

Δίκτυα Υπολογιστών



Επίπεδο Ζεύξης
(link layer)

Κ. Βασιλάκης

Περίγραμμα – ενότητες που εξετάζονται

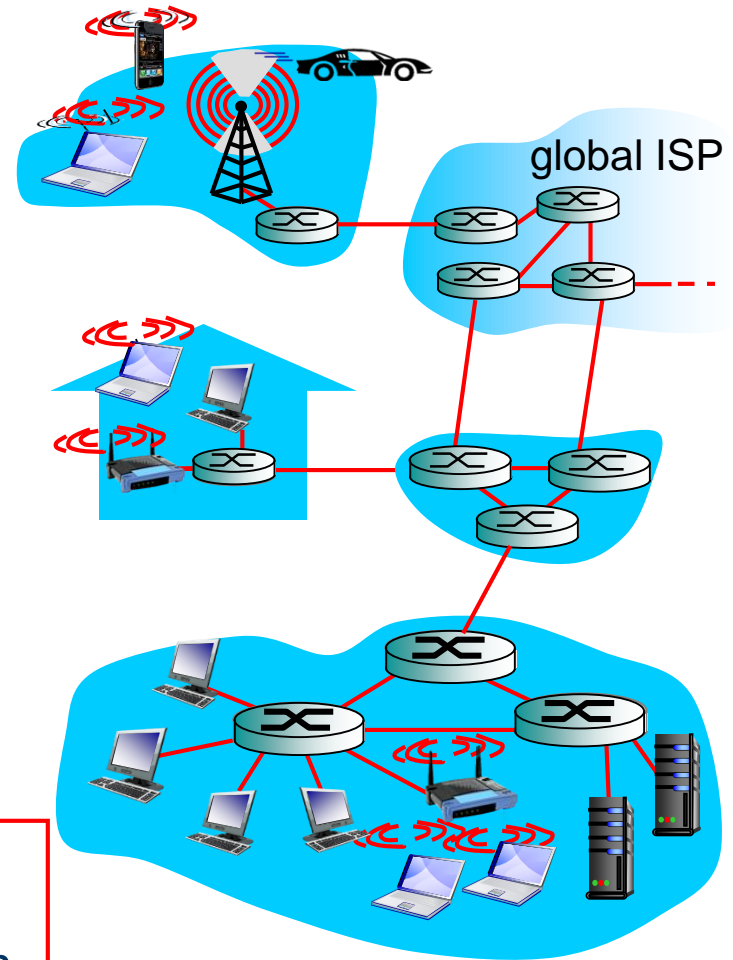
- Εισαγωγή - ορολογία
- Υπηρεσίες επιπέδου ζεύξης
- Ανίχνευση σφαλμάτων
 - Έλεγχος ισοτιμίας
 - Άθροισμα ελέγχου (checksum) Διαδικτύου
 - Κυκλικός Έλεγχος Πλεονασμού
- Πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης
 - Κατάτμησης καναλιού
 - Τυχαίας πρόσβασης
 - Εκ περιτροπής λειτουργία



Ορολογία σε αυτή τη ενότητα

- 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, αναλαμβάνει τη μεταφορά των *datagrams* από έναν κόμβο σε ένα φυσικά γειτονικό κόμβο πάνω από μια ζεύξη.



Επίπεδο ζεύξης: πλαίσιο

- Ένα datagram κατά τη διάρκεια της διαδρομής του από άκρο-σε-άκρο είναι δυνατόν να διέλθει από μια σειρά διακριτών ζεύξεων.
- 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.

