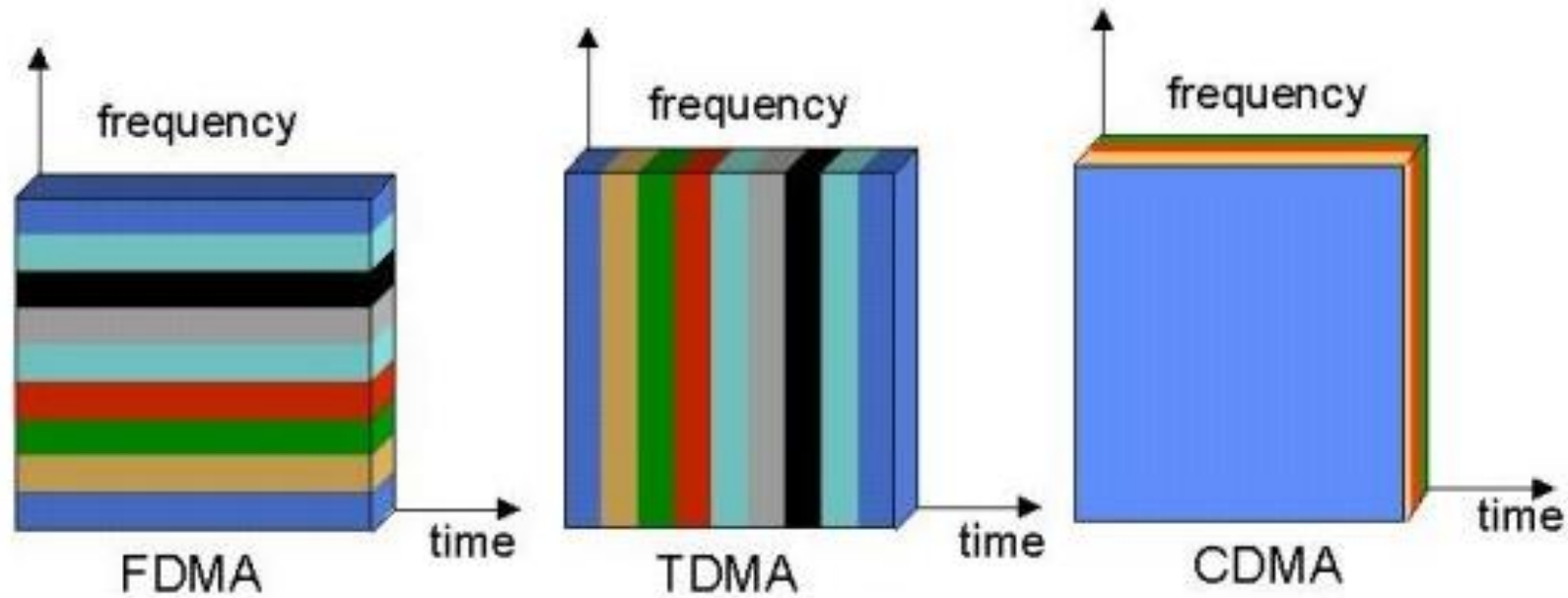


# Multiplexing

- Multiplexing allows parallel transmission from different sources, handling interference.
- Three basic kinds
  - **TDM/TDMA** (Time Division Multiple Access)
  - **FDM/FDMA** (Frequency Division Multiple Access)
  - **CDMA** (Code Division Multiple Access)
  - Combinations of the above



# Frequency Division Multiplexing (FDM)

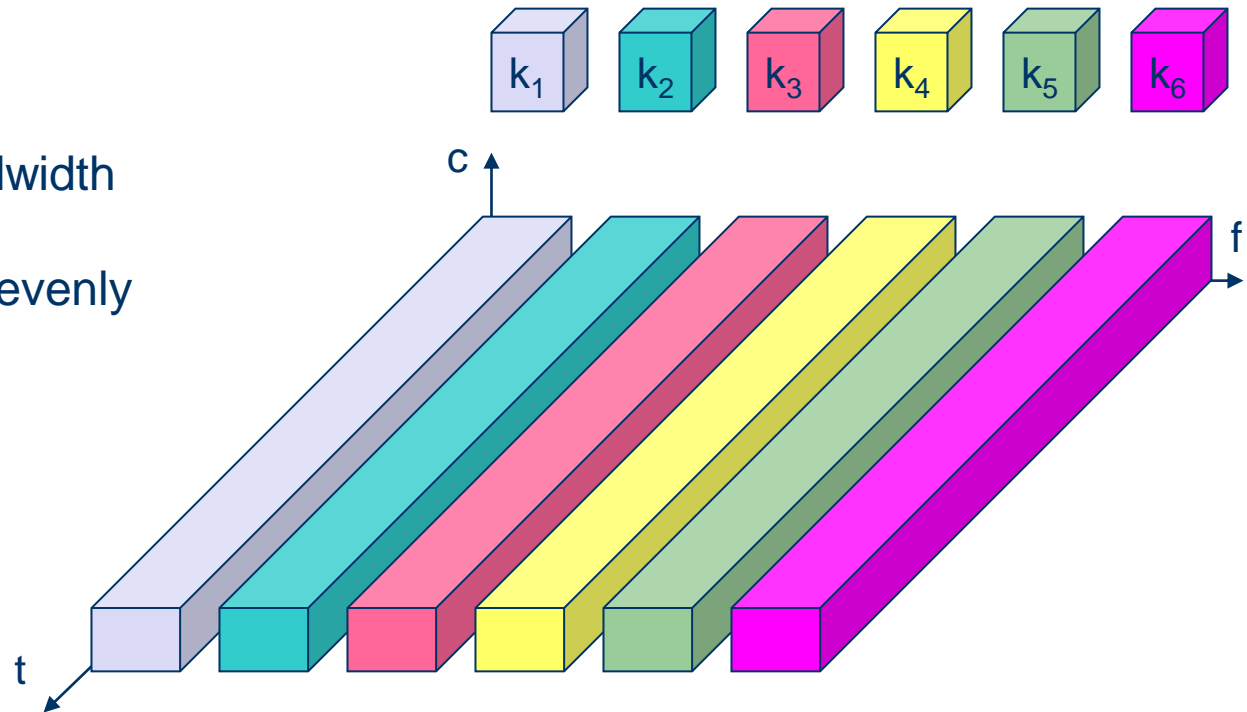
- Separation of the whole spectrum into smaller frequency bands
- A channel gets a certain band of the spectrum for the whole time

## Advantages:

- no dynamic coordination necessary
- works also for analog signals
- cheaper

## Disadvantages:

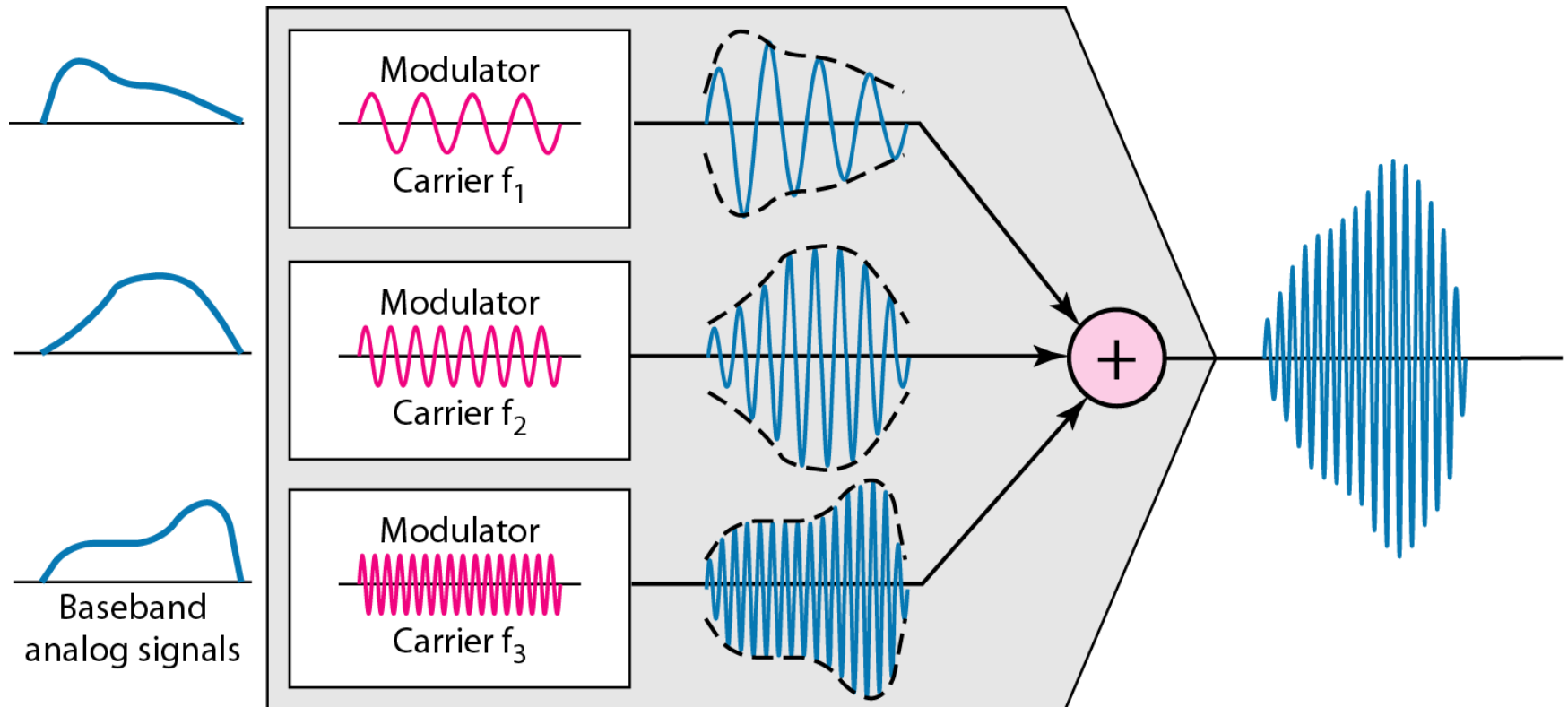
- waste of bandwidth if the traffic is distributed unevenly
- inflexible



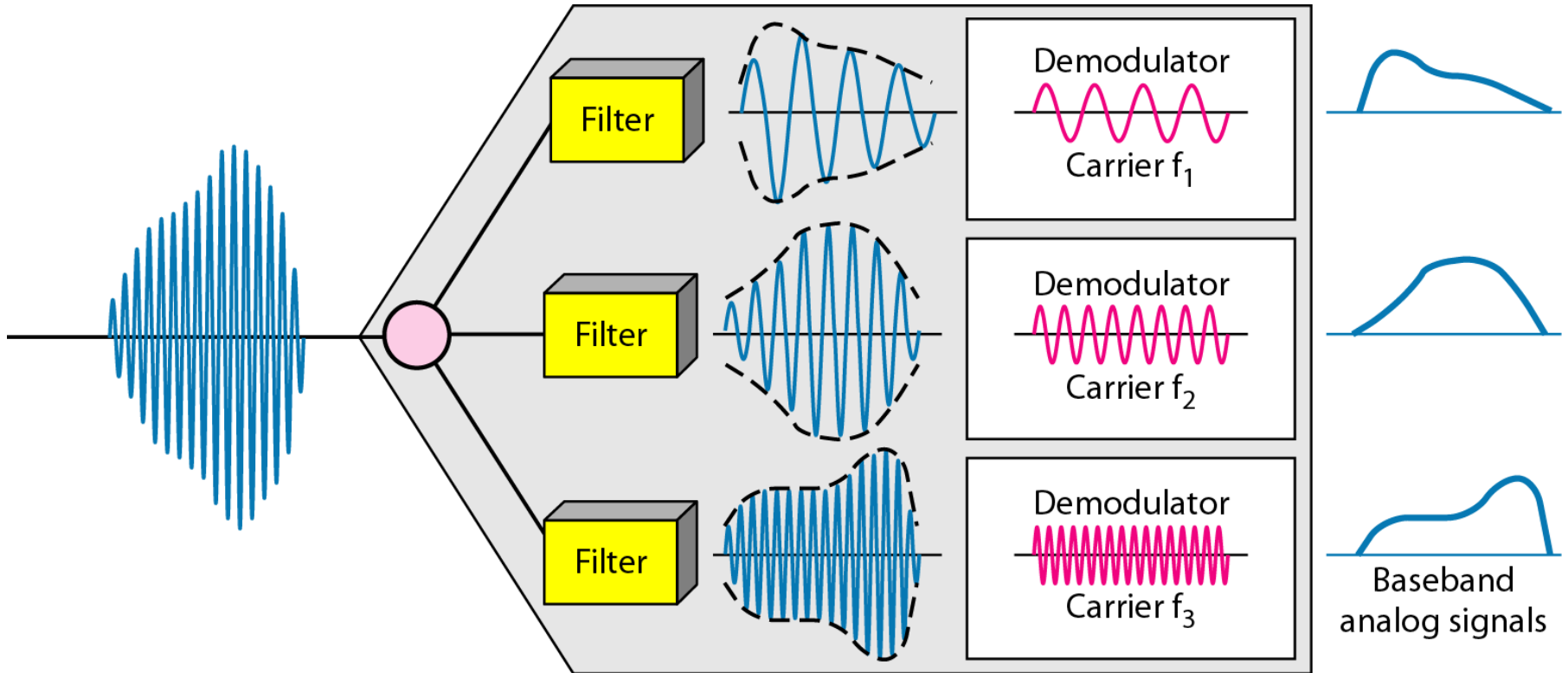
# Frequency Division Multiplexing (FDM)



# Frequency Division Multiplexing (FDM)

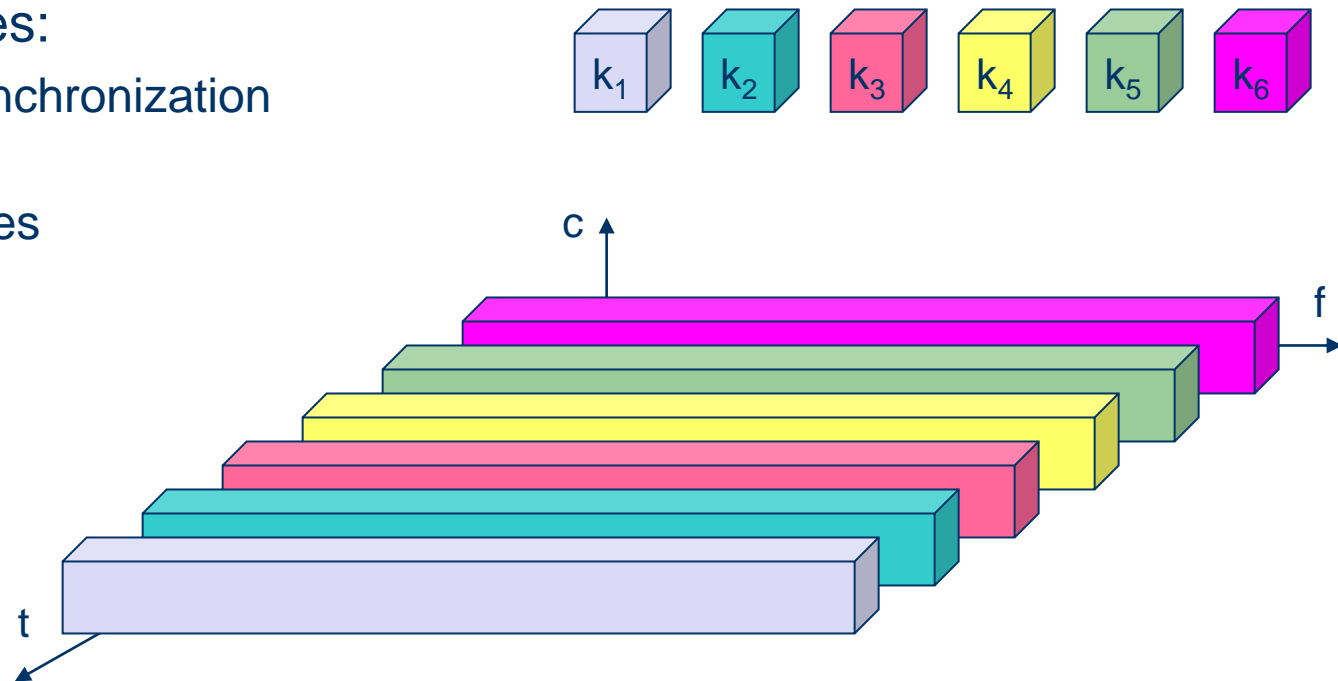


# Frequency Division Multiplexing (FDM)

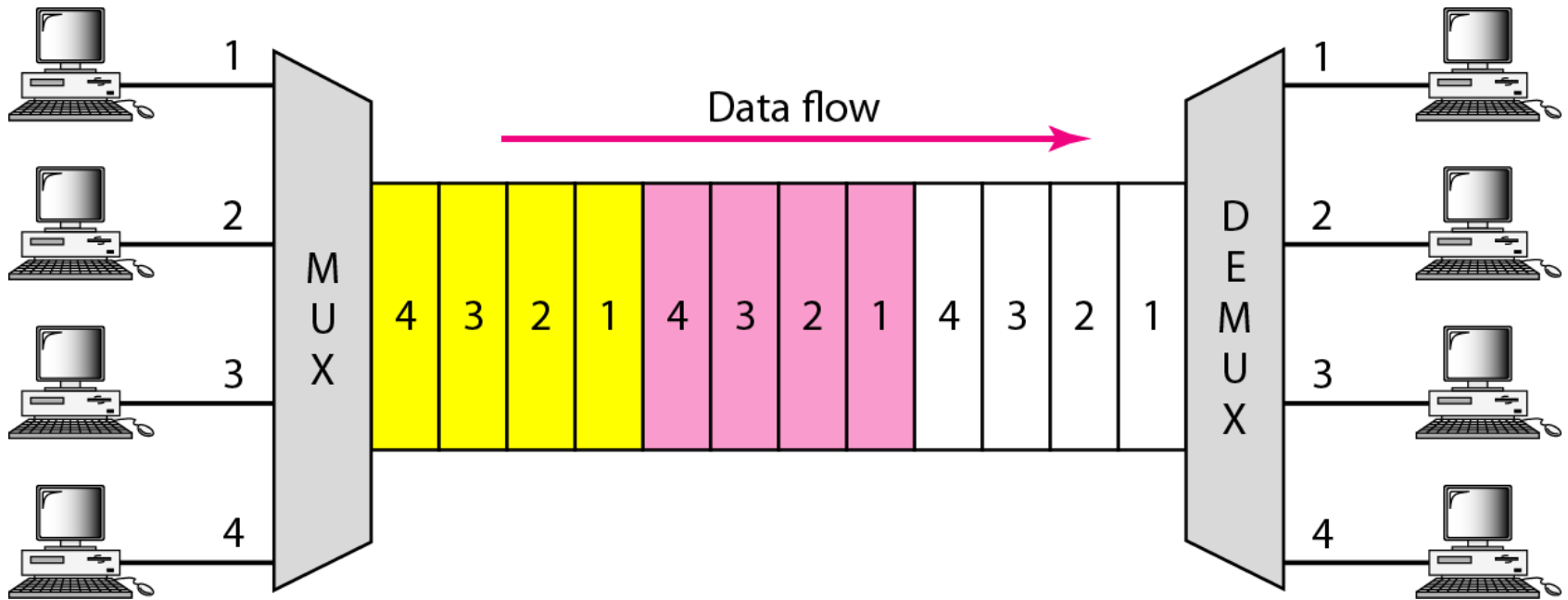


# Time Division Multiplexing (TDM)

- A channel gets the whole spectrum for a certain amount of time
- Advantages:
  - only one carrier in the medium at any time
  - throughput high - supports bursts
  - flexible – multiple slots
- Disadvantages:
  - Precise synchronization necessary
  - high bit rates at each Tx/Rx

