



**Università degli studi di Bergamo**

*Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione  
e Metodi Matematici*

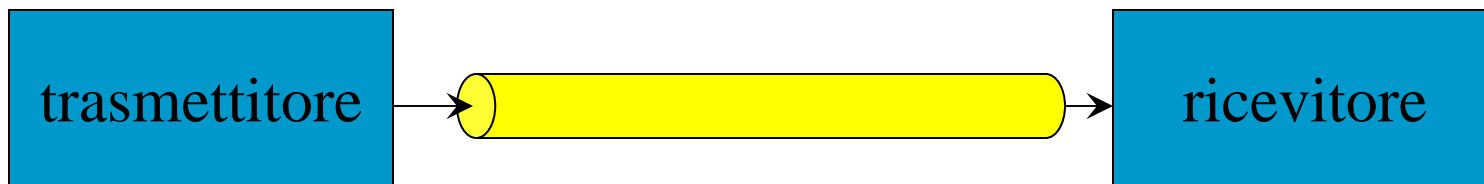
**Fondamenti di Reti e Telecomunicazione**

**prof. Fabio Martignon**

**2 - Canali e Multiplazione**

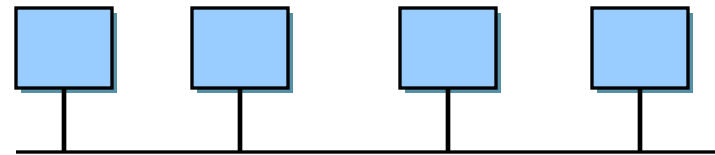
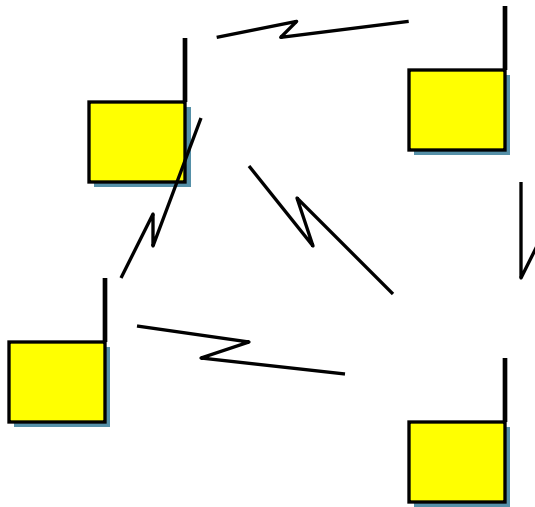
# Canali punto-punto

- collegamenti permanenti tra un trasmettitore ed un ricevitore
- il ricevitore può essere ottimizzato sulla base dell'unico segnale da ricevere
- trasmissione continua o in trame (problema del sincronismo)



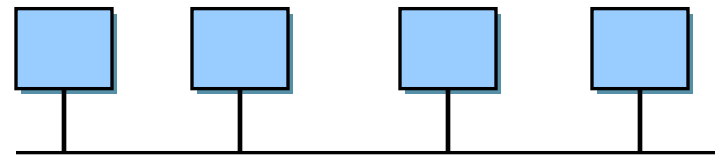
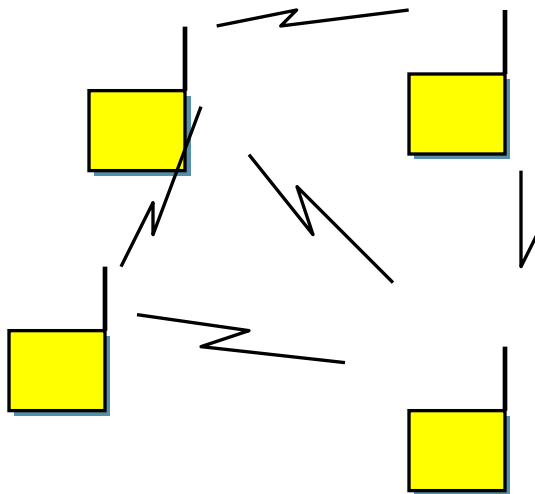
## Canali broadcast

- sono canali nei quali più stazioni possono accedere in parallelo al mezzo condiviso
- il segnale emesso da una stazione raggiunge tutte le altre



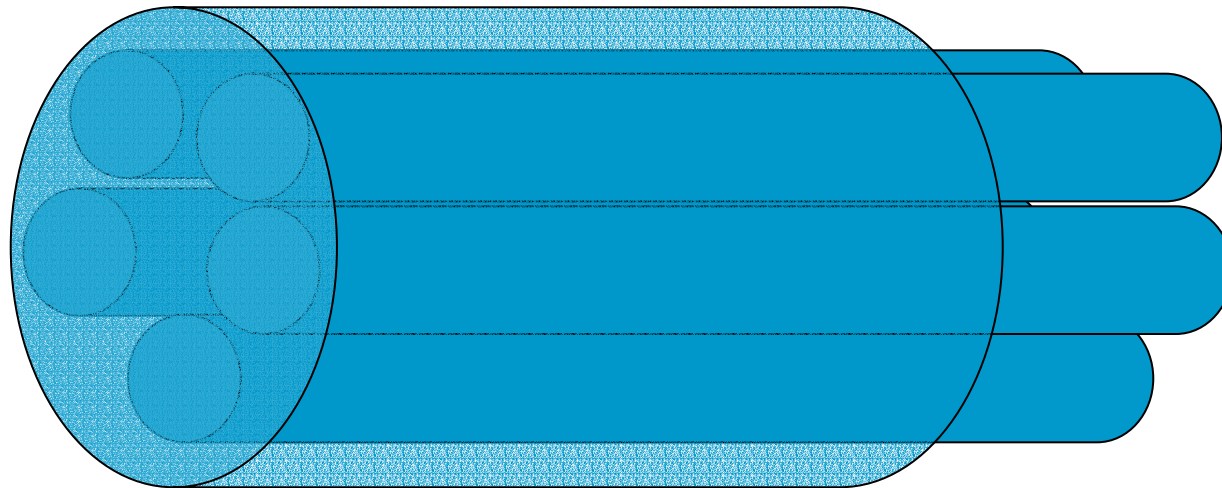
# Canali broadcast

- Il ricevitore può ricevere molti segnali diversi in livello e sincronismo e deve essere in grado di adattarsi
- le trasmissioni sono sempre precedute da un preambolo di sincronismo
- esempi: reti locali ethernet, sistemi cellulari



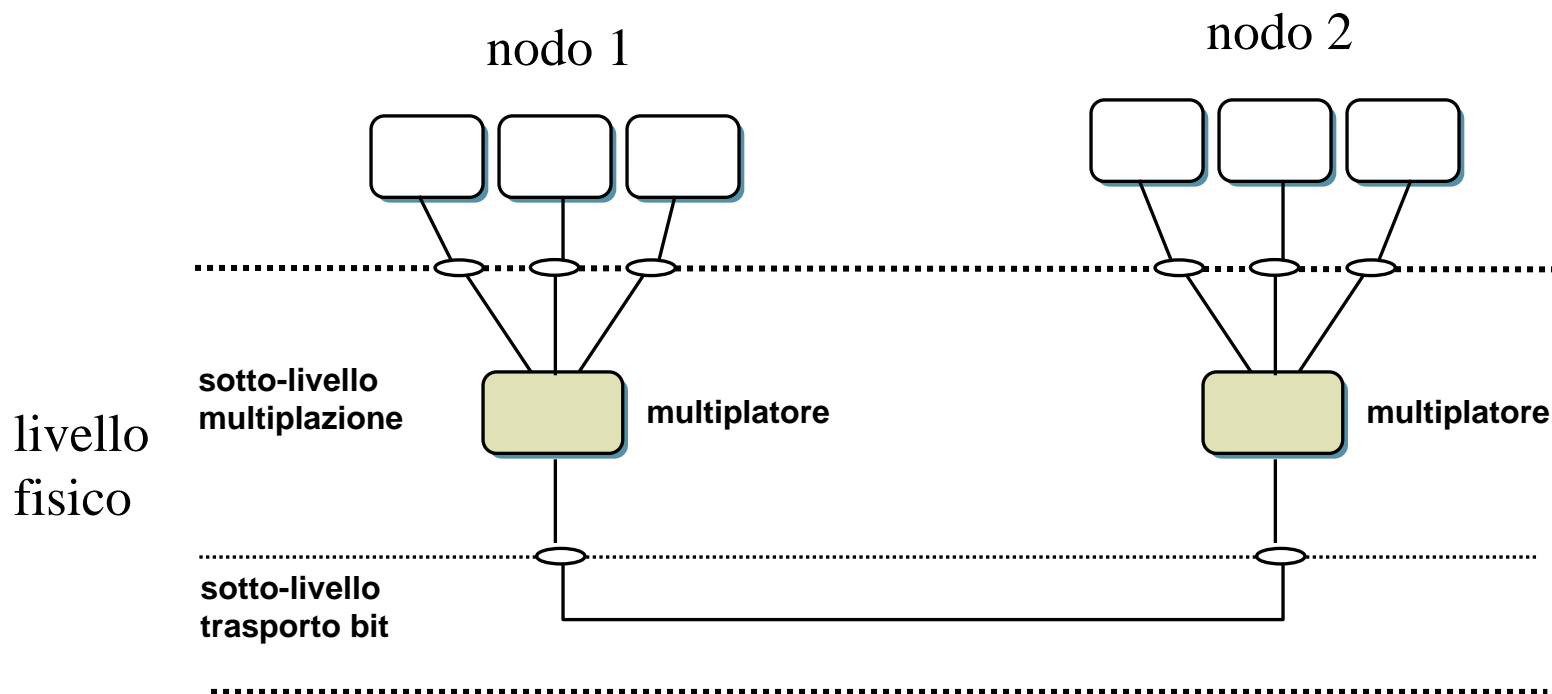
# La multiplazione

- **La capacità dei mezzi trasmissivi fisici può essere divisa per ottenere più canali di velocità più bassa**



