



Università degli studi di Bergamo

*Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
e Metodi Matematici*

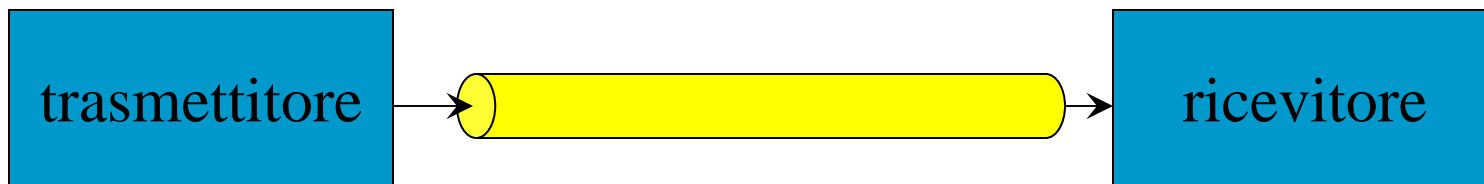
Reti di Calcolatori

prof. F. Martignon

2 - Canali e Multiplazione

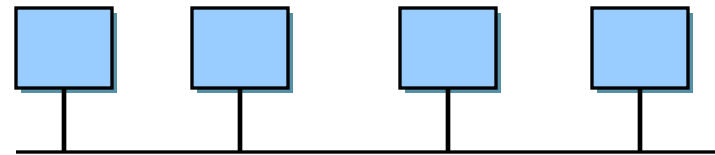
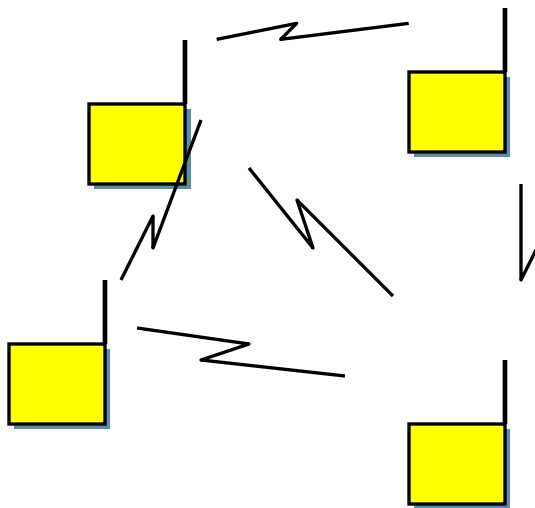
Canali punto-punto

- 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)



