



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Δίκτυα Επικοινωνιών

ΔΤΜΣ Οικονομική και Διοίκηση των Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων

Ενότητα 4: Επίπεδο Ζεύξης: Ζεύξεις, Δίκτυα Πρόσβασης, Δίκτυα Τοπικής Περιοχής

Νίκος Πασσάς

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών
Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών



Δίκτυα Επικοινωνιών

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών



ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Θεματικές Ενότητες (ΘΕ) μαθήματος:

ΘΕ1: Εισαγωγή
(Κεφ. 1 του βιβλίου)

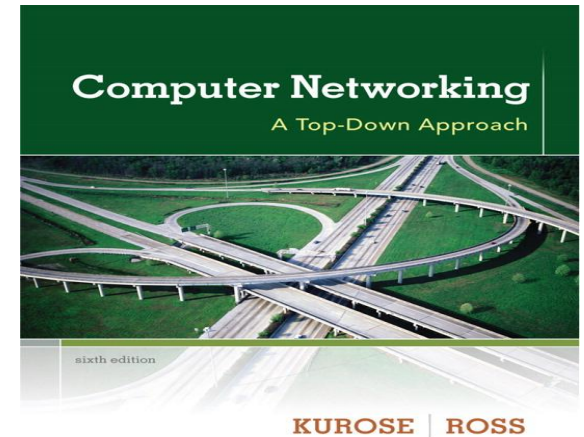
ΘΕ2: Συστήματα Αναμονής (M/M/1 και παραλλαγές, M/G/1, συστήματα με προτεραιότητες, δίκτυα ουρών)

ΘΕ3: Επίπεδο Δικτύου
(Κεφ. 4 του βιβλίου)

ΘΕ4: Επίπεδο Ζεύξης: Ζεύξεις, Δίκτυα Πρόσβασης, Δίκτυα Τοπικής Περιοχής
(Κεφ. 5 του βιβλίου)

Συνιστώμενο Βιβλίο:
Computer Networking: A Top-Down Approach, by Kurose & Ross, Addison-Wesley

Ελληνική Μετάφραση:
Εκδόσεις : Μ. Γκιούρδας



Οι περισσότερες από τις διαφάνειες αυτής της ενότητας αποτελούν προσαρμογή και απόδοση στα ελληνικά των διαφανειών που συνοδεύουν το βιβλίο *Computer Networking: A Top-Down Approach*, J.F. Kurose and K.W. Ross, 6/E, Addison-Wesley.

*All material copyright 1996-2012
J.F. Kurose and K.W. Ross, All Rights Reserved*

Προσαρμογή και επιμέλεια της απόδοσης των πρωτότυπων διαφανειών στα ελληνικά :
Λάζαρος Μεράκος

Επίπεδο Ζεύξης

Οι στόχοι μας:

- ❑ Κατανόηση των αρχών που διέπουν τις υπηρεσίες του επιπέδου ζεύξης:
 - Ανίχνευση, διόρθωση σφαλμάτων
 - Κοινή χρήση ενός καναλιού (ευρυ-)εκπομπής: πολλαπλή πρόσβαση
 - Διευθυνσιοδότηση επιπέδου ζεύξης
 - Δίκτυα τοπικής περιοχής: Ethernet, VLANs
- ❑ Γνωριμία με τις τεχνολογίες επιπέδου ζεύξης

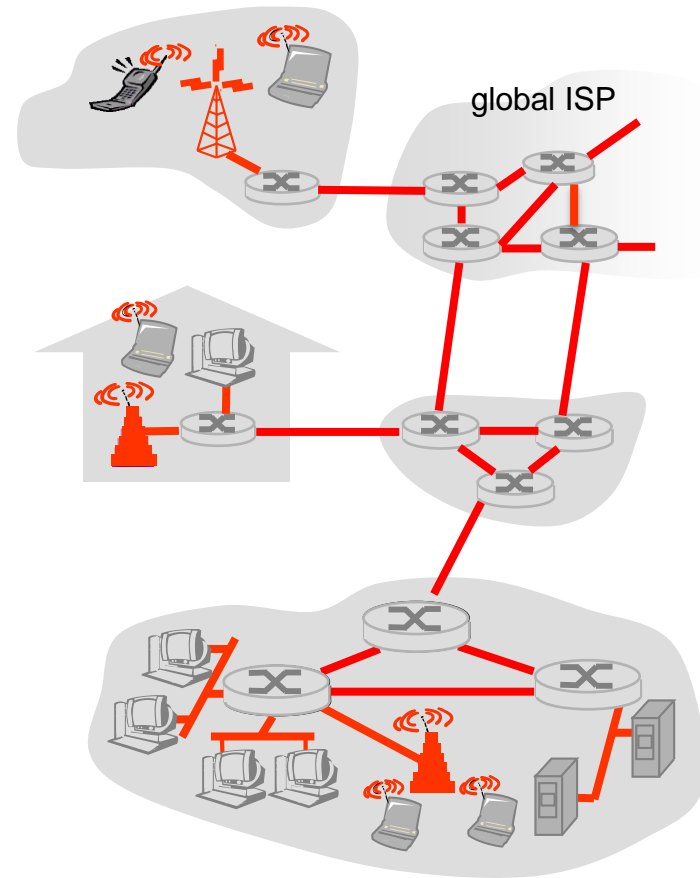
Επίπεδο ζεύξης

- ❑ 5.1 Εισαγωγή και υπηρεσίες
- ❑ 5.2 Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων
- ❑ 5.3 Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης
- ❑ 5.4 LANs
 - Διευθυνσιοδότηση, ARP
 - Ethernet
 - Μεταγωγείς (switches)
 - VLANs
- ❑ 5.5 Εικονικές Ζεύξεις: MPLS
- ❑ 5.6 Δικτύωση κέντρων δεδομένων
- ❑ 5.7 Η "ζωή" μιας αίτησης web

Επίπεδο ζεύξης: Εισαγωγή

Ορολογία:

- οι υπολογιστές και οι δρομολογητές είναι **κόμβοι (nodes)**
- τα κανάλια επικοινωνίας που ενώνουν γειτονικούς κόμβους κατά μήκος της διαδρομής επικοινωνίας είναι **ζεύξεις (links)**
 - ενσύρματες ζεύξεις
 - ασύρματες ζεύξεις
 - LANs
- το πακέτο επιπέδου 2 ονομάζεται **πλαίσιο (frame)**, ενθυλακώνει datagram



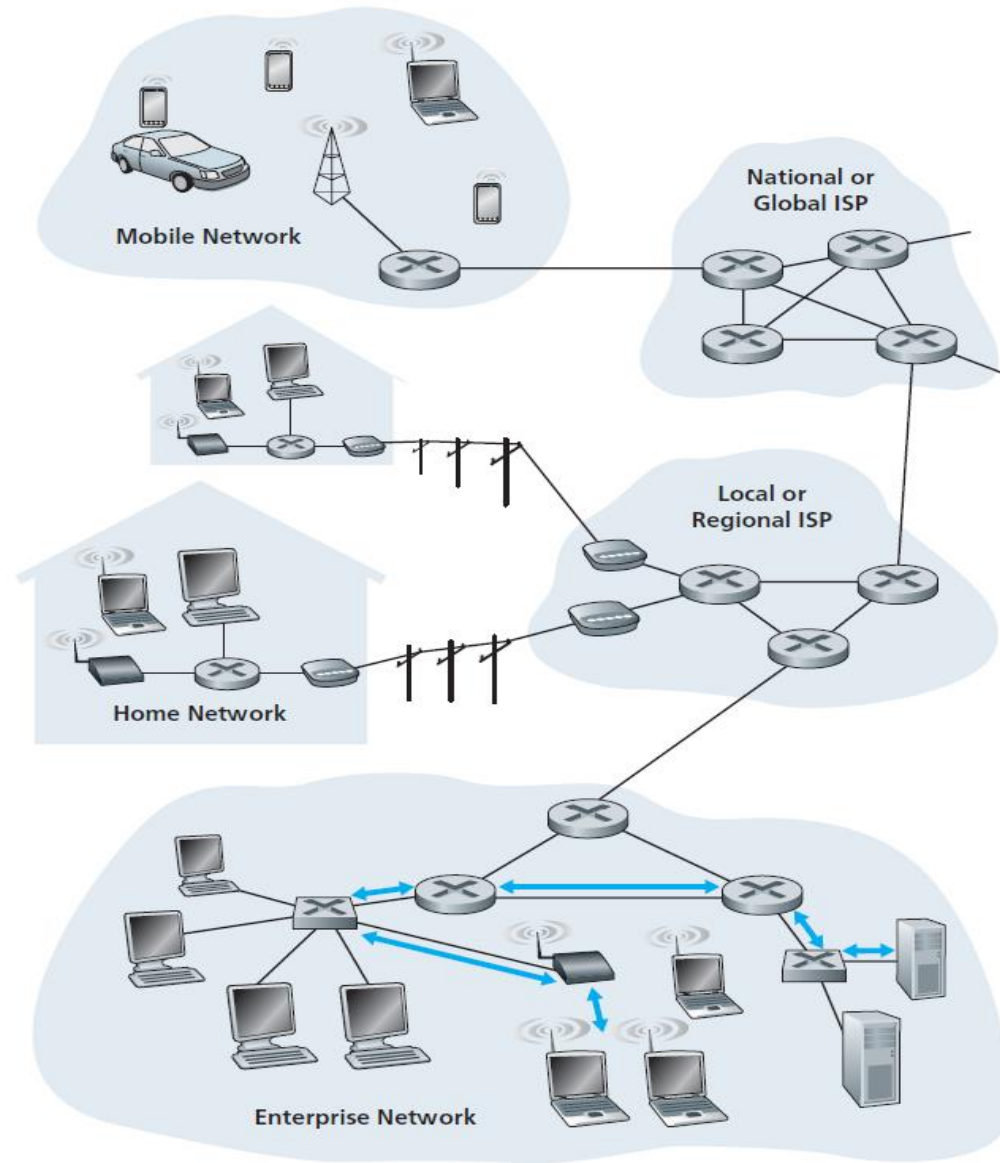
το επίπεδο ζεύξης δεδομένων έχει την ευθύνη μεταφοράς των datagrams από έναν κόμβο σε φυσικά γειτονικό κόμβο πάνω από μία ζεύξη

Επίπεδο ζεύξης: πλαίσιο

- Το datagram μεταφέρεται από διαφορετικά πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης σε διαφορετικές ζεύξεις:
 - 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 έλεγχο λαθών ή πολλαπλή πρόσβαση

Αναλογία με μεταφορές

- Ταξίδι από το Πρίνστον στη Λωζάνη
 - **Ταξί**: Πρίνστον ως JFK
 - **Αεροπλάνο**: JFK ως Γενεύη
 - **Τρένο**: Γενεύη ως Λωζάνη
- Τουρίστας = **datagram**
- Τμήμα μεταφοράς = **ζεύξη επικοινωνίας**
- Τρόπος μεταφοράς = **πρωτόκολλο επιπέδου ζεύξης**
- Ταξιδιωτικός πράκτορας = **αλγόριθμος δρομολόγησης**



Υπηρεσίες επιπέδου ζεύξης

□ Πλαισίωση, πρόσβαση στη ζεύξη:

- ενθυλακώνει το datagram σε πλαίσιο, προσθέτοντας κεφαλίδα, ουρά
- πρόσβαση στο κανάλι στην περίπτωση κοινόχρηστου μέσου
- χρησιμοποιούνται "MAC" (medium access control) διευθύνσεις στις κεφαλίδες των πλαισίων για την αναγνώριση πηγής, προορισμού
 - διαφορετικές από τις διευθύνσεις IP !