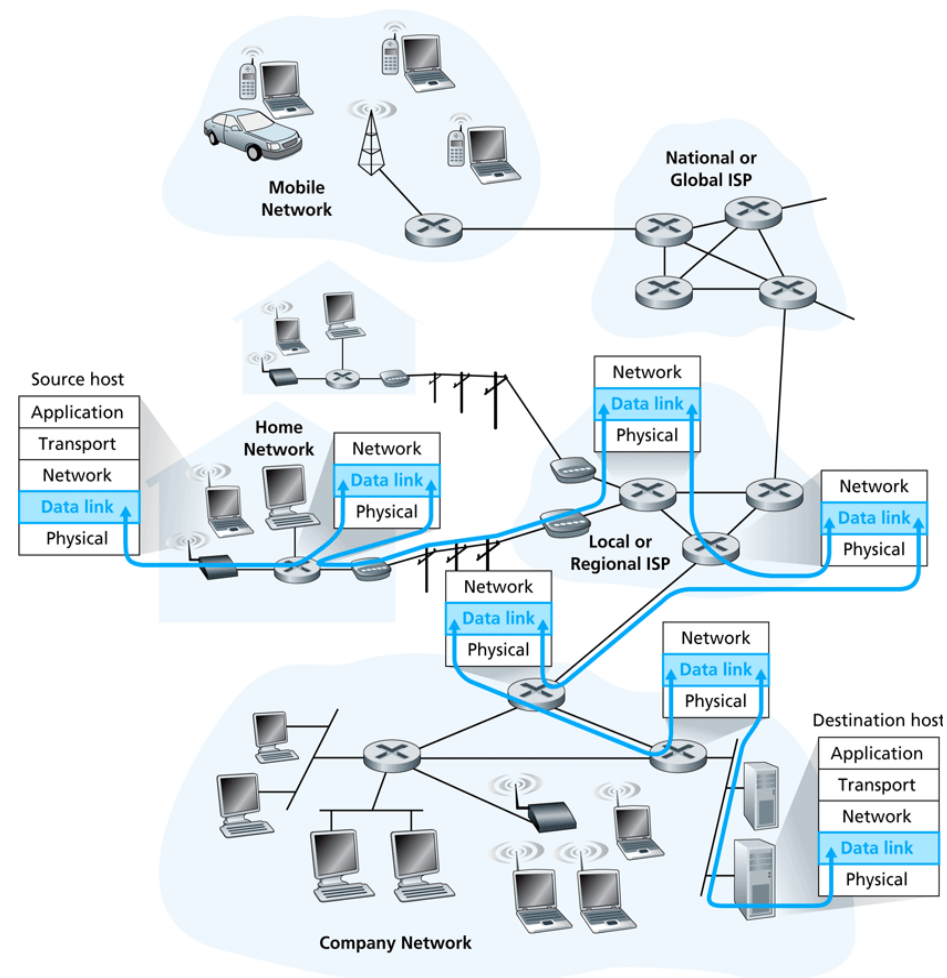


Figure 5.1 ♦ The link layer



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!



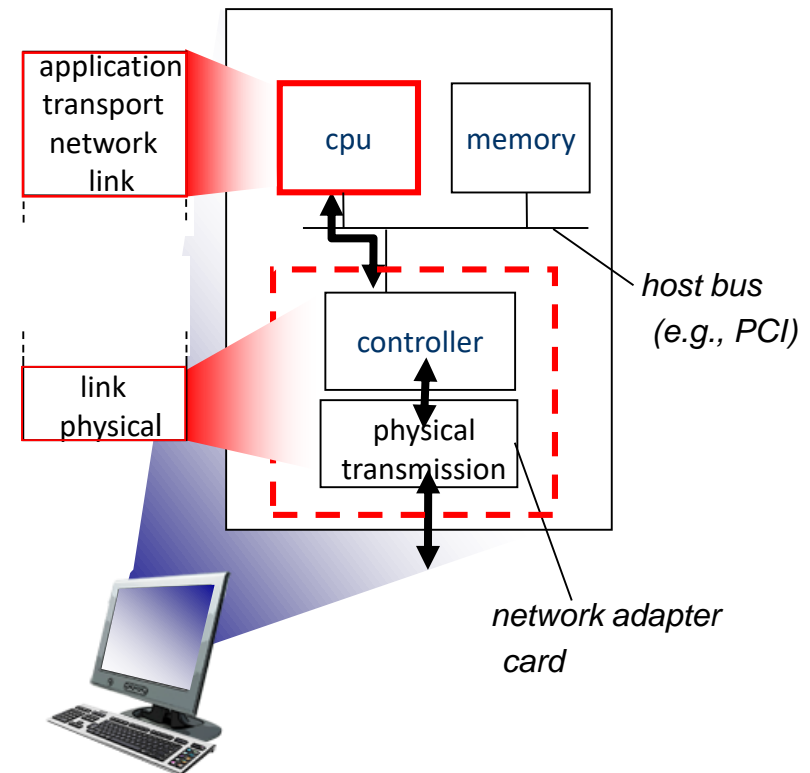
Αξιόπιστη παράδοση, διαχείριση σφαλμάτων

- 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) επικοινωνία.
- Έλεγχος ροής (ρύθμιση ρυθμού αποστολής και λήψης μεταξύ γειτονικών κόμβων).

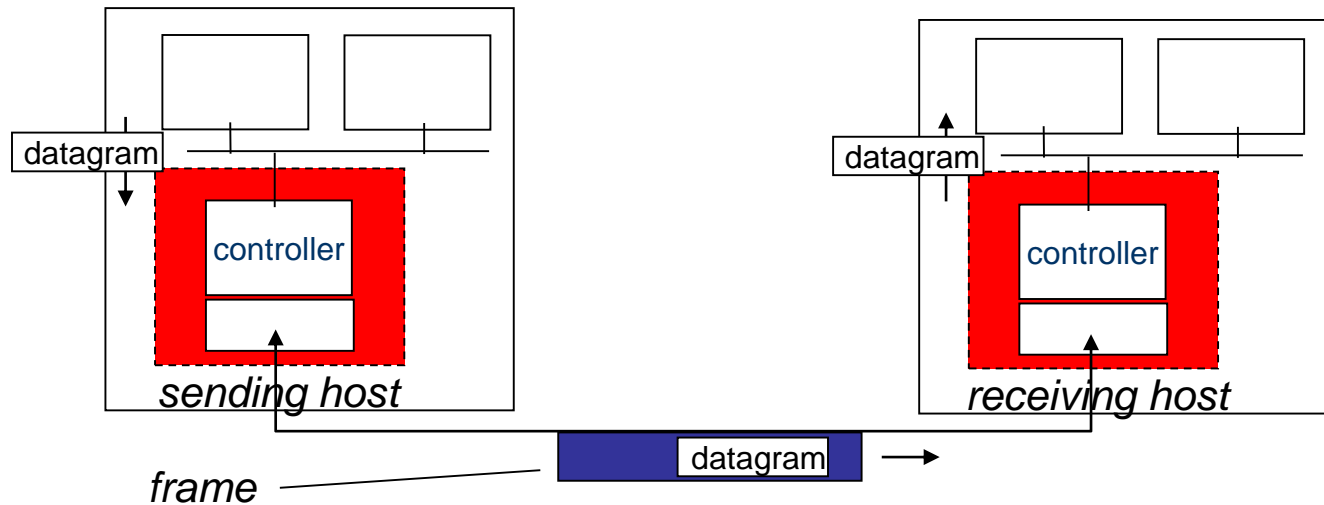


Που υλοποιείται το επίπεδο ζεύξης;

- 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.