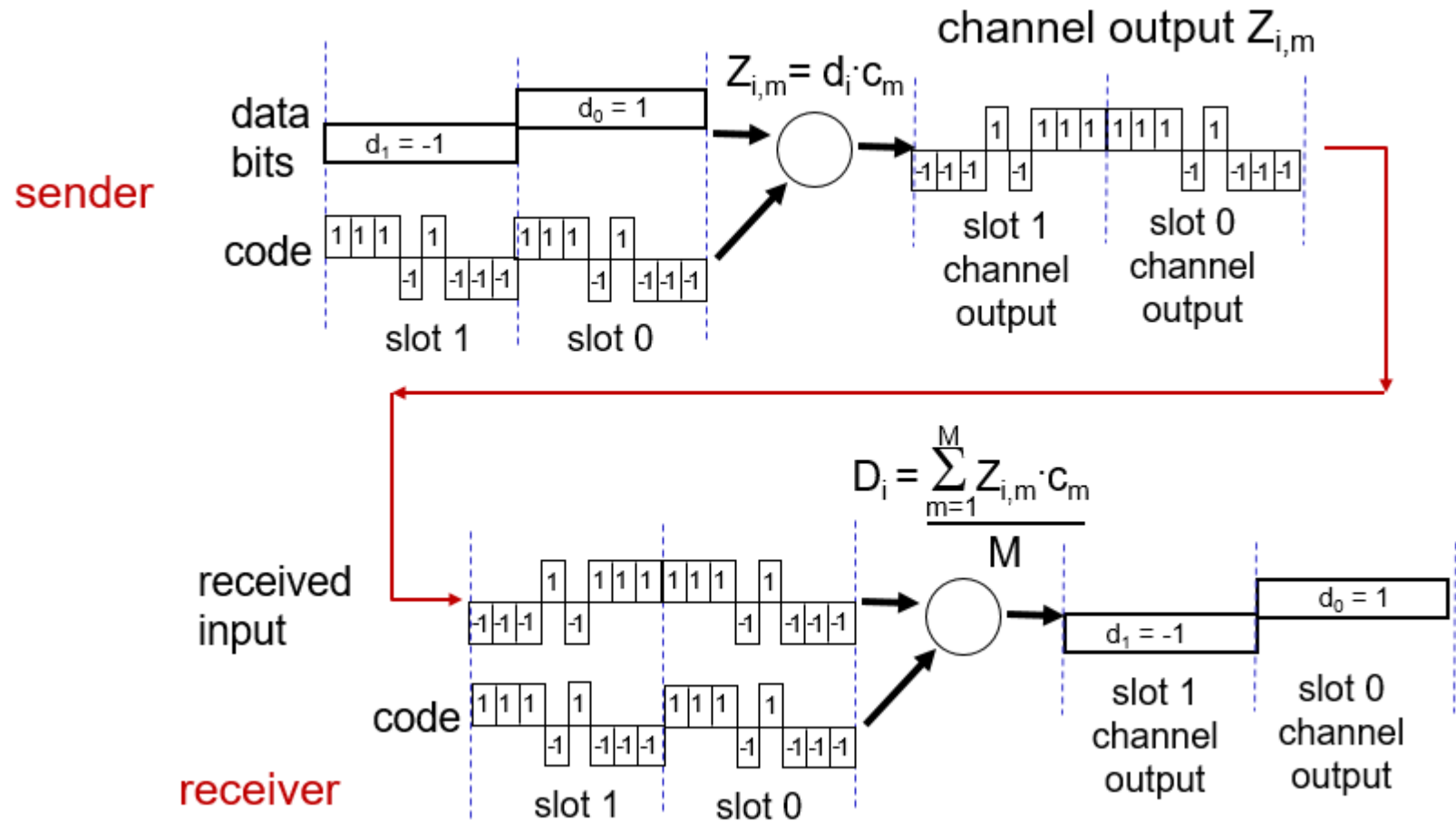


# Time Division Multiplexing (TDM)



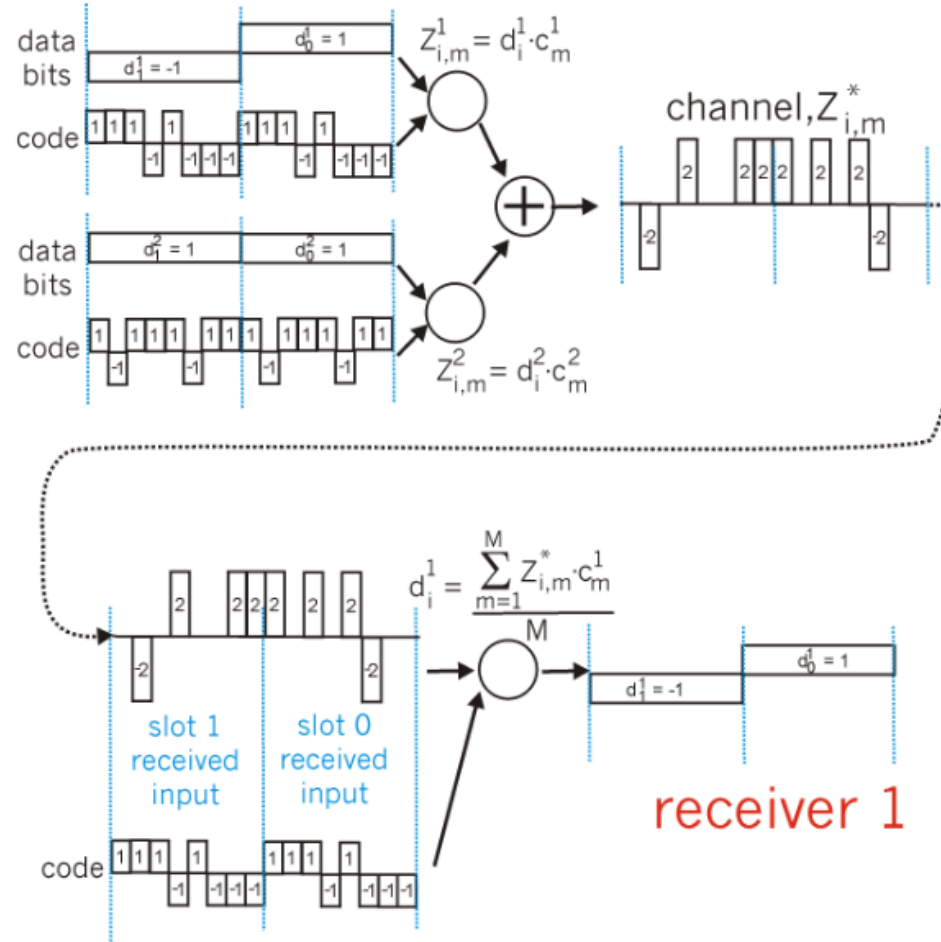


# Code Division Multiple Access (CDMA)



# Code Division Multiple Access (CDMA)

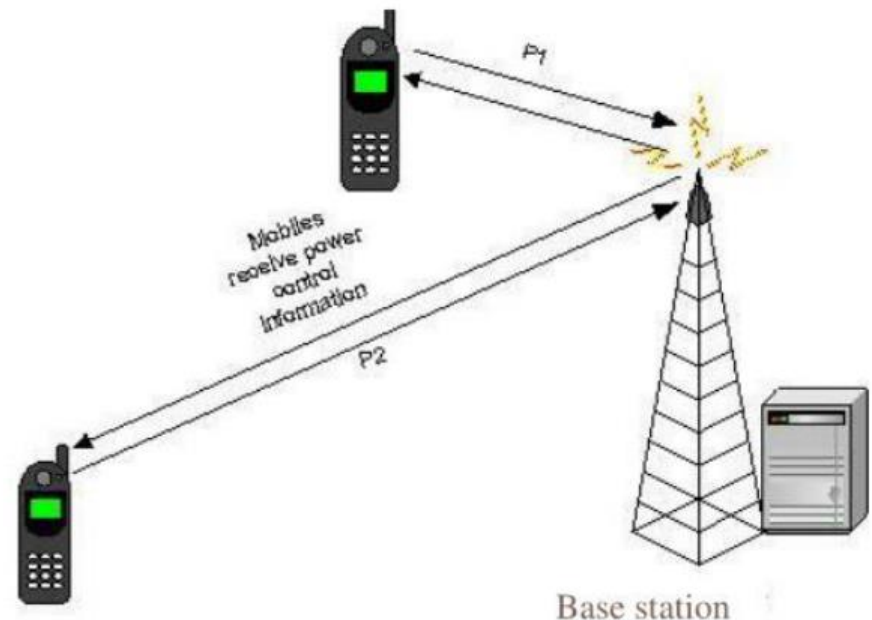
senders



# Near-far problem in CDMA

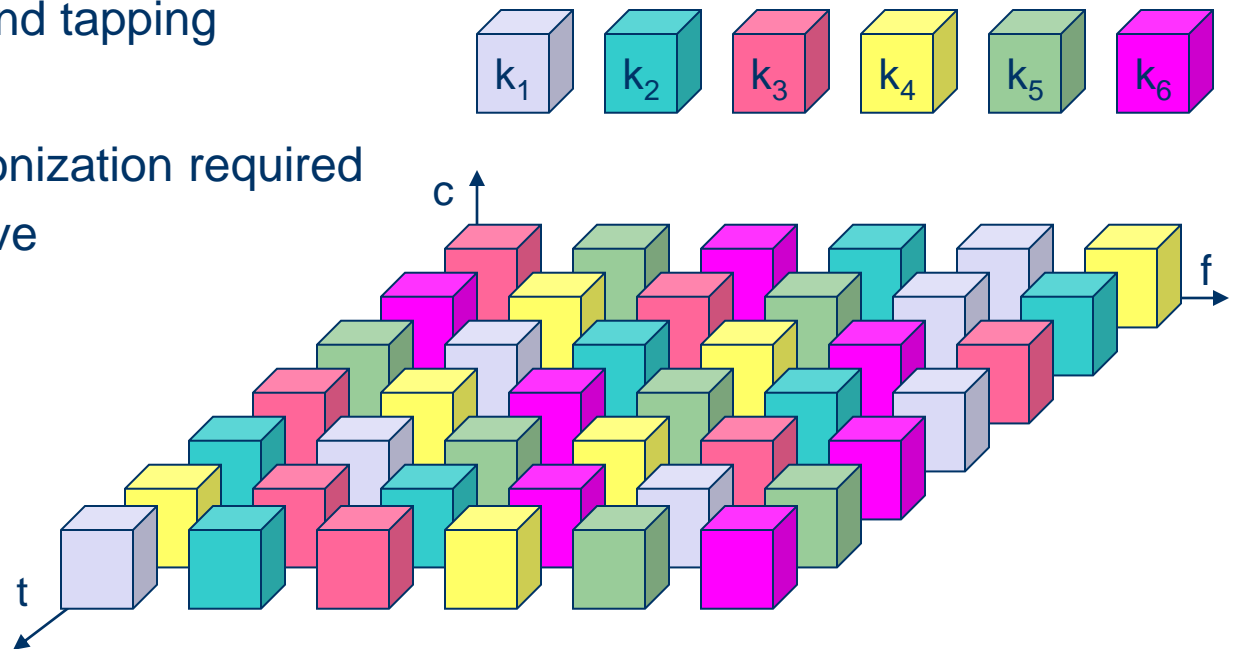
- A CDMA receiver cannot successfully de-spread the desired signal in a high multiple-access-interference environment
- Unless a transmitter close to the receiver transmits at power lower than a transmitter farther away, the far transmitter cannot be heard
- Power control must be used to mitigate the near-far problem
- Mobiles transmit at such power levels to ensure that received power levels are equal at base station

- Power control and channel problems!

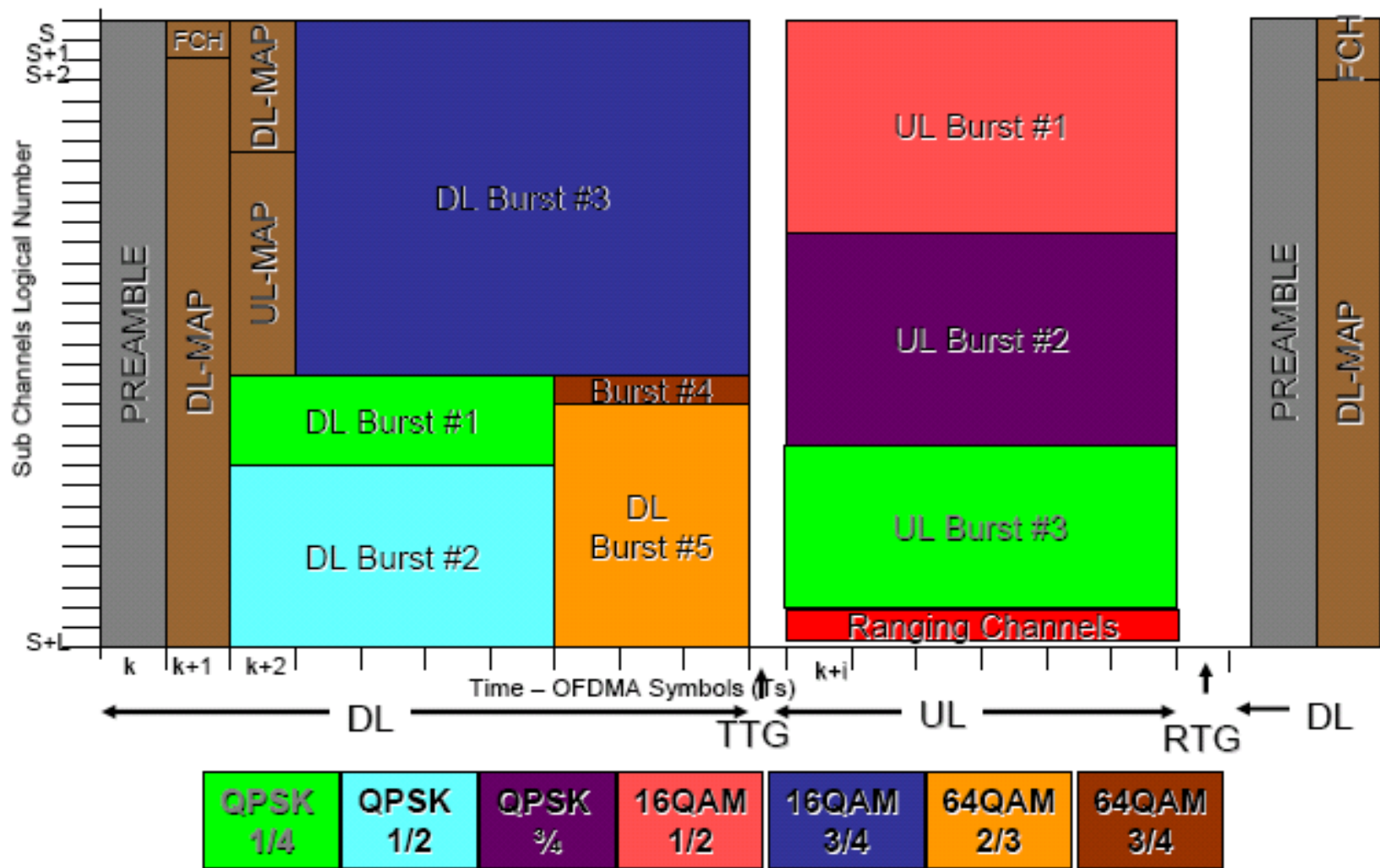


# Hybrid TDM/FDM

- Combination of both methods
- A channel gets a certain frequency band for a certain amount of time (slot).
- Advantages:
  - better protection against interference and tapping
- Disadvantages:
  - Better synchronization required
  - More expensive