□ Αξιόπιστη παράδοση μεταξύ γειτονικών κόμβων

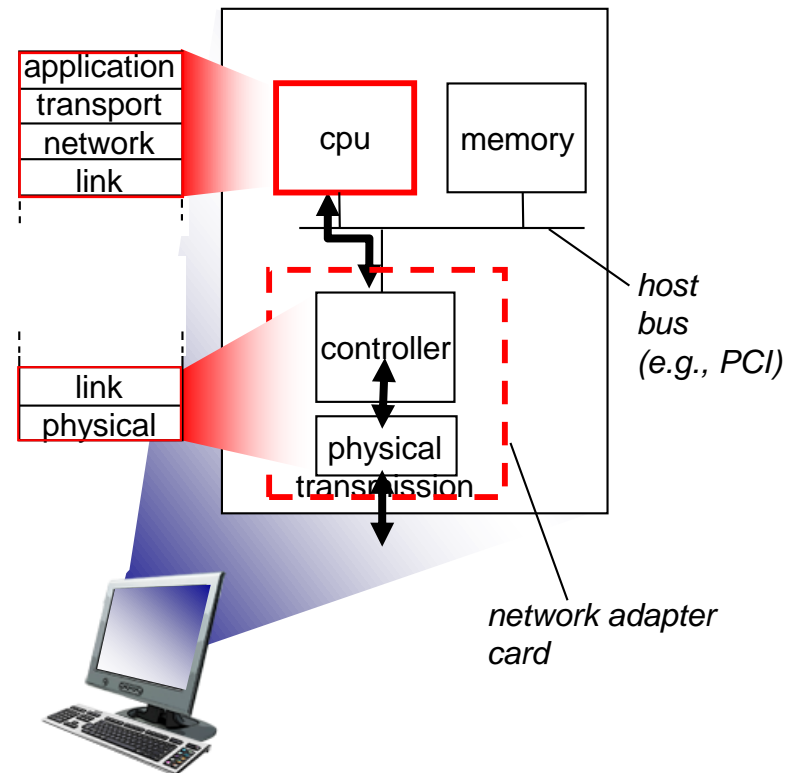
- Γίνεται και στο επίπεδο μεταφοράς -TCP- από άκρο σε άκρο
- σπάνια χρησιμοποιείται σε ζεύξεις με χαμηλό ρυθμό σφαλμάτων bit (ίνες, κάποια συνεστραμμένα ζεύγη)
- ασύρματες ζεύξεις: υψηλοί ρυθμοί σφαλμάτων
 - **E**: γιατί αξιοπιστία και σε επίπεδο ζεύξης και από άκρο σε άκρο;

Υπηρεσίες επιπέδου ζεύξης

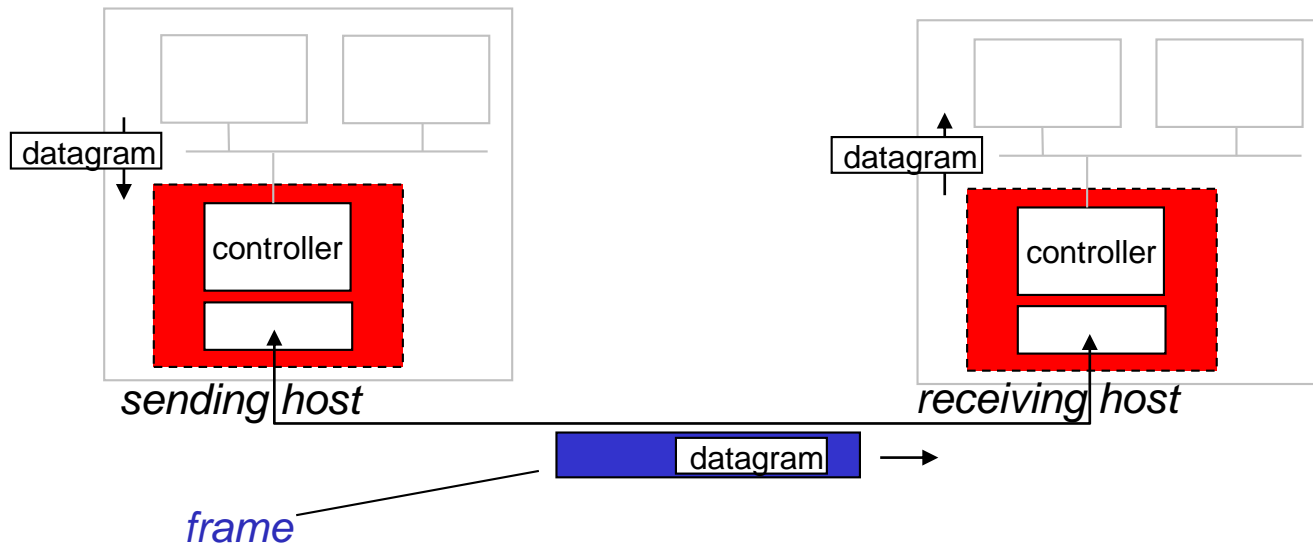
- ❑ Έλεγχος ροής:
 - ρύθμιση ρυθμού μεταξύ γειτονικών κόμβων αποστολής και λήψης
- ❑ Ανίχνευση σφαλμάτων :
 - σφάλματα που προκαλούνται από εξασθένιση του σήματος, θόρυβο
 - ο δεκτής ανιχνεύει την ύπαρξη σφαλμάτων:
 - ειδοποιεί τον αποστολέα για αναμετάδοση ή απορρίπτει το πλαίσιο
- ❑ Διόρθωση σφαλμάτων: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

Πού υλοποιείται το επίπεδο ζεύξης;

- σε κάθε υπολογιστή
- σε «προσαρμογέα» δικτύου (δηλ. **κάρτα δικτύου (network interface card - NIC)**) ή σε chip
 - κάρτα Ethernet, κάρτα 802.11, Ethernet chipset
 - υλοποιεί τη ζεύξη, φυσικό επίπεδο
- συνδέεται στο δίαυλο συστήματος του υπολογιστή
- συνδυασμός hardware, software, firmware



Προσαρμογείς που επικοινωνούν



□ πλευρά αποστολής:

- ενθυλακώνει το datagram σε πλαίσιο (*frame*)
- προσθέτει bits ελέγχου σφάλματος, αξιόπιστης μεταφοράς δεδομένων (rdt), ελέγχου ροής, κ.τ.λ.

□ πλευρά λήψης

- ελέγχει για σφάλματα, rdt, έλεγχος ροής, κ.τ.λ.
- εξαγάγει το datagram, το παραδίδει στο ανώτερο επίπεδο στην πλευρά λήψης

Επίπεδο ζεύξης

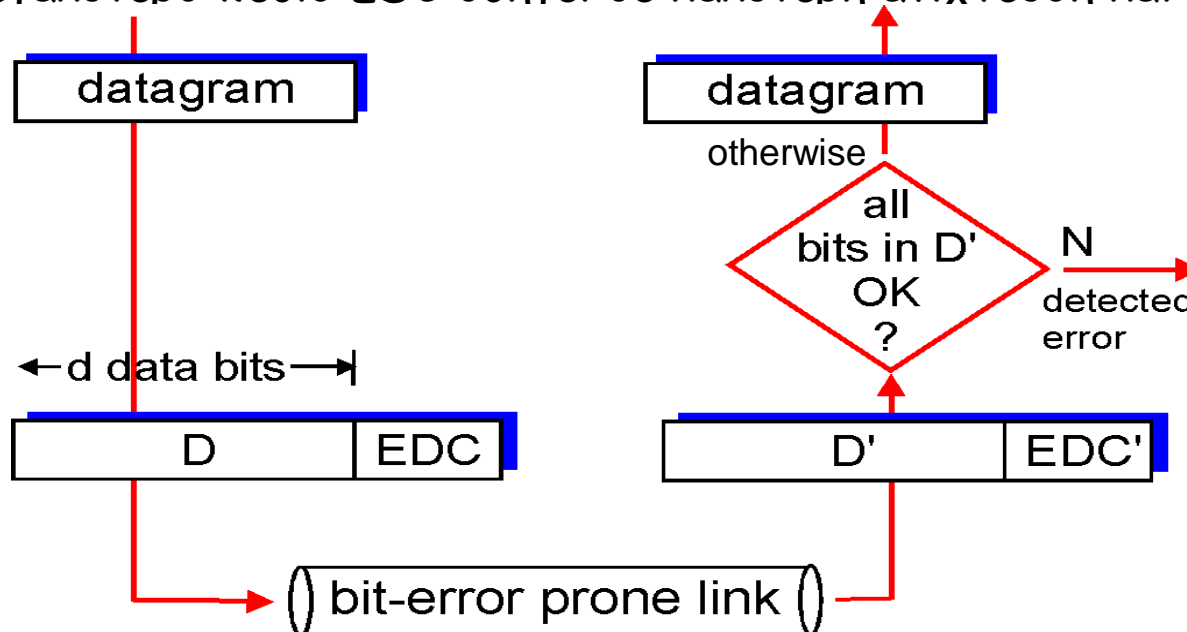
- 5.1 Εισαγωγή και υπηρεσίες
- 5.2 Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων
- 5.3 Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης
- 5.4 LANs
 - Διευθυνσιοδότηση, ARP
 - Ethernet
 - Μεταγωγείς (switches)
 - VLANs
- 5.5 Εικονικές Ζεύξεις: MPLS
- 5.6 Δικτύωση κέντρων δεδομένων
- 5.7 Η "ζωή" μιας αίτησης web

Ανίχνευση σφαλμάτων

EDC= Error Detection and Correction bits [bits ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων] (πλεονασμός)

D = τα δεδομένα που προστατεύονται από τον έλεγχο σφαλμάτων ενδέχεται να περιλαμβάνουν πεδία της κεφαλίδας

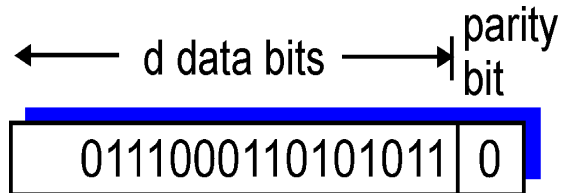
- Η ανίχνευση σφαλμάτων δεν είναι 100% αξιόπιστη!
 - το πρωτόκολλο μπορεί να «χάσει» μερικά σφάλματα, αλλά σπάνια
 - μεγαλύτερο πεδίο EDC οδηγεί σε καλύτερη ανίχνευση και διόρθωση



Έλεγχος Ισοτιμίας

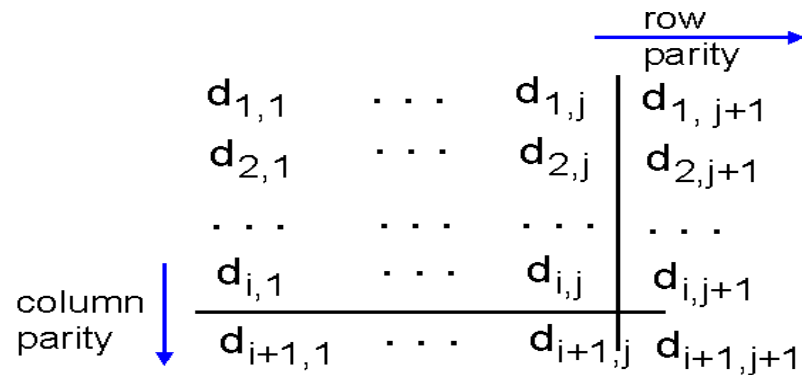
Ισοτιμία μονού Bit:

Ανιχνεύει μονά σφάλματα bit



Δισδιάστατη Ισοτιμία Bit:

Ανιχνεύει και διορθώνει μονά σφάλματα 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

no errors

1	0	1	0	1	1
1	0	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

parity error

parity error

*correctable
single bit error*

Άθροισμα ελέγχου (checksum) Διαδικτύου (επισκόπηση)

Στόχος: ανίχνευση «σφαλμάτων» (π.χ., αλλοιωμένα bits) στο μεταδιδόμενο πακέτο (σημείωση: χρησιμοποιείται μόνο στο επίπεδο μεταφοράς)

Αποστολέας:

- ❑ Αντιμετώπισε το περιεχόμενο του segment σαν ακολουθία ακεραίων 16-bit
- ❑ checksum: πρόσθεση (άθροισμα συμπληρώματος ως προς 1) του περιεχομένου του segment
- ❑ Ο αποστολέας βάζει την τιμή του checksum στο πεδίο checksum του UDP

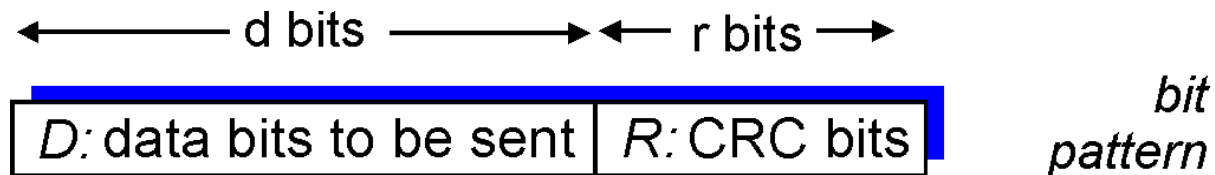
Δέκτης:

- ❑ Υπολόγισε το checksum του λαμβανόμενου segment
- ❑ Έλεγε αν το υπολογισμένο checksum ισούται με την τιμή του πεδίου checksum:
 - ΟΧΙ - ανιχνεύτηκε σφάλμα
 - ΝΑΙ - δεν ανιχνεύτηκε σφάλμα.