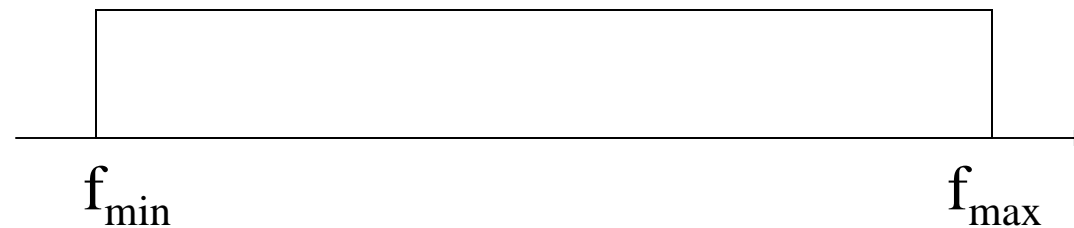
# La multiplazione fisica

- la distinzione tra i flussi avviene esclusivamente sulla base di parametri del livello fisico come frequenza, tempo, codice, lunghezza d'onda, ecc.

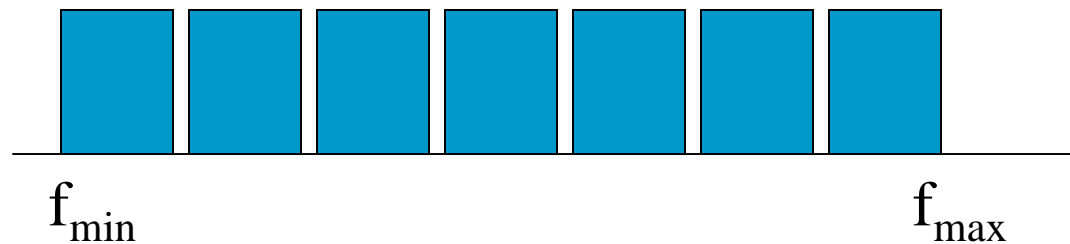


# Multiplazione a divisione di frequenza FDM (Frequency Division Multiplexing)

- Il mezzo trasmissivo può essere caratterizzato da una banda di frequenze utilizzabili

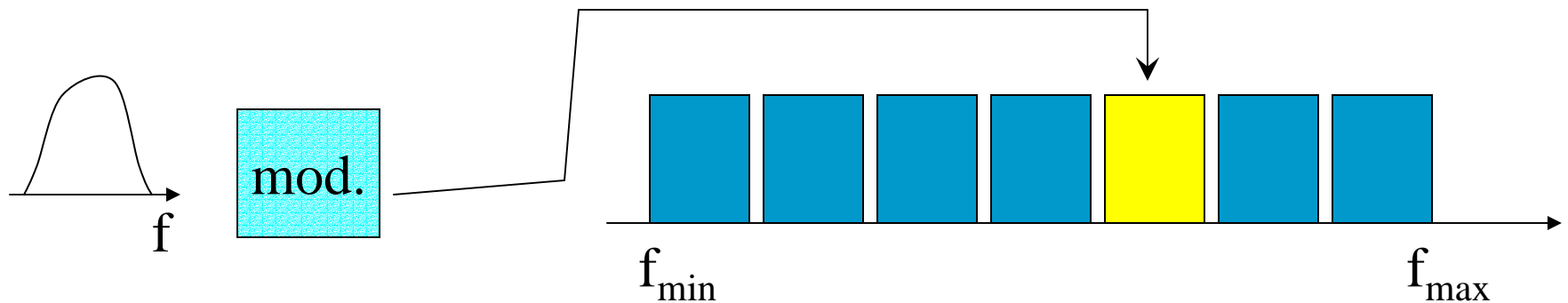


- la banda complessiva può essere divisa in sotto-bande cui associare un canale



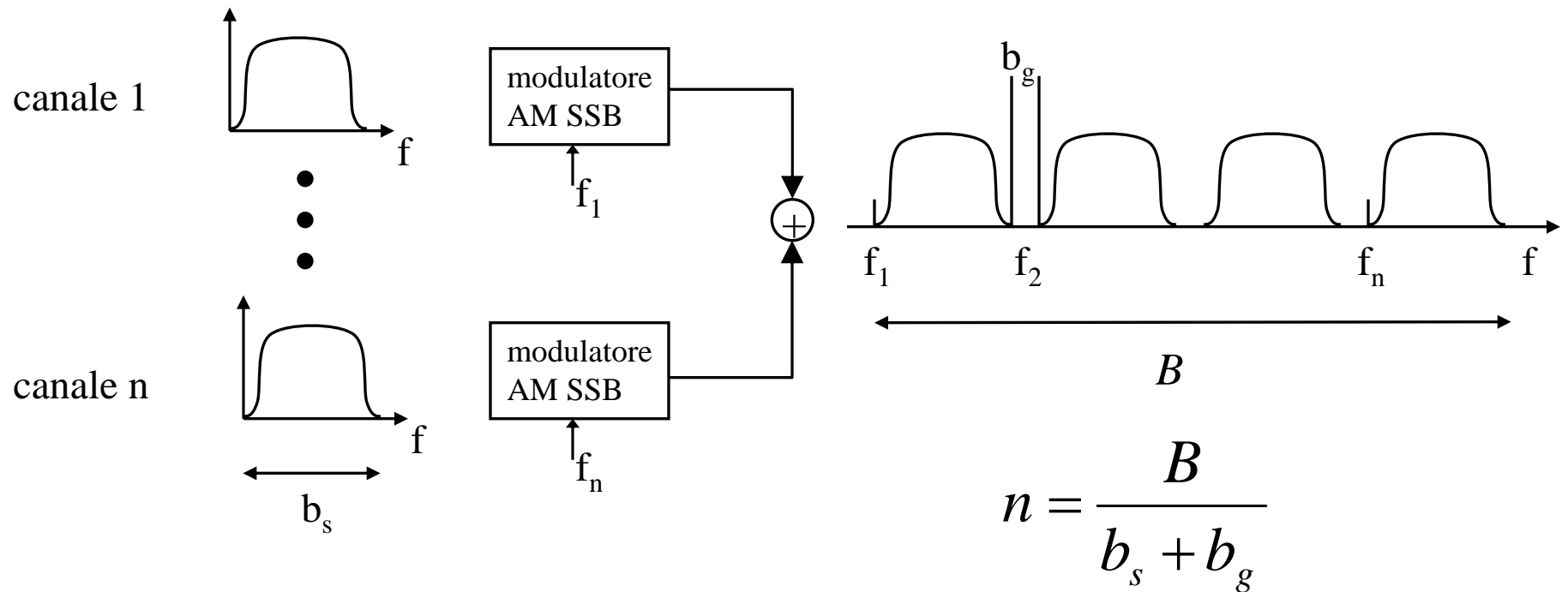
# Multiplazione a divisione di frequenza FDM (Frequency Division Multiplexing)

- il segnale relativo ad un canale viene trattato mediante tecniche di modulazione in modo da associarlo a ciascuna sotto-banda





# Multiplazione a divisione di frequenza FDM (Frequency Division Multiplexing)



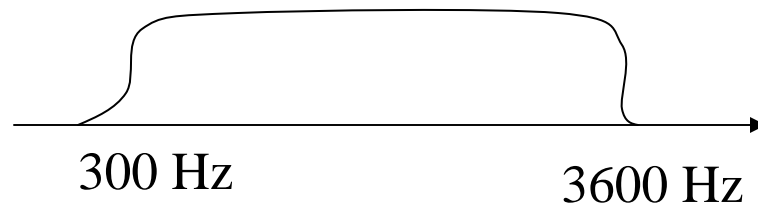
$B =$  banda complessiva utilizzabile del mezzo trasmissivo

$b_s =$  banda del segnale

$b_g =$  banda di guardia

# FDM telefonico

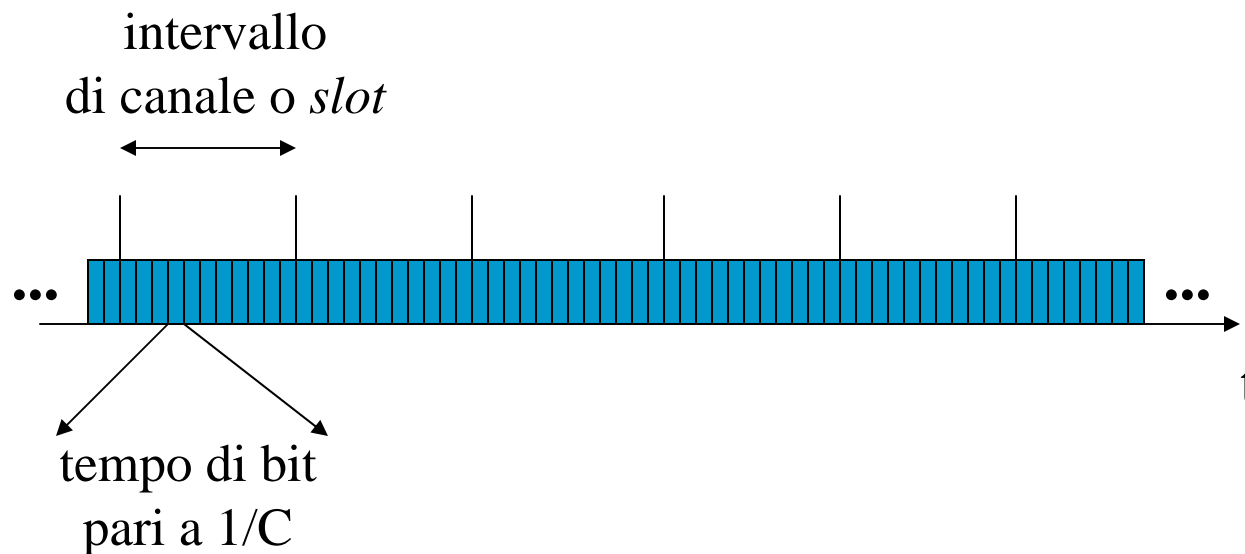
- in passato l'FDM veniva usato come tecnica di moltiplicazione dei canali vocali tra centrali telefoniche
- banda segnale vocale: circa 4 kHz