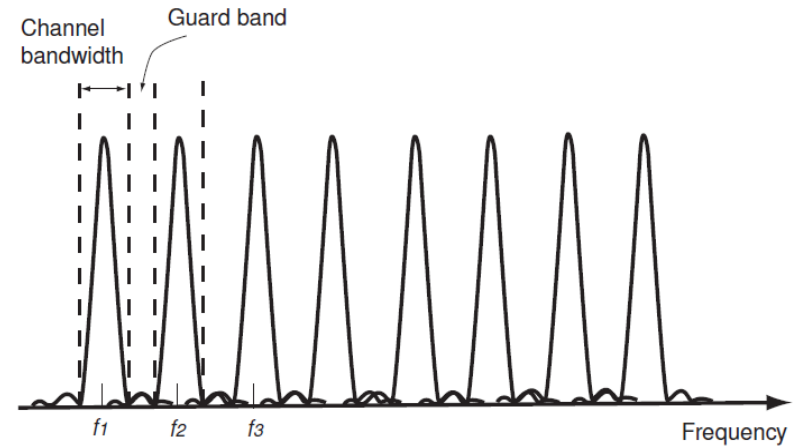


# FDM/TDM structure in 4G

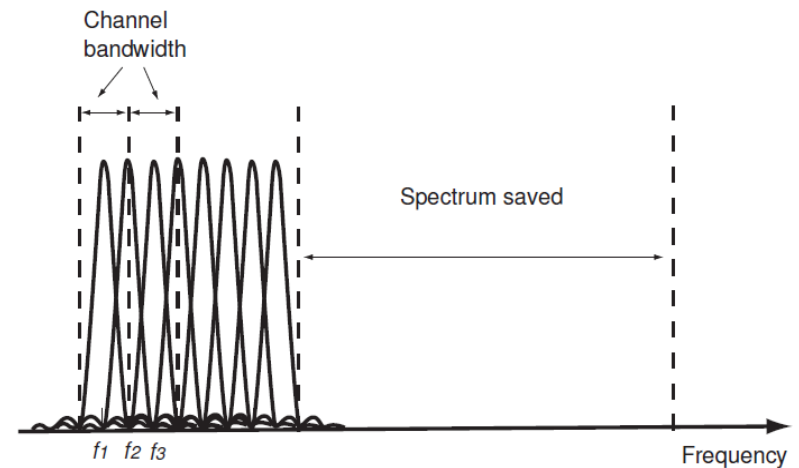


# OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

- Divides spectrum into many small, **partially overlapping** subcarriers
- Subcarrier frequencies “orthogonal” to each other
- Traditional FDM does not allow overlapping

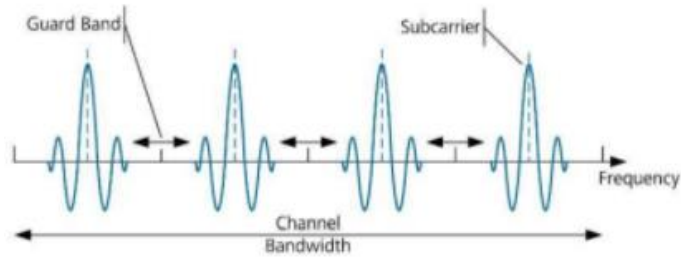


(a) Normal frequency division multiplexing

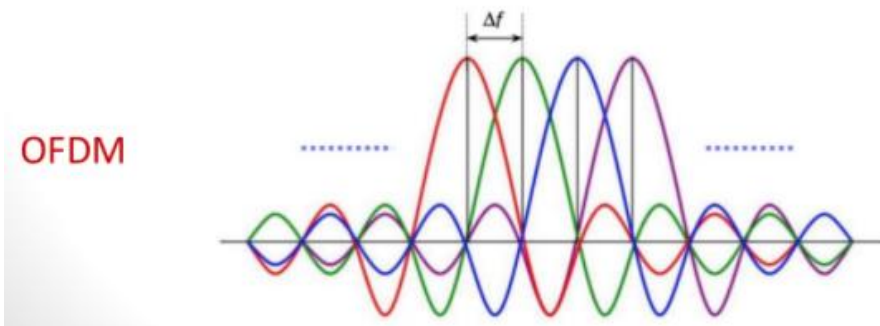


(b) OFDM

# OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

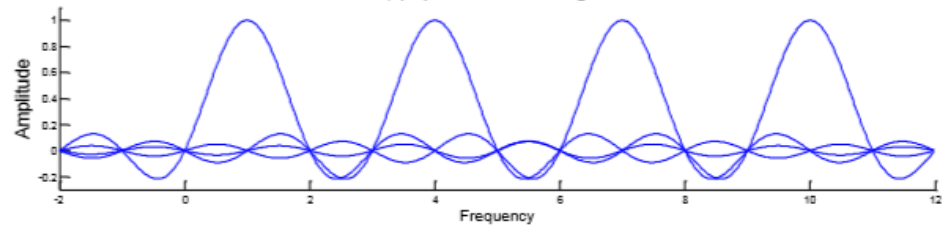


Frequency  
Division  
Multiplexing

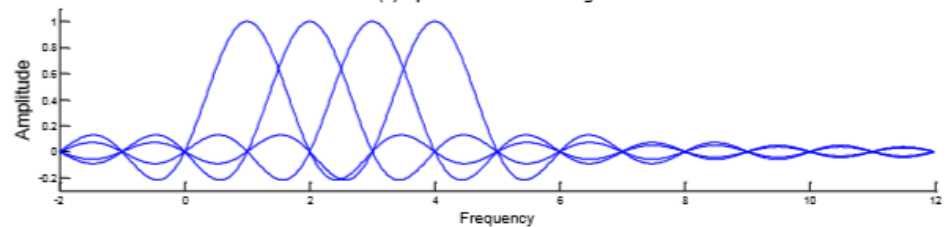


OFDM

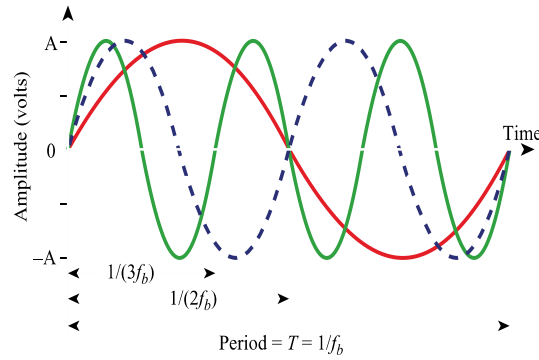
(a) Spectrum for FDM signal



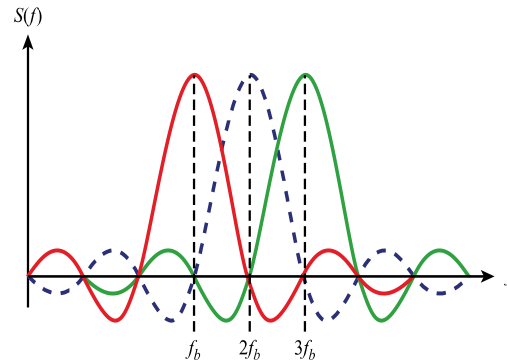
(b) Spectrum for OFDM signal



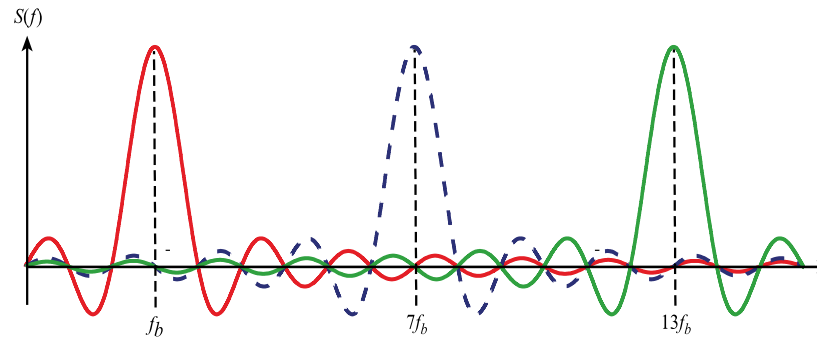
# OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing



(a) Three subcarriers in time domain



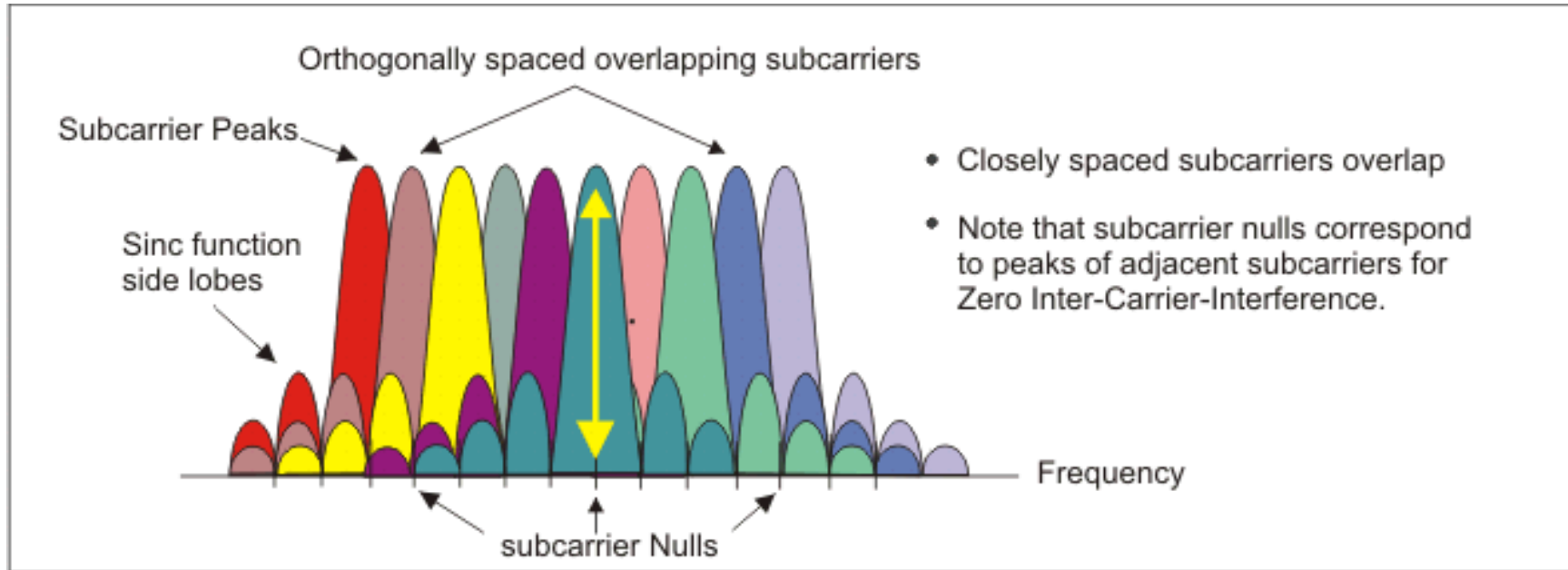
(b) Three orthogonal subcarriers in frequency domain



(c) Three carriers using traditional FDM

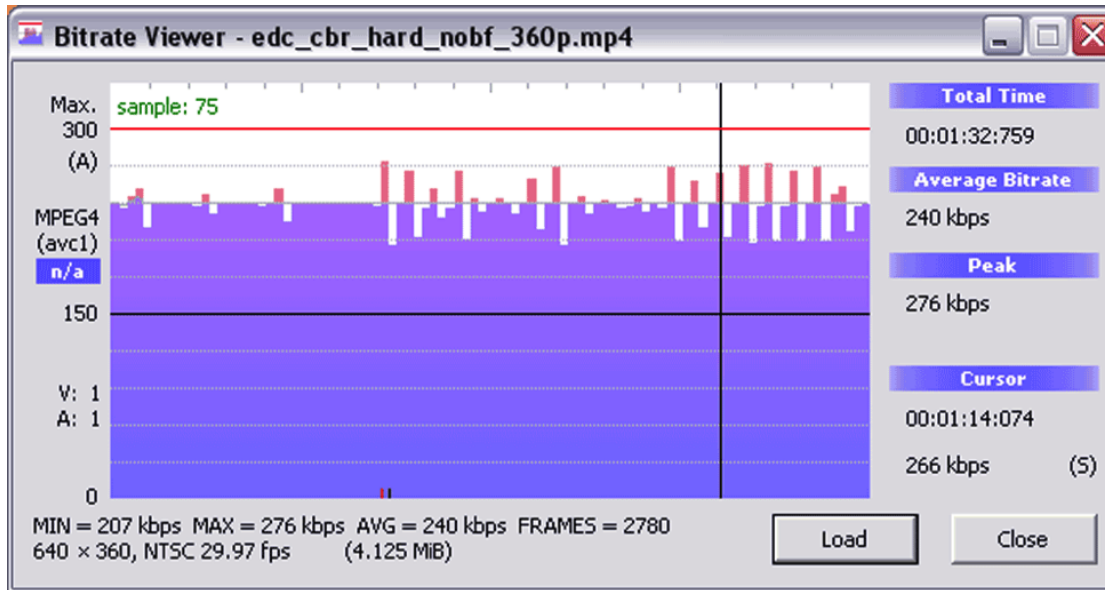


# OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

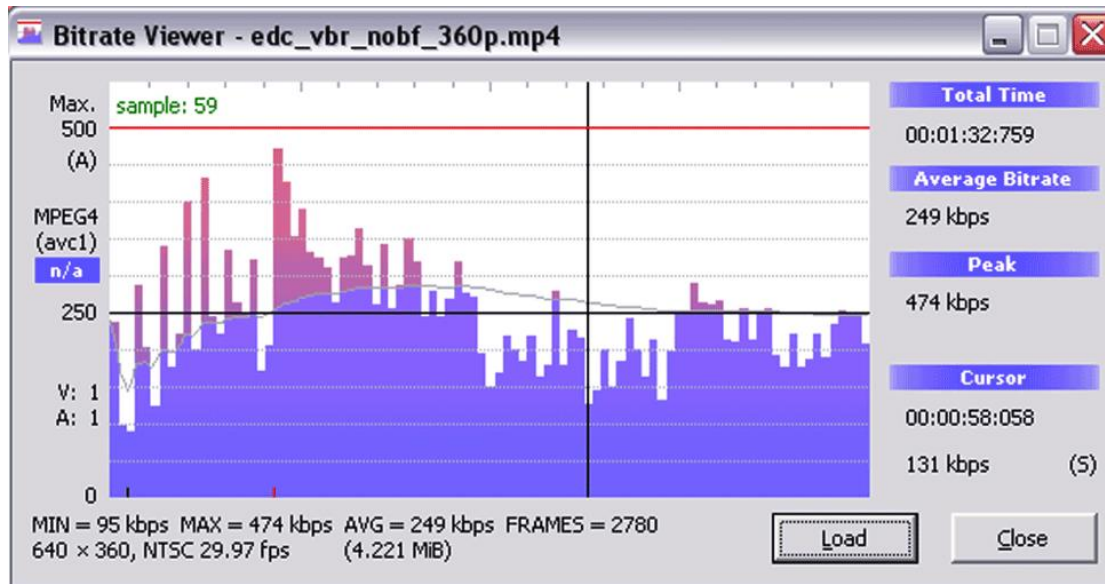


OFDM Signal Frequency Spectra

# Constant / Variable Bit Rate



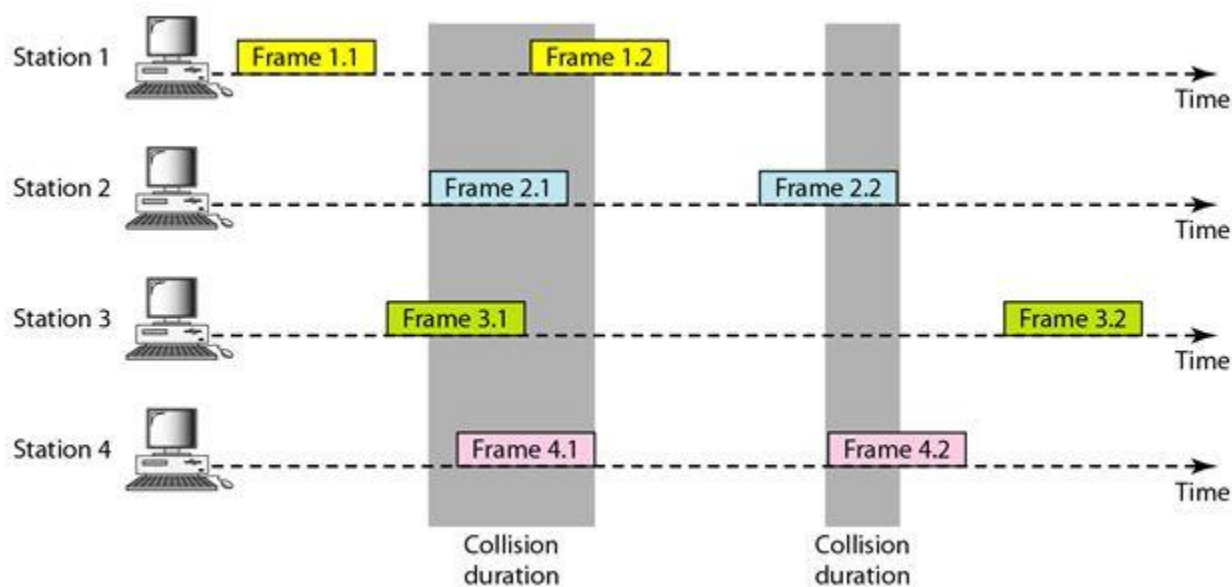
**CBR**



**VBR**

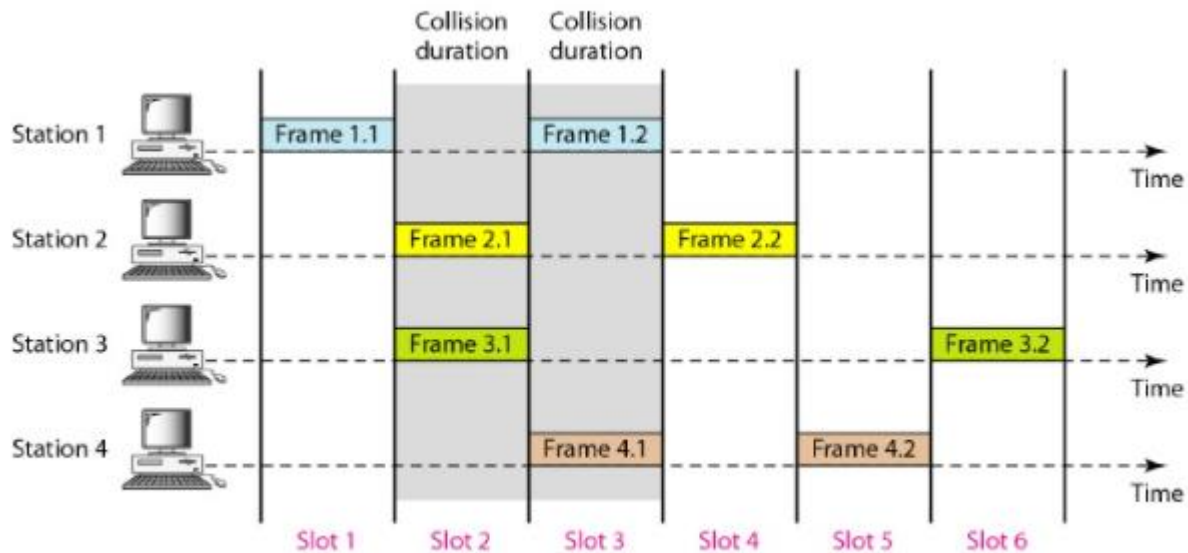
# ALOHA (Καθαρό - Pure)