Αλλά παράλα αυτά μπορεί να υπάρχουν λάθη;

Κυκλικός Έλεγχος Πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check)

- περισσότερο ισχυρή κωδικοποίηση ανίχνευσης σφαλμάτων
- αντιμετωπίζει τα bits δεδομένων, D , σαν δυαδικό αριθμό
- επιλέγει μοτίβο $r+1$ bit (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)



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

mathematical formula

Παράδειγμα CRC

Θέλουμε:

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

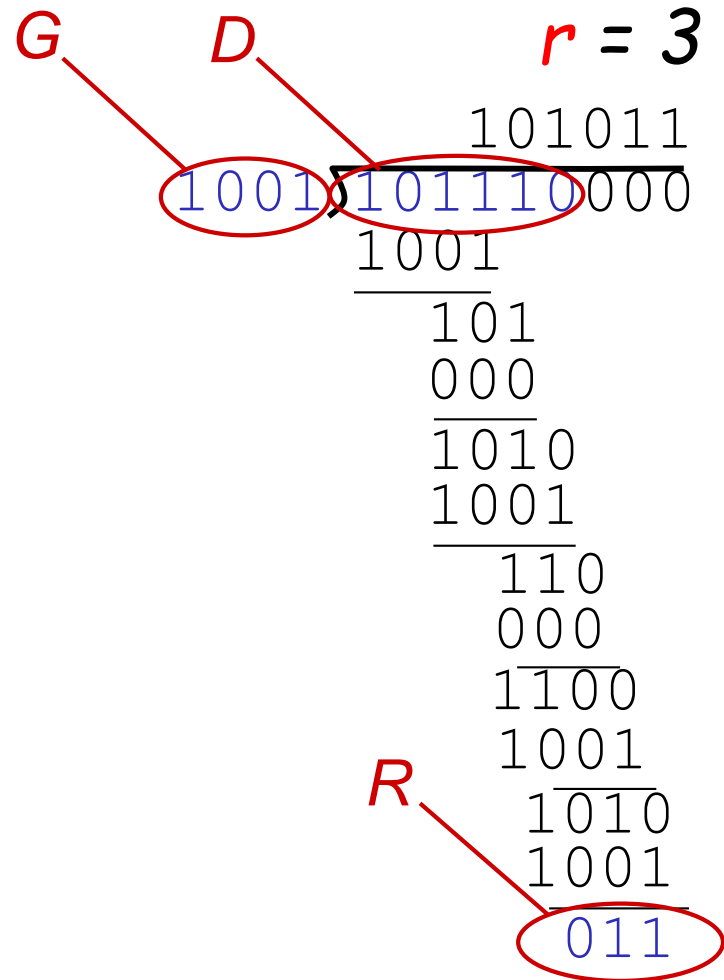
ισοδύναμα:

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

ισοδύναμα:

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

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



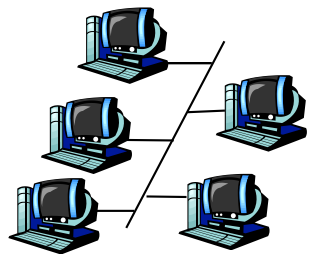
Επίπεδο ζεύξης

- 5.1 Εισαγωγή και υπηρεσίες
- 5.2 Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων
- 5.3 Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης
- 5.4 LANs
 - Διευθυνσιοδότηση, ARP
 - Ethernet
 - Μεταγωγείς (switches)
 - VLANs
- 5.5 Εικονικές Ζεύξεις: MPLS
- 5.6 Δικτύωση κέντρων δεδομένων
- 5.7 Η "ζωή" μιας web αίτησης

Πρωτόκολλα και ζεύξεις πολλαπλής πρόσβασης

Δύο είδη "ζεύξεων":

- **σημείο προς σημείο**
 - PPP για πρόσβαση dial-up
 - σημείο προς σημείο ζεύξη μεταξύ μεταγωγού Ethernet και υπολογιστή
- **ευρυ-εκπομπής (broadcast) (καλώδιο ή μέσο κοινής χρήσης)**
 - παραδοσιακό Ethernet
 - upstream HFC
 - 802.11 wireless LAN



shared wire (e.g.,
cabled Ethernet)



shared RF
(e.g., 802.11 WiFi)



shared RF
(satellite)



humans at a
cocktail party
(shared air, acoustical)

Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης

- ❑ μοναδικό broadcast κανάλι κοινής χρήσης
- ❑ δύο ή περισσότερες ταυτόχρονες μεταδόσεις από τους κόμβους: παρεμβολές
 - **Σύγκρουση (collision)** αν ο κόμβος λάβει δύο ή περισσότερα σήματα ταυτόχρονα

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!

Ιδανικό πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης

Δίνεται: Κανάλι ευρυ-εκπομπής (broadcast) ρυθμού R

Ζητούμενο:

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

Πρωτόκολλα ΜΑC: μια ταξινόμηση

Τρεις ευρείες κατηγορίες:

❑ διαμέριση καναλιού

- διαιρεί το κανάλι σε μικρότερα "κομμάτια" (χρονοθυρίδες, συχνότητα, κώδικες)
- εκχώρηση κομματιού σε κόμβο για αποκλειστική χρήση

❑ τυχαία πρόσβαση

- το κανάλι δε διαιρείται, επιτρέπονται συγκρούσεις
- "ανάληψη" από συγκρούσεις

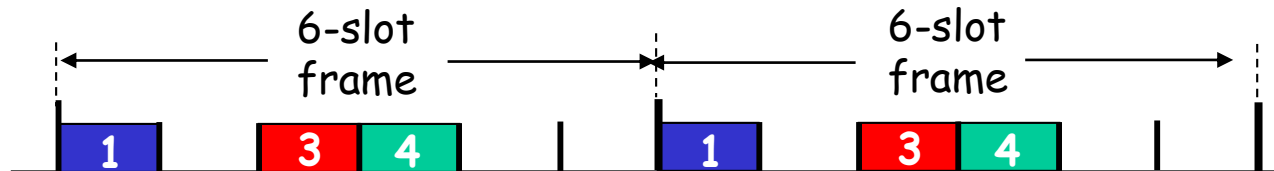
❑ εκ περιτροπής λειτουργία

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

Πρωτόκολλα MAC διαμέρισης καναλιού: TDMA

TDMA: πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (time division multiple access)

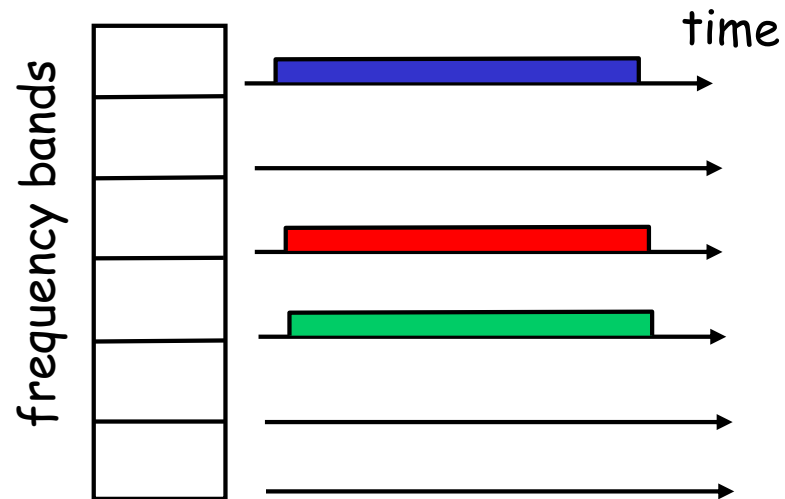
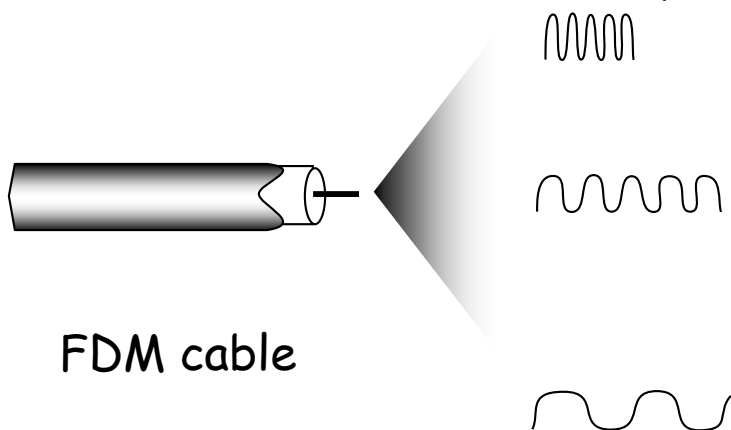
- ❑ πρόσβαση στο κανάλι σε "γύρους"
- ❑ κάθε σταθμός παίρνει θυρίδα σταθερού μήκους (μήκος = χρόνος μετάδοσης πακέτου) σε κάθε γύρο
- ❑ Θυρίδες που δεν χρησιμοποιούνται παραμένουν αδρανείς
- ❑ παράδειγμα: 6 σταθμοί LAN, 1,3,4 έχουν πακέτα, θυρίδες 2,5,6 ανενεργές



Πρωτόκολλα MAC κατάρτησης καναλιού: FDMA

FDMA: πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (frequency division multiple access)

- το φάσμα του καναλιού διαιρείται σε ζώνες συχνοτήτων
- σε κάθε σταθμό εκχωρείται μια σταθερή ζώνη συχνοτήτων
- ο χρόνος μετάδοσης που δεν χρησιμοποιείται στις ζώνες συχνοτήτων παραμένει αδρανής
- παράδειγμα: 6 σταθμοί LAN, 1,3,4 έχουν πακέτα, οι ζώνες συχνοτήτων 2,5,6 αδρανείς



Πρωτόκολλα τυχαίας πρόσβασης

- Όταν ο κόμβος έχει πακέτο προς αποστολή
 - μεταδίδει με τον πλήρη ρυθμό του καναλιού R.
 - χωρίς *a priori* συντονισμό μεταξύ των κόμβων
- Δύο ή περισσότεροι κόμβοι που μεταδίδουν → “σύγκρουση”
- Το πρωτόκολλο **MAC τυχαίας πρόσβασης** καθορίζει:
 - πώς να ανιχνεύονται οι συγκρούσεις
 - πώς να γίνεται η ανάνηψη από συγκρούσεις (π.χ., μέσω καθυστερημένων αναμεταδόσεων)
- Παραδείγματα πρωτοκόλλων **MAC τυχαίας πρόσβασης**:
 - Θυριδωτό ALOHA
 - ALOHA
 - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

Θυριδωτό ALOHA (Slotted ALOHA)

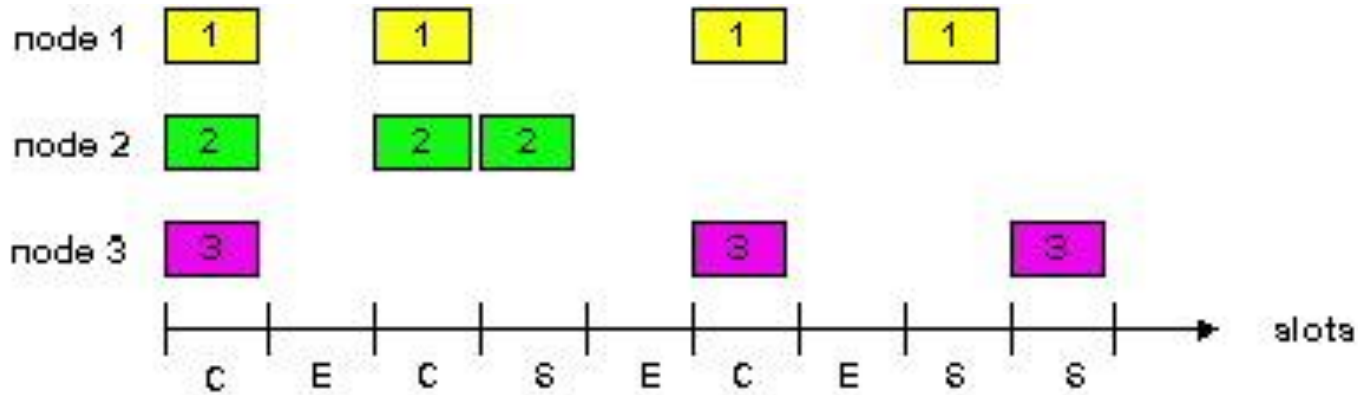
Υποθέσεις:

- 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

- αν μόνο ένας κόμβος είναι ενεργός μπορεί να μεταδίδει διαρκώς στον πλήρη ρυθμό του καναλιού
- σε μεγάλο βαθμό αποκεντρωμένο: μόνο οι θυρίδες στους κόμβους χρειάζεται να είναι συγχρονισμένες
- απλό

Μειονεκτήματα

- συγκρούσεις, χάνονται θυρίδες
- αδρανείς θυρίδες
- οι κόμβοι ενδέχεται να μπορούν να ανιχνεύσουν σύγκρουση σε λιγότερο από το χρόνο μετάδοσης ενός πακέτου
- συγχρονισμός ρολογιού

Αποδοτικότητα του Θυριδωτού Aloha

Αποδοτικότητα : ποσοστό επιτυχημένων θυρίδων σε βάθος χρόνου (πολλοί κόμβοι, όλοι με πολλά πλαίσια προς αποστολή)

- **Υπόθεση**: N κόμβοι με πολλά πλαίσια προς αποστολή, ο καθένας μεταδίδει σε μια θυρίδα με πιθανότητα p
- πιθανότητα ένας συγκεκριμένος κόμβος να επιτύχει σε μια θυρίδα = $p(1-p)^{N-1}$
- πιθανότητα κάποιος κόμβος να επιτύχει = $Np(1-p)^{N-1}$

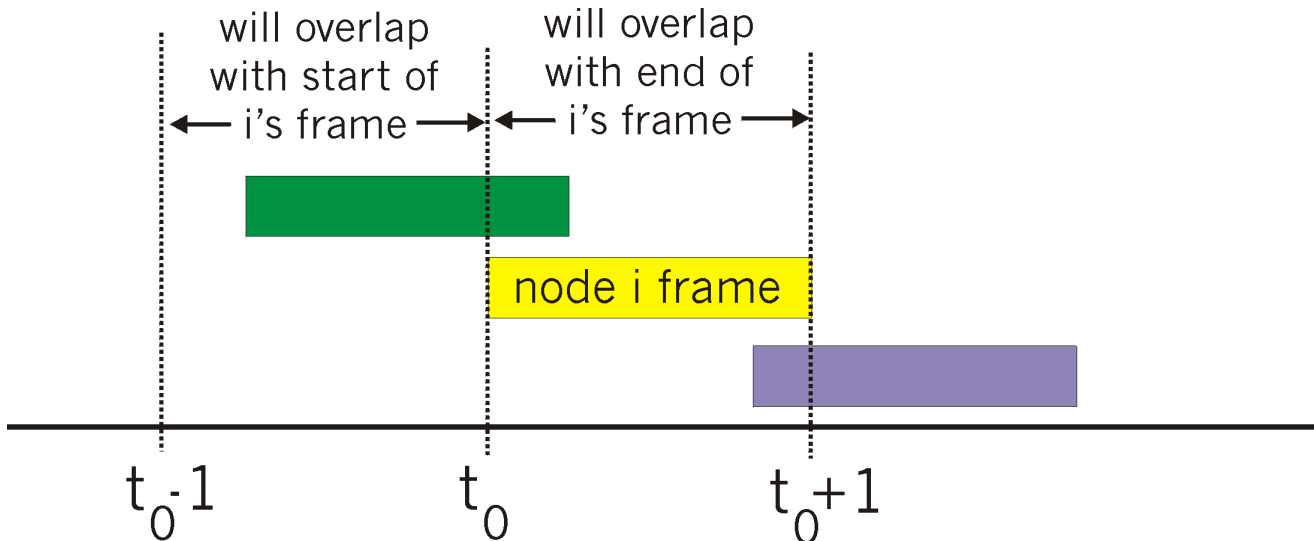
- **Μέγιστη αποδοτικότητα**: βρες το p^* που μεγιστοποιεί το $Np(1-p)^{N-1}$
- Για πολλούς κόμβους, το όριο του $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ καθώς το N πάει στο άπειρο, δίνει **μέγιστη αποδοτικότητα = $1/e = 0.37$**

Στην καλύτερη περίπτωση:
το κανάλι χρησιμοποιείται για ωφέλιμες μεταδόσεις το 37% του χρόνου!