- moltiplicazione di 12 canali da 4 kHz su una banda di 48 kHz (compresa fra 60 e 108 kHz)
- moltiplicazione successiva del segnale di 48 kHz (chiamato *segnale multiplo*) con altri segnali multipli (moltiplicazione a livelli gerarchici)

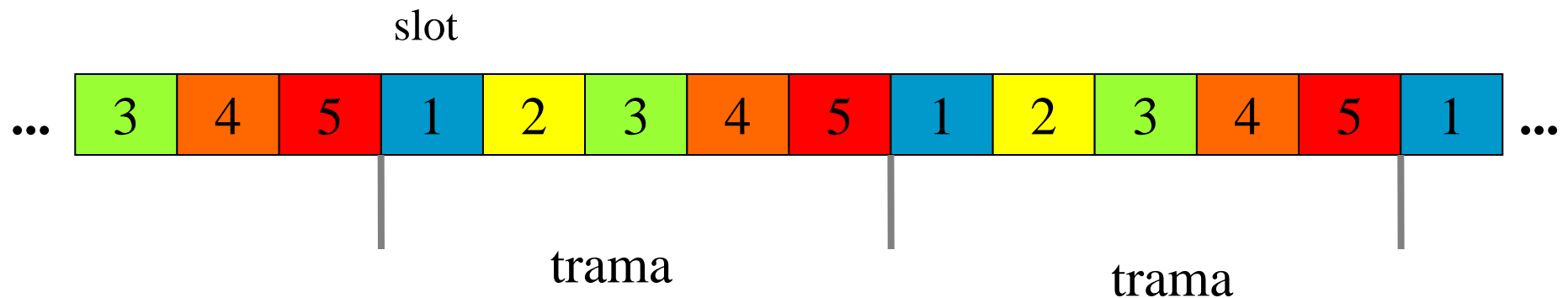
# Multiplazione a divisione di tempo TDM (Time Division Multiplexing)

- E' una tecnica usata per segnali digitali
- Dato un canale numerico a velocità  $C$  (bit/s) si costruiscono intervalli di tempo di canale (slot) costituiti da multipli del tempo di bit  $t_b=1/C$

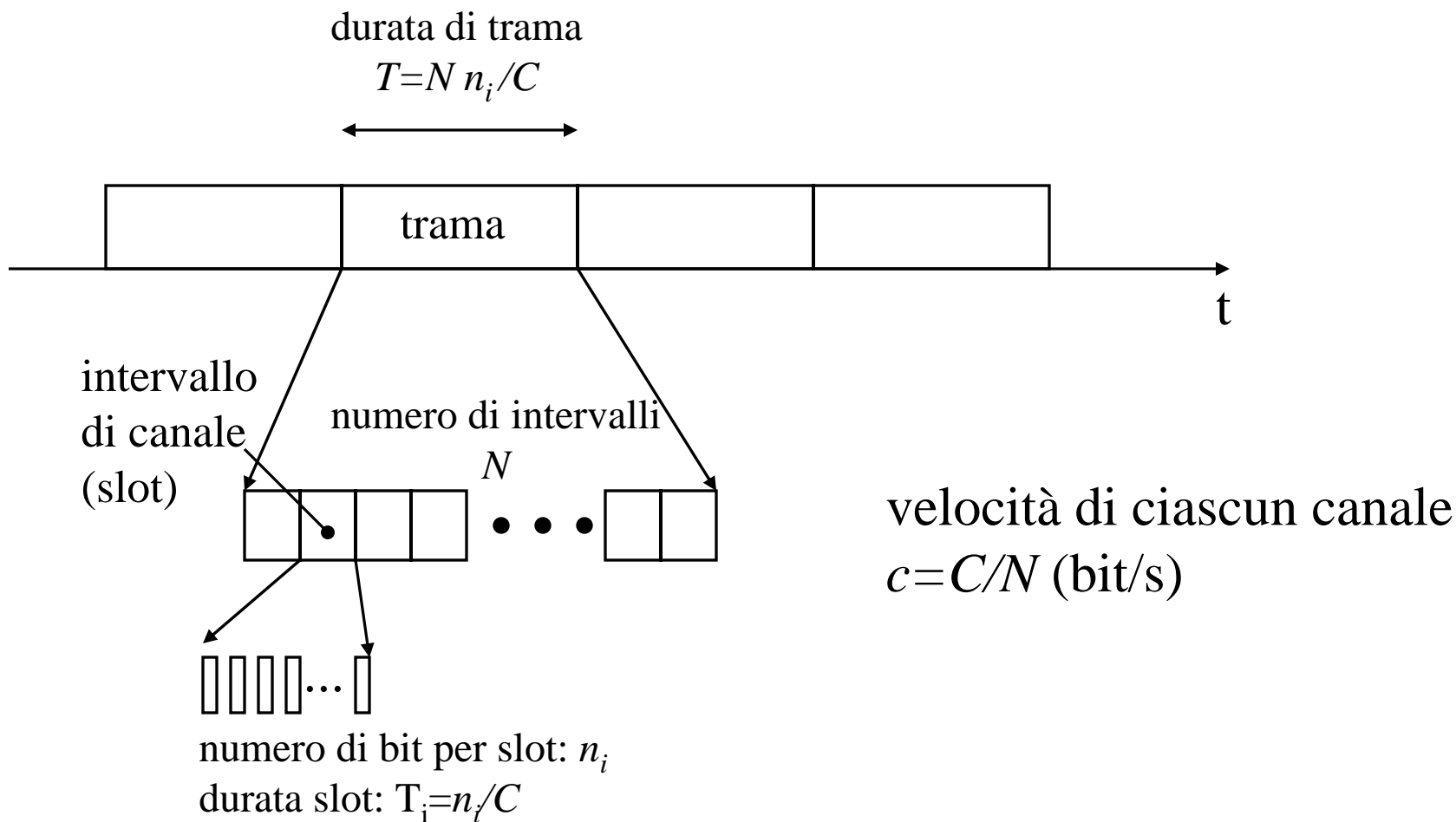


# TDM (Time Division Multiplexing)

- Un canale (sorgente) può usare un intervallo di canale (*slot*) ogni  $N$
- si definisce una struttura a *trame* consecutive costituite da  $N$  slot consecutivi
- se si numerano ciclicamente gli slot delle trame, un canale è associato ad un numero di slot

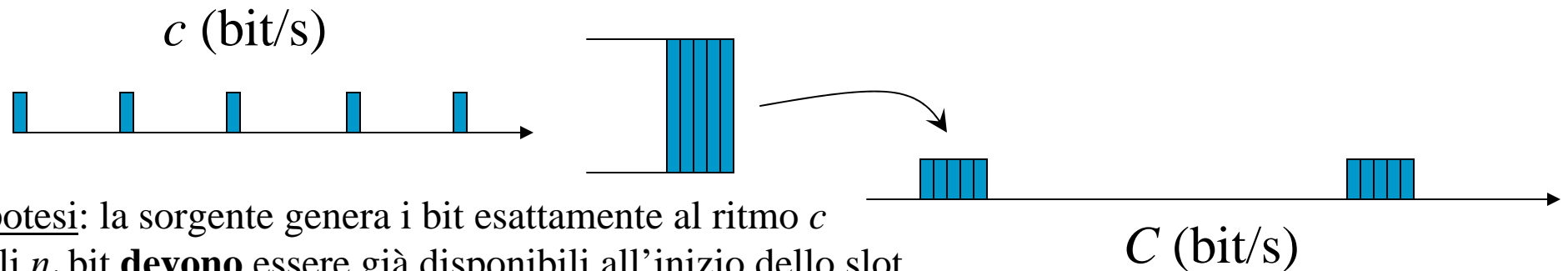


# TDM (Time Division Multiplexing)



# TDM (Time Division Multiplexing)

- Scelta della durata di slot (parametro di progetto):
  - $n_i$  numero di bit per slot
  - $T_i$  durata di uno slot ( $T_i = n_i / C$ )
- la velocità del canale  $c$  non dipende da  $T_i$  ma solo da  $N$  ( $c = C/N$ )
- Tempo di adattamento:  $T_a = n_i / c$



Ipotesi: la sorgente genera i bit esattamente al ritmo  $c$

Gli  $n_i$  bit **devono** essere già disponibili all'inizio dello slot.

