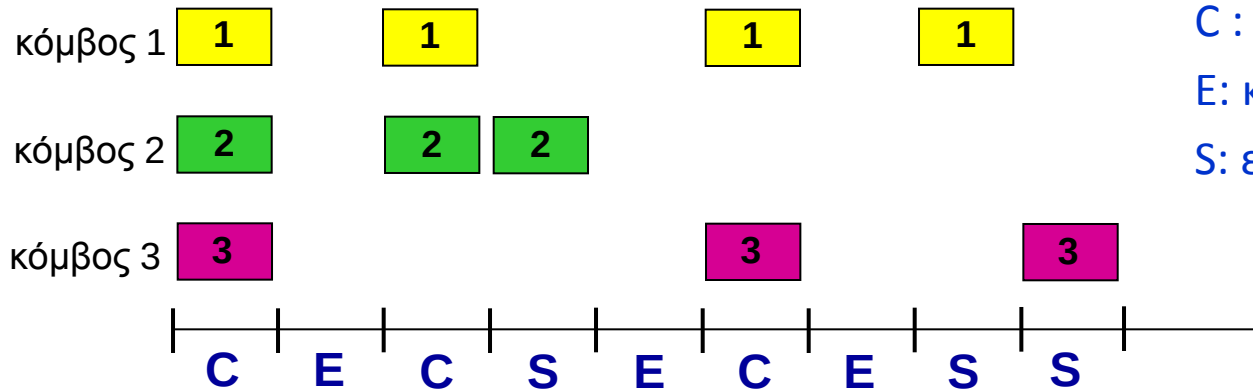
- Αν μόνο ένας κόμβος είναι ενεργός (έχει πλαίσια για αποστολή) μπορεί να μεταδίδει διαρκώς στον πλήρη ρυθμό  $R$  του καναλιού.
- Σε μεγάλο βαθμό αποκεντρωμένο: σε περίπτωση σύγκρουσης κάθε κόμβος αποφασίζει ανεξάρτητα σε ποια μελλοντική θυρίδα θα εκπέμψει ξανά το πλαίσιο.
- Ιδιαίτερα απλό.

## ■ Μειονεκτήματα:

- Σε κάποιες θυρίδες έχουμε συγκρούσεις (χάνονται πλαίσια).
- Υπάρχουν αδρανείς θυρίδες (δεν εκπέμπει κανένας κόμβος).
- Απαιτείται συγχρονισμός ρολογιού για τις θυρίδες στους κόμβους.



# Αποδοτικότητα του θυριδωτού Aloha



C : θυρίδα με σύγκρουση,  
E: κενή θυρίδα,  
S: επιτυχής θυρίδα ,  
(εκπέμπει 1 κόμβος,  
οι υπόλοιποι  $N-1$  δεν  
μεταδίδουν).

- **Αποδοτικότητα:** ποσοστό επιτυχημένων θυρίδων σε βάθος χρόνου (πολλοί κόμβοι, όλοι με πολλά πλαίσια προς αποστολή)
- Στην καλύτερη περίπτωση: το κανάλι χρησιμοποιείται για ωφέλιμες μεταδόσεις το **37%** του χρόνου!

Έστω  $N$  κόμβοι με πολλά πλαίσια προς αποστολή, ο καθένας μεταδίδει σε μια θυρίδα με πιθανότητα  $p$ .

- $p$ : η πιθανότητα να εκπέμπει 1 κόμβος,  $(1-p)^{N-1}$  η πιθανότητα να μην μεταδίδουν οι άλλοι.
- $p(1-p)^{N-1}$ : η πιθανότητα ένας συγκεκριμένος κόμβος να έχει επιτυχία.
- $Np(1-p)^{N-1}$ : η πιθανότητα οποιοσδήποτε κόμβος να έχει επιτυχία.

Ποιο  $p'$  μεγιστοποιεί το  $Np(1-p)^{N-1}$  ? ( $N \rightarrow \infty$ )?