Απλό (χωρίς θυρίδες) ALOHA

- ❑ ALOHA χωρίς θυρίδες: απλούστερο, χωρίς συγχρονισμό
- ❑ όταν το πλαίσιο φτάνει για πρώτη φορά
 - μετάδωσε αμέσως
- ❑ η πιθανότητα σύγκρουσης αυξάνει:
 - το πλαίσιο που στέλνεται στο t_0 συγκρούεται με άλλα πλαίσια που στέλνονται στο $[t_0-1, t_0+1]$



Αποδοτικότητα του απλού Aloha

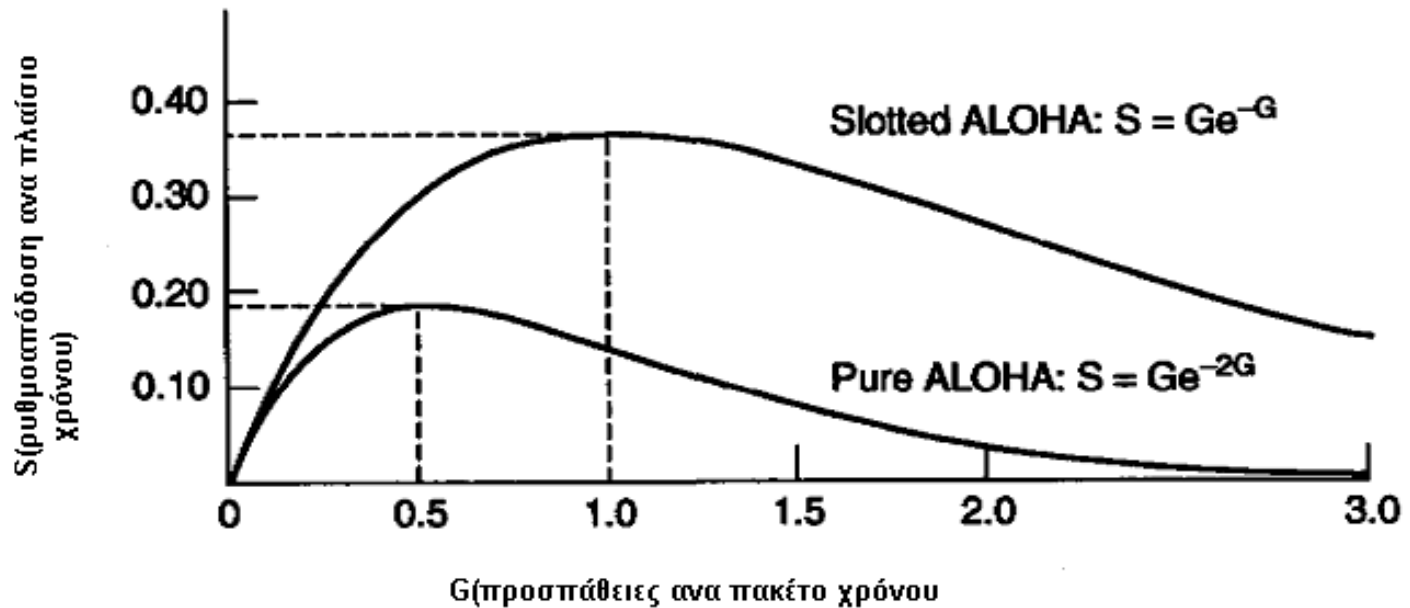
$$\begin{aligned} P(\text{επιτυχία από συγκεκριμένο κόμβο}) &= P(\text{ο κόμβος μεταδίδει}) * \\ & P(\text{κανένας άλλος κόμβος δεν μεταδίδει στο } [t_0-1, t_0]) * \\ & P(\text{κανένας άλλος κόμβος δεν μεταδίδει στο } [t_0, t_0+1]) \\ &= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1} \\ &= p \cdot (1-p)^{2(N-1)} \end{aligned}$$

... διαλέγοντας το βέλτιστο p και αφήνοντας $N \rightarrow \infty$...

$$= 1/(2e) = 0.18$$

Ακόμα χειρότερα από το θυριδωτό!

Ρυθμαπόδοση (Throughput)



Η ρυθμοαπόδοση για τα διάφορα ALOHA συστήματα

Πολλαπλή πρόσβαση με ανίχνευση φέροντος (CSMA - Carrier Sense Multiple Access)

CSMA: άκου πριν μεταδώσεις:

□ Αν το κανάλι ανιχνευτεί ανενεργό, μετάδωσε ολόκληρο το πλαίσιο

Αν το κανάλι ανιχνευτεί απασχολημένο, ανάβαλε τη μετάδοση

□ Ανθρώπινη αναλογία: μη διακόπτεις τους άλλους!

Συγκρούσεις στο CSMA

και πάλι μπορεί να εμφανιστούν συγκρούσεις:

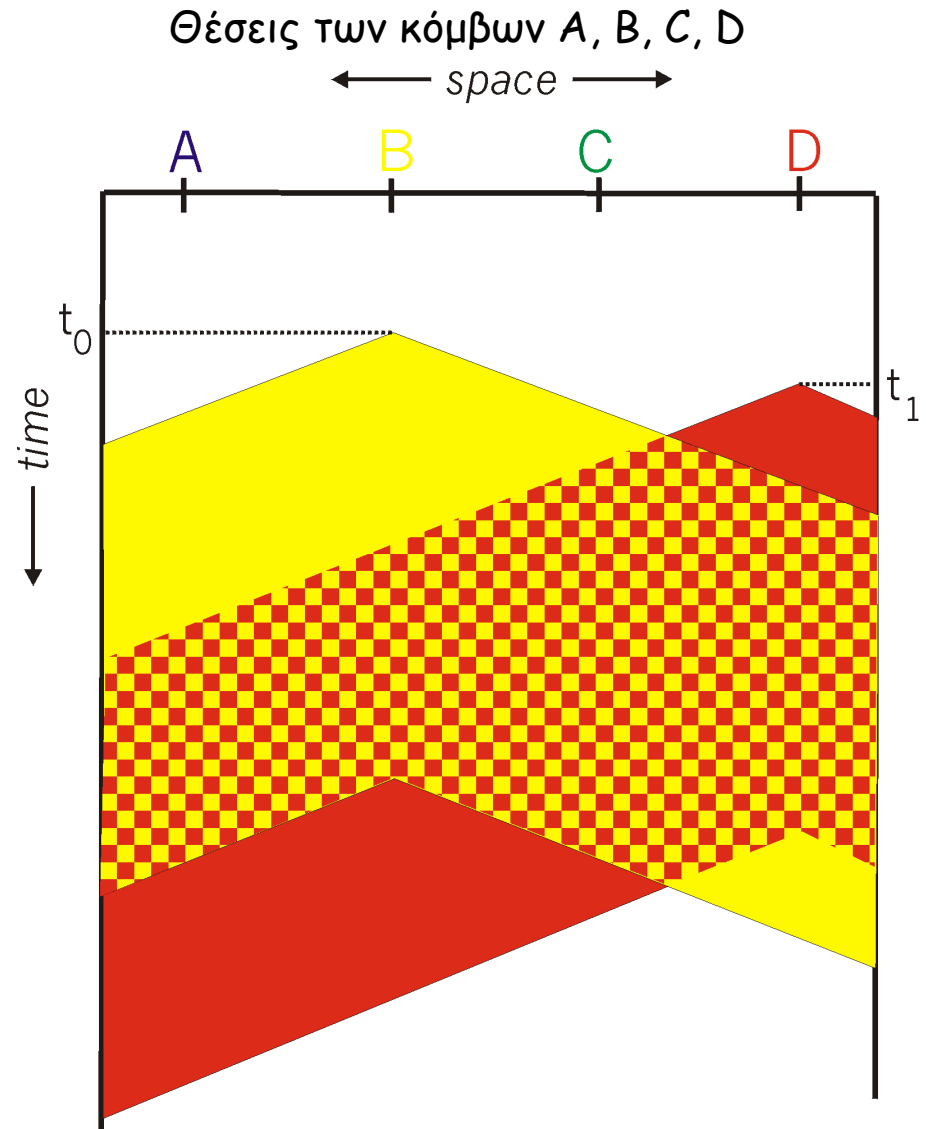
λόγω της καθυστέρησης διάδοσης, δύο κόμβοι μπορεί να μην άκουσαν ο ένας τη μετάδοση του άλλου

σύγκρουση:

χάνεται ολόκληρος ο χρόνος μετάδοσης του πακέτου

- είναι εμφανής ο ρόλος της απόστασης και της καθυστέρησης διάδοσης στον καθορισμό της πιθανότητας σύγκρουσης

Προβληματικό σε ασύρματα περιβάλλοντα

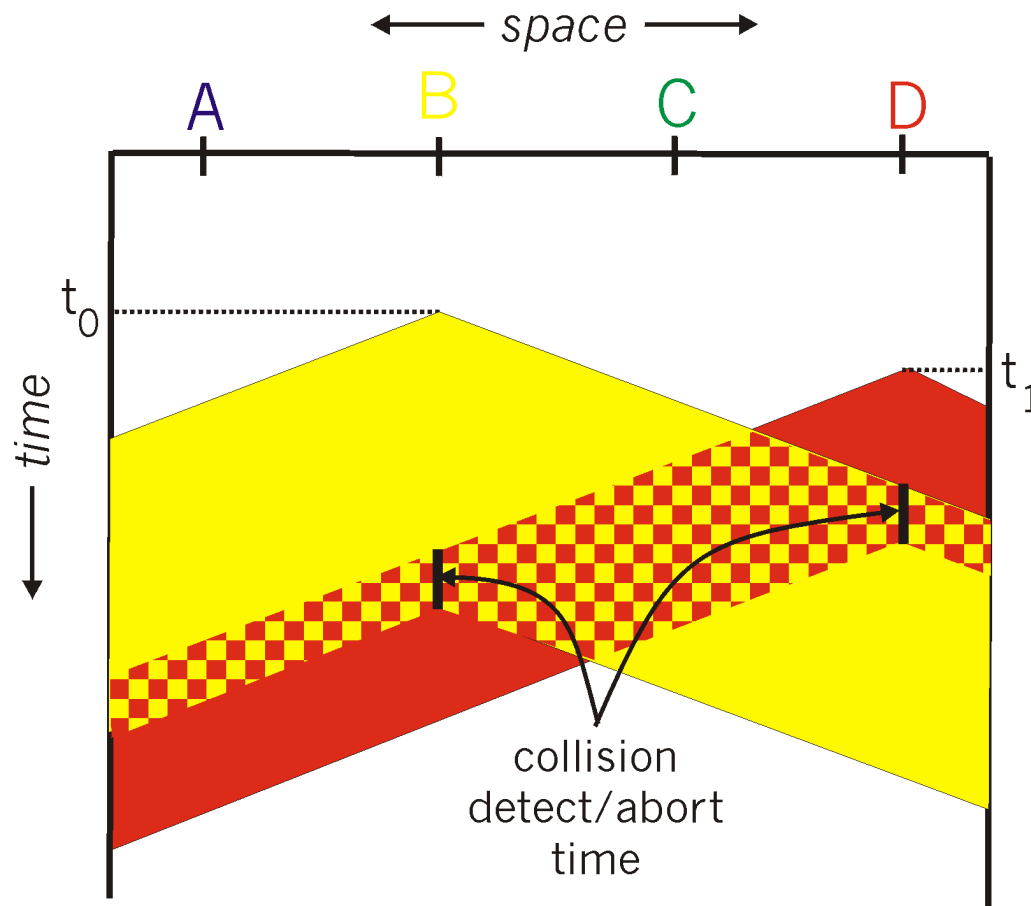


CSMA/CD (Ανίχνευση Σύγκρουσης)