- Συνεχής χρόνος, μετάδοση οποιαδήποτε χρονική στιγμή
- Δεν υπάρχει συγχρονισμός και ο κάθε κόμβος ξεκινά τη μετάδοση αμέσως μόλις δεχτεί το πακέτο στην ουρά του (άφιξη πακέτου)
- Εάν υπάρξει σύγκρουση το πακέτο επαναμεταδίδεται μετά από τυχαίο χρονικό διάστημα

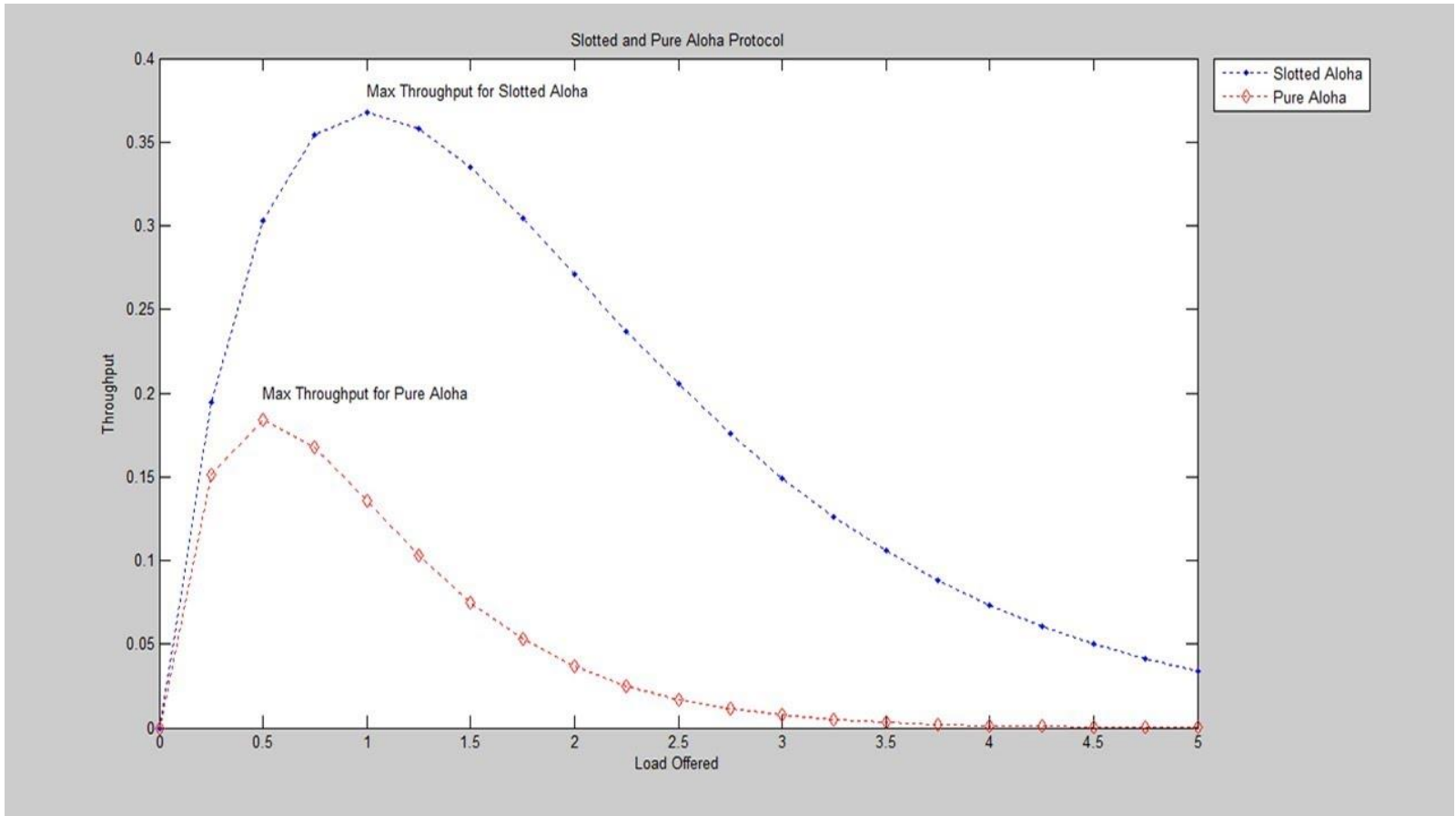


# Τεμαχισμένο ALOHA (Slotted)

- Σταθερό μέγεθος πακέτων
- Χρόνος μετάδοσης πακέτου = μέγεθος χρονοθυρίδας (slot)
- Κάθε πακέτο μεταδίδεται στην πρώτη χρονοθυρίδα μετά την άφιξη του
- Απαιτείται συγχρονισμός
- Σε περίπτωση σύγκρουσης η μετάδοση επαναλαμβάνεται μετά από τυχαίο αριθμό χρονοθυρίδων



# Ρυθμαπόδοση (Throughput)



# Κριτική του ALOHA

- Ασταθής συμπεριφορά : ένα πακέτο μπορεί να έχει υψηλή ή χαμηλή καθυστέρηση για την ίδια Ρυθμαπόδοση (S)
- Έχει σχετικά μικρή ρυθμαπόδοση (ικανότητα) = 18% ή 36%
- ΑΛΛΑ
  - ◆ Είναι πολύ απλό στην υλοποίηση
  - ◆ Έχει χαμηλή καθυστέρηση για χαμηλή κίνηση
  - ◆ Η καθυστέρηση είναι ανεξάρτητη από τον συνολικό πληθυσμό των κόμβων

# Πολλαπλή Προσπέλαση Ανίχνευσης Φέροντος (CSMA)

- Ένας κόμβος **μπορεί να ακούσει** αν άλλοι κόμβοι μεταδίδουν ύστερα από ένα χρονικό διάστημα
- Εφόσον οι κόμβοι μπορούν να ακούσουν μεταδόσεις άλλων, μπορούν να **αναβάλουν τη μετάδοσή τους**, ώστε να αποφύγουν μια βέβαιη σύγκρουση
- **Δεν αποφεύγονται όλες οι συγκρούσεις** εξαιτίας της αργοπορημένης ανίχνευσης μετάδοσης (καθυστέρηση διάδοσης σήματος)

# CSMA ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ

## Μη-επίμονο (Non-persistent) CSMA

- Πακέτα που φθάνουν σε μια ανεκμετάλλευτη χρονοθυρίδα, μεταδίδονται στην επόμενη χρονοθυρίδα
- Εάν η χρονοθυρίδα άφιξης του πακέτου είναι απασχολημένη, ξανασχεδιάζουμε τη μετάδοση μετά από τυχαίο χρόνο (προσποιούμαστε ότι υπήρξε σύγκρουση)
- Καλή ρυθμαπόδοση
- Καλό μοίρασμα της κίνησης στο χρόνο
- Η καθυστέρηση αυξάνεται εξαιτίας του μη-επίμονου



# CSMA ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ

## (συνέχεια)

### 1-επίμονο (1-persistent) CSMA

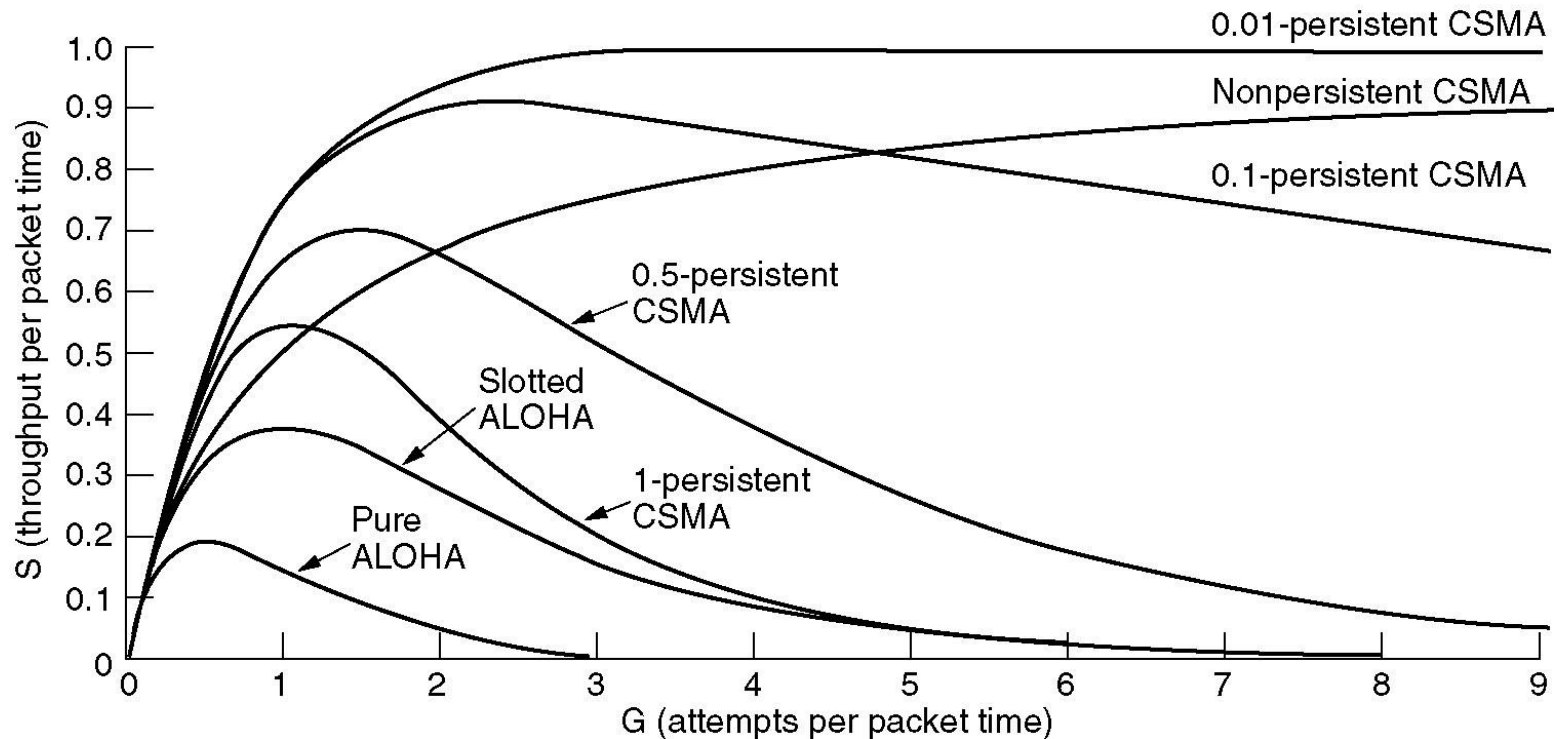
- Εάν υπάρχει ανεκμετάλλευτη χρονοθυρίδα μεταδίδονται τα πακέτα στην επόμενη
- Εάν η χρονοθυρίδα είναι απασχολημένη περιμένουμε μέχρι να γίνει αδρανής και μεταδίδουμε στην επόμενη
- Καλή καθυστέρηση σε χαμηλή κίνηση
- Όχι και τόσο καλή μέγιστη ρυθμαπόδοση
- Στο τέλος της τρέχουσας μετάδοσης μπορεί να συγκεντρωθεί μεγάλη κίνηση

# CSMA ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ (συνέχεια)

## P-επίμονο (p-persistent) CSMA

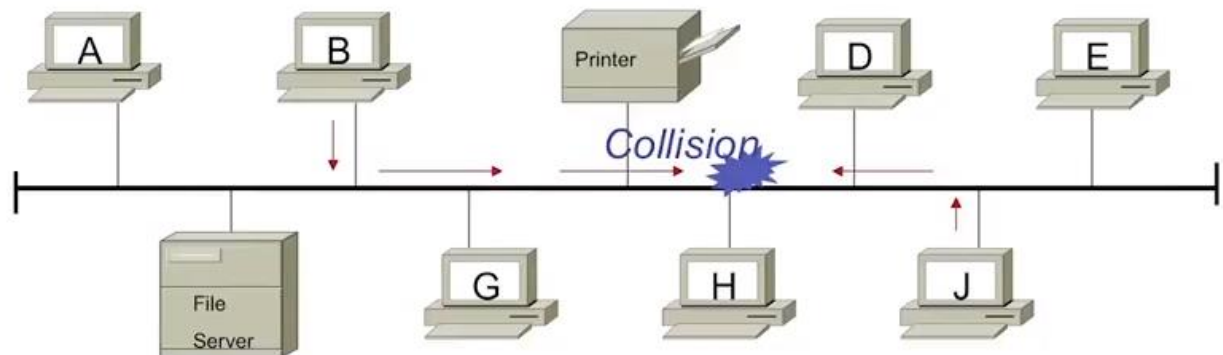
- Εφαρμόζεται σε κανάλια χρονοθυρίδων.
- Όταν ένας κόμβος επιθυμεί να εκπέμψει ένα πακέτο, ελέγχει αν η τρέχουσα θυρίδα είναι διαθέσιμη.
- Αν είναι, εκπέμπει στην επόμενη με πιθανότητα  $p$ , ενώ με πιθανότητα  $1-p$  επαναλαμβάνει τη διαδικασία στην επόμενη χρονοθυρίδα
- Αν εν τω μεταξύ κάποιος άλλος μεταδώσει, λειτουργεί σα να συνέβει σύγκρουση (περιμένει τυχαίο αριθμό χρονοθυρίδων και ξαναπροσπαθεί)

# A comparison of simple protocols



# Πολλαπλή Προσπέλαση Ανίχνευσης Φέροντος Με Ανίχνευση Σύγκρουσης(CSMA/CD)

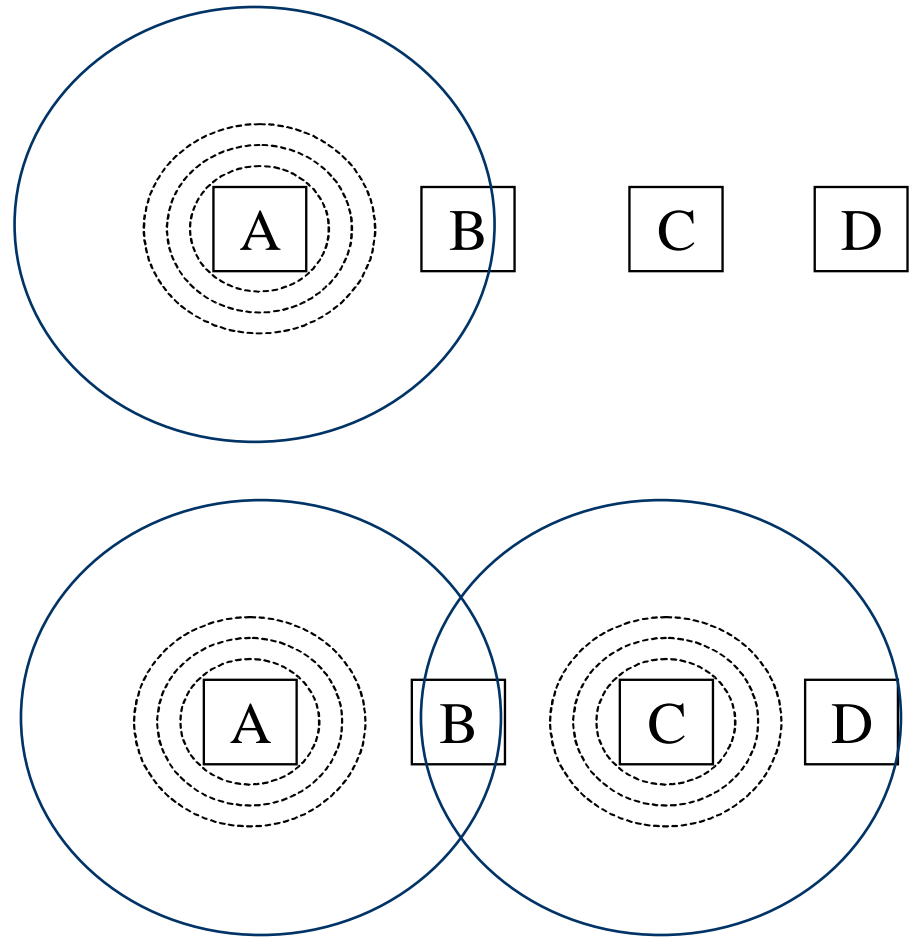
- κάθε κόμβος μπορεί να ακούσει το μέσο πριν μεταδώσει και οι φυσικές ιδιότητες του μέσου επιτρέπουν σε ένα κόμβο να ακούει το κανάλι ενώ μεταδίδει
- δύσκολο να εφαρμοστεί σε ασύρματες μεταδόσεις
- αμέσως μόλις ο κόμβος ανιχνεύσει την σύγκρουση:
  - εγκαταλείπει τη μετάδοση
  - περιμένει τυχαίο χρονικό διάστημα πριν ξαναπροσπαθήσει
- Χρησιμοποιείται στο Ethernet