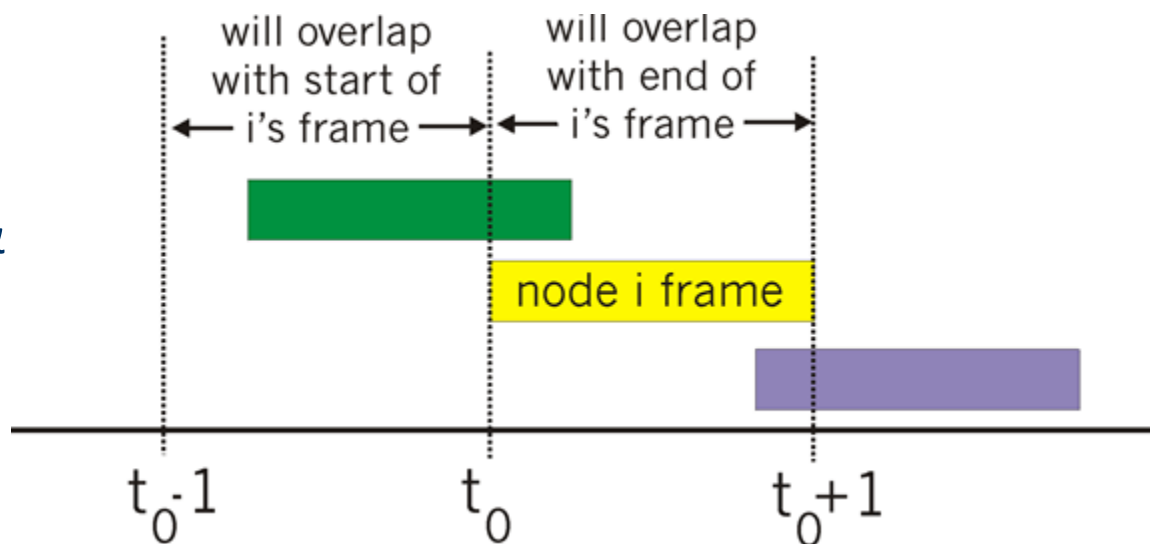
# Απλό (χωρίς θυρίδες) ALOHA

- Χωρίς θυρίδες, πλήρως αποκεντρωμένο, χωρίς συγχρονισμό.
- Πολύ απλή λειτουργία:
  - Όταν φτάνει ένα πλαίσιο για πρώτη φορά, μεταδίδεται αμέσως.
  - Αν έχουμε σύγκρουση, τότε όλοι οι κόμβοι με πλαίσια για μετάδοση πρέπει να προσπαθήσουν «αργότερα».
- Στην καλύτερη περίπτωση: το κανάλι χρησιμοποιείται για ωφέλιμες μεταδόσεις το **18%** του χρόνου!

Η πιθανότητα σύγκρουσης αυξάνει:

- το πλαίσιο που στέλνεται στο  $t_0$  συγκρούεται με άλλα πλαίσια που ενδεχομένως στέλνονται στο