Chiaramento la sorgente deve attendere  $n_i / c$  per accumulare gli  $n_i$  bit (tempo di adattamento)

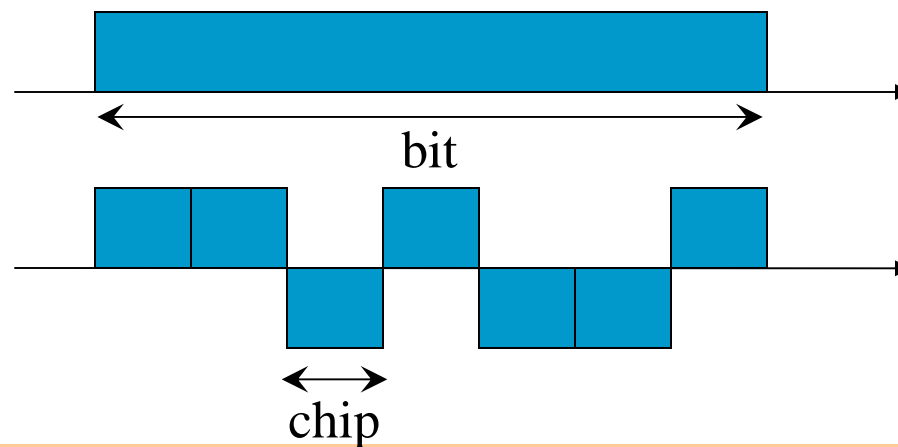
## Esercizio

- Si consideri un canale di velocità  $C=900$  kbit/s
- si vogliano ricavare 4 canali di velocità  $c=200$  kbit/s e un canale di velocità 100 kbit/s
- si definisca allo scopo una struttura di trama TDM, Assumendo che l'unità minima di multiplazione sia un byte (ottetto).

*da fare a casa*

# Multiplazione a divisione di codice CDM (Code Division Multiplexing)

- La tecnica CDM consiste nel miscelare  $N$  flussi di bit previa moltiplicazione di ciascuno di questi per una parola di codice  $C_i$  scelta fra le  $N$  parole di un codice ortogonale
- le parole del codice sono costituite da  $N$  simboli binari, chiamati *chip* per distinguerli dai bit di informazione, di durata  $N$  volte inferiore al bit di informazione

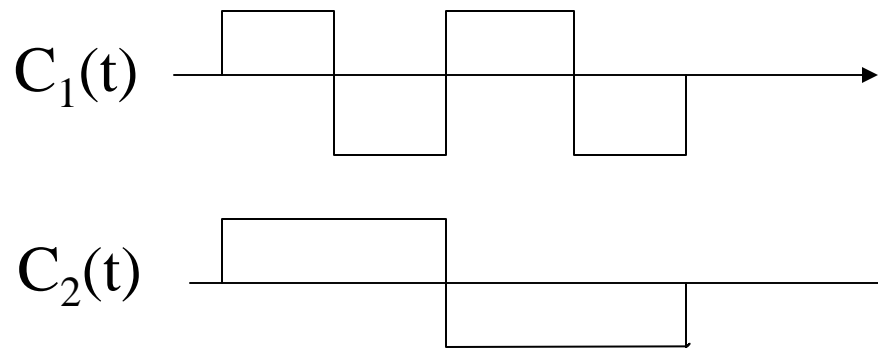




# Codici ortogonali

- **segnali ortogonali:**  $\int s_1(t) \cdot s_2(t) = 0$

- **sequenze ortogonali:**



$$\int_0^T C_1(t) \cdot C_2(t) = 0$$

$$\sum_{i=1}^N c_{1i} \cdot c_{2i} = 0$$

# Codici ortogonali

matrici di Hadamard:

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$H_{2n} = \begin{bmatrix} H_n & H_n \\ H_n & -H_n \end{bmatrix}$$

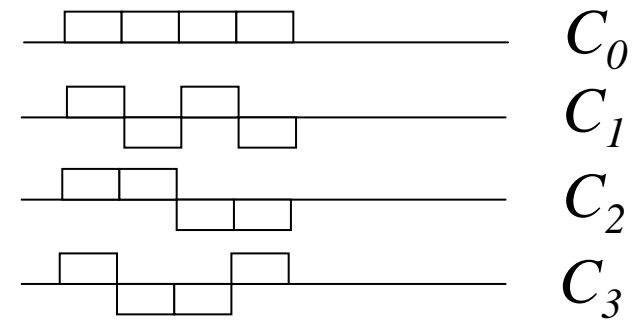
Esempio N=4

$$C_0 = \{1, 1, 1, 1\}$$

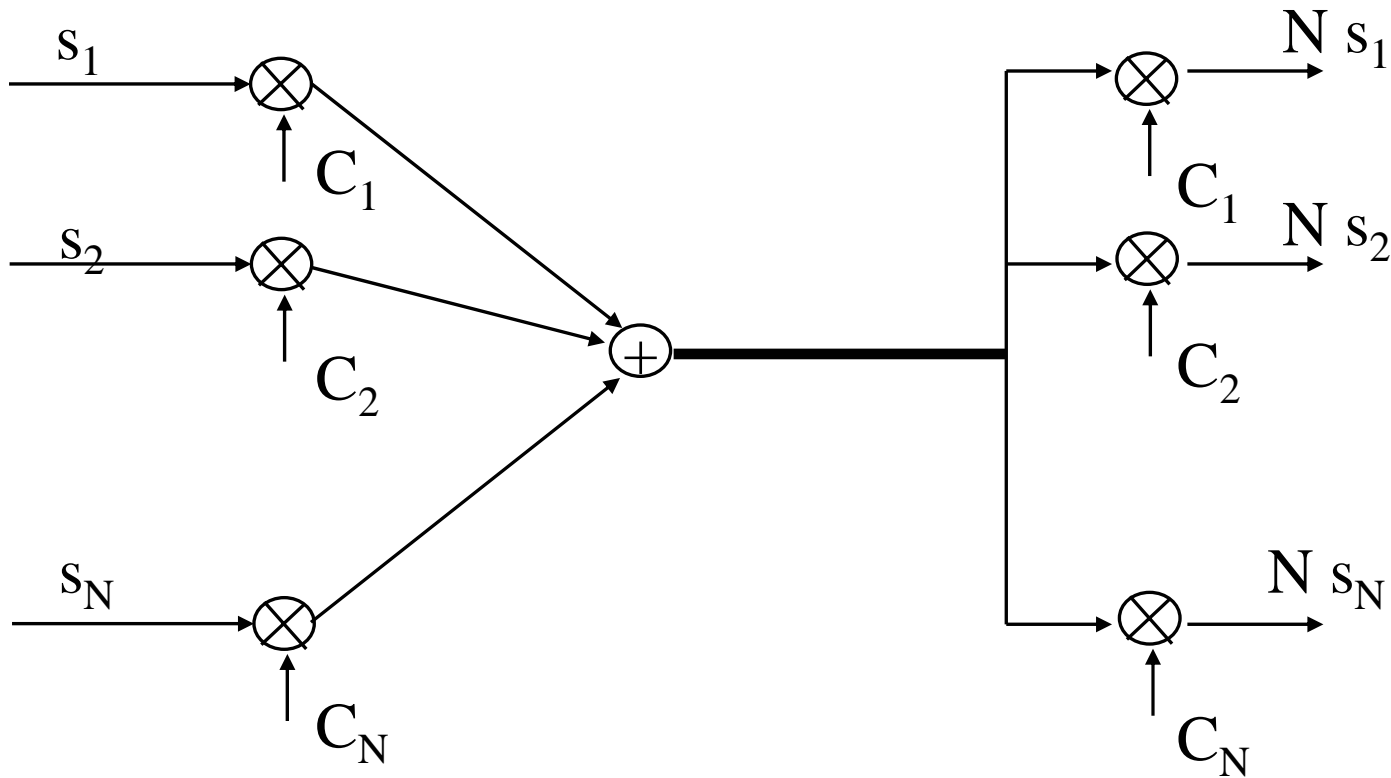
$$C_1 = \{1, -1, 1, -1\}$$

$$C_2 = \{1, 1, -1, -1\}$$

$$C_3 = \{1, -1, -1, 1\}$$



# CDM (Code Division Multiplexing)



In ricezione: estraggo il k-esimo segnale

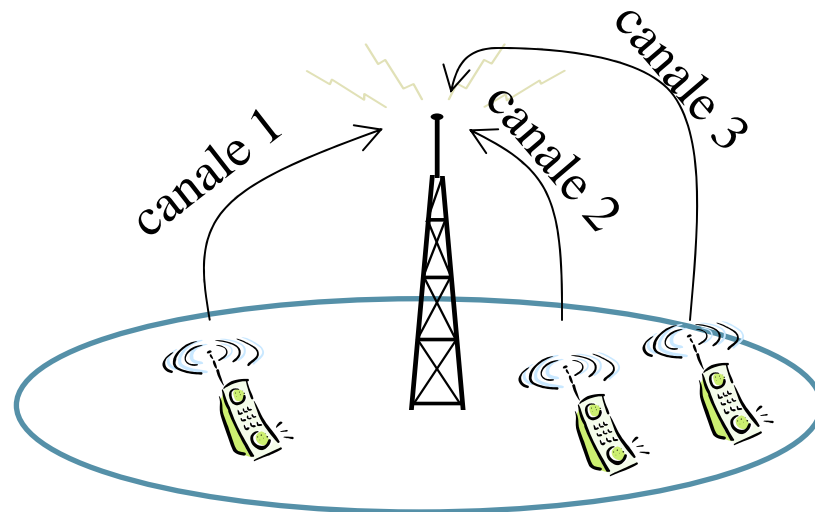
$$\left( \sum_{i=1}^N s_i C_i \right) \cdot C_k = N \cdot s_k$$