Bus Topology - Ethernet

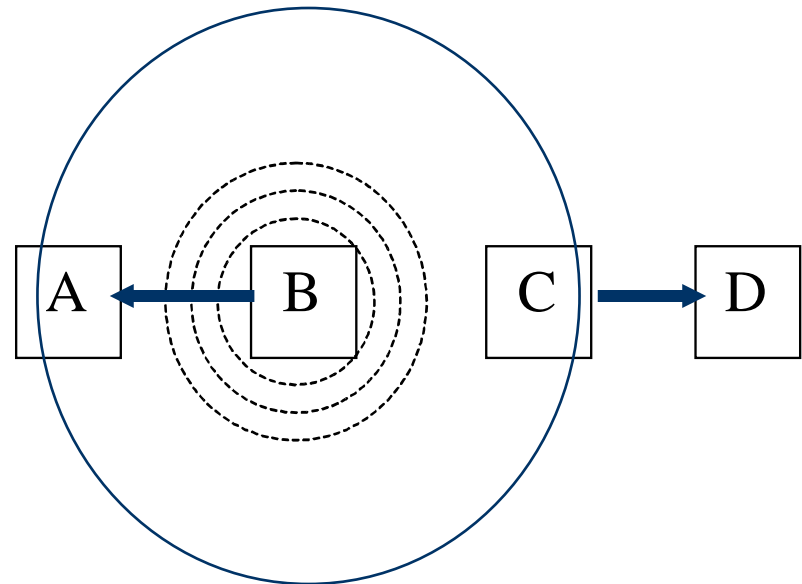
# Το Πρόβλημα του Κρυμμένου Σταθμού

- 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 ad-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 εκπέμψει.



# Δίκτυα τύπου IEEE 802.11

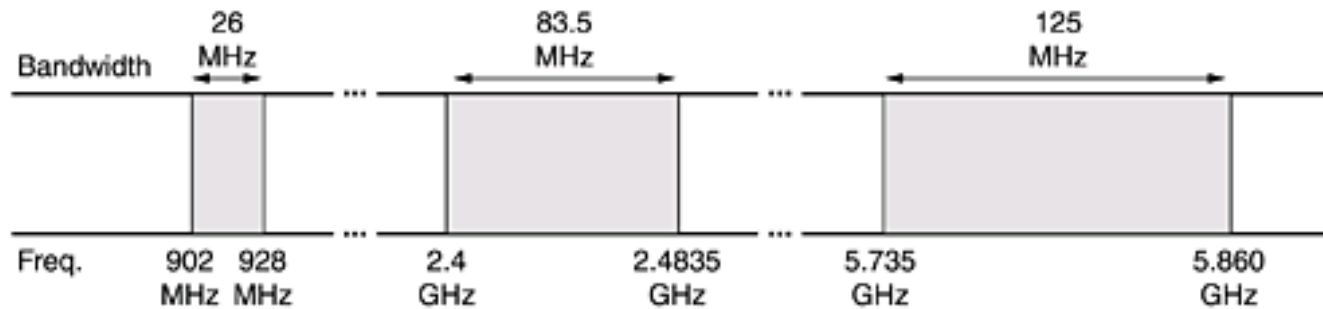


# Εισαγωγή

- Το 1997 η IEEE υιοθέτησε το πρότυπο IEEE Std. 802.11-1997 για ασύρματη τοπική μετάδοση στην ISM μπάντα.
- Το πρότυπο ορίζει τα επίπεδα MAC και PHY για ασύρματα τοπικά περιβάλλοντα.
- Το βασικό **802.11** προσφέρει 2Mbps στα 2,4GHz ('97).
- Η επέκταση **802.11b** προσφέρει 11Mbps στα 2,4GHz ('99).
- Η επέκταση **802.11a** προσφέρει 54Mbps στα 5GHz ('99) μέσω χρήσης OFDM.
- Η επέκταση **802.11g** προσφέρει 54Mbps στα 2,4GHz ('02) μέσω χρήσης OFDM.
- Η επέκταση **802.11n** προσφέρει μέχρι 600Mbps στα 2,4/5GHz μέσω χρήσης MIMO.

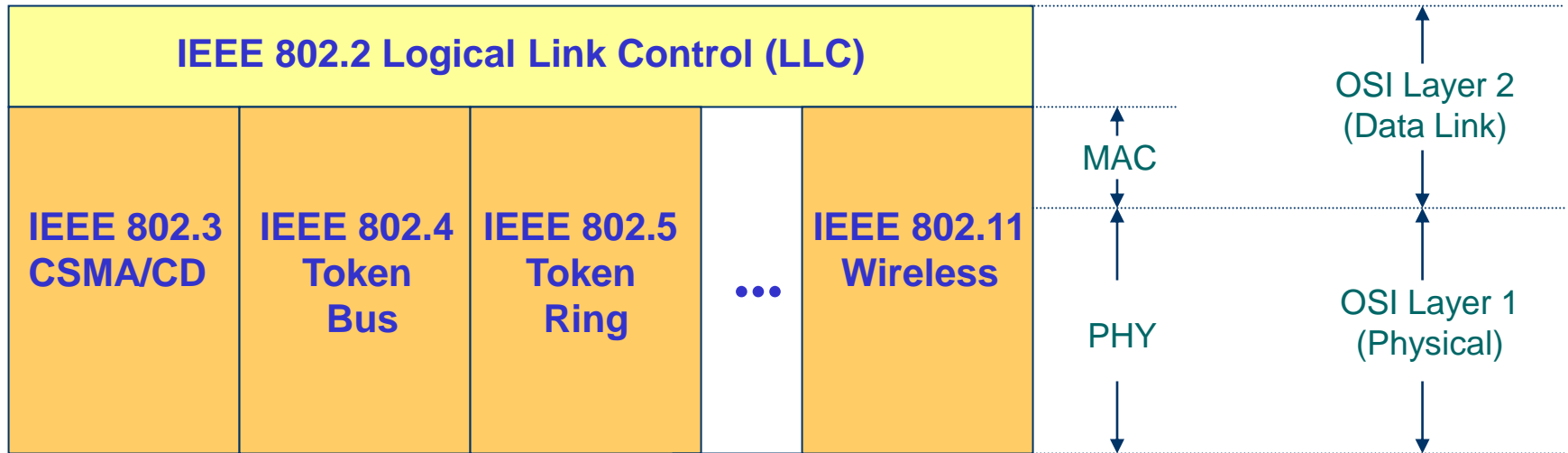


# ISM Band (Industrial Scientific Medical)



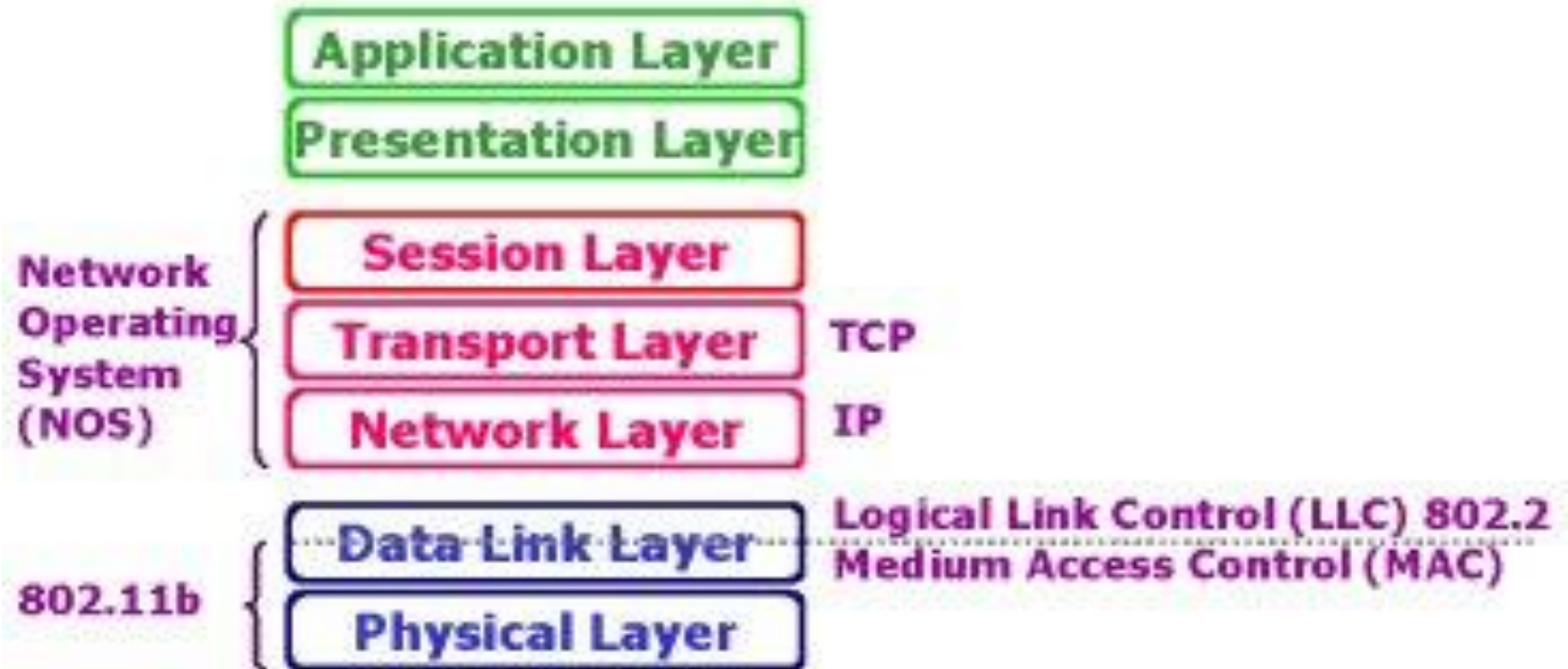
- Ελεύθερη προς χρήση χωρίς άδεια
- Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο από τα WLANs

# Η οικογένεια προτύπων 802.x

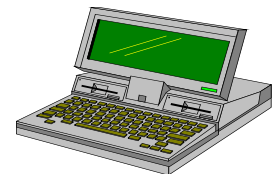
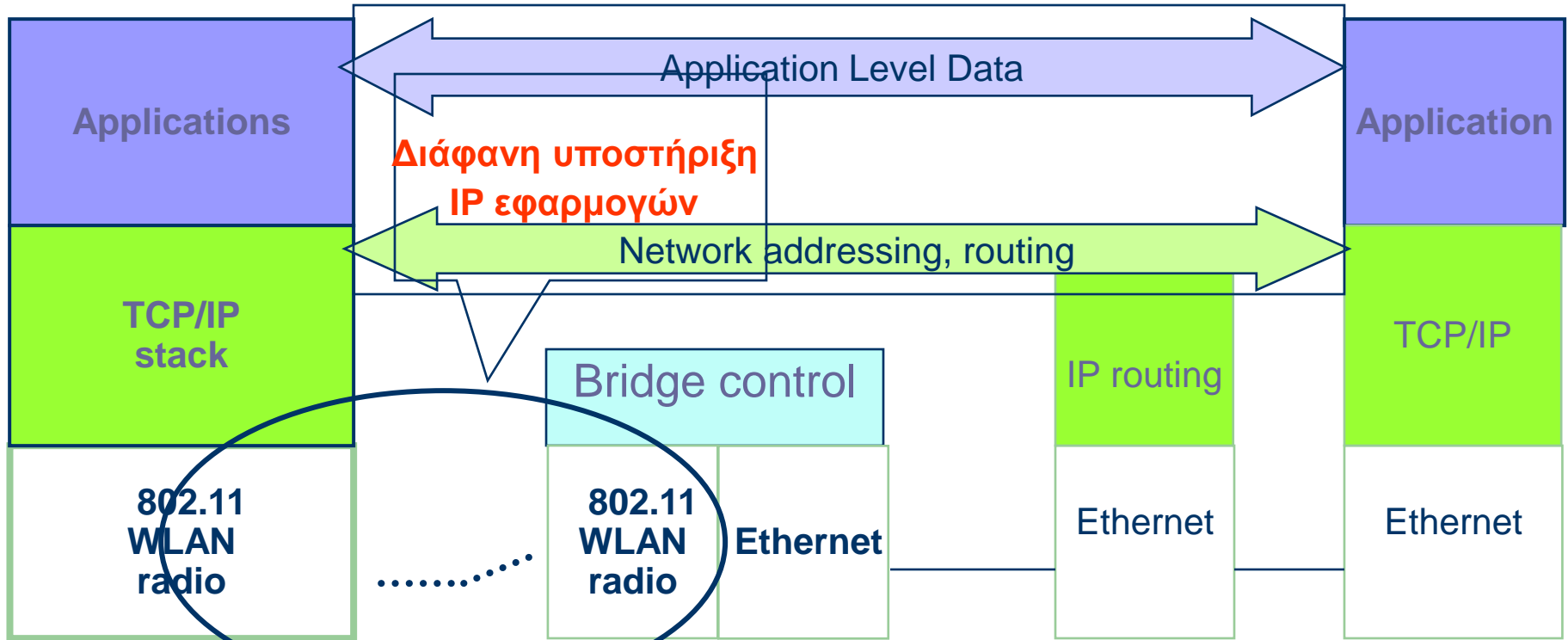


# Το 802.11 στη στοίβα OSI

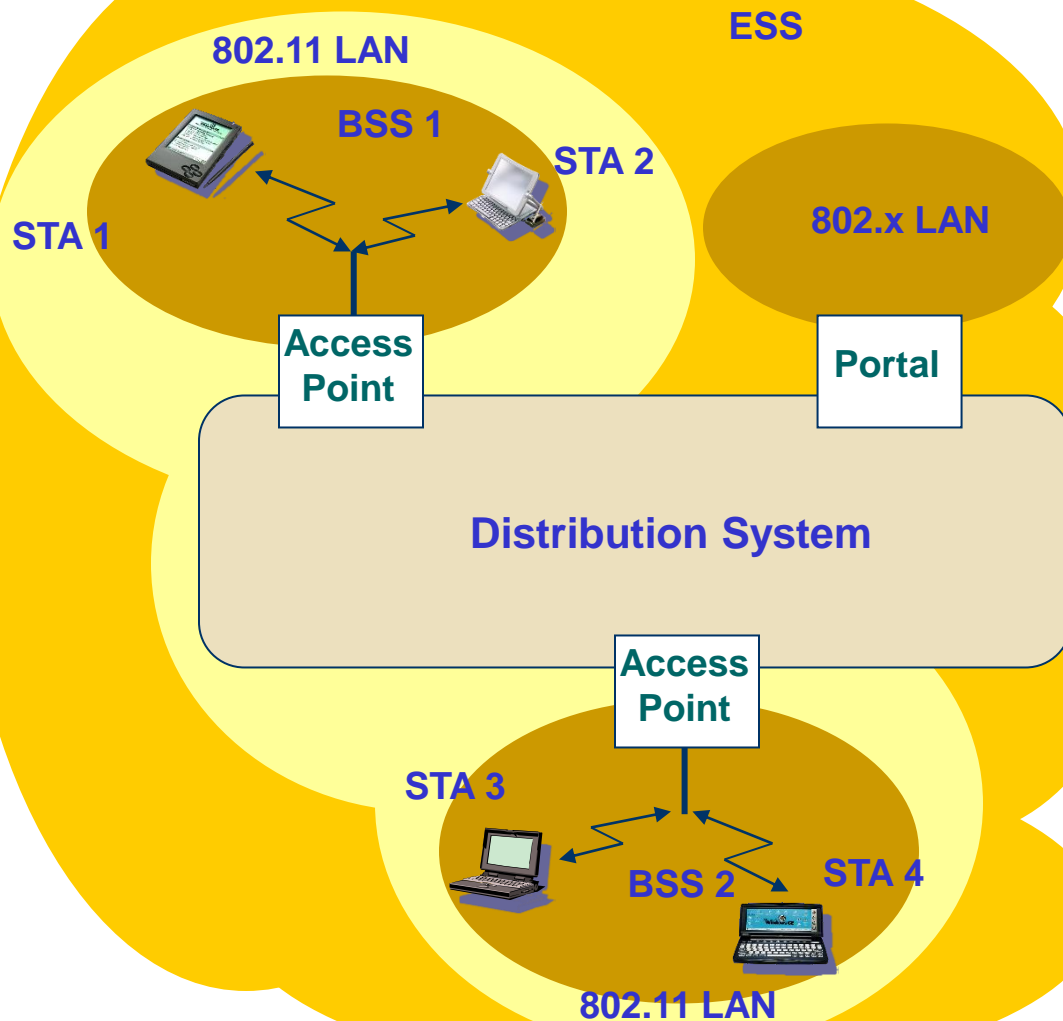
## OSI Reference Model



# 802.11 – Ασύρματη Επέκταση του Ethernet



# 802.11 Με Υποδομή



## Station (STA) - Σταθμός

τερματικό με μηχανισμούς πρόσβασης στο ασύρματο μέσο και δυνατότητα επικοινωνίας με το Access Point