Σφάλματα

- Σφάλμα: η αλλαγή της τιμής ενός bit (το 1 γίνεται 0 και αντίστροφα).
- Που οφείλονται τα σφάλματα:
 - *εξωτερικό θόρυβο,*
 - *κακό συγχρονισμό,*
 - *παρεμβολές,*
 - *μη σωστή τροφοδοσία κλπ.*
- **BER**: ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων (Bit Error Rate)
 - *Έχει άμεση σχέση με τη ποιότητα της σύνδεσης.*
- Αντιμετώπιση σφαλμάτων:
 - *αναγνώριση και αίτημα για επανεκπομπή,*
 - *αναγνώριση και μη αντιμετώπιση (αγνοούνται),*
 - *αναγνώριση και διόρθωση.*



Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων επιπέδου bit

- *EDC= Error Detection and Correction bits* (bits ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων – πλεονασμός)
- Έστω 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 .



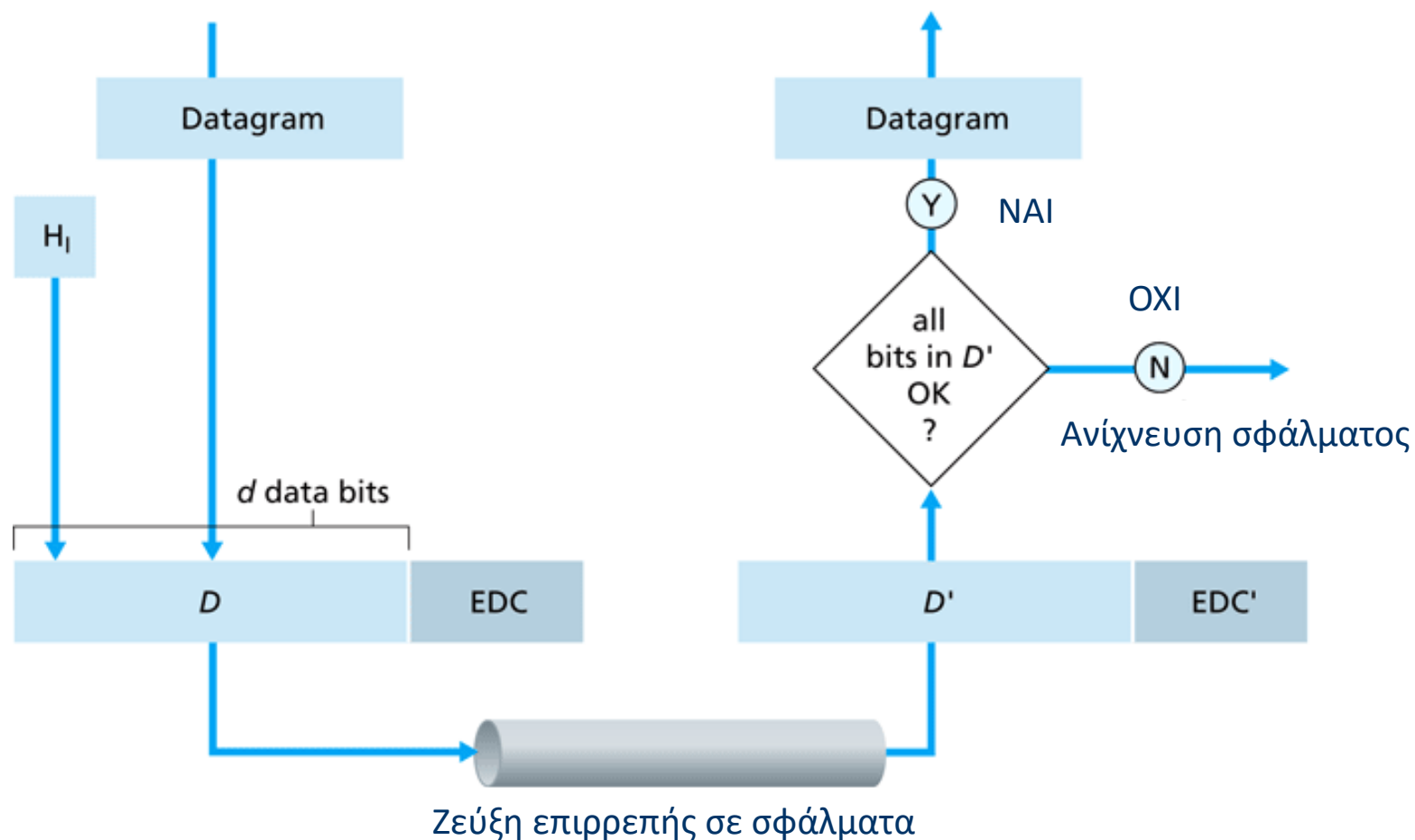
Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων επιπέδου bit

- 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.*
 - *Συνήθως μεγαλύτερο πεδίο EDC οδηγεί σε καλύτερη ανίχνευση και διόρθωση.*