# **Multiplicazione a divisione di lunghezza d'onda WDM (Wavelength Division Multiplexing)**

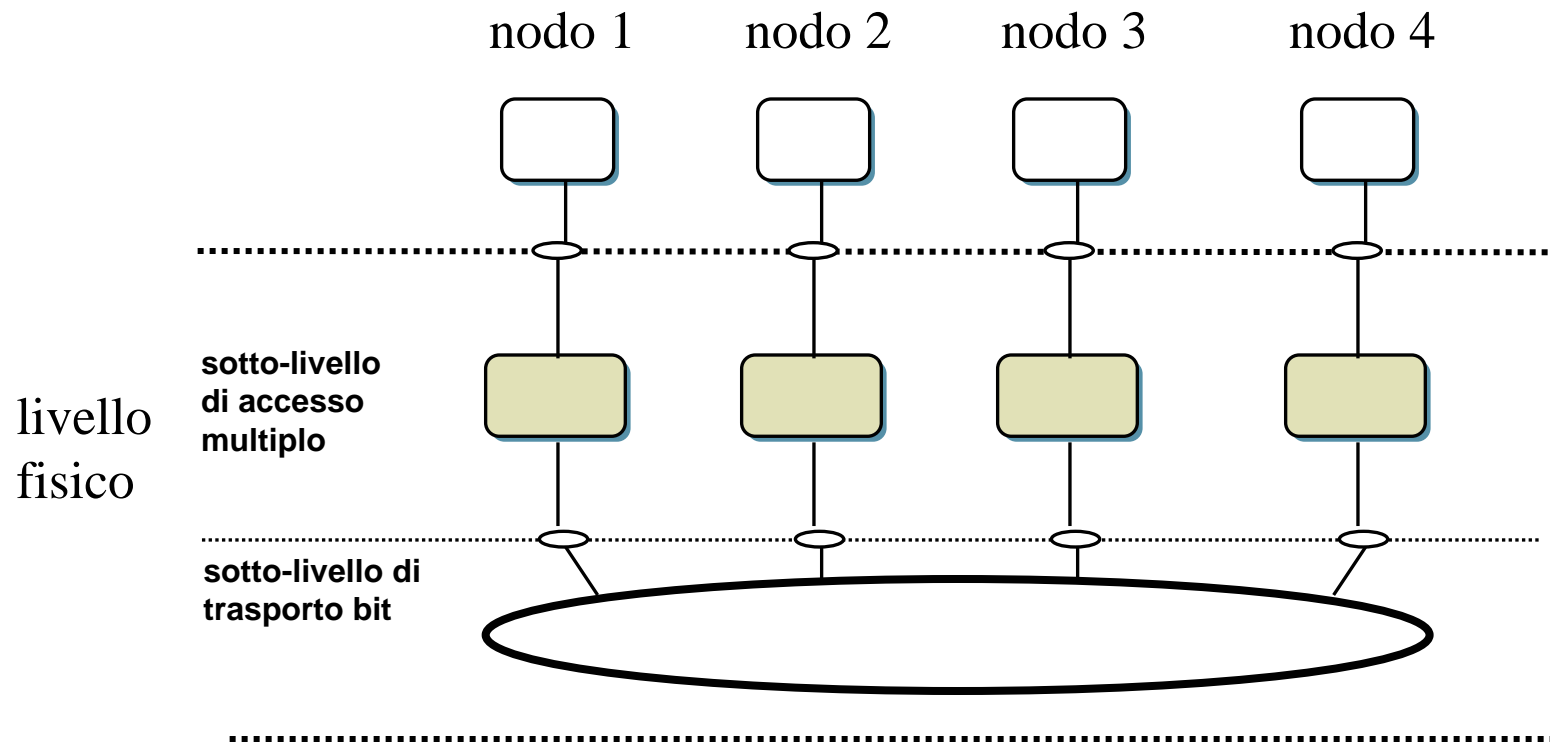
- **è la stessa cosa che FDM, si chiama WDM per ragioni storiche legate allo sviluppo della fibra ottica**
- **le diverse portanti ottiche alle diverse lunghezze d'onda sono gestite con dispositivi ottici**
- **ciascuna portante ottica viene modulata ai limiti delle velocità elettroniche (5-10 Gbit/s)**
- **il limite tecnologico è dovuto alla stabilità dei laser in frequenza ed alla scarsa risoluzione dei filtri ottici**
- **dispositivi commerciali con 16 lunghezze d'onda, ma presto avremo 128 lunghezze d'onda (DWDM)**
- **ad esempio la capacità dei cavi transoceanici viene moltiplicata dal numero di lunghezze d'onda**

# Accesso Multiplo

- E' l'analogo della multiplazione ma per canali broadcast
- le stazioni che accedono sono distanti (dunque non fisicamente nello stesso luogo) e devono coordinarsi per accedere al canale broadcast



# Accesso multiplo fisico



# FDMA

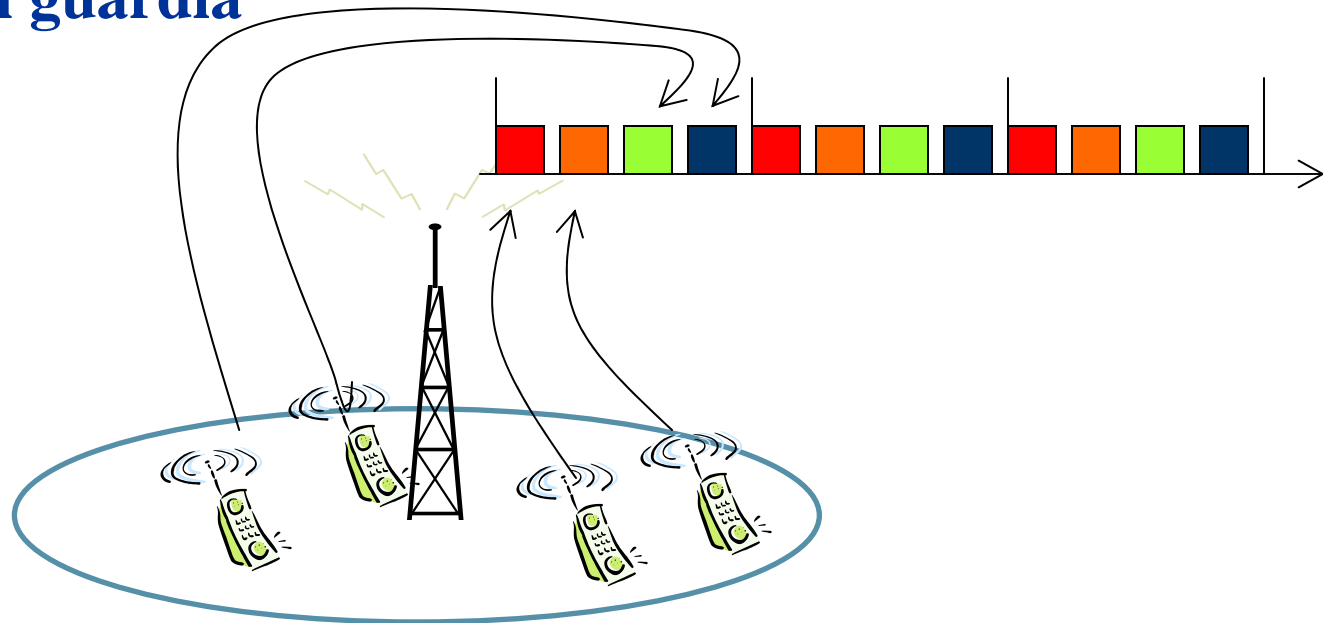
## Frequency Division Multiple Access

- **E' analogo a FDM**
- **la necessità del coordinamento delle stazioni non crea problemi nel caso di divisione di frequenza**
- **Esempi:**
  - **trasmissioni radiofoniche e televisive**
  - **sistema cellulare TACS (Total Access Cellular System) utilizza una portante modulata FM con banda 25 kHz per ciascun canale**

# TDMA

## Time Division Multiple Access

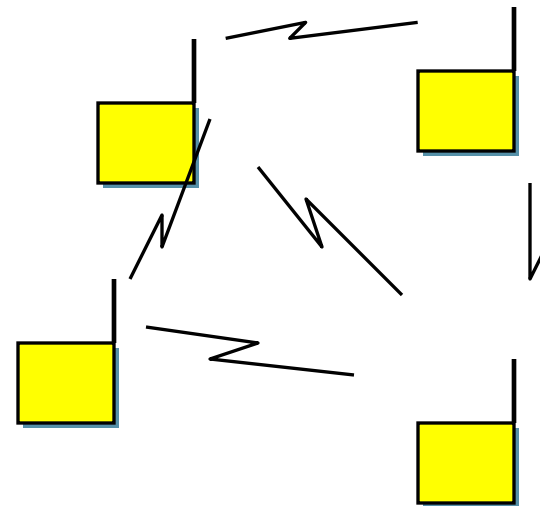
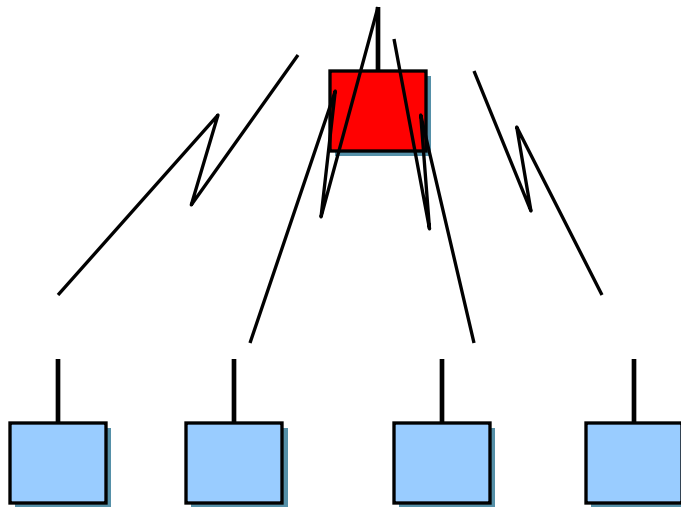
- è l'analogo del TDM
- è necessario un coordinamento per trovare una base temporale comune alle stazioni (sincronismo di trama)
- il sincronismo non può essere perfetto: sono necessari tempi di guardia