## Basic Service Set (BSS)

ομάδα σταθμών που χρησιμοποιούν την ίδια ραδιο-συχνότητα

## Access Point – Σημείο Πρόσβασης

σταθμός ο οποίος επικοινωνεί τόσο με το ασύρματο τοπικό δίκτυο, όσο και με το σύστημα διανομής (distribution system)

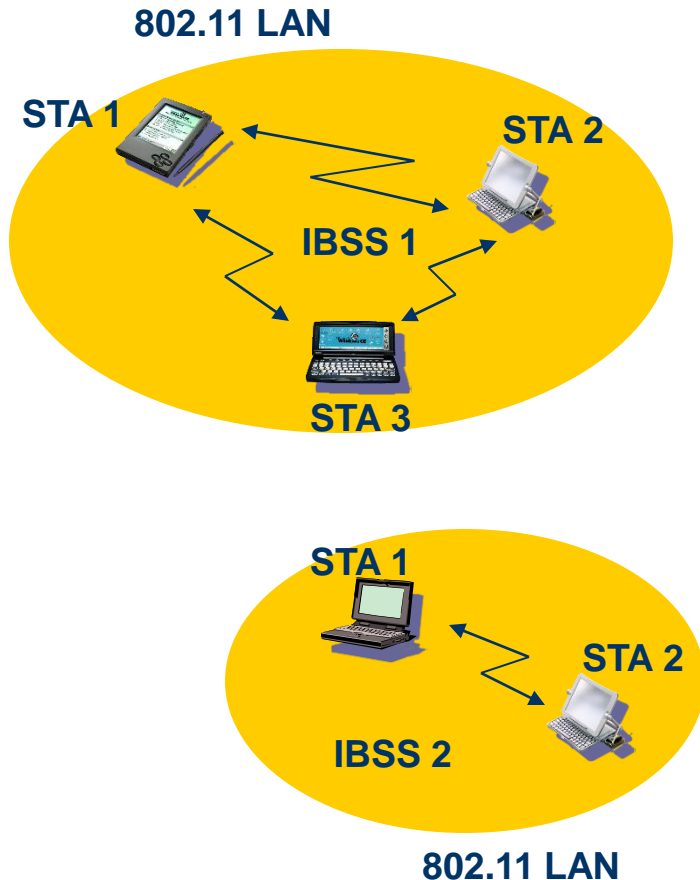
## Portal

γέφυρα μεταξύ του συστήματος διανομής και εξωτερικών δικτύων

## Distribution System – Σύστημα Διανομής

δίκτυο διασύνδεσης πολλών BSS σε ένα ESS (Extended Service Set)

# 802.11 Χωρίς Υποδομή (Ad-Hoc)



## Station (STA)

τερματικό με μηχανισμούς πρόσβασης στο ασύρματο μέσο

## Independent Basic Service Set (IBSS)

ομάδα σταθμών που χρησιμοποιούν την ίδια ραδιο-συχνότητα, χωρίς την παρεμβολή σημείου πρόσβασης

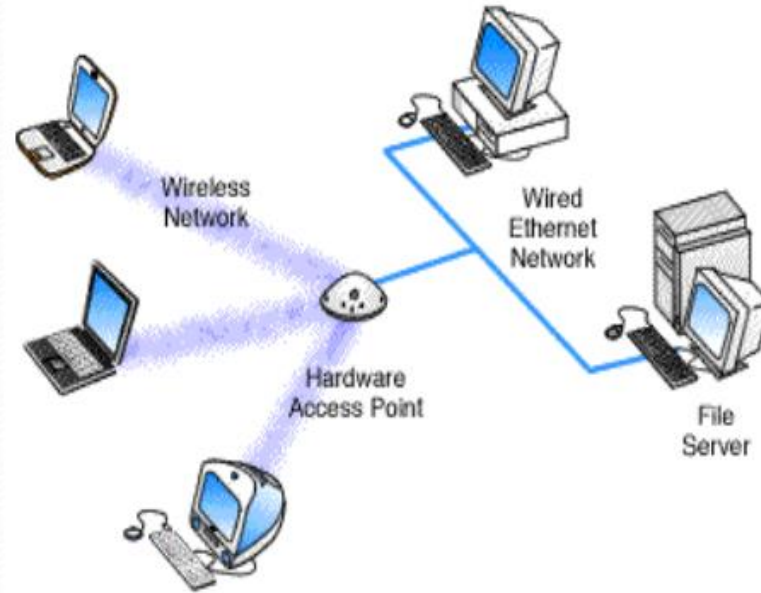
# Δύο Τρόποι Λειτουργίας

## Ad-Hoc versus Infrastructure Mode

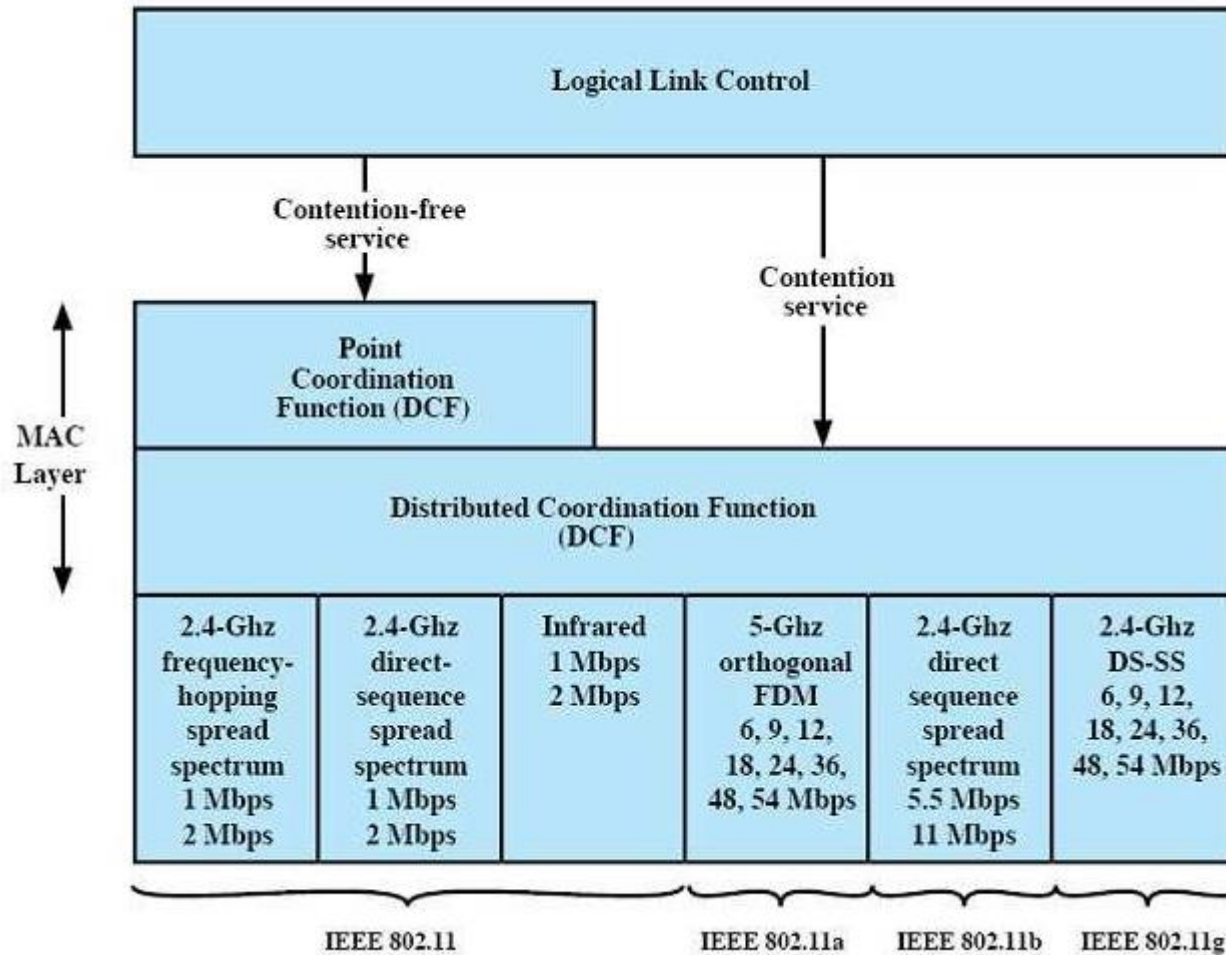
**Ad-Hoc** Mode  
(IBSS)



**Infrastructure** Mode  
(BSS)



# Protocol stack of 802.11

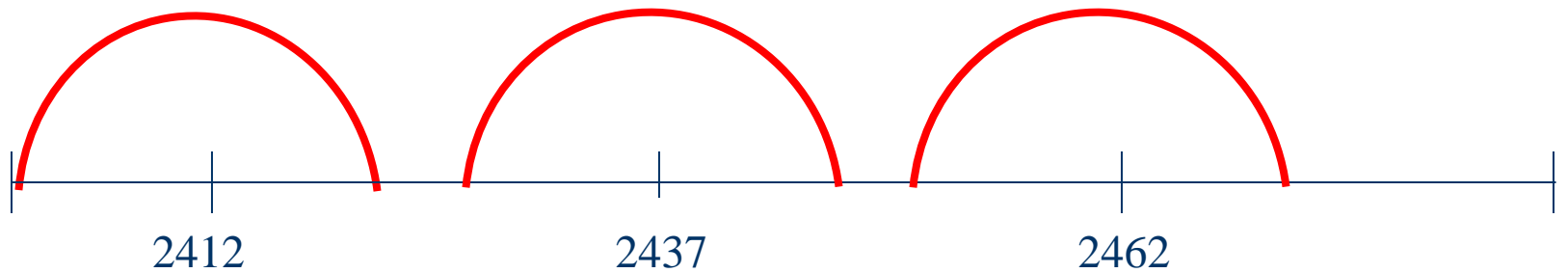




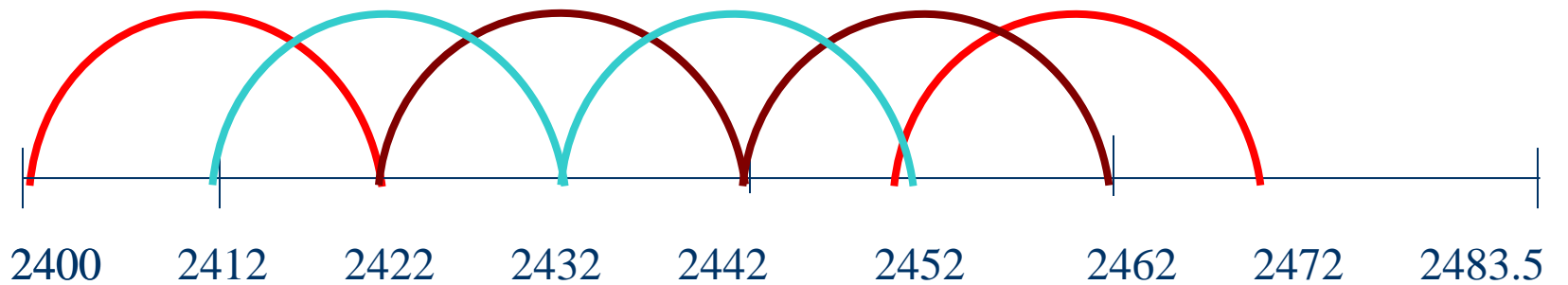
# 802.11b Κανάλια μετάδοσης

- Το PHY του 802.11b έχει 14 κανάλια, με εύρος 22MHz το καθένα τοποθετημένα 5MHz το ένα από το άλλο
- Το Κανάλι 1 βρίσκεται γύρω από τα 2.412 GHz, το Κανάλι 2 γύρω από τα 2.417 GHz, κ.ο.κ., μέχρι το Κανάλι 14 που βρίσκεται γύρω από τα 2.477 GHz
- 3 μη αλληλο-επικαλυπτόμενα κανάλια

Μη αλληλο-επικαλυπτόμενα κανάλια

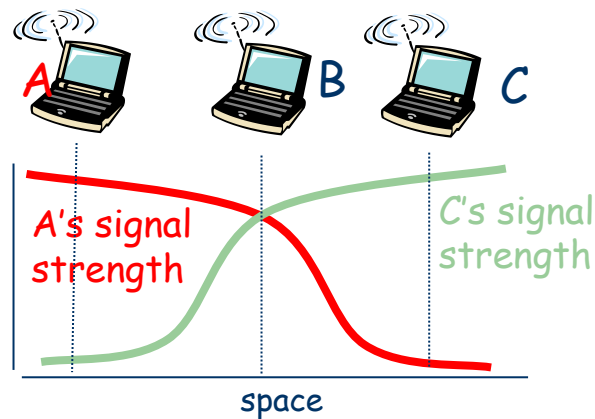
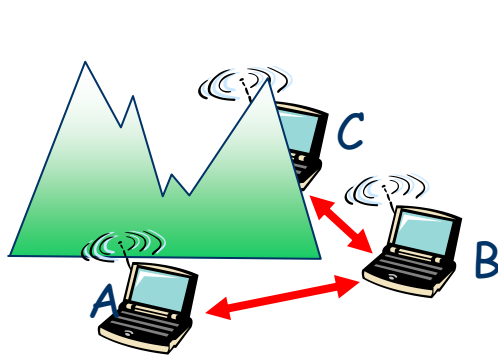


Αλληλο-επικαλυπτόμενα κανάλια



# IEEE 802.11: multiple access

- avoid collisions: 2+ nodes transmitting at same time
- 802.11: CSMA - sense before transmitting
  - don't collide with ongoing transmission by other node
- 802.11: *no collision detection!*
  - difficult to receive (sense collisions) when transmitting due to weak received signals (fading)
  - can't sense all collisions in any case: hidden terminal, fading
  - goal: *avoid collisions*: CSMA/C(ollision)A(voidance)



# Το MAC είναι υπεύθυνο για

- ✓ δέσμευση του καναλιού
- ✓ διευθυνσιοδότηση (addressing)
- ✓ δομή των πλαισίων μετάδοσης
- ✓ έλεγχο λαθών (επαναμεταδόσεις)
- ✓ fragmentation/reassembly

Τρία είδη πλαισίων:

- ✓ management (association, synchronization, authentication)
- ✓ control (acks, end of contention-free period)
- ✓ data

# Μέθοδοι Πρόσβασης

## Distributed Coordination Function

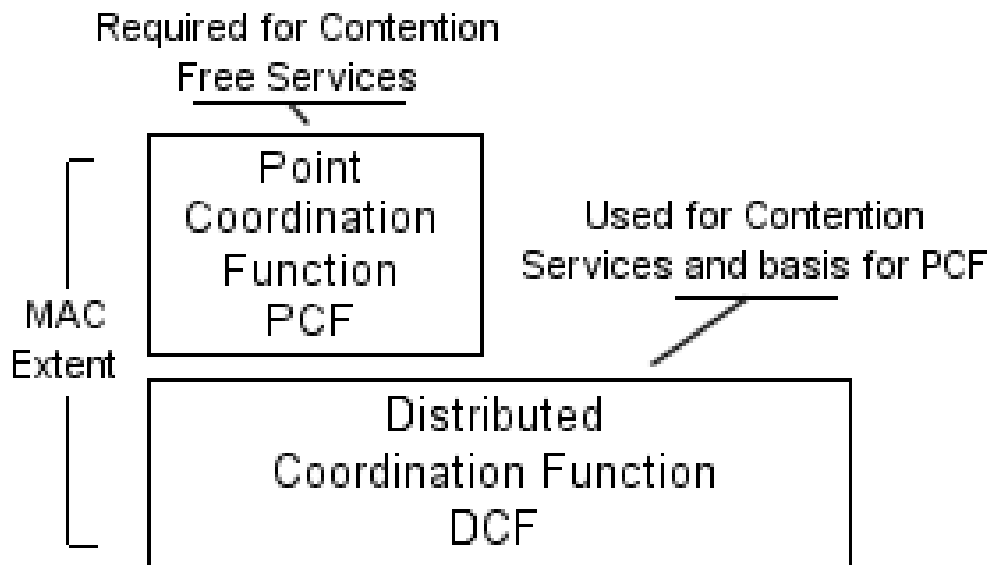
### (DCF)