Σενάριο ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων

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

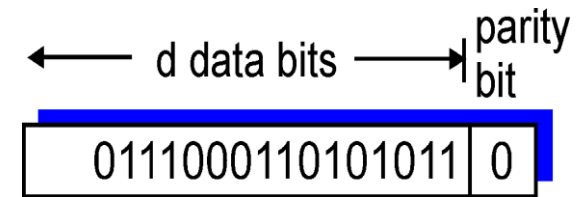


Έλεγχος ισοτιμίας μονού bit

- 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



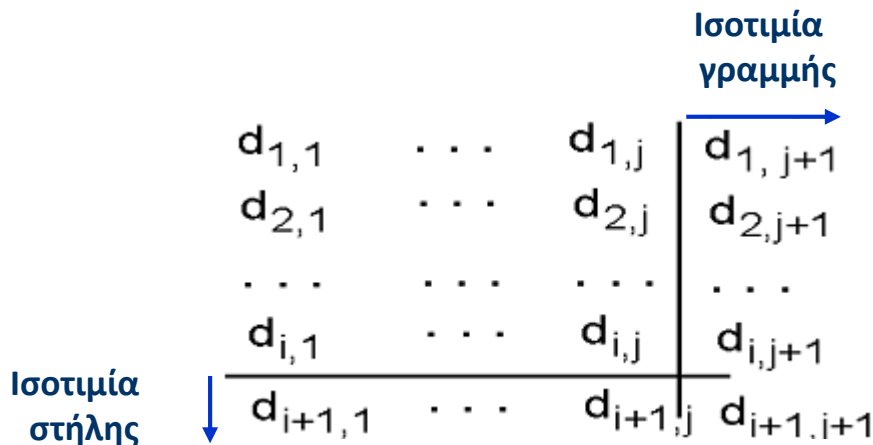
Περιττή ισοτιμία:

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

Άρτια
ισοτιμία

```

1 0 1 0 1 | 1
1 1 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).



Παράδειγμα αθροίσματος ελέγχου

■ Στον αποστολέα

Πρέπει να σταλούν:

0110011001100000

0101010101010101

1000111100001100

Τα προσθέτουμε:

1011010100111101

Συμπλήρωμα ως προς 1:

0100101011000010

Στέλνεται:

0110011001100000

0101010101010101

1000111100001100

0100101011000010

■ Στο παραλήπτη

Λαμβάνονται:

0110011001100000

0101010101010101

1000111100001100

0100101011000010

Τα προσθέτουμε:

1111111111111111

Αν υπάρχει έστω
και ένα 0 τότε
έχουμε σφάλμα!



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 ενός μοτίβου 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

← d bits → ← r bits →

D : data bits to be sent | R : CRC bits

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:

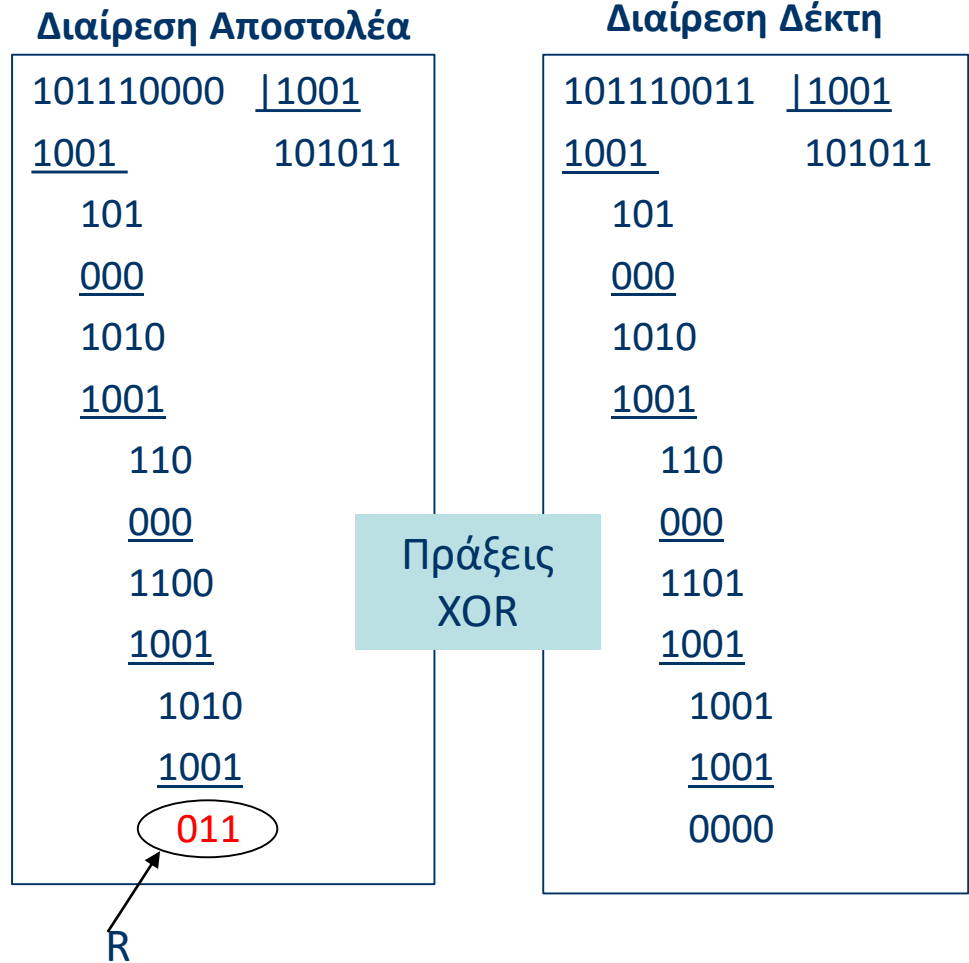
αν διαιρέσουμε το $D \cdot 2^r$ με G , θέλουμε το υπόλοιπο R να ικανοποιεί τη σχέση:

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



Παράδειγμα CRC

- Έστω τα d-bits: 101110 (D: 6 bits)
και ότι $G=1001$
Τότε $D \cdot 2^r = 101110000$
- 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.