CSMA/CD: ανίχνευση φέροντος, αναβολή μετάδοσης (όπως στο CSMA)

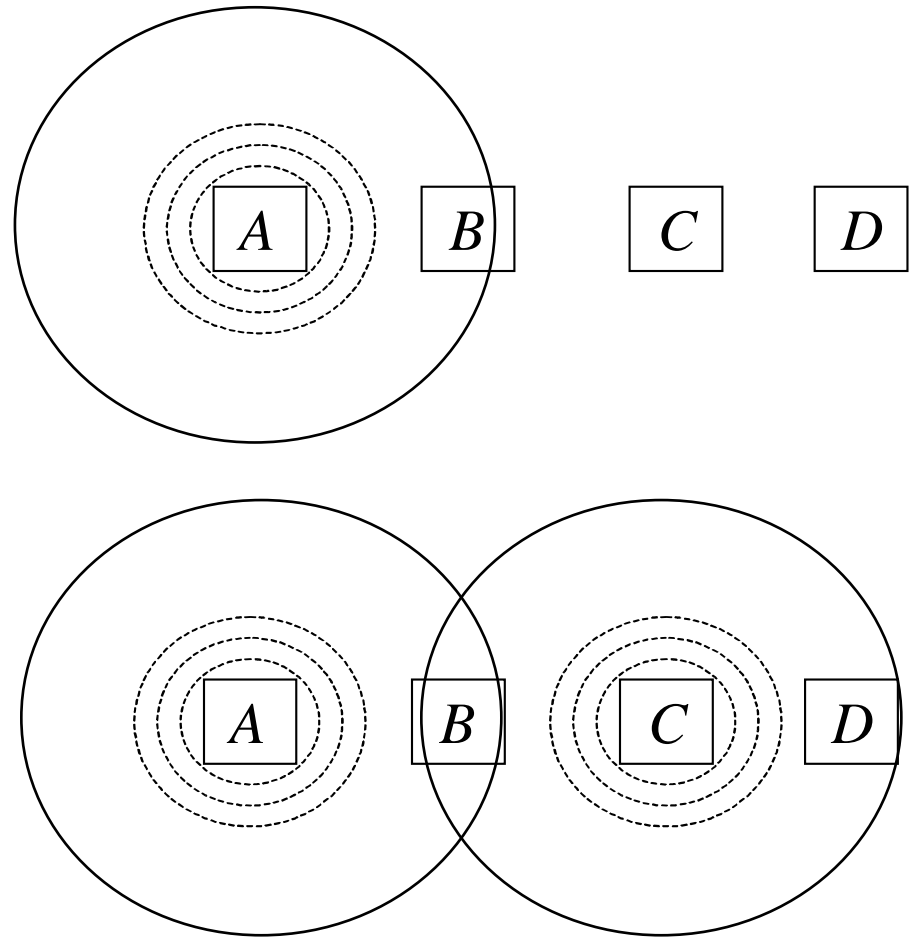
- οι συγκρούσεις ανιχνεύονται γρήγορα
 - οι μεταδόσεις που συγκρούονται διακόπτονται, μειώνοντας το χαμένο χρόνο του καναλιού
- ανίχνευση σύγκρουσης:
- εύκολη στα ενσύρματα LANs: μέτρηση ισχύος σήματος, σύγκριση μεταδιδόμενων, λαμβανόμενων σημάτων
 - **δύσκολη στα ασύρματα LANs:** η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος «καλύπτεται» από την ισχύ της τοπικής μετάδοσης
- ανθρώπινη αναλογία: ο ευγενικός συνομιλητής

CSMA/CD ανίχνευση σύγκρουσης



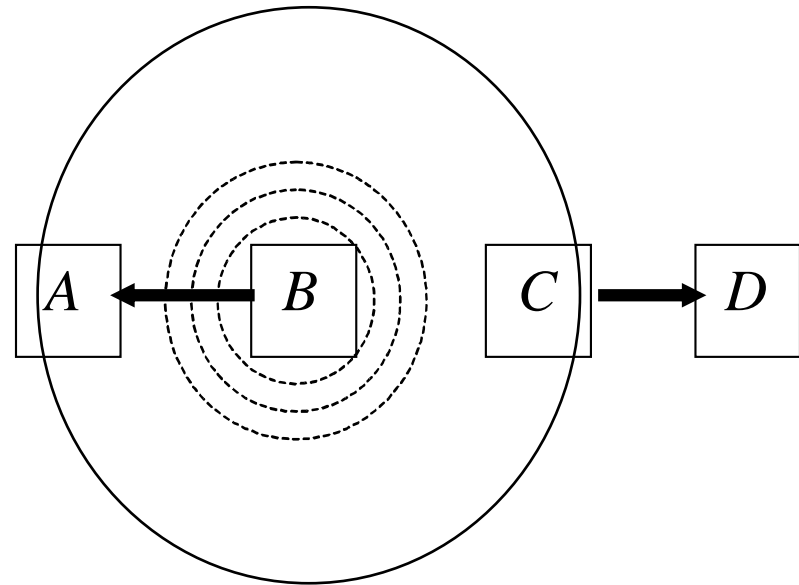
Το Πρόβλημα του Κρυμμένου Σταθμού

- ❑ ο A στέλνει προς τον B
- ❑ ο C δεν ακούει τον A
- ❑ και
 - ο C επίσης στέλνει στον B
 - με αποτέλεσμα να καταστρέφει τα πλαίσια του A (προς τον B)
 - Βασικός λόγος μη αποδοτικότητας των πρωτοκόλλων CSMA



Το Πρόβλημα του Αποκαλυμμένου Σταθμού

- ❑ Πρόβλημα στις αδ-
hoc επικοινωνίες
- ❑ ο B στέλνει προς
τον A
- ❑ ο C θέλει να στείλει
στον D
- ❑ αλλά
 - ο C ακούει τον B να εκπέμπει
 - και (ο C) αποφεύγει να εκπέμπει.



Ethernet CSMA/CD αλγόριθμος

1. Η κάρτα διεπαφής δικτύου (Network Interface Card - NIC) λαμβάνει το datagram από το επίπεδο δικτύου και δημιουργεί το πλαίσιο (frame)
2. Αν η NIC αισθανθεί το κανάλι αδρανές, αρχίζει τη μετάδοση του πλαισίου. Αν το αισθανθεί κατειλημμένο, περιμένει μέχρι να γίνει αδρανές και τότε μεταδίδει
3. Αν η NIC μεταδώσει όλο το πλαίσιο χωρίς να εντοπίσει άλλη μετάδοση, τότε έχει τελειώσει με το πλαίσιο!
4. Αν η NIC εντοπίσει άλλη μετάδοση ενώ μεταδίδει, διακόπτει και στέλνει ένα jam σήμα
5. Αφού διακόψει, η NIC εισάγει **δυναδική (εκθετική) οπισθοχώρηση:**
 - μετά τη m -οστή σύγκρουση, η NIC επιλέγει ένα **τυχαίο K** στο διάστημα $\{0,1,2,\dots,2^m-1\}$. Περιμένει για $K*512$ bit χρόνους και επιστρέφει στο Βήμα 2
 - μεγαλύτερο διάστημα οπισθοχώρησης με περισσότερες συγκρούσεις

Πρωτόκολλα MAC λειτουργίας εκ περιτροπής

Πρωτόκολλα MAC με διαμέριση του καναλιού:

- μοιράζουν το κανάλι αποτελεσματικά και δίκαια σε υψηλό φορτίο
- αναποτελεσματικά σε χαμηλό φορτίο: καθυστέρηση στην πρόσβαση στο κανάλι, εκχώρηση $1/N$ -οστού του εύρους ζώνης ακόμη και αν ένας μόνο ενεργός κόμβος!

Πρωτόκολλα MAC τυχαίας πρόσβασης

- αποτελεσματικά για χαμηλό φορτίο: ένας κόμβος μόνος του μπορεί να χρησιμοποιήσει πλήρως το κανάλι
- υψηλό φορτίο: overhead συγκρούσεων

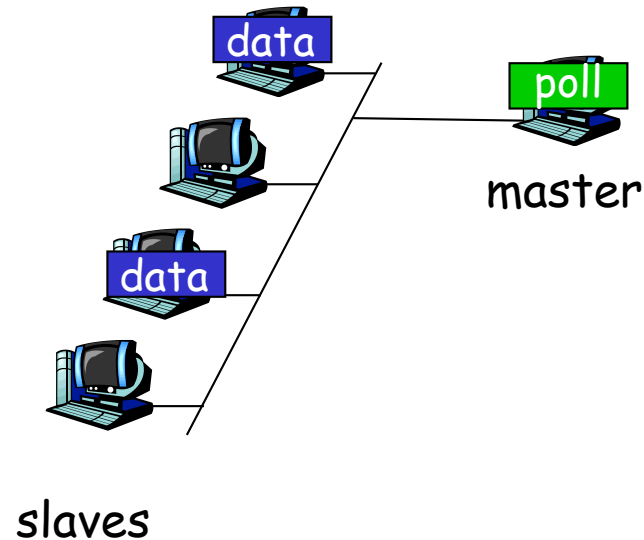
Πρωτόκολλα λειτουργίας εκ περιτροπής

αναζητώντας τα καλύτερα από τους δυο κόσμους!

Πρωτόκολλα MAC λειτουργίας εκ περιτροπής

Σταθμοσκόπηση:

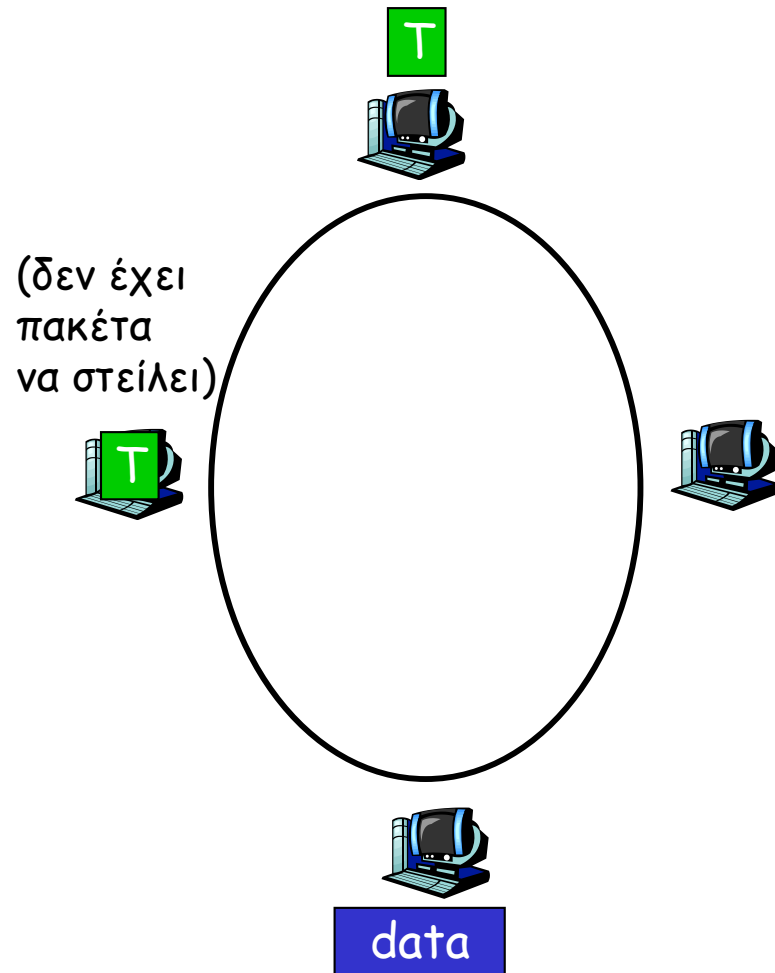
- ο master κόμβος "προσκαλεί" τους κόμβους slaves να μεταδώσουν με τη σειρά
- συνήθως χρησιμοποιείται με "χαζές" slave συσκευές
- προβληματισμοί:
 - overhead σταθμοσκόπησης
 - καθυστέρηση
 - μοναδικό σημείο αποτυχίας (master)