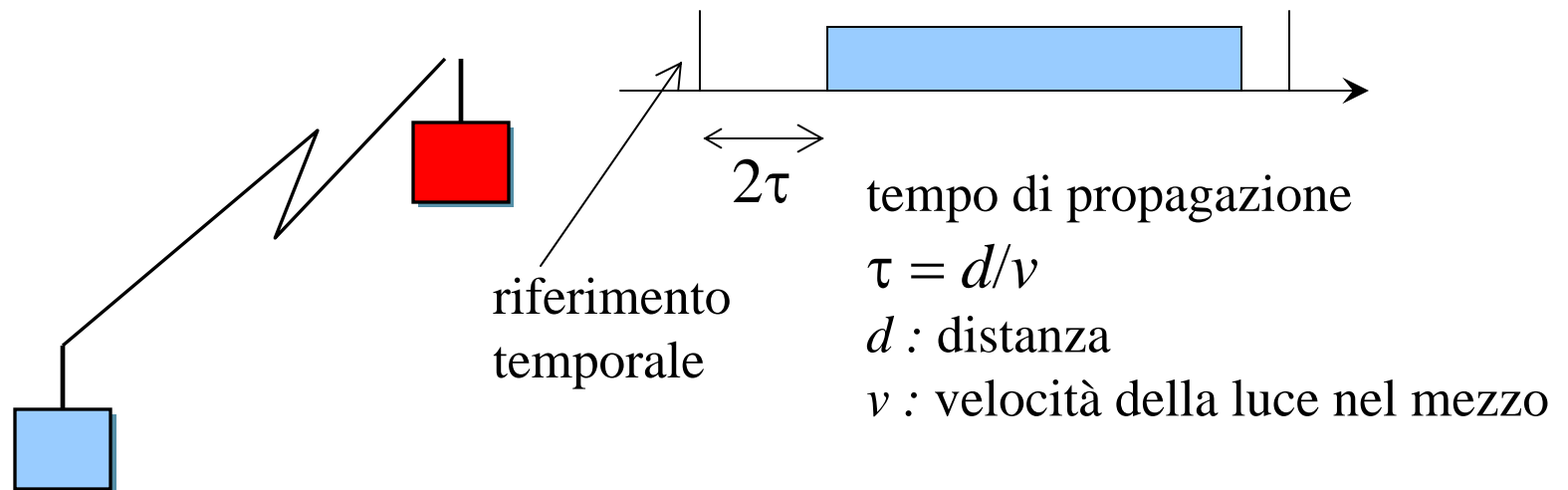
# Sincronismo di trama

 **canali broadcast centrali**  
**canali broadcast non-centrali**



## Canali broadcast centrali

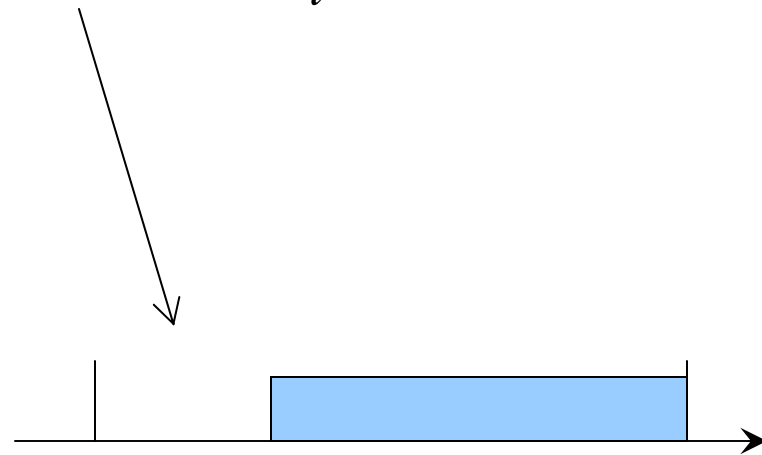
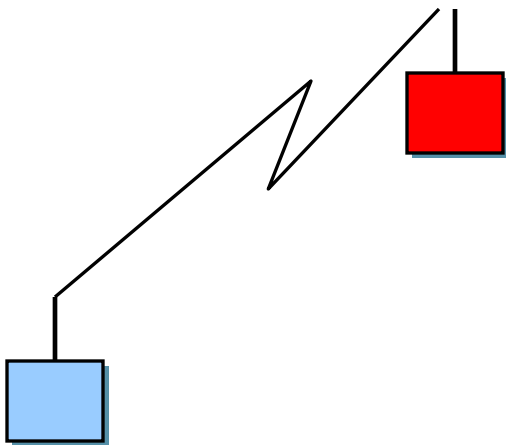
- il punto centrale può essere di riferimento per il sincronismo
- le sue trasmissioni regolari possono sincronizzare le trasmissioni delle altre (ad es. una trasm. ogni trama, o ad intervalli multipli)



## Canali broadcast centrali

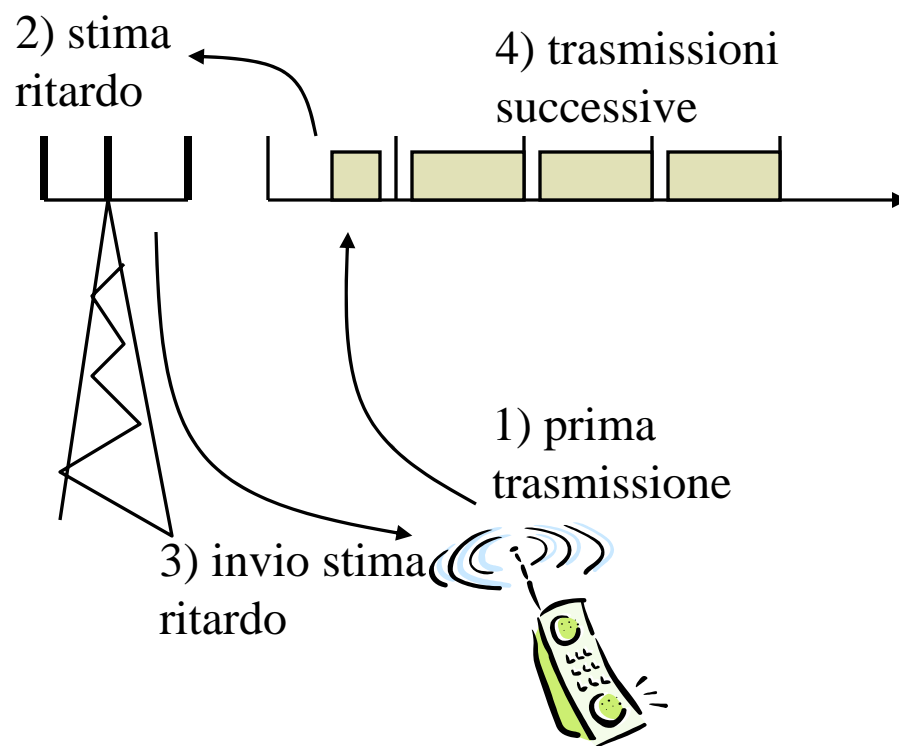
- tempo di guardia:

$$T_g = \max_i (2\tau_i)$$



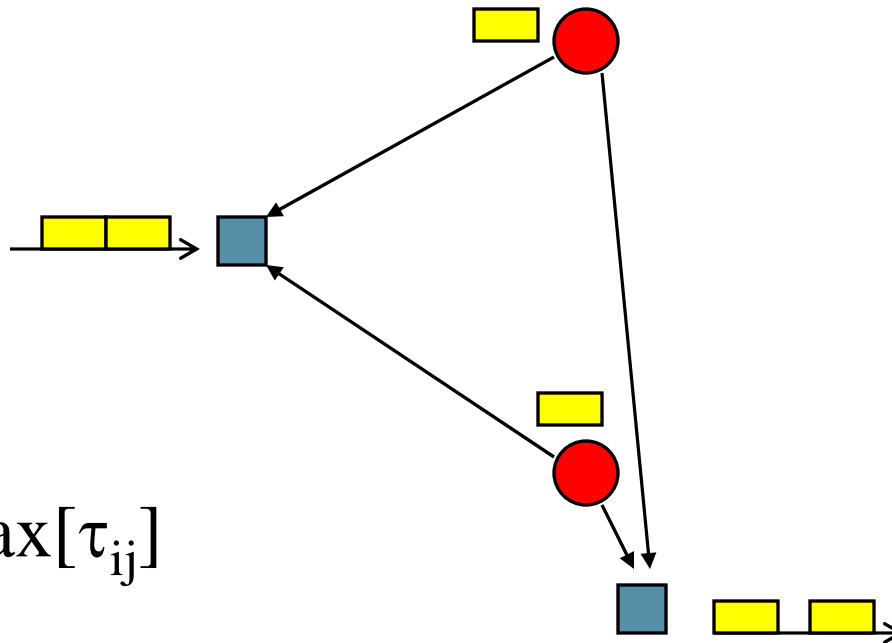
# Canali broadcast centrali

- **Timing Advance:**
  - **noti i tempi di propagazione le stazioni possono compensarli con una trasmissione anticipata**
  - **necessità di stimare i  $\tau$  (possono essere variabili)**
  - **errore di stima: tempi di guardia**
  - **tecnica usata in GSM**