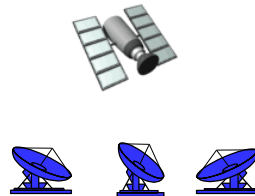
Τεχνολογίες: Ethernet, wireless LAN.



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 ένας 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 μόνο ένας κόμβος θέλει να μεταδώσει να μπορεί να στείλει τα 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 των πόρων του καναλιού σε μικρότερες “μονάδες” (χρονοθυρίδες, συχνότητα, κώδικες) και
 - εκχώρηση μονάδας σε κόμβο για αποκλειστική χρήση.
- **Τυχαίας πρόσβασης** (random access)
 - το κανάλι δεν διαιρείται, επιτρέπονται συγκρούσεις,
 - μηχανισμοί “ανάληψης” 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.

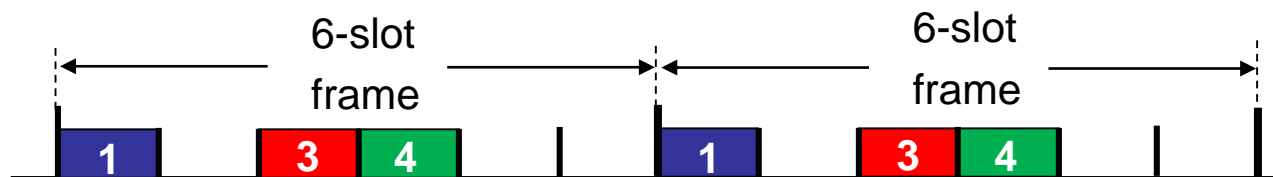
**Πρωτόκολλα Ελέγχου Προσπέλασης Μέσου
(Medium Access Control – MAC).**



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.

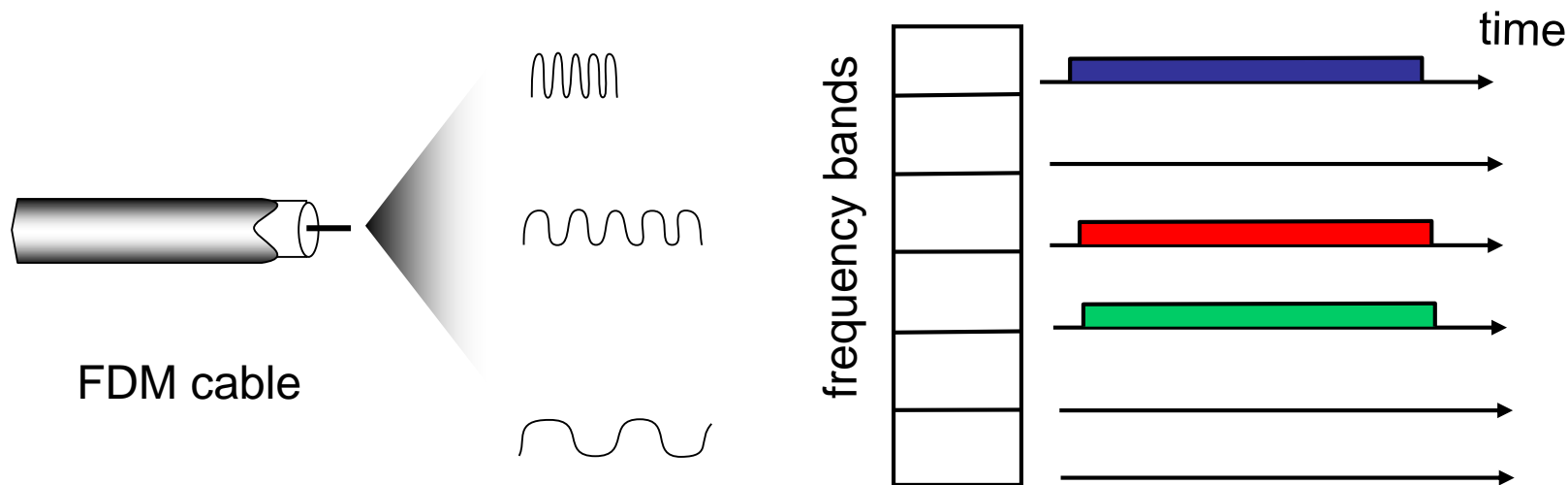
Παράδειγμα: 6 κόμβοι LAN, οι κόμβοι 1,3 και 4 έχουν πλαίσια, θυρίδες 2,5,6 ανενεργές



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 ΑΛΟΗΑ: πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα

■ Πλεονεκτήματα:

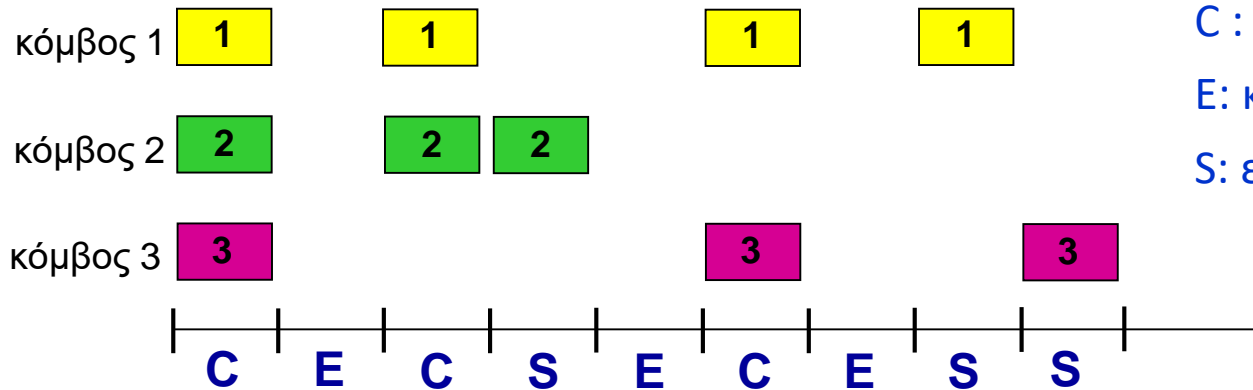
- *Αν μόνο ένας κόμβος είναι ενεργός (έχει πλαίσια για αποστολή) μπορεί να μεταδίδει διαρκώς στον πλήρη ρυθμό R του καναλιού.*