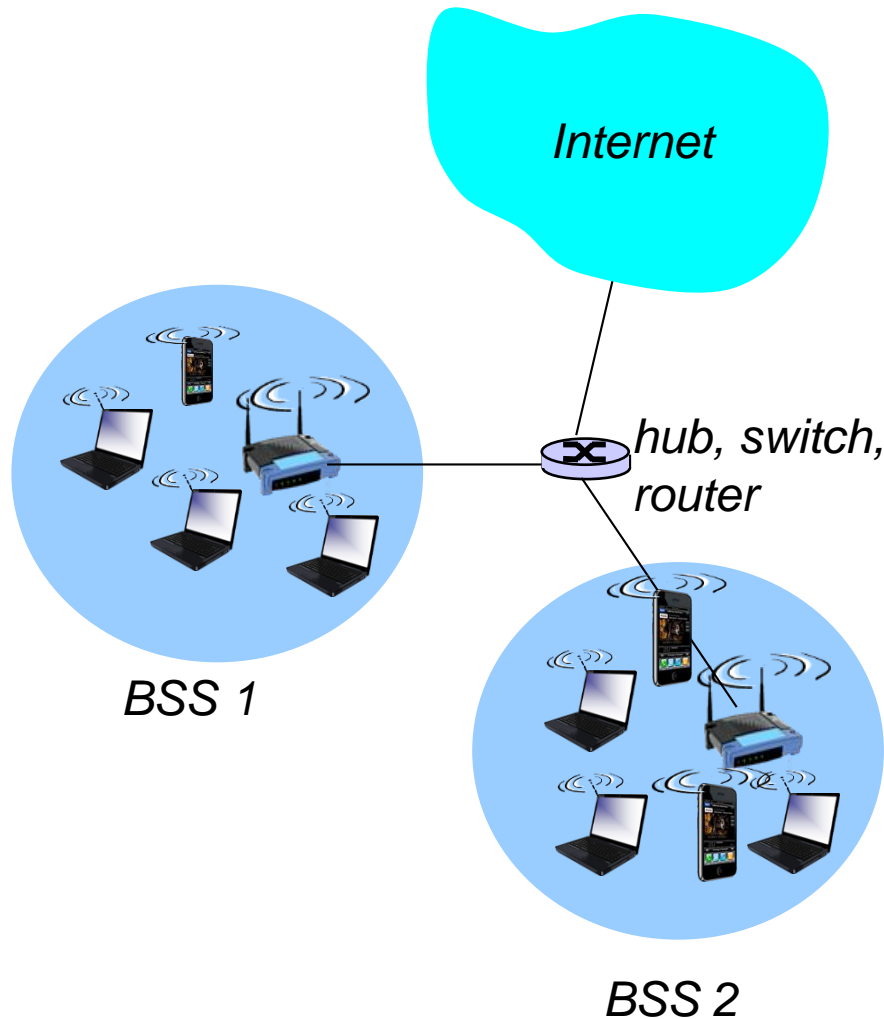
Πρωτόκολλα MAC λειτουργίας εκ περιτροπής

Μεταβίβασης σκυτάλης:

- σκυτάλη (**token**) ελέγχου που μεταβιβάζεται από τον έναν κόμβο στον επόμενο σειριακά
- πλαίσιο σκυτάλης
- προβληματισμοί:
 - overhead σκυτάλης
 - καθυστέρηση
 - μοναδικό σημείο αποτυχίας (σκυτάλη)



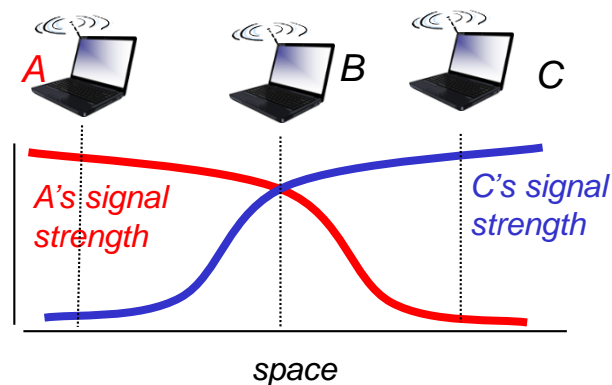
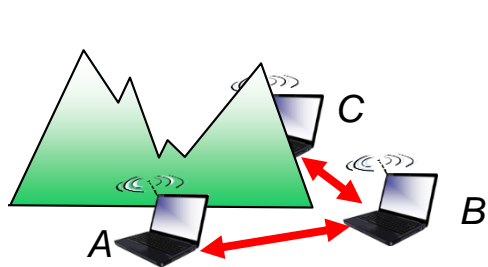
802.11 LAN : αρχιτεκτονική



- ❖ το ασύρματο τερματικό επικοινωνεί με το σταθμό βάσης
 - σταθμός βάσης = σημείο πρόσβασης (AP)
- ❖ **Basic Service Set (BSS)** (δλδ “κυψέλη”) σε λειτουργία υποδομής περιέχει:
 - ασύρματα τερματικά
 - σημεία πρόσβασης (AP): σταθμός βάσης
 - *ad hoc* λειτουργία: μόνο τερματικά

IEEE 802.11: πολλαπλή πρόσβαση

- ❑ αποφυγή συγκρούσεων: >1 κόμβοι μεταδίδουν την ίδια στιγμή
- ❑ 802.11: CSMA - "αφουγκράζεται" το κανάλι πριν μεταδώσει
 - μη συγκρουστείς με εν εξελίξει μετάδοση από άλλο κόμβο
- ❑ 802.11: χωρίς ανίχνευση σύγκρουσης!
 - δύσκολο να λάβει (ανιχνεύσει συγκρούσεις) όταν μεταδίδει λόγω αδύναμων λαμβανόμενων σημάτων (εξασθένιση)
 - δεν μπορεί να αντιληφθεί όλες τις συγκρούσεις σε κάθε περίπτωση: κρυμμένο τερματικό, εξασθένιση
 - στόχος: **αποφυγή συγκρούσεων**: CSMA/C(ollision)A(voidance)



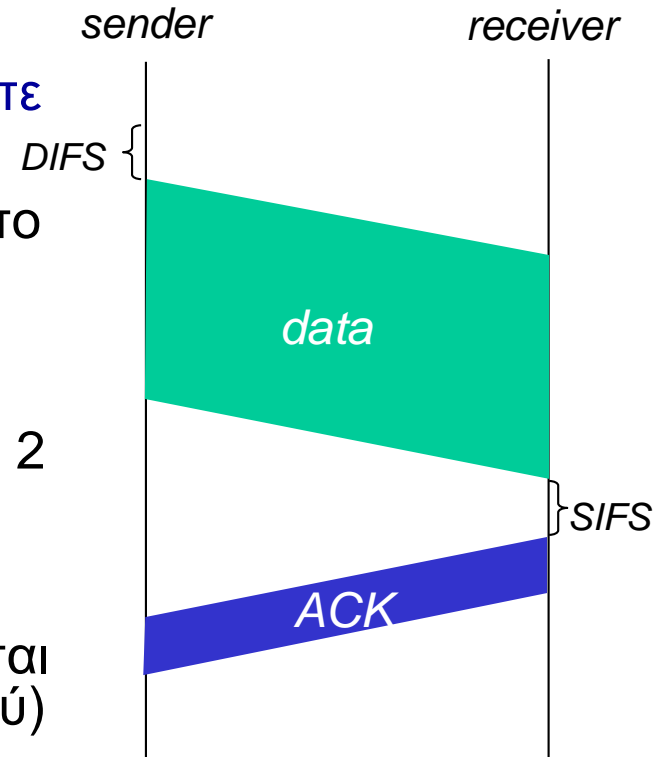
IEEE 802.11 MAC Protocol: CSMA/CA

802.11 αποστολέας

- αν «αισθανθείς» το κανάλι αδρανές για **DIFS** τότε μετάδωσε ολόκληρο το πλαίσιο (όχι CD)
- αν «αισθανθείς» το κανάλι απασχολημένο τότε
 - ξεκίνησε τυχαίο χρόνο οπισθοχώρησης
 - χρονομετρητής μετράει αντίστροφα όταν το κανάλι είναι αδρανές
 - μετάδωσε όταν λήξει ο χρονομετρητής
 - αν δεν λάβεις ACK, αύξησε το τυχαίο διάστημα οπισθοχώρησης, επανάλαβε το 2

802.11 δέκτης

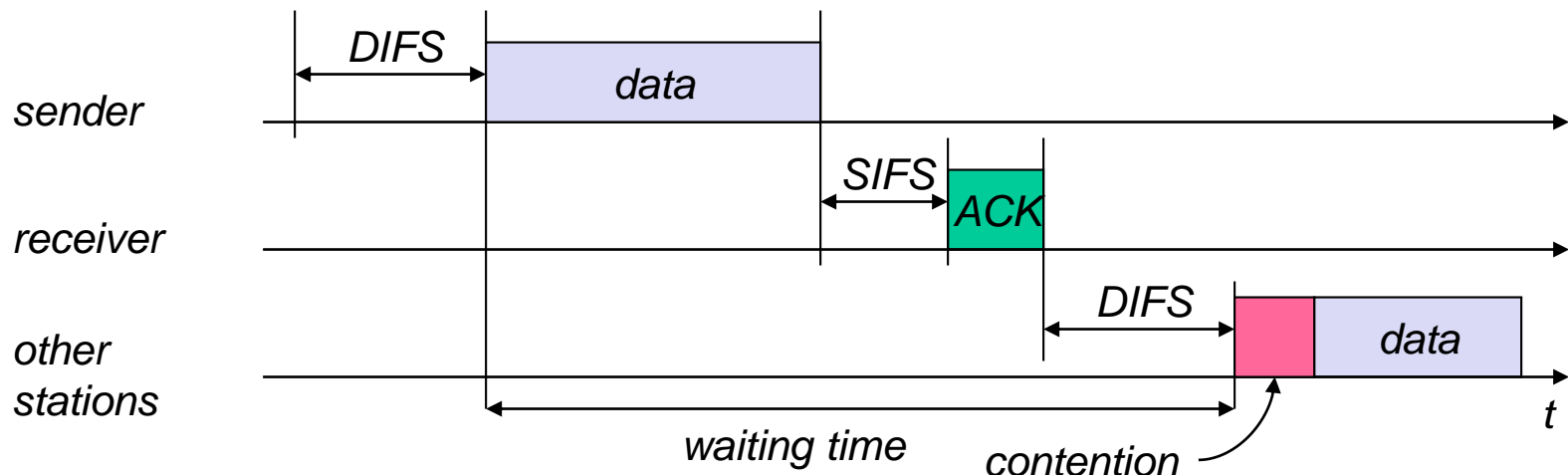
- αν το πλαίσιο παραληφθεί OK
 - στείλε ACK μετά από **SIFS** (ACK χρειάζεται λόγω προβλήματος κρυμμένου τερματικού)



802.11 - CSMA/CA access method

□ Sending unicast packets

- station has to wait for DIFS before sending data
- receivers acknowledge at once (after waiting for SIFS) if the packet was received correctly (CRC)
- automatic retransmission of data packets in case of transmission errors



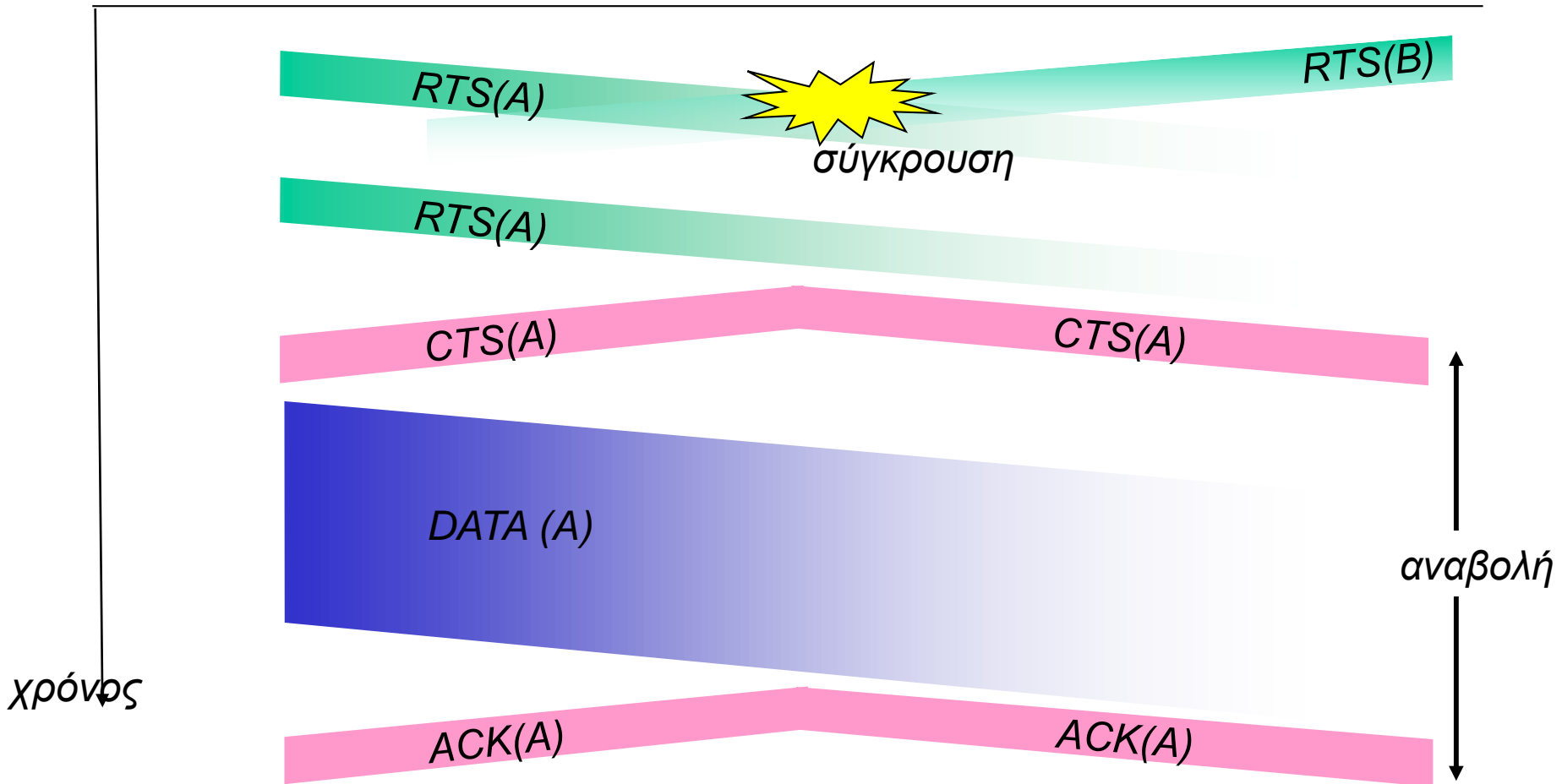
Αποφυγή συγκρούσεων (περισσότερα)