$[t_0-1, t_0+1]$



# Πολλαπλή προσπάθεια με ανίχνευση φέροντος

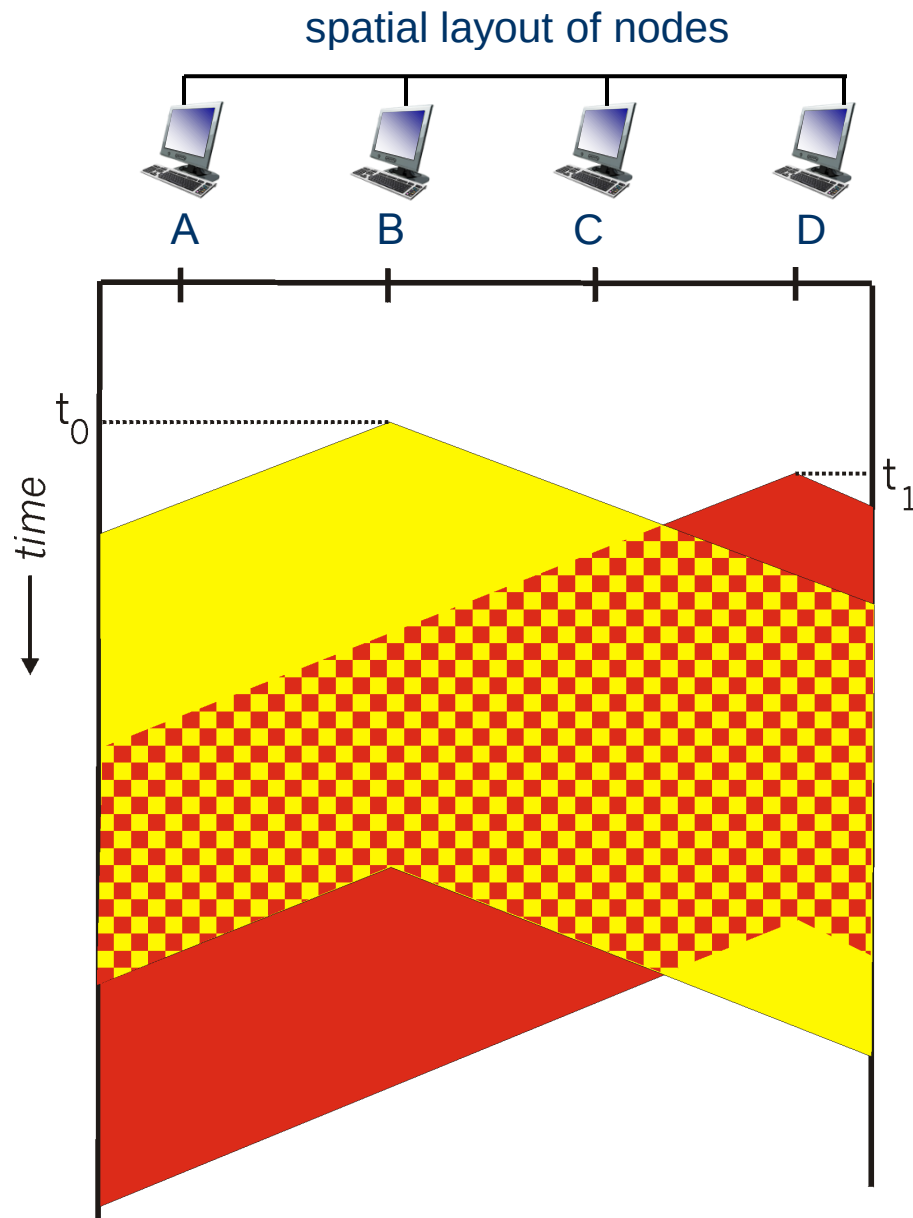
- Πρωτόκολλο **CSMA** - Carrier Sense Multiple Access
- Στα MAC πρωτόκολλα ALOHA:
  - κάθε κόμβος ξεκινά να στέλνει πλαίσια, χωρίς να λαμβάνει υπόψη του τη δραστηριότητα άλλων κόμβων.
  - Επίσης, δεν σταματά τη μετάδοση ενός πλαισίου ακόμα και αν υπάρχουν παρεμβολές από μεταδόσεις άλλων κόμβων.
- Ανίχνευση φέροντος στο CSMA:
  - Αν το κανάλι ανιχνευτεί ανενεργό, μετάδωσε ολόκληρο το πλαίσιο.
  - Αν το κανάλι ανιχνευτεί απασχολημένο, ανάβαλε τη μετάδοση για αργότερα.
- Ανθρώπινη αναλογία:  
*«άκου πριν μεταδώσεις» ή «μην διακόπτεις τους άλλους»*



# Συγκρούσεις στο CSMA

- Όμως και πάλι μπορεί να εμφανιστούν συγκρούσεις:
  - η καθυστέρηση διάδοσης σημαίνει ότι δύο κόμβοι μπορεί να μην άκουσαν ο ένας τη μετάδοση του άλλου.
- Σύγκρουση: χάνεται ολόκληρος ο χρόνος μετάδοσης του πακέτου (Οι κόμβοι ολοκληρώνουν τη μετάδοση των πακέτων αν και έχει γίνει σύγκρουση).

Κρίσιμος ο ρόλος της απόστασης και της καθυστέρησης διάδοσης στον καθορισμό της πιθανότητας σύγκρουσης.