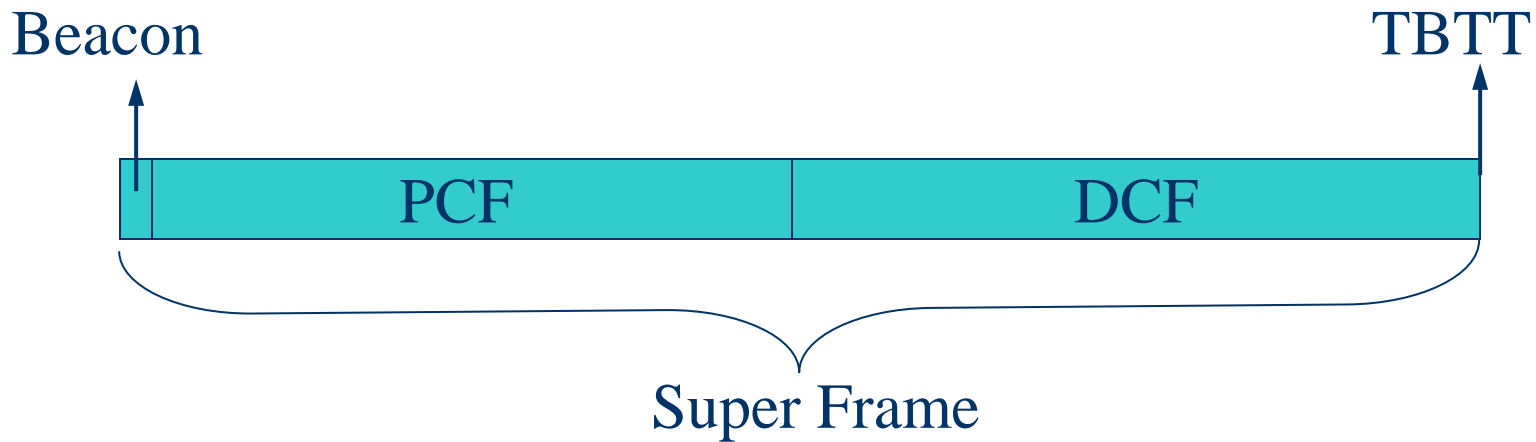
- υποχρεωτική
- η βασική μέθοδος πρόσβασης
- βασίζεται στον ανταγωνισμό για το μέσο (contention)

## Point Coordination Function (PCF)

- προαιρετική
- χωρίς ανταγωνισμό
- μειώνει τις μεταβολές στις καθυστερήσεις μετάδοσης

-μόνο στη δομημένη διάρθρωση (infrastructure mode)





**DCF** - Distributed Coordinated Function  
(**Contention Period** - *Ad-hoc Mode*)

**PCF** - Point Coordinated Function  
(**Contention Free Period** - *Infrastructure BSS*)

**Beacon** - Management Frame

Synchronization of Local timers

Delivers protocol related parameters (e.g., version)

TBTT (Target Beacon Transition Time)

# IEEE 802.11 MAC Protocol: CSMA/CA

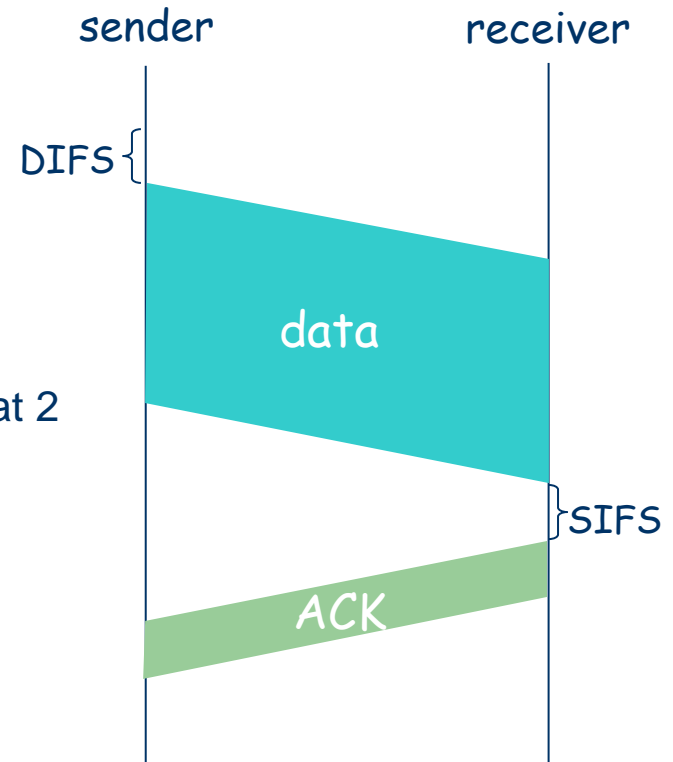
## 802.11 sender

- 1 if sense channel idle for **DIFS** then  
transmit entire frame (no CD)
- 2 if sense channel busy then  
start random backoff time  
timer counts down while channel idle  
transmit when timer expires  
if no ACK, increase random backoff interval, repeat 2

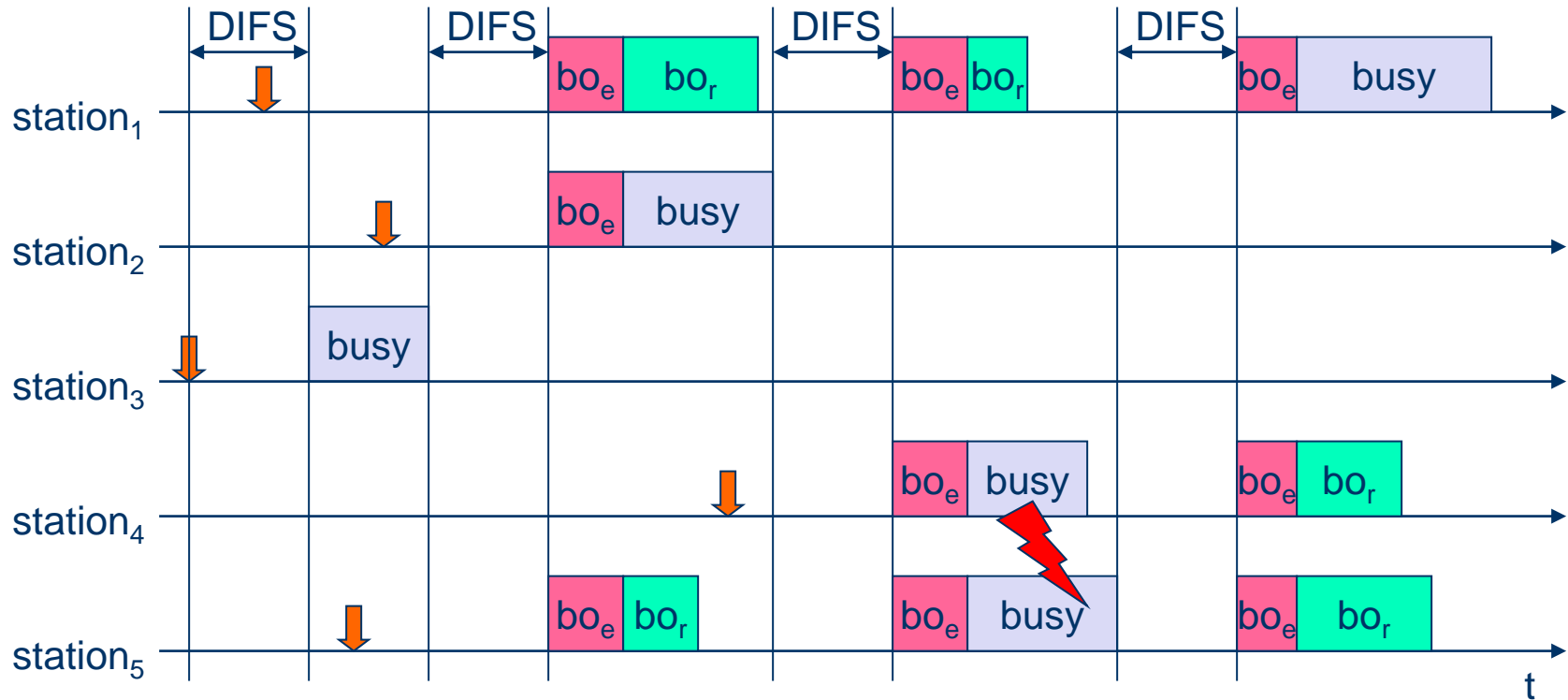
## 802.11 receiver

- if frame received OK  
return ACK after **SIFS** (ACK needed due to hidden terminal problem)

**SIFS < DIFS**



# 802.11 - competing stations - simple version



busy medium not idle (frame, ack etc.)

bo<sub>e</sub> elapsed backoff time

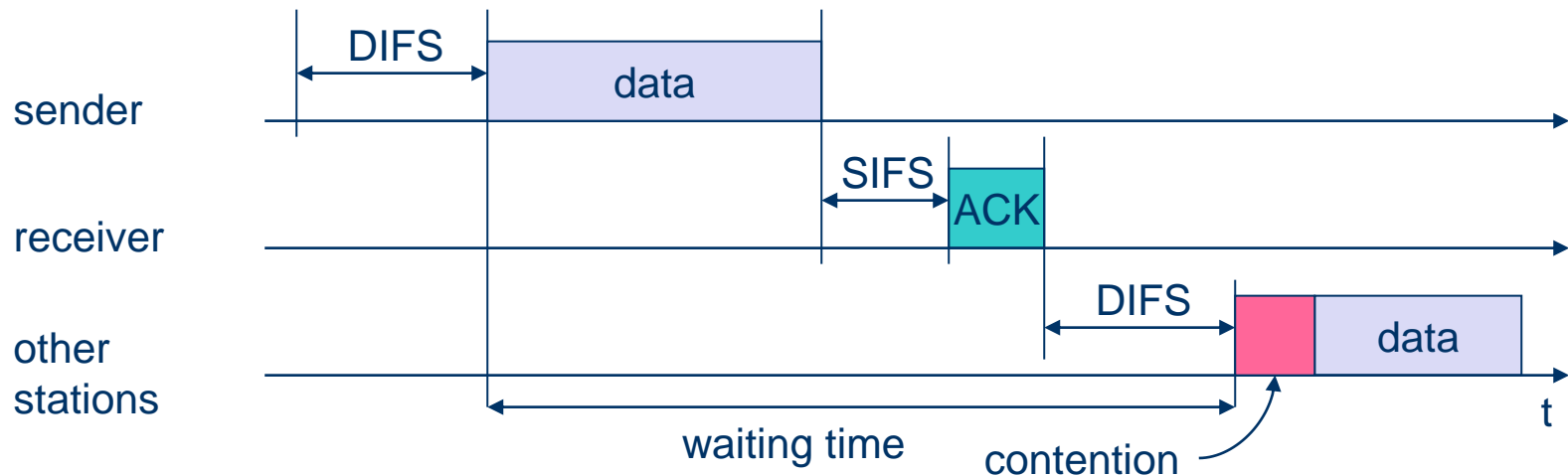
↓ packet arrival at MAC

bo<sub>r</sub> residual backoff time



# 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



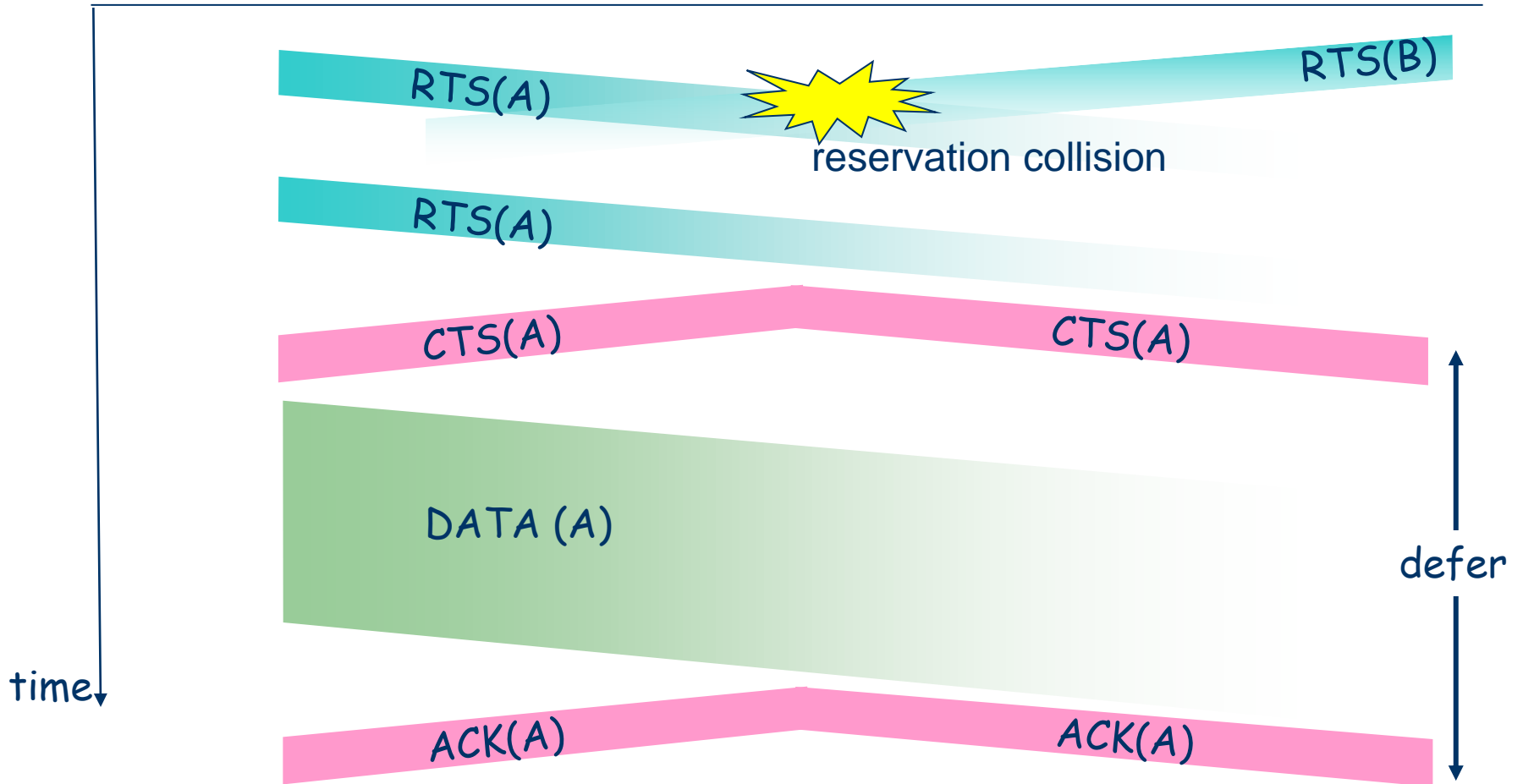
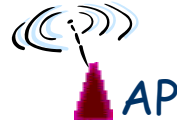
# Avoiding collisions (more)

*idea:* allow sender to “reserve” channel rather than random access of data frames:  
avoid collisions of long data frames

- sender first transmits *small* request-to-send (RTS) packets to BS using CSMA
  - RTSs may still collide with each other (but they’re short)
- BS broadcasts clear-to-send CTS in response to RTS
- CTS heard by all nodes
  - sender transmits data frame
  - other stations defer transmissions

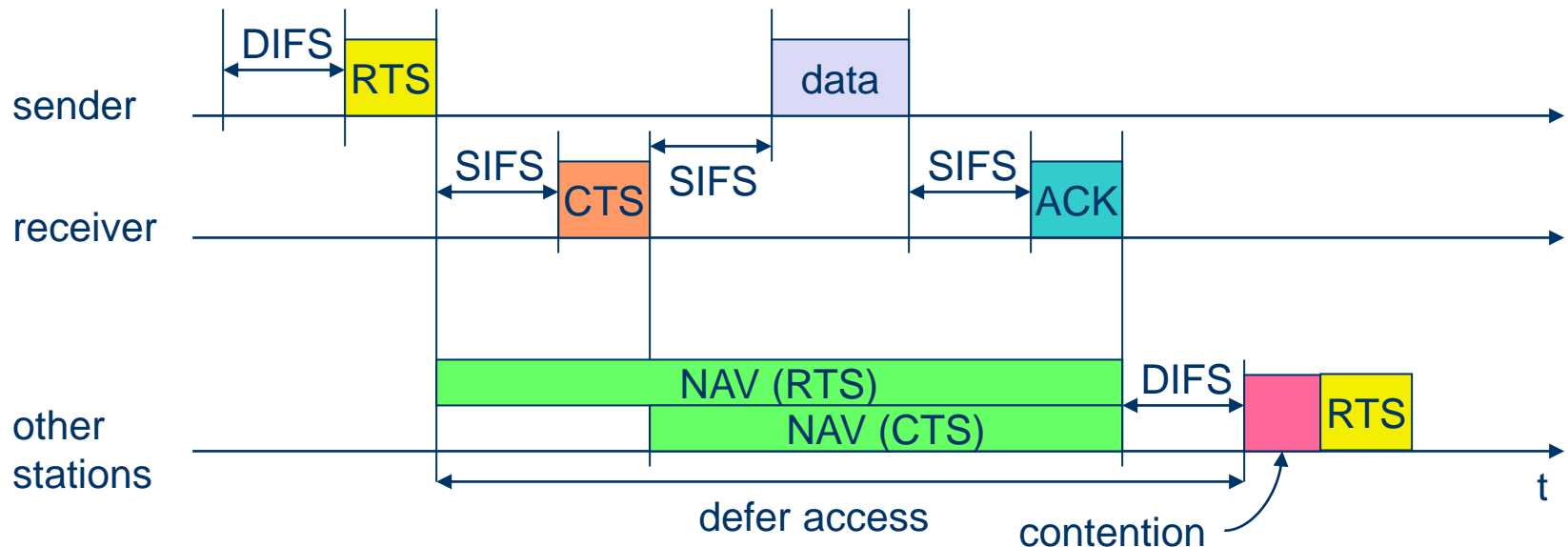
avoid data frame collisions completely  
using small reservation packets!