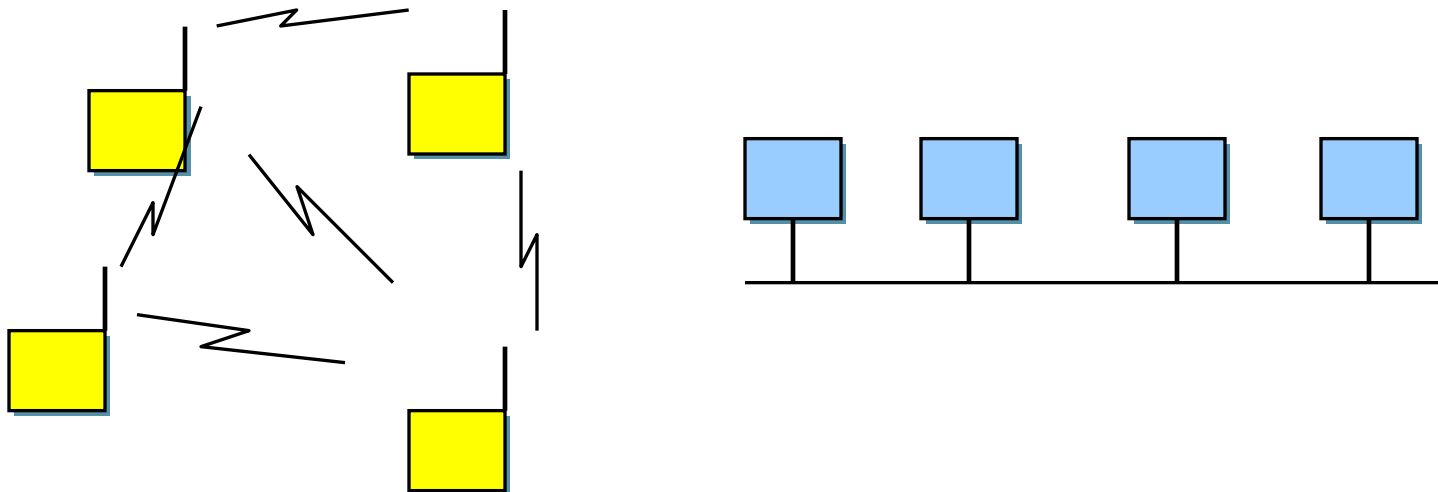
Canali broadcast

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



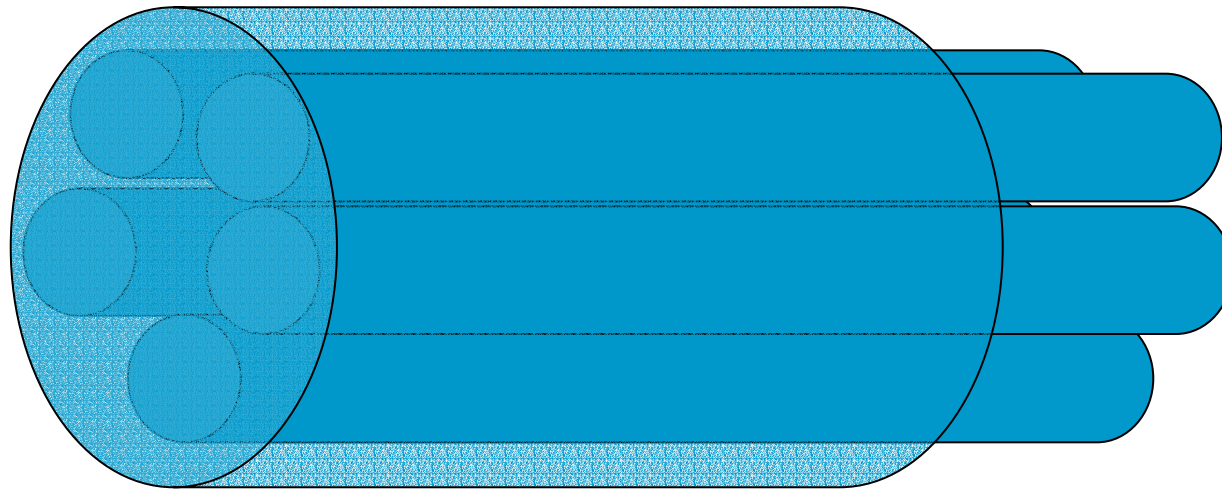
Canali broadcast

- 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



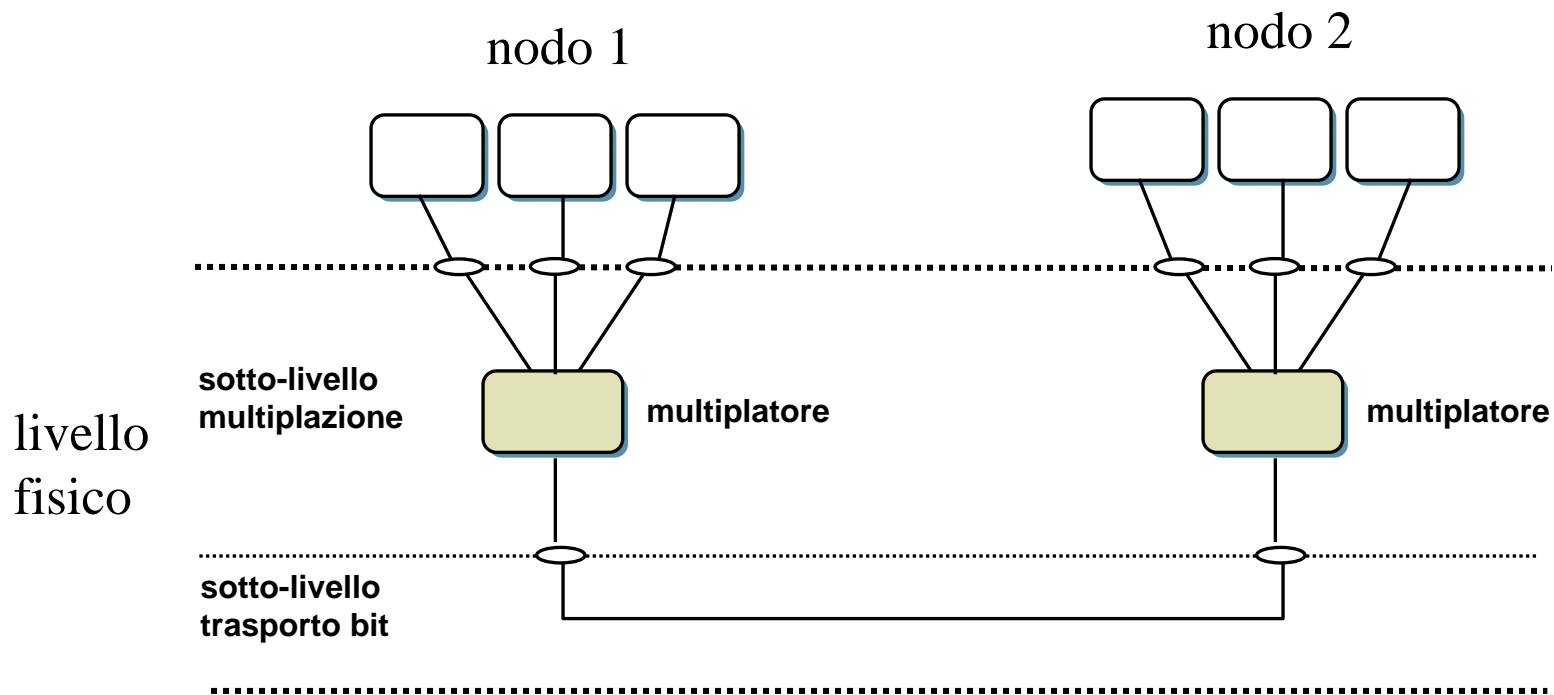
La multiplazione

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



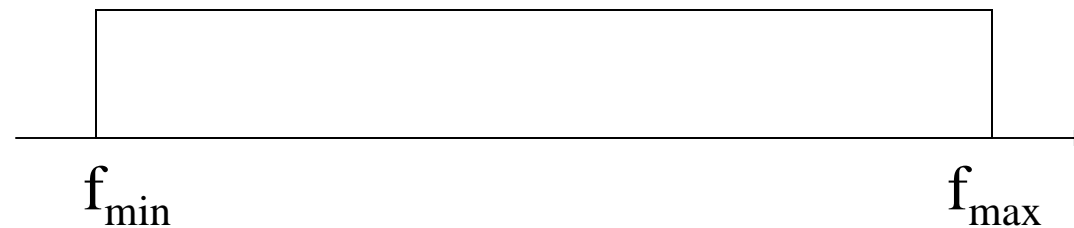