- *Σε μεγάλο βαθμό αποκεντρωμένο: σε περίπτωση σύγκρουσης κάθε κόμβος αποφασίζει ανεξάρτητα σε ποια μελλοντική θυρίδα θα εκπέμψει ξανά το πλαίσιο.*
- *Ιδιαίτερα απλό.*

■ 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 για 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 $Np(1-p)^{N-1}$? ($N \rightarrow \infty$)?

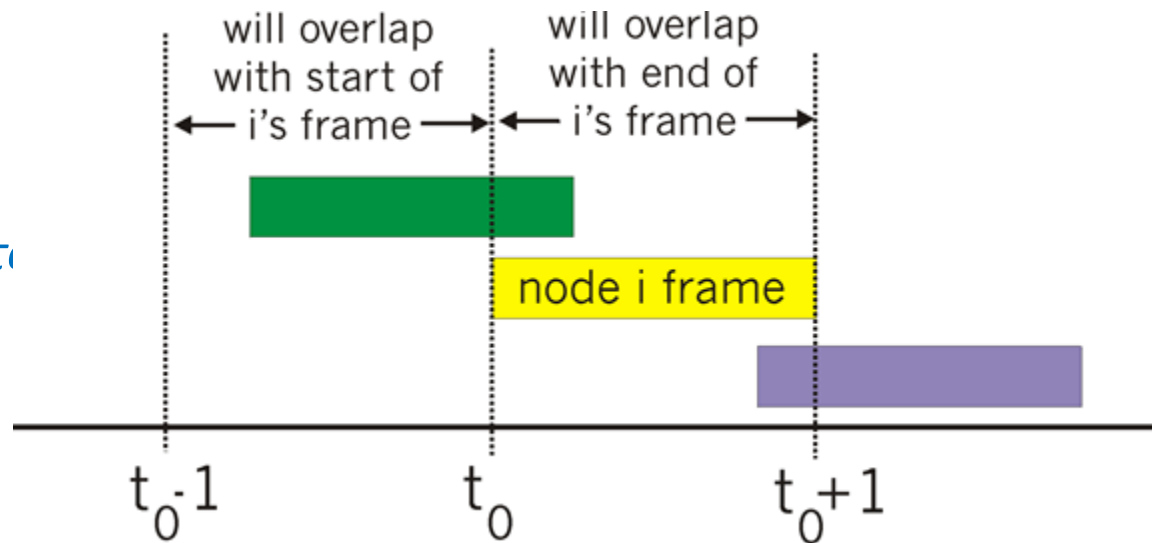


Απλό (χωρίς θυρίδες) ALOHA

- 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 σε σχέση με το θυριδωτό ALOHA:

- το πλαίσιο που στέλνεται στο t_0 συγκρούεται με άλλα πλαίσια που ενδεχομένως στέλνονται στο $[t_0-1, t_0+1]$



Πολλαπλή προσπέλαση 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»

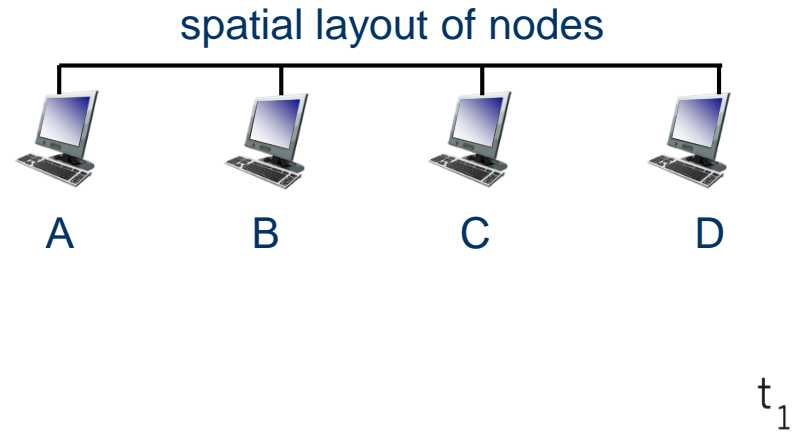


Συγκρούσεις στο CSMA

- 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.

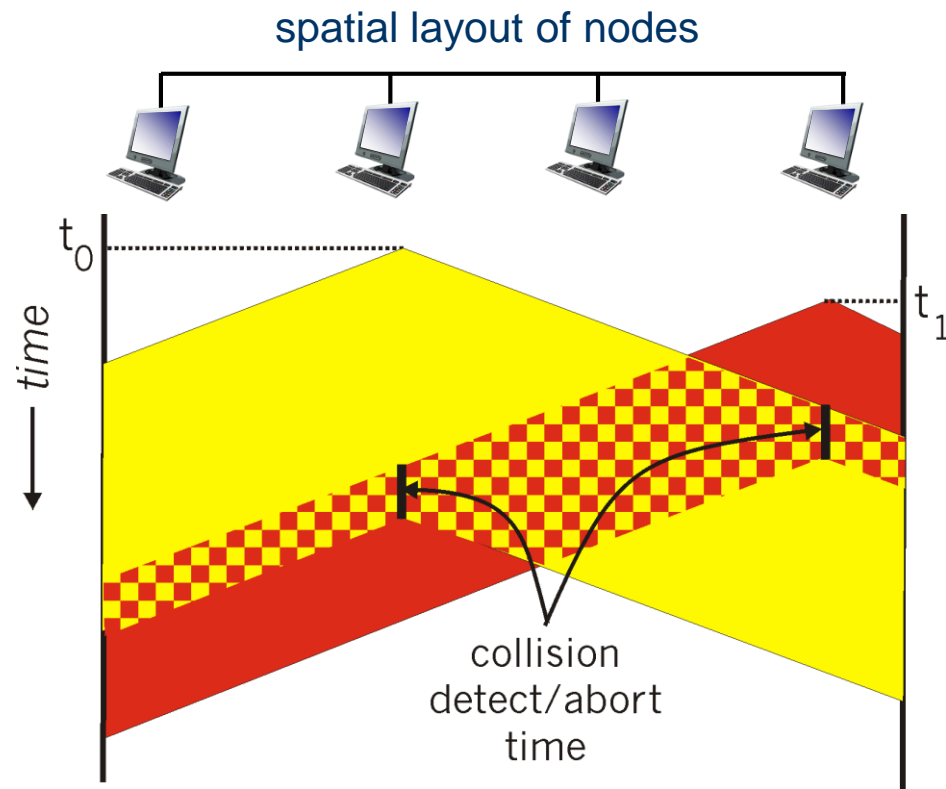


CSMA με ανίχνευση σύγκρουσης (Collision Detection)

- *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: $K * 512 \text{ bit}$, 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^η 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^η):
 - Το K επιλέγεται με ίση πιθανότητα από το σύνολο $\{0,1,2,3\}$
- Αν ξανά σύγκρουση (3^η):