# Collision Avoidance: RTS-CTS exchange

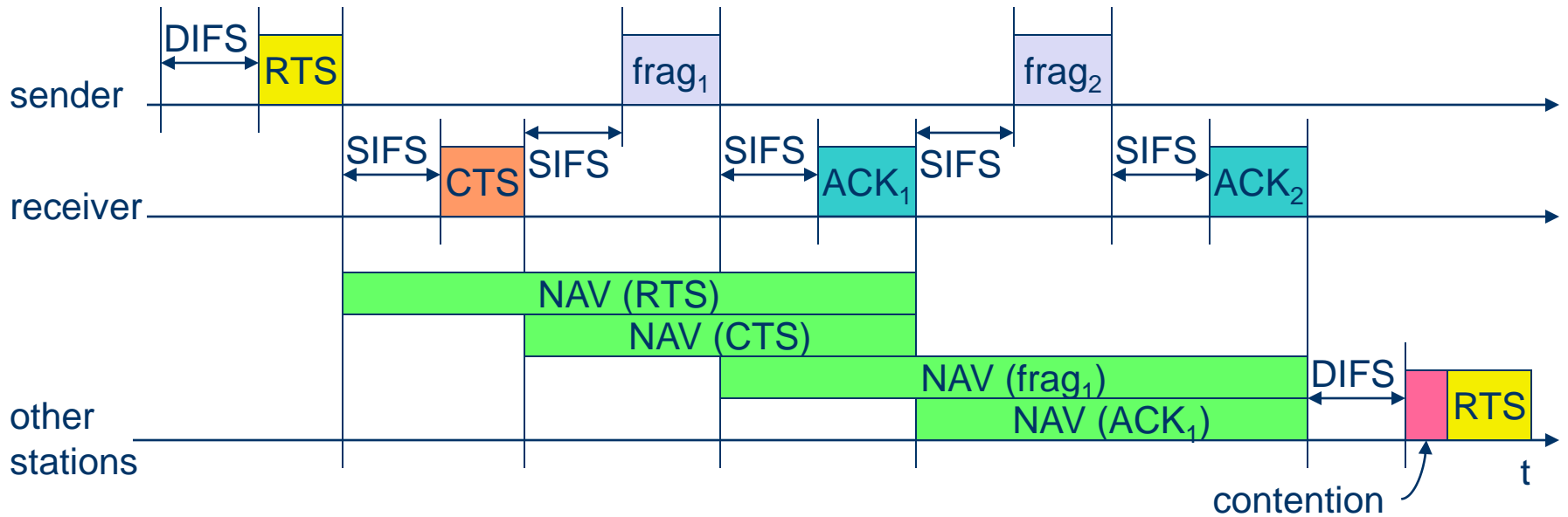


# Collision Avoidance: RTS-CTS exchange

- 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

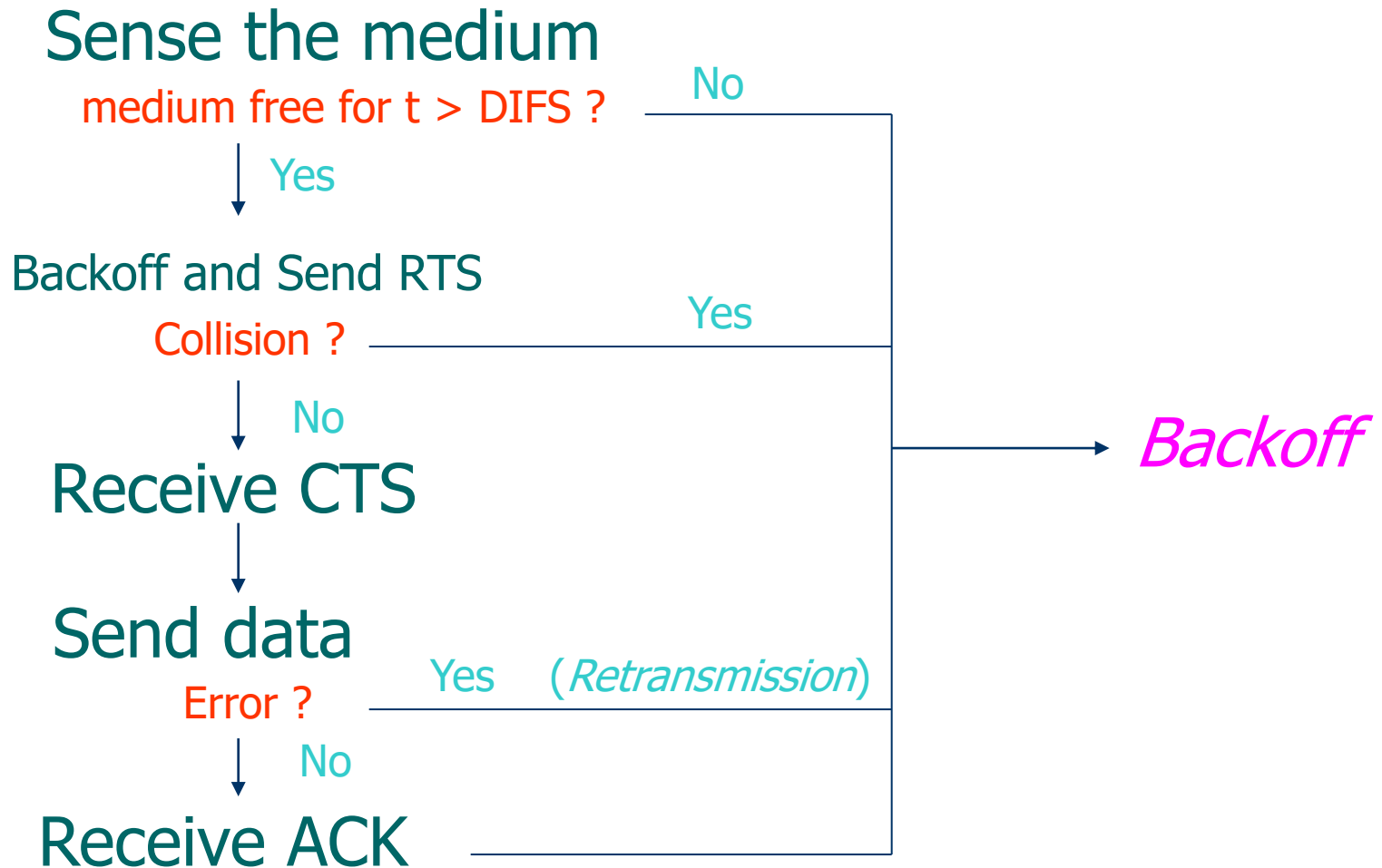


# Fragmentation



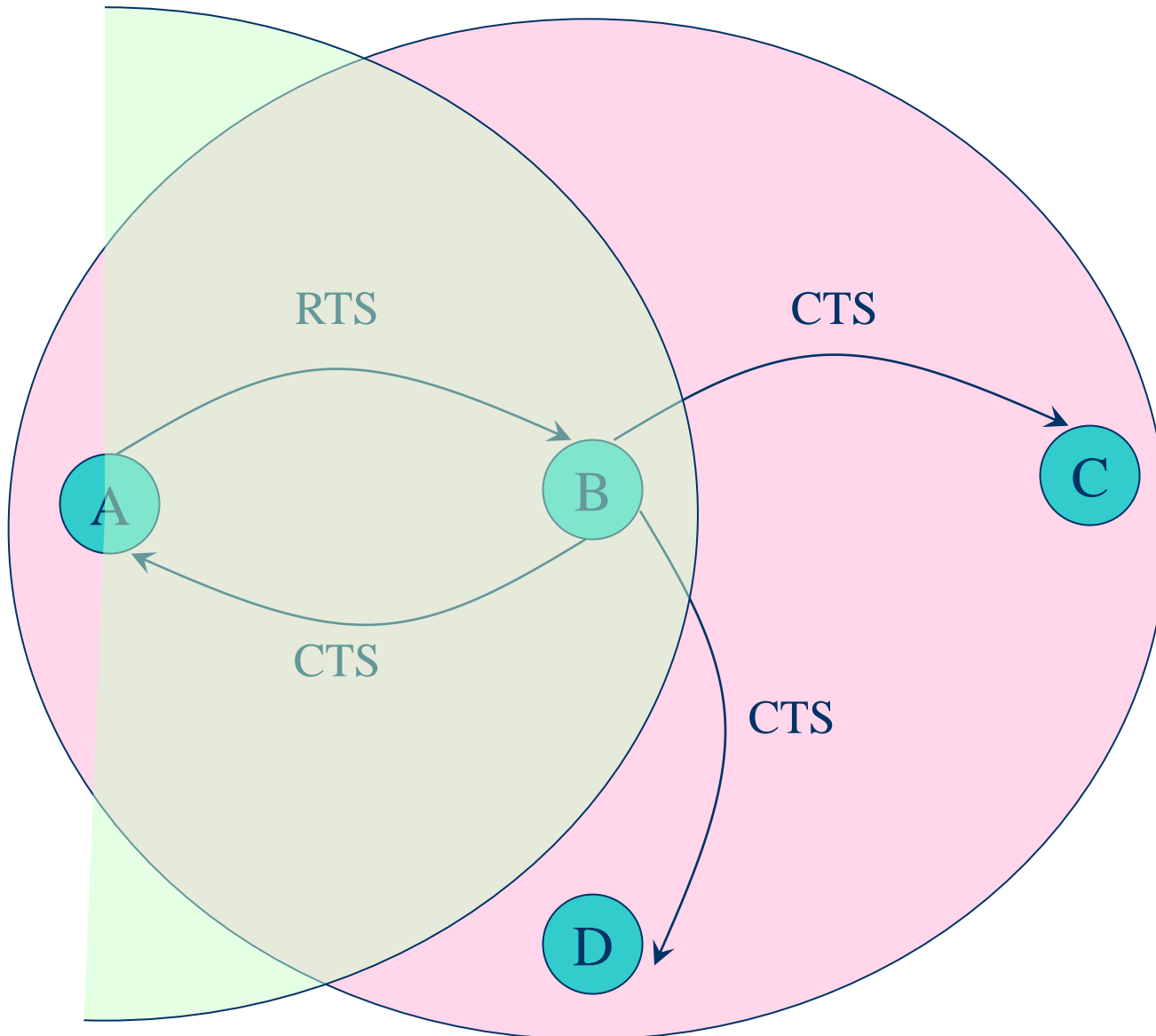
## Why fragment?

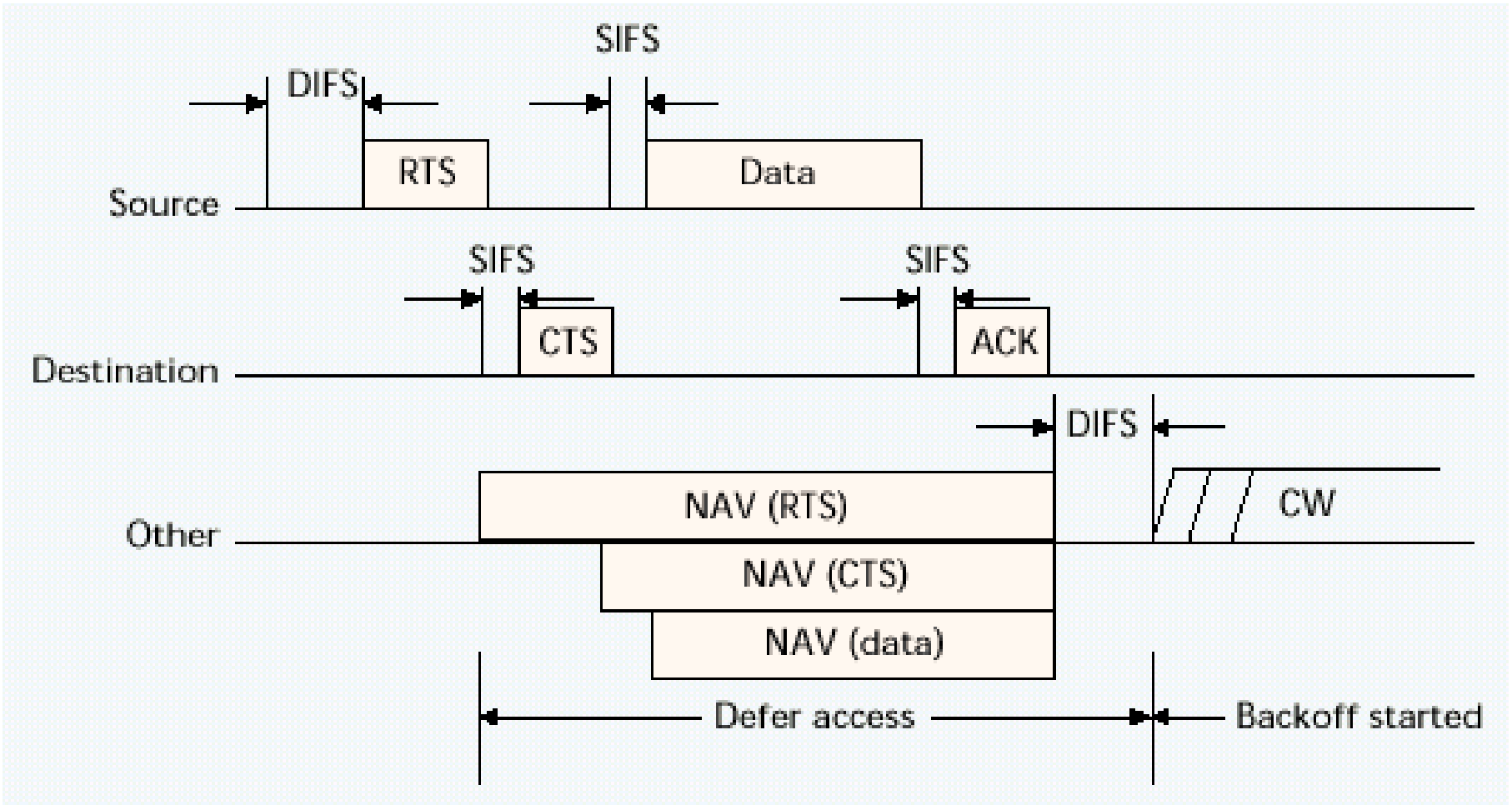
# Distributed Coordination Function



**DIFS: DCF Interframe Space**

# Αποφυγή σύγκρουσης στον κόμβο B



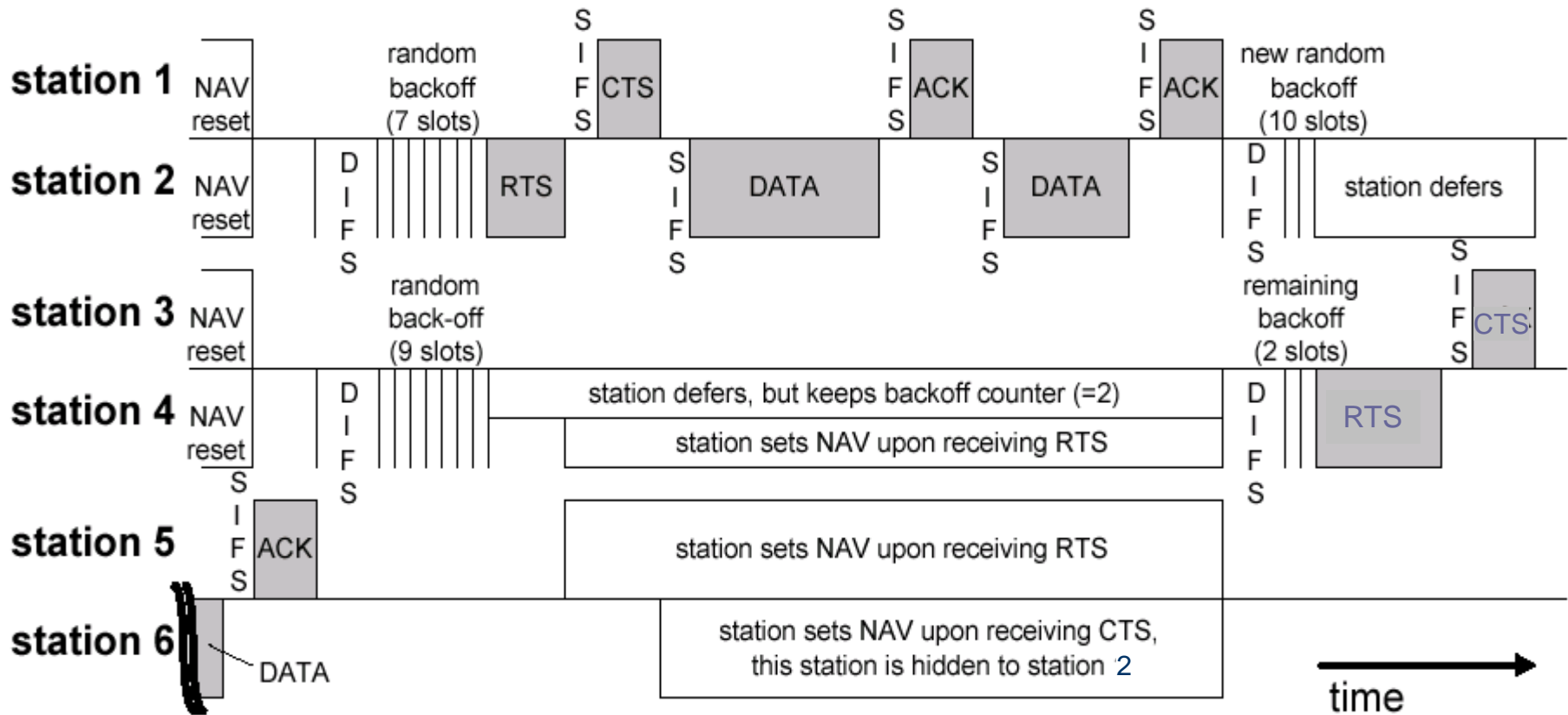


➤ Ισχύει πάντα  $SIFS < DIFS$

➤ Πολύ σημαντική η ενημέρωση των NAVs (Network Allocation Vectors) με τη χρήση των RTS/CTS/data MPDUs για την εφαρμογή power saving μηχανισμών και την αποφυγή συγκρούσεων



# 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