Ιδέα: επέτρεψε στον αποστολέα να “**κάνει κράτηση**” στο κανάλι αντί για τυχαία πρόσβαση των πλαισίων δεδομένων → αποφυγή συγκρούσεων μεγάλων πλαισίων δεδομένων

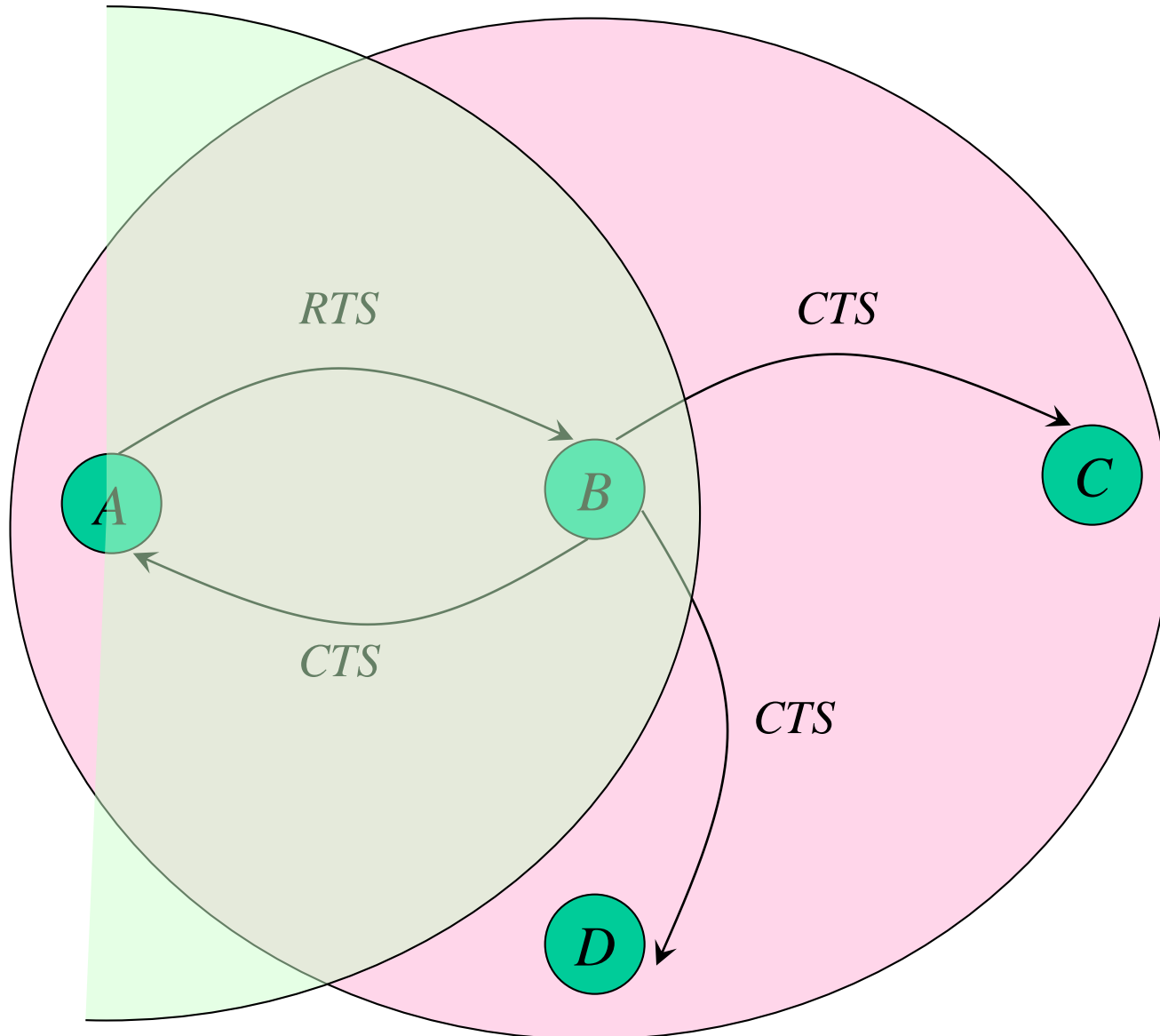
- ο αποστολέας πρώτα μεταδίδει μικρά πακέτα **request-to-send (RTS)** (αίτηση για αποστολή) στο BS (σταθμό βάσης) χρησιμοποιώντας CSMA
 - τα RTS μπορεί να συγκρουστούν μεταξύ τους (αλλά είναι μικρά)
- BS εκπέμπει **clear-to-send (CTS)** σε απόκριση του RTS
- το CTS (clear to send – “ελεύθερο” για αποστολή) ακούγεται από όλους τους κόμβους
 - ο αποστολέας μεταδίδει πλαίσιο δεδομένων
 - οι άλλοι σταθμοί αναβάλλουν τις μεταδόσεις

*απόφυγε συγκρούσεις πλαισίων δεδομένων εντελώς,
χρησιμοποιώντας μικρά πακέτα κράτησης!*

Αποφυγή Συγκρούσεων: «κράτηση» καναλιού μέσω RTS-CTS



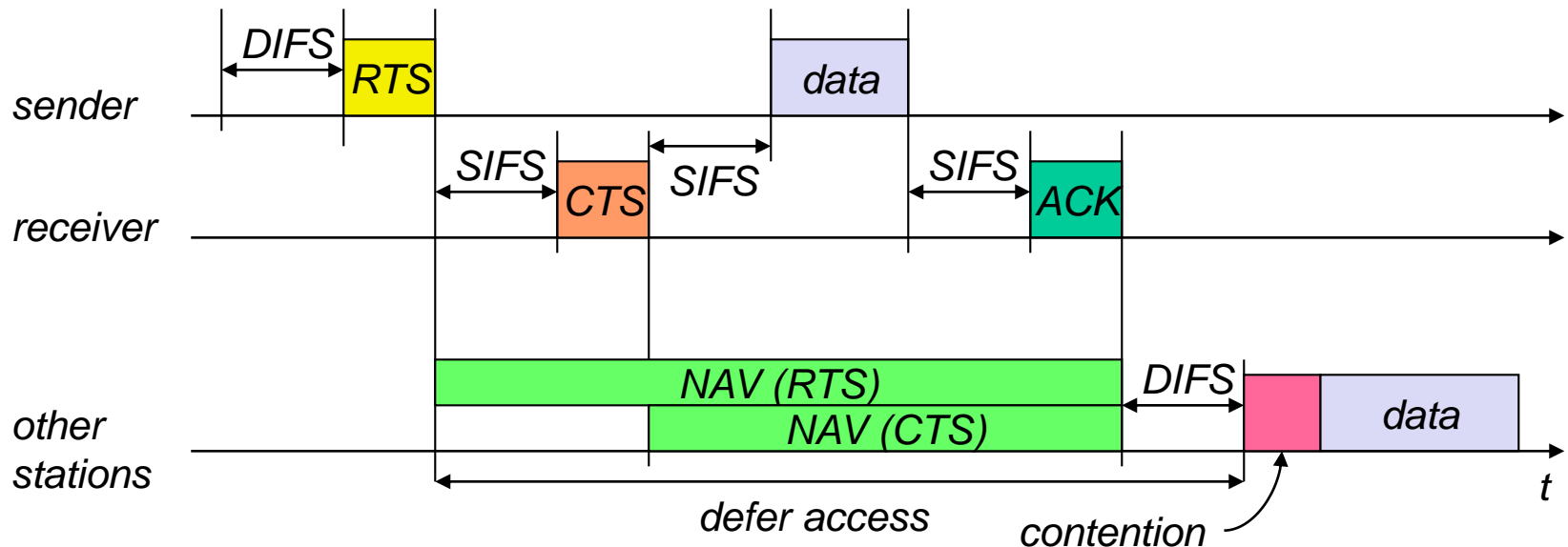
Αποφυγή σύγκρουσης στον κόμβο B



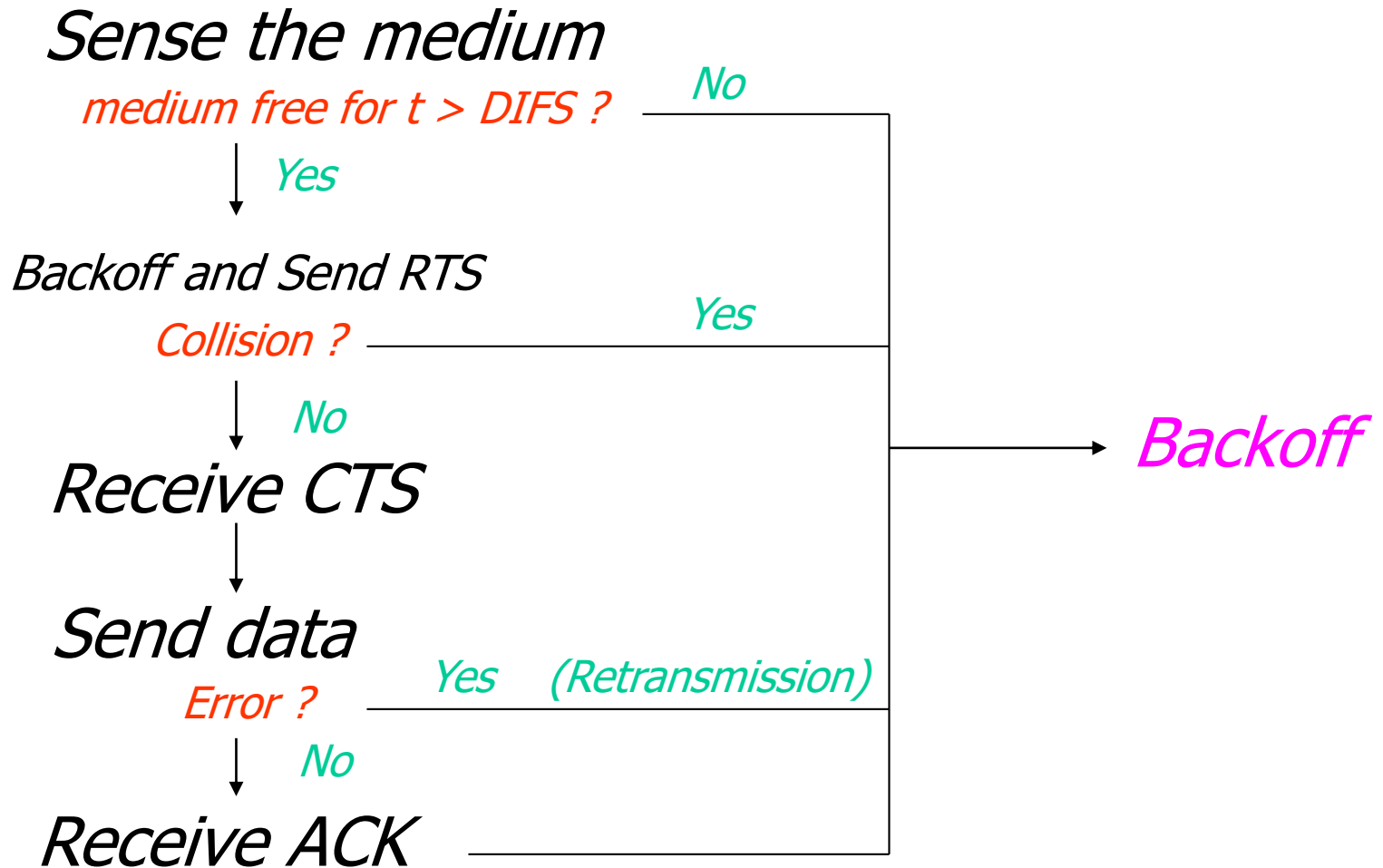
Collision Avoidance: RTS-CTS exchange

□ Sending unicast packets

- station can send RTS with reservation parameter after waiting for DIFS (reservation determines amount of time the data packet needs the medium)
- acknowledgement via CTS after SIFS by receiver (if ready to receive)
- sender can now send data at once, acknowledgement via ACK
- other stations store medium reservations distributed via RTS and CTS