## Canali broadcast non centrali

- non c'è il riferimento centrale
- trasmissioni diverse possono combaciare in un punto ed essere distanti in un altro



- $T_g = 2 \max[\tau_{ij}]$

# Efficienza

$$\eta = \frac{T_i}{T_i + T_g} = \frac{1}{1 + \frac{T_g}{T_i}} = \frac{1}{1 + T_g \frac{C}{n_i}}$$

- dipende dal rapporto  $T_g/T_i$
- l'efficienza scende:
  - all'aumentare delle distanze (aumenta  $T_g$ )
  - all'aumentare della velocità del canale  $C$
  - al diminuire della durata dello slot

# CDMA

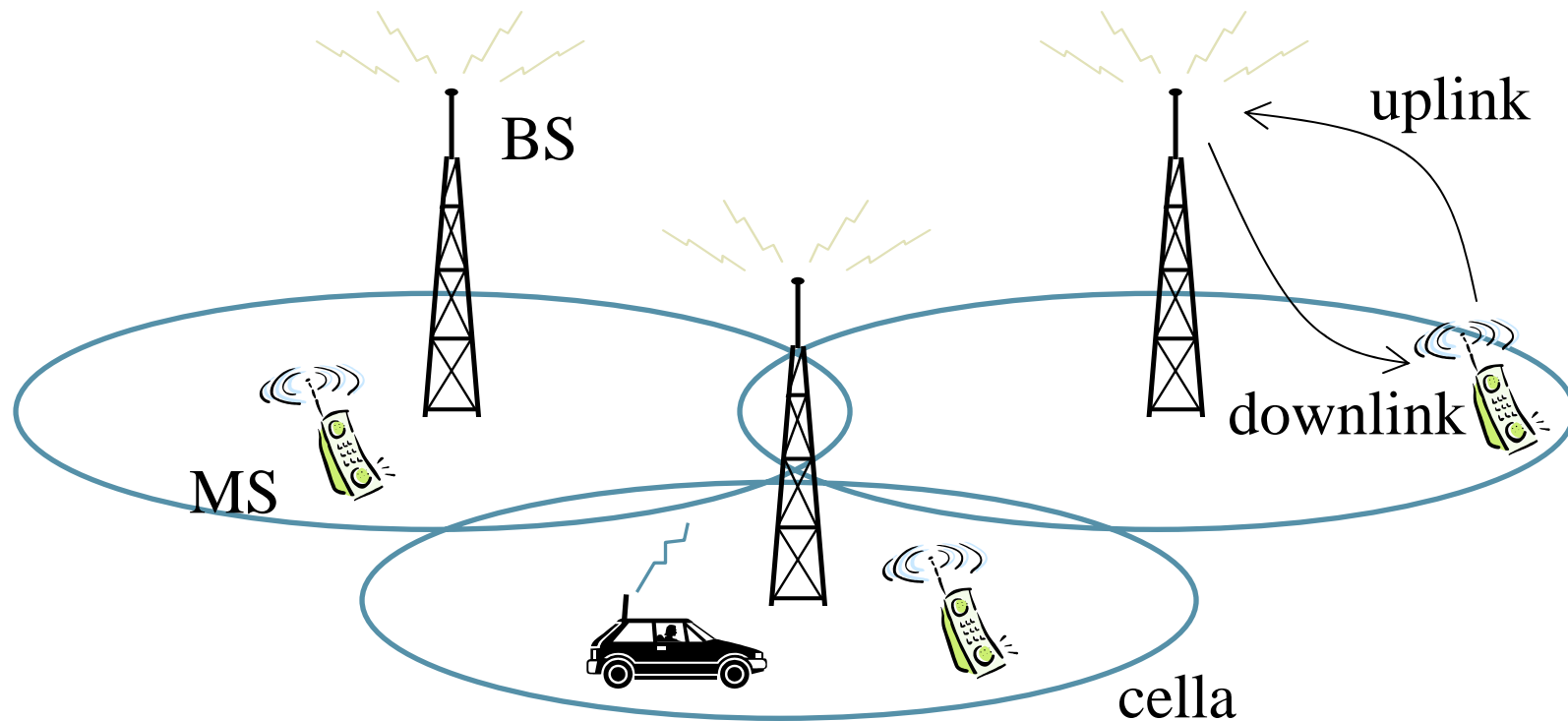
## Code Division Multiple Access

- non è possibile avere trasmissioni sincrone e quindi non si riesce a conservare l'ortogonalità dei codici
- si usano codici a bassa correlazione per qualunque sfasamento temporale
- usato nel sistema UMTS (telefonini di 3<sup>a</sup> generazione)

$$\int_0^T C_1(t) \cdot C_2(t) \neq 0$$

$$\int_0^T C_1(t) \cdot C_2(t + \Delta)$$

# Sistemi radiomobili

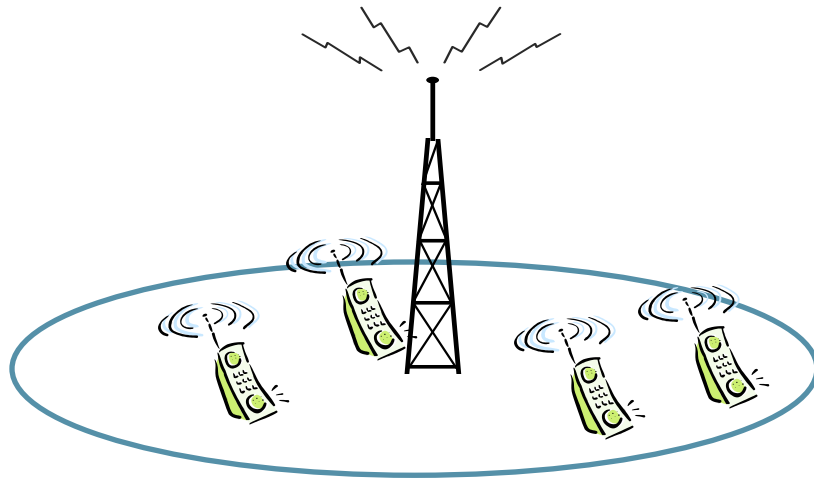


MS = Mobile Station  
BS = Base Station

Uplink = tratta da MS a BS  
Downlink = tratta da BS a MS



# Accesso radio



- Il problema dell'accesso radio è relativo al modo con il quale gli utenti della stessa cella condividono le risorse radio

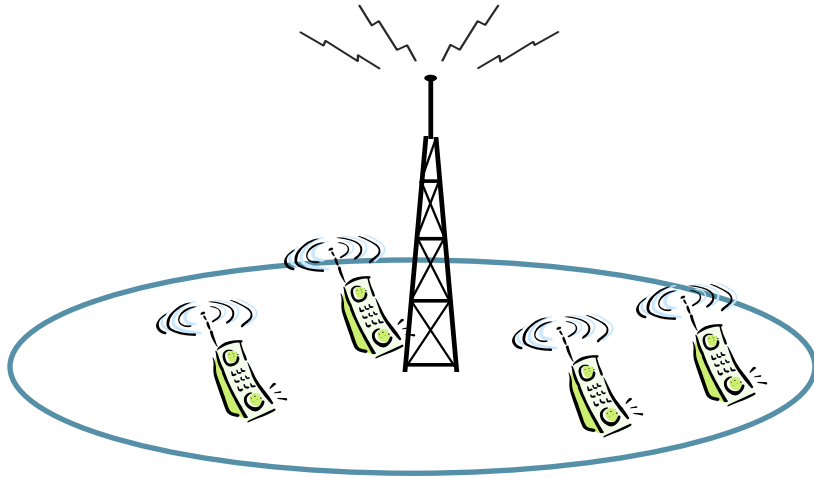
- **downlink:**

- multiplazione dei canali verso gli utenti

- **uplink:**

- accesso multiplo delle stazioni mobili

# Accesso radio



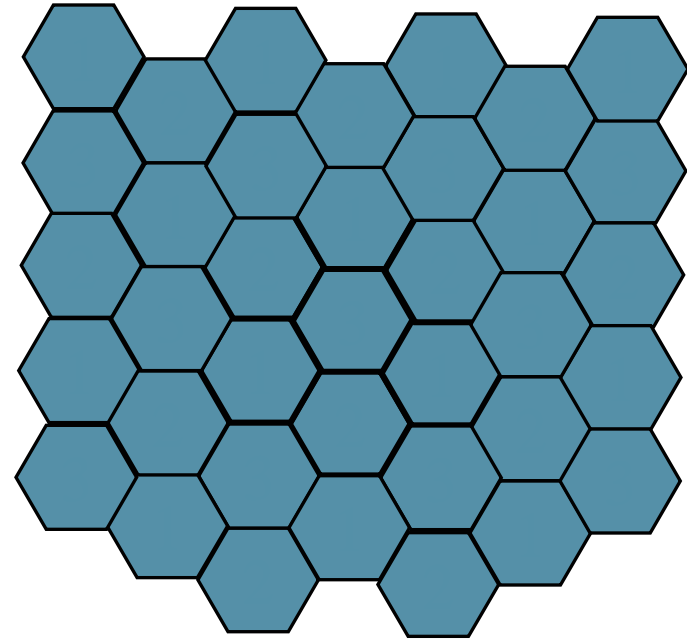
- **Sistemi di prima generazione:**
  - TACS (Europa)**
  - AMPS (Stati Uniti)**
    - **FDM/FDMA**  
**(downlink/uplink)**
- **Sistemi di seconda gen.:**
  - GSM (Europa)**
  - D-AMPS (Stati Uniti)**
    - **multi-carrier TDM/TDMA**
- **Sistemi di terza gen.:**
  - UMTS (Europa e ???)**
    - **CDM/CDMA**