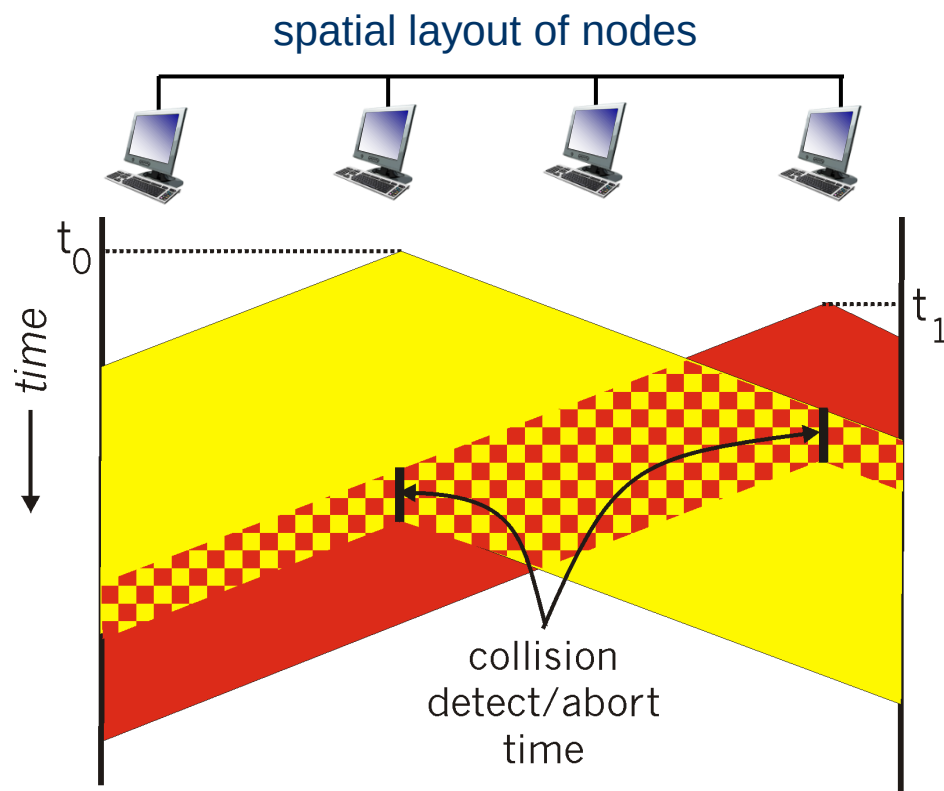
# CSMA με ανίχνευση σύγκρουσης (Collision Detection)

- **CSMA/CD** (Carrier Sense Multiple Access/collision detection)
- Ανίχνευση φέροντος και αναβολή όπως στο CSMA.
- Εδώ όμως:
  - οι συγκρούσεις ανιχνεύονται σε σύντομο χρόνο,
  - οι μεταδόσεις που συγκρούονται διακόπτονται, μειώνοντας το χαμένο χρόνο του καναλιού.
- Ανίχνευση σύγκρουσης:
  - εύκολη στα ενσύρματα LANs: μέτρηση ισχύος σήματος, σύγκριση μεταδιδόμενων, λαμβανόμενων σημάτων.
  - δύσκολη στα ασύρματα LANs: η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος «καλύπτεται» από την ισχύ της τοπικής μετάδοσης.
- Ανθρώπινη αναλογία: «**ο ευγενικός συνομιλητής**»  
(αν κάποιος άλλος αρχίσει να μιλά ταυτόχρονα, εσύ σταματάς!)





# CSMA/CD ανίχνευση σύγκρουσης



# Λειτουργία του CSMA/CD

- Η κάρτα δικτύου (NIC) λαμβάνει το datagram από το επίπεδο δικτύου και δημιουργεί το πλαίσιο (frame).
- Εάν ανιχνευτεί ότι το κανάλι είναι αδρανές, αρχίζει η μετάδοση του πλαισίου. Αν όχι, (ενεργό κανάλι) τότε αναμονή έως ότου το κανάλι απελευθερωθεί και να αρχίσει ξανά η μετάδοση.
- Κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του πλαισίου, ο κόμβος αποστολής παρακολουθεί το κανάλι για παρουσία σήματος από άλλο κόμβο:
  - Αν δεν ανιχνευτεί μετάδοση (σήμα) άλλου κόμβου τότε θεωρεί ότι έχει ολοκληρωθεί η μετάδοση του πλαισίου.
  - Αν ανιχνευτεί μετάδοση άλλου κόμβου, τότε σταματά την μετάδοση.
- Μετά την ματαίωση ο κόμβος περιμένει ένα **τυχαίο διάστημα** και μετά επαναλαμβάνει τη διαδικασία μετάδοσης.