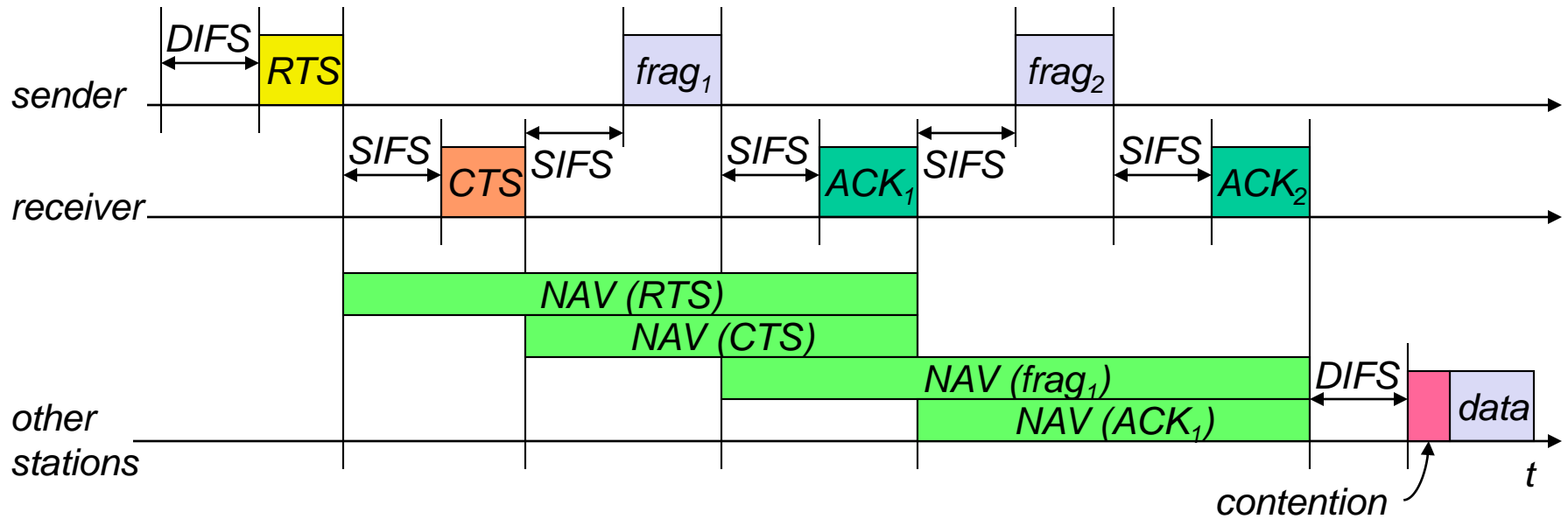


Distributed Coordination Function



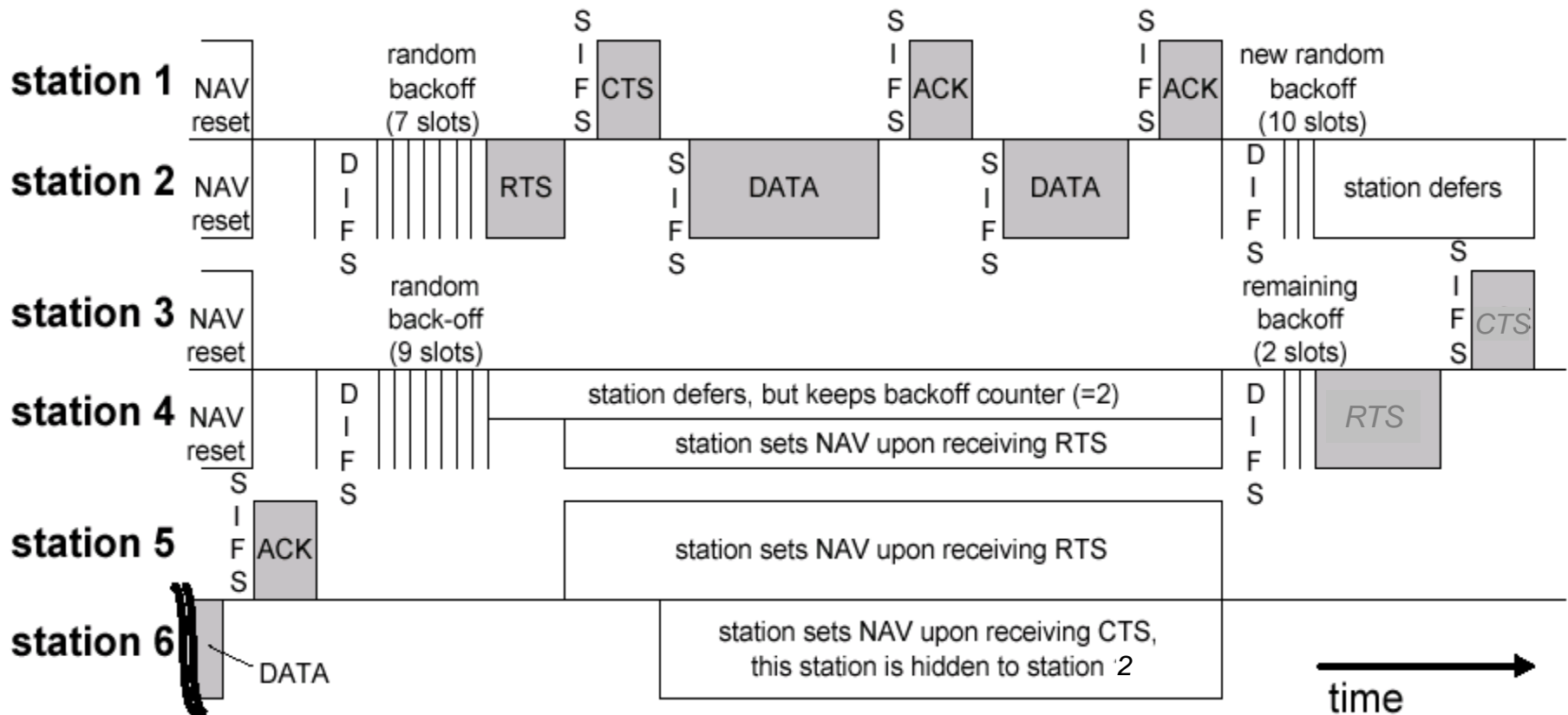
DIFS: DCF Interframe Space

Fragmentation



Why fragment?

Παράδειγμα Μετάδοσης με DCF



Το CW διπλασιάζεται μετά από κάθε σύγκρουση

- Initial CW → 3 (τιμές backoff 0-3)
- CW after Collision 1 → 7 (τιμές backoff 0-7)
- CW after Collision 2 → 15 (τιμές backoff 0-15)
- CW after Collision 3 → 31 (τιμές backoff 0-31)
- CW after Collision 4 → 63 (τιμές backoff 0-63)

Βασικά Μειονεκτήματα DCF

- ❑ Απρόβλεπτος αριθμός συγκρούσεων
- ❑ Απρόβλεπτες καθυστερήσεις επιτυχούς μετάδοσης
- ❑ Απρόβλεπτη ρυθμαπόδοση (throughput)
- ❑ Μη ελεγχόμενη επιλογή σταθμού προς μετάδοση

Και ένα πλεονέκτημα:

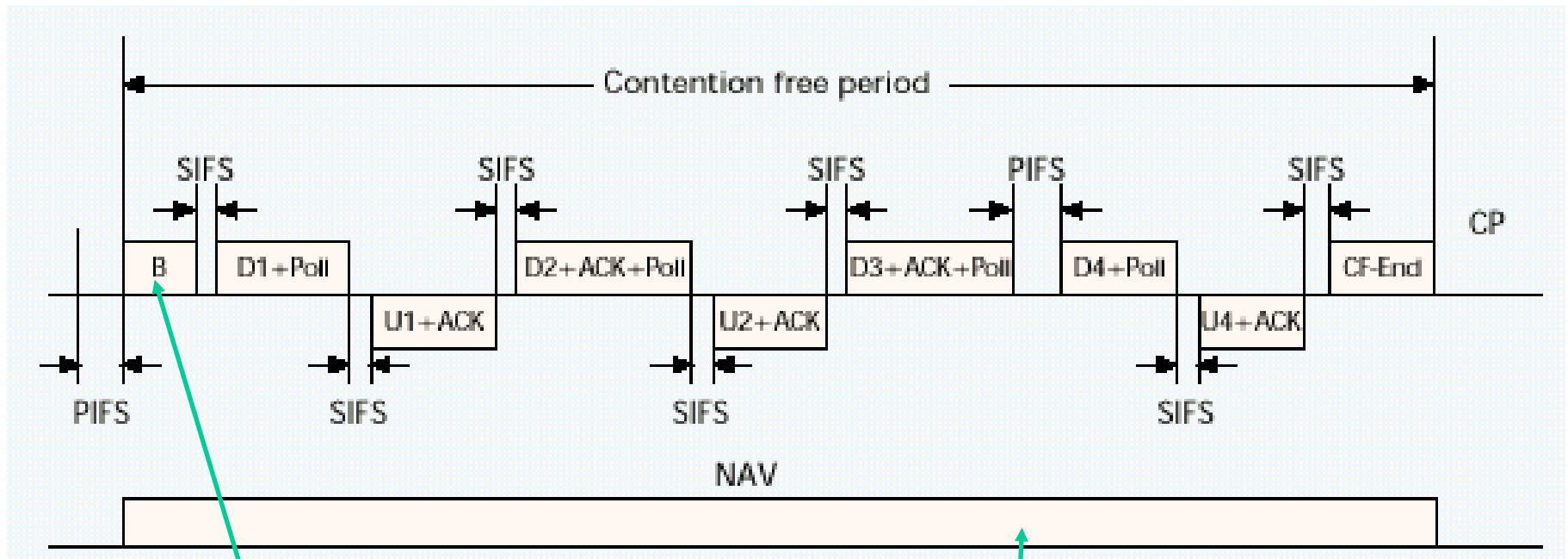
- ❑ Χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης και καλή απόδοση σε χαμηλό φόρτο

Point Coordination Function (I)

- ✓ Ενεργοποιείται από το AP όποτε αυτό κρίνει ότι πρέπει να περάσει σε contention-free period
- ✓ Γενικά, όταν η κίνηση είναι χαμηλή συμφέρει το DCF, ενώ όταν είναι υψηλή συμφέρει το PCF
- ✓ Σε αυτή τη λειτουργία το AP ονομάζεται και Point Coordinator
- ✓ Έχει προτεραιότητα σε σχέση με την DCF γιατί ενεργοποιείται μετά από ανενεργό χρόνο

PIFS < DIFS

Point Coordination Function (II)

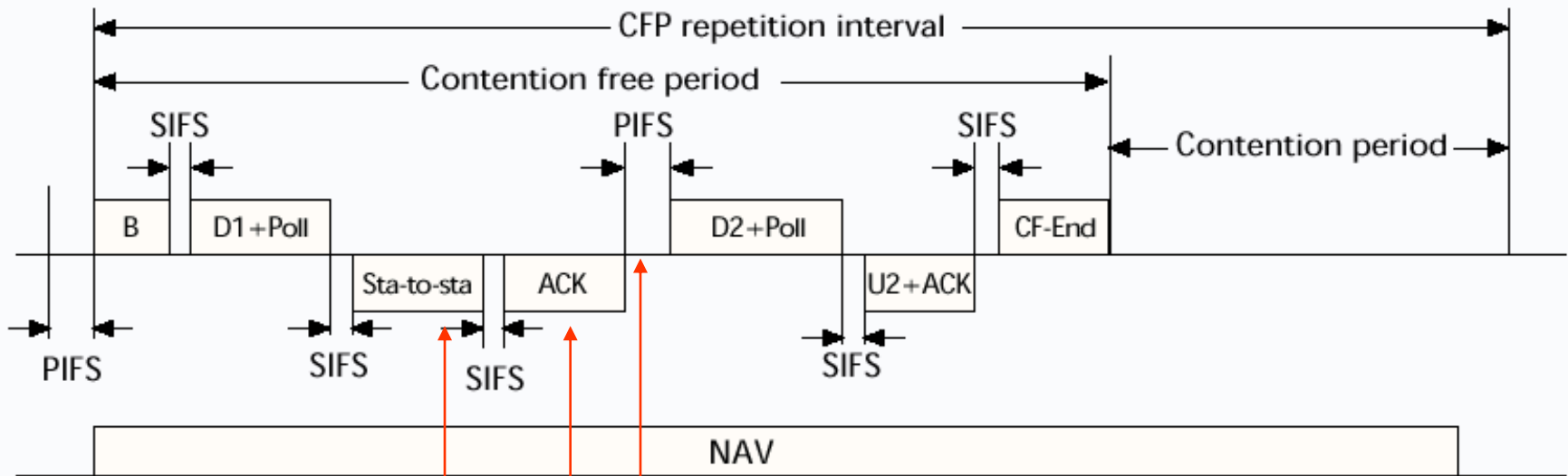


Synchronization beacon

*Variable duration of
Contention Free Period*

Point Coordination Function (III)

Στην περίπτωση που ένα STA θέλει να μιλήσει σε ένα άλλο STA κατά τη διάρκεια της CFP



- ◆ Μόλις έρθει η σειρά του, ένα STA επιλέγει να μεταδώσει σε ένα άλλο STA στο ίδιο BSS
- ◆ Μόλις το άλλο STA λάβει τα δεδομένα, απαντά με ένα DCF Ack στο πρώτο STA
- ◆ Το AP περιμένει χρόνο ίσο με PIFS πριν συνεχίσει με το επόμενο STA

Βασικά μειονεκτήματα του PCF, όσον αφορά το QoS

- ✓ Τα τερματικά δεν έχουν τρόπο να μεταδώσουν τις απαιτήσεις τους στο AP
 - ✓ Το AP δεν έχει τρόπο να διακόψει μια μετάδοση σε εξέλιξη για να στείλει το *synchronization beacon* *
 - ✓ Το *Poll* δεν καθορίζει χρόνο για τον οποίο δίνεται το κανάλι με αποτέλεσμα ένας σταθμός να μπορεί να το κρατήσει όσο έχει δεδομένα προς μετάδοση *
- * *Maximum packet (MPDU) allowed 4095 bytes = 32760 bits = 32,76 msec (για κανάλι 1Mbps)*

LTE MAC Frame Structure