## Riuso di frequenza

- I canali disponibili non bastano per tutti gli utenti
- soluzione: usare più volte gli stessi canali in celle diverse (riuso spaziale)
- il riuso degli stessi canali genera *interferenza co-canale*
- il riuso è possibile in celle sufficientemente distanti da far sì che l'interferenza sia tollerabile (buona qualità del collegamento)

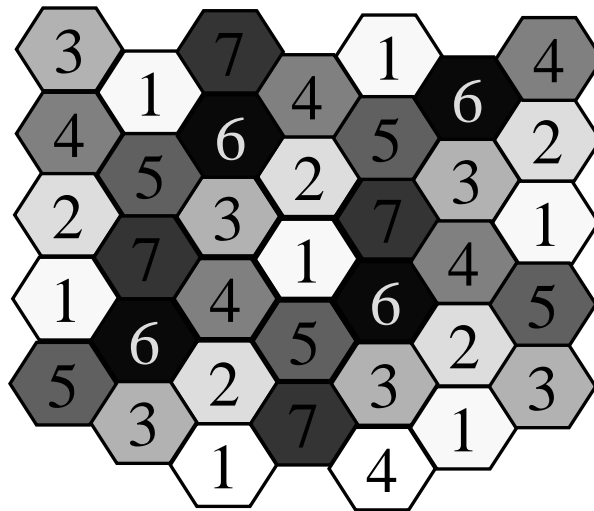
# Riuso di frequenza

- l'interferenza è la caratteristica fondamentale dei sistemi cellulari
- Di solito si assume che la qualità sia buona se il rapporto tra potenza del segnale e potenza dell'interferenza SIR (Signal-to-Interference Ratio) sia maggiore di una soglia,  $SIR_{\min}$

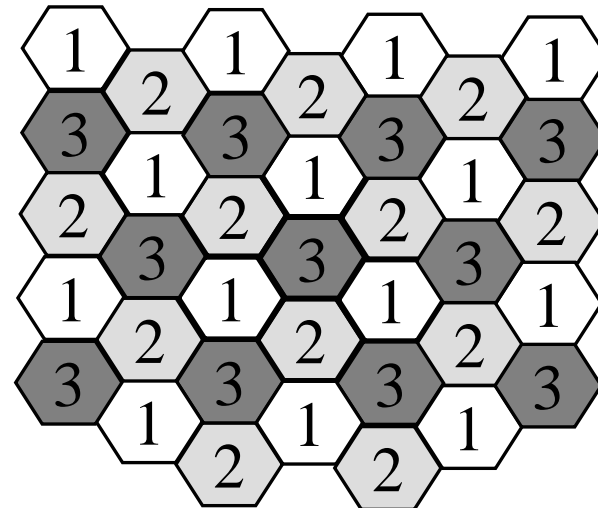


# Cluster

- L'insieme delle portanti disponibili viene diviso in  $K$  gruppi
- ad ogni cella viene assegnato un gruppo in modo tale da massimizzare la distanza tra celle che usano lo stesso gruppo
- efficienza di riuso =  $1/K$
- Valori di  $K$  possibili:  $K=1,3,4,7,9,12,13, \dots$



$K = 7$



$K = 3$

# Cluster

- dato il valore di  $SIR_{\min}$  tollerato dal sistema, è possibile stimare l'efficienza massima del sistema, ovvero il  $K$  minimo utilizzabile
- potenza ricevuta:

$$P_r = P_t \cdot G \cdot d^{-\eta}$$

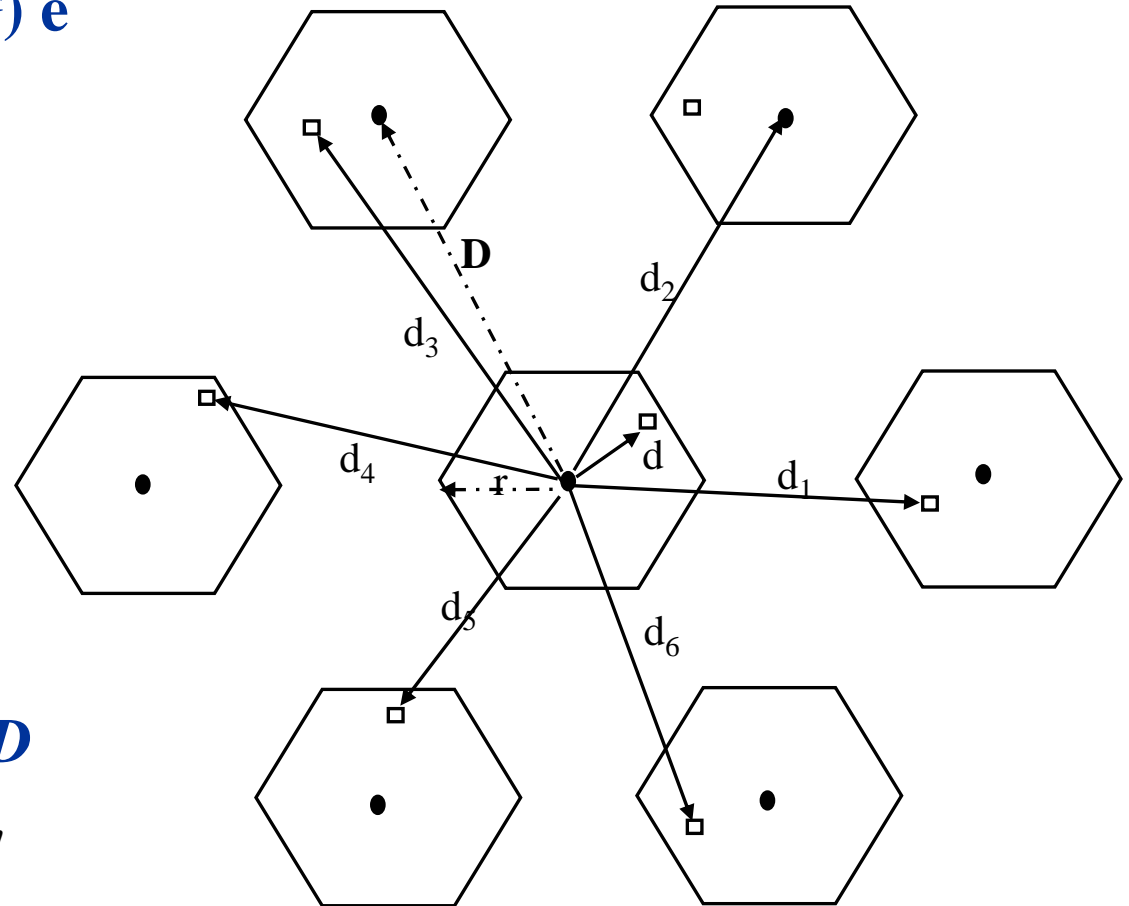
# Cluster

- Ip.: stesse antenne ( $G$ ) e stessa potenza ( $P_t$ )

$$\begin{aligned} SIR &= \frac{P_t \cdot G \cdot d^{-\eta}}{\sum_{i=1}^6 P_t \cdot G \cdot d_i^{-\eta}} = \\ &= \frac{d^{-\eta}}{\sum_{i=1}^6 d_i^{-\eta}} \end{aligned}$$

- caso peggiore  $d = r$
- approssimazione  $d_i = D$

$$SIR \cong \frac{r^{-\eta}}{6D^{-\eta}} = \frac{1}{6} \left( \frac{1}{R} \right)^{-\eta}$$



## Cluster

- Il SIR dipende solo dal rapporto di riuso  $R=D/r$  (e da  $\eta$ ) e non dalla potenza assoluta trasmessa e dal raggio della cella
- fissato  $SIR_{\min}$  si può calcolare  $R_{\min}$
- noto  $R_{\min}$  si può ottenere  $K$  osservando che:

$$K = \frac{R^2}{3}$$

- quindi:

$$K_{\min} = \frac{(6SIR)^{2/\eta}}{3}$$



## Esercizio

- Si dimensioni il cluster di un sistema che tollera  $SIR_{\min} = 18$  dB nel caso in cui l'esponente di attenuazione della distanza  $\eta$  sia pari a 3.9

$$K_{\min} = \frac{(6 SIR)^{2/\eta}}{3} = \frac{(6 \cdot 63.1)^{2/3.9}}{3} = 6.99$$

# Ripasso

- dB
  - scala logaritmica
  - potenze

$$P_{dB} = 10 \log_{10} P$$

$$P = 10^{P_{dB}/10}$$

## Ripasso

- al prodotto in scala lineare corrisponde la somma in dB
- al rapporto la differenza

$$G \cdot P \rightarrow G_{dB} + P_{dB}$$

$$P / A \rightarrow P_{dB} - A_{dB}$$

# Ripasso

- **valori notevoli**

$$2 \rightarrow 3dB$$

$$3 \rightarrow 4.77dB$$

$$4 = 2 \cdot 2 \rightarrow 3 + 3 = dB$$

$$5 \rightarrow 7dB$$

$$6 \rightarrow 7.77dB$$

$$8 \rightarrow 9dB$$

$$9 \rightarrow 9.54dB$$

$$10 \rightarrow 10dB$$

$$100 \rightarrow 20dB$$

$$1000 \rightarrow 30dB$$