## Δυαδική (εκθετική) οπισθοχώρηση

- Σε περίπτωση συγκρούσεων πως καθορίζεται το τυχαίο διάστημα για να επαναληφθεί η διαδικασία μετάδοσης?
- Αλγόριθμος (*binary exponential backoff*):
  - Μετά την  $n$ -στη σύγκρουση ο κόμβος επιλέγει τυχαία ένα αριθμό  $K$  στο διάστημα  $\{0,1,2,\dots, 2^n-1\}$
  - Περιμένει ένα χρονικό διάστημα που εξαρτάται από το  $K$  και επαναλαμβάνει τη διαδικασία.
- Έτσι, όσο περισσότερες συγκρούσεις έχουμε στη μετάδοση ενός πακέτου, τόσο μεγαλύτερο θα είναι το εύρος από το οποίο επιλέγετε το  $K$ .
- Για το Ethernet:
  - το χρονικό διάστημα που εξαρτάται από το  $K$  είναι:  $K \cdot 512$  bit, δηλαδή  $K$  φορές το χρόνο που χρειάζεται για σταλθούν 512 bits.
  - η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το  $n$  είναι 10.



# Παράδειγμα με τη δυαδική (εκθετική) οπισθοχώρηση

- Έστω ότι στη 1<sup>η</sup> μετάδοση ενός πλαισίου ανιχνεύεται σύγκρουση:
  - Το διάστημα είναι  $\{0,1\}$  (0,5 η πιθανότητα για  $K=0$  ή  $K=1$ )
  - Αν  $K=0$  (πιθανότητα 0,5) αρχίζει αμέσως η ανίχνευση του καναλιού.
  - Αν  $K=1$  (πιθανότητα 0,5) περιμένει για ανίχνευση τόσο χρόνο όσο για να μεταδοθούν 512 bits.
- Αν ανιχνευθεί ξανά σύγκρουση (2<sup>η</sup>):
  - Το  $K$  επιλέγεται με ίση πιθανότητα από το σύνολο  $\{0,1,2,3\}$
- Αν ξανά σύγκρουση (3<sup>η</sup>):
  - Το  $K$  επιλέγεται με ίση πιθανότητα από το σύνολο  $\{0,1,2,3,4,5,6,7\}$
- Μετά από 10 ή περισσότερες συγκρούσεις:
  - Το  $K$  επιλέγεται με ίση πιθανότητα από το σύνολο  $\{0,1,\dots,1023\}$
- Τα σύνολα αυξάνουν εκθετικά με τον αριθμό των συγκρούσεων
- Κάθε φορά που ένας κόμβος ετοιμάζεται για αποστολή νέου πλαισίου, ο αλγόριθμος εκτελείται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη δεδομένα προηγούμενων συγκρούσεων.



# Αποδοτικότητα CSMA/CD

- Έστω ότι:
  - $d_{prop}$  = μέγιστη καθυστέρηση διάδοσης μεταξύ 2 κόμβων στο LAN
  - $d_{trans}$  = χρόνος για τη μετάδοση του πλαισίου μέγιστου μεγέθους
- Τότε ο τύπος για την αποδοτικότητα έχει ως εξής:

$$\text{Απόδοση} = \frac{1}{1 + 5d_{prop}/d_{trans}}$$

- Η αποδοτικότητα πάει στο 1
  - όσο το  $d_{prop}$  πάει στο 0
  - όσο το  $d_{trans}$  πάει στο άπειρο
- Έχουμε καλύτερη απόδοση από το ALOHA:  
και απλό, φθηνό, αποκεντρωμένο!



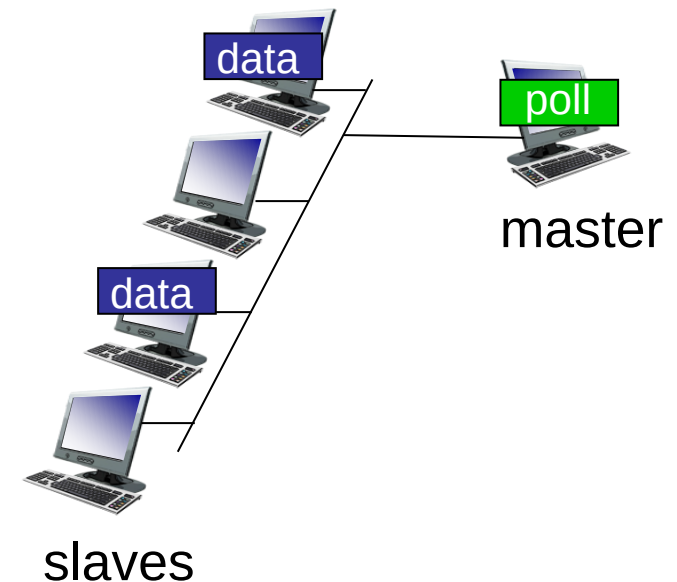
# Πρωτόκολλα με εκ περιτροπής λειτουργία