 - 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!*



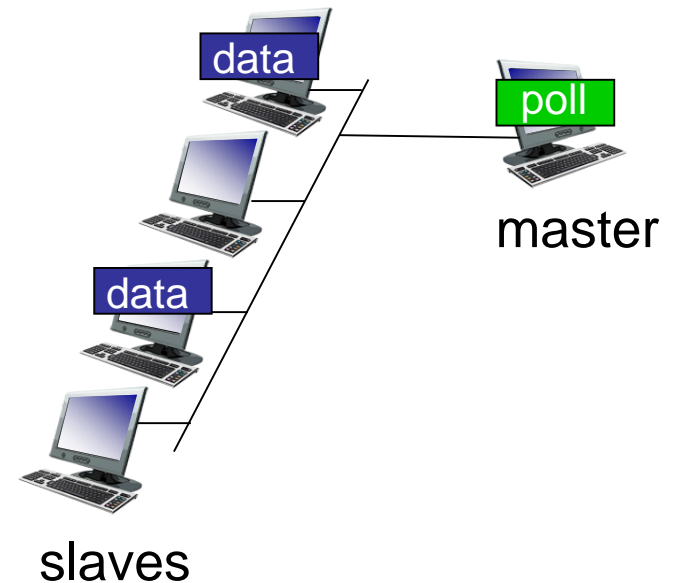
Πρωτόκολλο σταθμοσκόπησης (polling)

- 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).

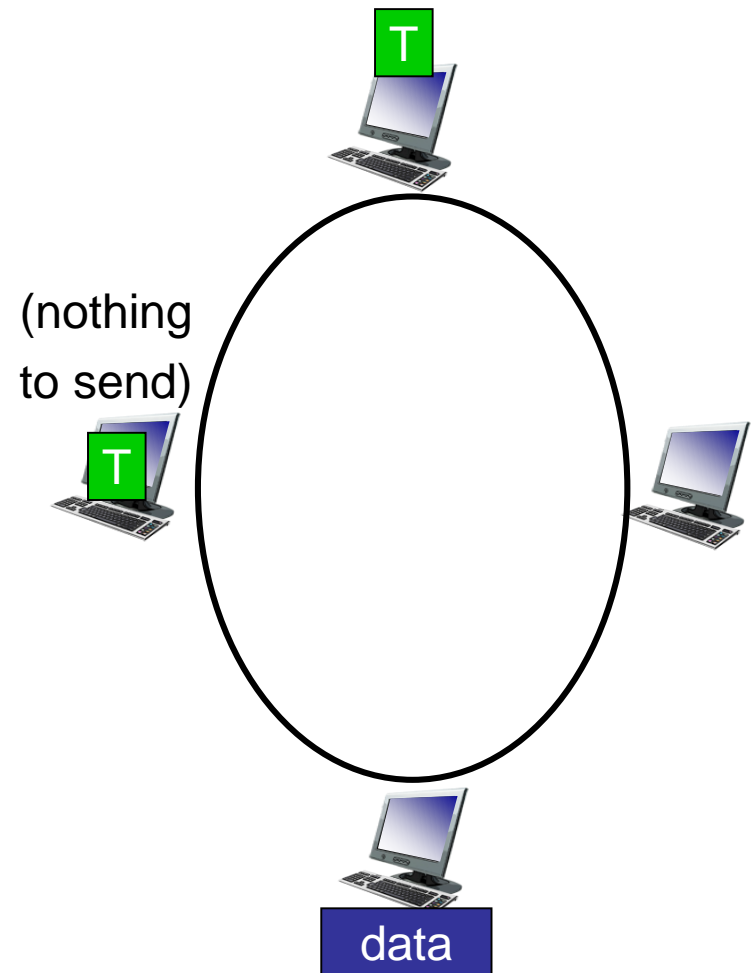
Αν ο master κόμβος παρουσιάσει βλάβη, τότε όλο το κανάλι δεν λειτουργεί (μοναδικό σημείο αποτυχίας).

- 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



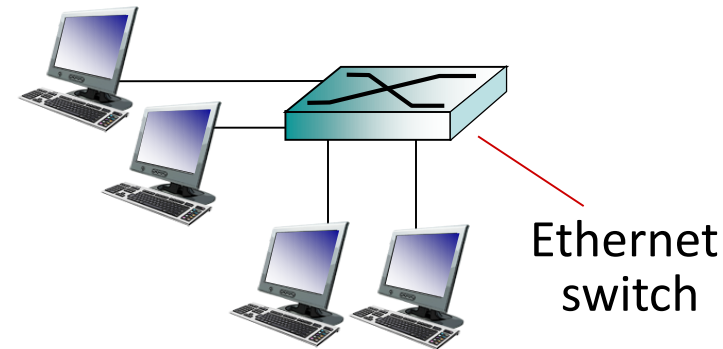
Σύνοψη πρωτοκόλλων MAC

- Κατάτμηση καναλιού, μέσω χρόνου, συχνότητας, ή κώδικα:
 - *Διαίρεση χρόνου, διαίρεση συχνότητας.*
- Τυχαίας πρόσβασης (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^ο επίπεδο και δεν αναγνωρίζουν τις IP διευθύνσεις του 3^{ου} 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

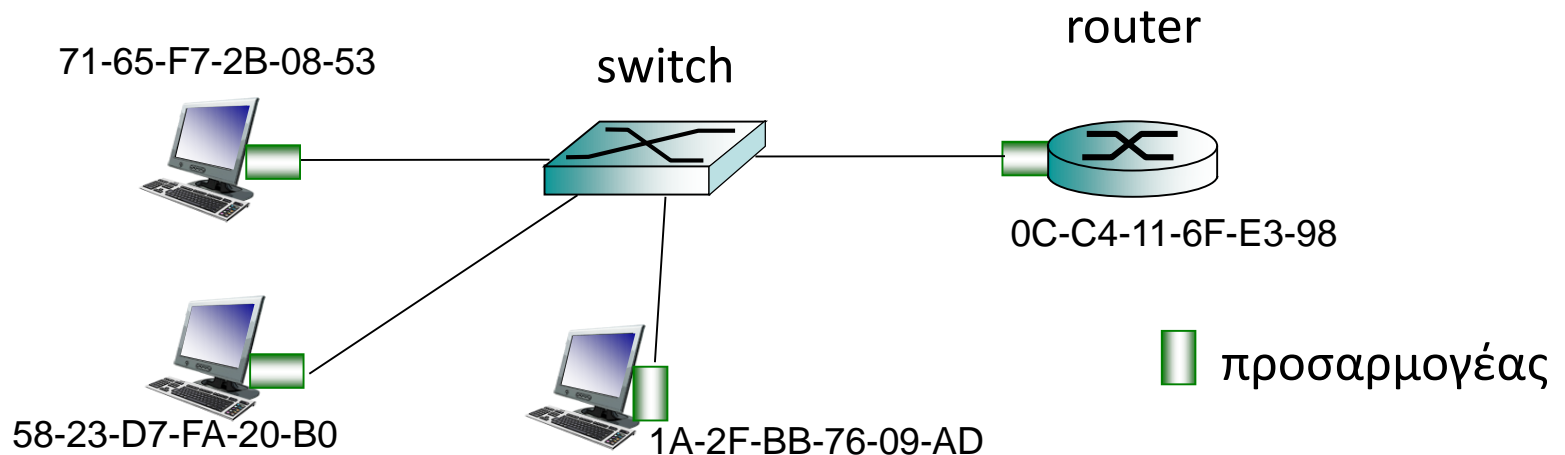
κάθε αριθμός έχει μήκος 4 bits

- Η ΙΕΕΕ 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 μια διεπαφή σε μια άλλη φυσικά συνδεδεμένη διεπαφή (ίδιο δίκτυο, υπό την έννοια της IP διευθυνσιοδότησης) .
- Τα switches (μεταγωγείς 2^{ου} 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:
 - *(α) διεύθυνση MAC: όπως ο αριθμός κοινωνικής ασφάλισης*
 - *(β) 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*