- Τα πρωτόκολλα MAC με κατάτμηση του καναλιού:
  - Μοιράζουν το κανάλι αποτελεσματικά και δίκαια σε υψηλό φορτίο.
  - Αναποτελεσματικά σε χαμηλό φορτίο: καθυστέρηση στην πρόσβαση στο κανάλι, δεν εκμεταλλεύονται αποτελεσματικά το εύρος ζώνης του καναλιού (εκχώρηση  $1/N$ -οστού του εύρους ζώνης ακόμη και αν ένας μόνο ενεργός κόμβος!)
- Τα πρωτόκολλα MAC τυχαίας πρόσβασης:
  - Αποτελεσματικά για χαμηλό φορτίο: ένας κόμβος μόνος του μπορεί να χρησιμοποιήσει πλήρως το κανάλι.
  - Υψηλό φορτίο: πληθώρα συγκρούσεων.
- Τα πρωτόκολλα λειτουργίας εκ περιτροπής (taking turns):
  - Αναζητούν τα καλύτερα από τους δυο κόσμους!



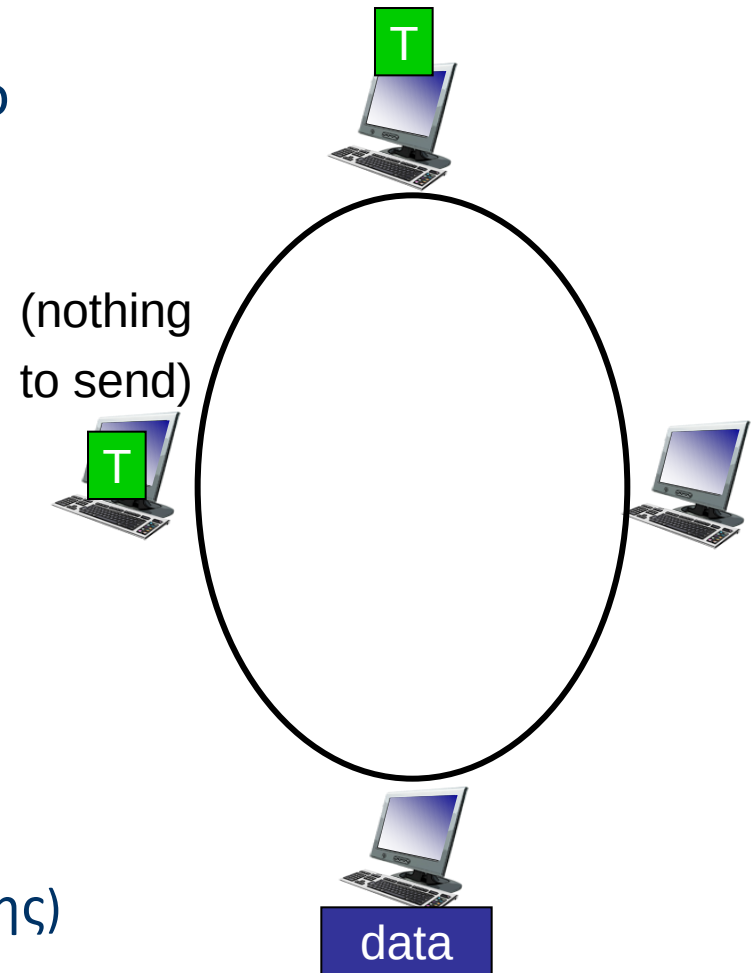
# Πρωτόκολλο σταθμοσκόπησης (polling)

- Ένας κόμβος ορίζεται ως κύριος (master)
- Αυτός ο κόμβος προσκαλεί κυκλικά τους υπόλοιπους (slaves) να μεταδώσουν.
- Εξαλείφονται οι συγκρούσεις και οι κενές θυρίδες
- Μειονεκτήματα:
  - Υπάρχει καθυστέρηση στη επιλογή του κόμβου που έχει σειρά (σταθμοσκόπηση -poll).
  - Αν ο master κόμβος παρουσιάσει βλάβη, τότε όλο το κανάλι δεν λειτουργεί (μοναδικό σημείο αποτυχίας).
- Πρωτόκολλα: 812.15, Bluetooth



# Πρωτόκολλο μεταβίβασης σκυτάλης (token)

- Δεν υπάρχει κύριος κόμβος.
- Ένα ειδικό πλαίσιο γνωστό ως **σκυτάλη** (token) μεταβιβάζεται από τον έναν κόμβο στον επόμενο σειριακά.
- Όταν ένας κόμβος παίρνει τη σκυτάλη, τη κρατά μόνο αν έχει να μεταδώσει κάτι. Αλλιώς την μεταβιβάζει στον επόμενο.
- Μειονεκτήματα:
  - Η βλάβη σε ένα κόμβο προκαλεί κατάρρευση του συστήματος.
  - Καθυστέρηση (μεταβίβαση σκυτάλης)
- Πρωτόκολλα: FDDI, token ring.





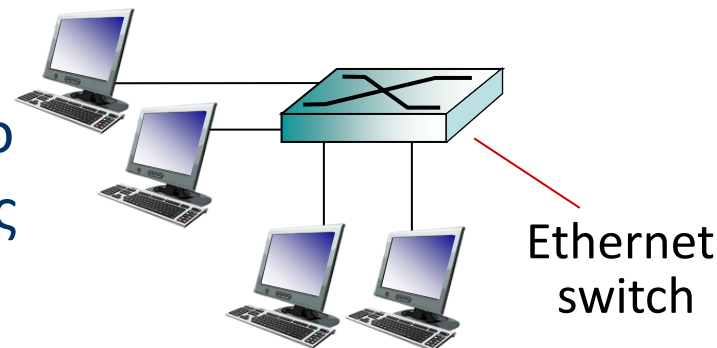
# Σύνοψη πρωτοκόλλων MAC

- Κατάτμηση καναλιού, μέσω χρόνου, συχνότητας, ή κώδικα:
  - Διαίρεση χρόνου, διαίρεση συχνότητας.
- Τυχαία πρόσβαση (δυναμικό):
  - ALOHA, Slotted-ALOHA, CSMA, CSMA/CD.
  - Ανίχνευση φέροντος: εύκολη σε ορισμένες τεχνολογίες (ενσύρματες), δύσκολη σε άλλες (ασύρματη).
  - CSMA/CD χρησιμοποιείται στο Ethernet.
  - CSMA/CA (Collision Avoidance) χρησιμοποιείται στο 802.11.
- Λειτουργία εκ περιτροπής:
  - Σταθμοσκόπηση από κεντρικό σταθμό, μεταβίβαση σκυτάλης.
  - Bluetooth, FDDI, Token Ring.



# Διευθύνσεις επιπέδου ζεύξης

- Σ' ένα τοπικό δίκτυο (LAN) ένα switch κάνει μεταγωγή πλαισίων (frames).
- Τα switches λειτουργούν στο 2<sup>ο</sup> επίπεδο και δεν αναγνωρίζουν τις IP διευθύνσεις του 3<sup>ου</sup> επιπέδου (δικτύου), ούτε χρησιμοποιούν αλγόριθμους δρομολόγησης.
- Τα switches χρησιμοποιούν διευθύνσεις 2ου επιπέδου (ζεύξης) που ονομάζονται διευθύνσεις MAC ή LAN ή φυσικές ή Ethernet.
- Διευθύνσεις IP (32-bit):
  - διεύθυνση επιπέδου δικτύου για τη διεπαφή,
  - χρησιμοποιείται για προώθηση επιπέδου 3 (επίπεδο δικτύου).
- Διευθύνσεις MAC (48-bit):
  - διεύθυνση επιπέδου ζεύξης για τη διεπαφή,
  - χρησιμοποιείται για μεταγωγή επιπέδου 2 (επίπεδο ζεύξης).



# Οι διευθύνσεις MAC

- Κάθε προσαρμογέας (κάρτα δικτύου) έχει μοναδική διεύθυνση MAC που βρίσκεται αποθηκευμένη στη ROM του.
- Οι διευθύνσεις MAC έχουν μήκος 6 bytes (48 bits, άρα  $2^{48}$  πιθανές διευθύνσεις).
- Εκφράζονται με 16-δικό συμβολισμό:
  - Κάθε byte αντιπροσωπεύεται από 2 δεκαεξαδικούς αριθμούς.

Πχ. 1A-2F-BB-76-09-AD

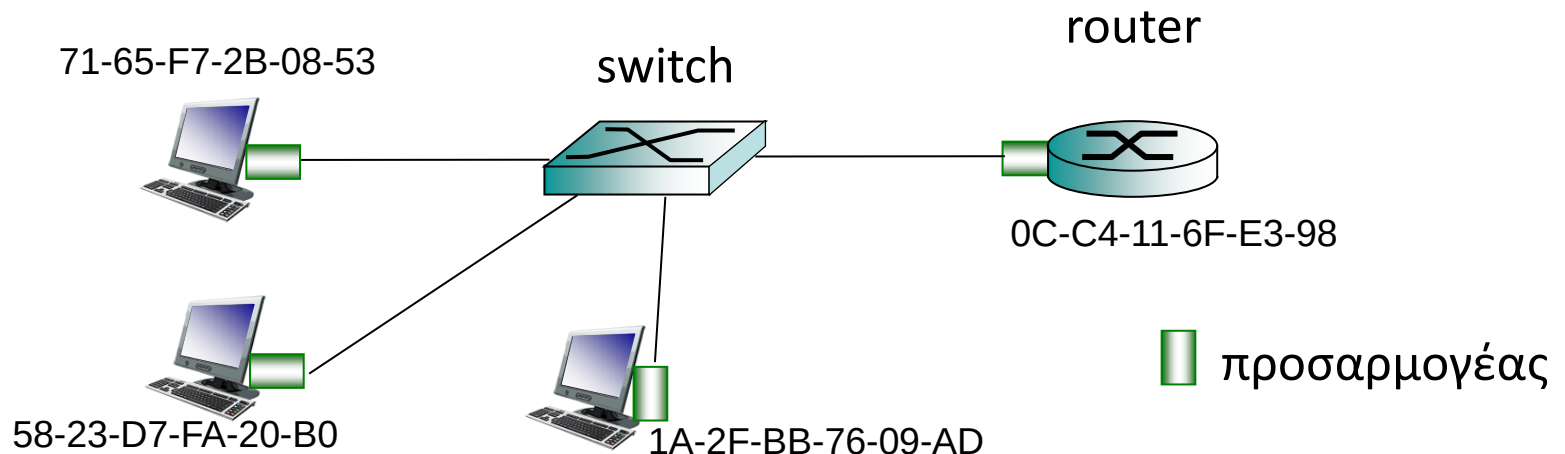
κάθε αριθμός έχει  
μήκος 4 bits

- Η IEEE διαχειρίζεται την εκχώρηση MAC διευθύνσεων:
  - ένας κατασκευαστής αγοράζει τμήμα του χώρου ( $2^{24}$ ) των MAC διευθύνσεων (για να διασφαλιστεί μοναδικότητα).
- Ειδική διεύθυνση εκπομπής (broadcast): FF-FF-FF-FF-FF-FF



## Διευθύνσεις MAC και switches

- Χρησιμοποιούνται “τοπικά” για να πάει το πλαίσιο από τη μία διεπαφή σε μια άλλη φυσικά συνδεδεμένη διεπαφή (ίδιο δίκτυο, υπό την έννοια της IP διευθυνσιοδότησης) .
- Τα switches (μεταγωγείς 2<sup>ου</sup> επιπέδου) δεν έχουν διευθύνσεις MAC στους προσαρμογείς τους που συνδέονται με hosts ή routers.
- Αυτό διότι η λειτουργία τους πρέπει να είναι διαφανής προς τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου.



- Κάθε προσαρμογέας (κάρτα δικτύου) ενός υπολογιστή ή ενός δρομολογητή έχει και μοναδική διεύθυνση MAC και ταυτόχρονα μοναδική διεύθυνση IP.
- Αναλογία:
  - a) διεύθυνση MAC: όπως ο αριθμός κοινωνικής ασφάλισης
  - b) 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