La multiplazione fisica

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

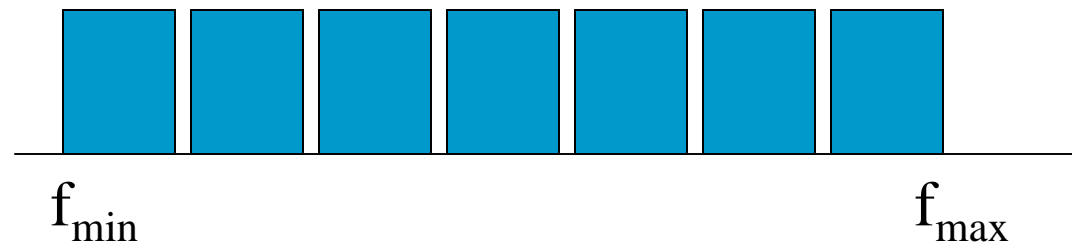


Multiplazione a divisione di frequenza FDM (Frequency Division Multiplexing)

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

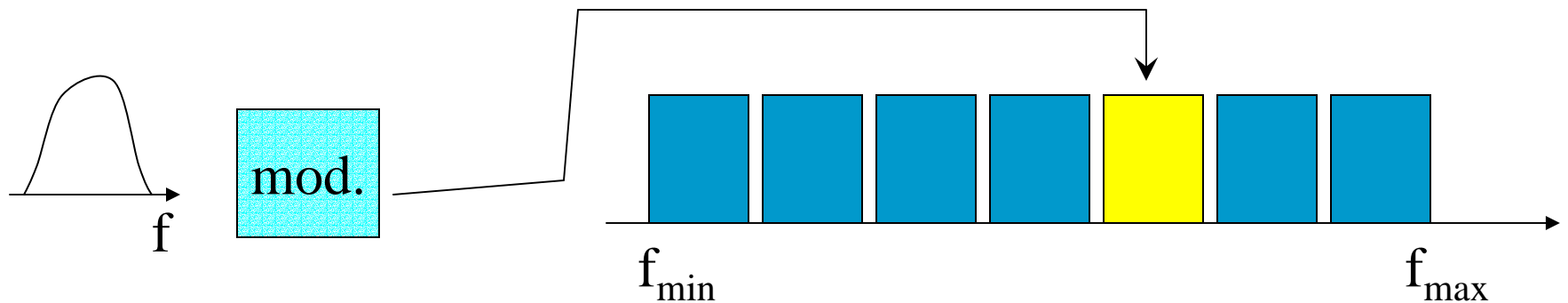


- la banda complessiva può essere divisa in sotto-bande cui associare un canale

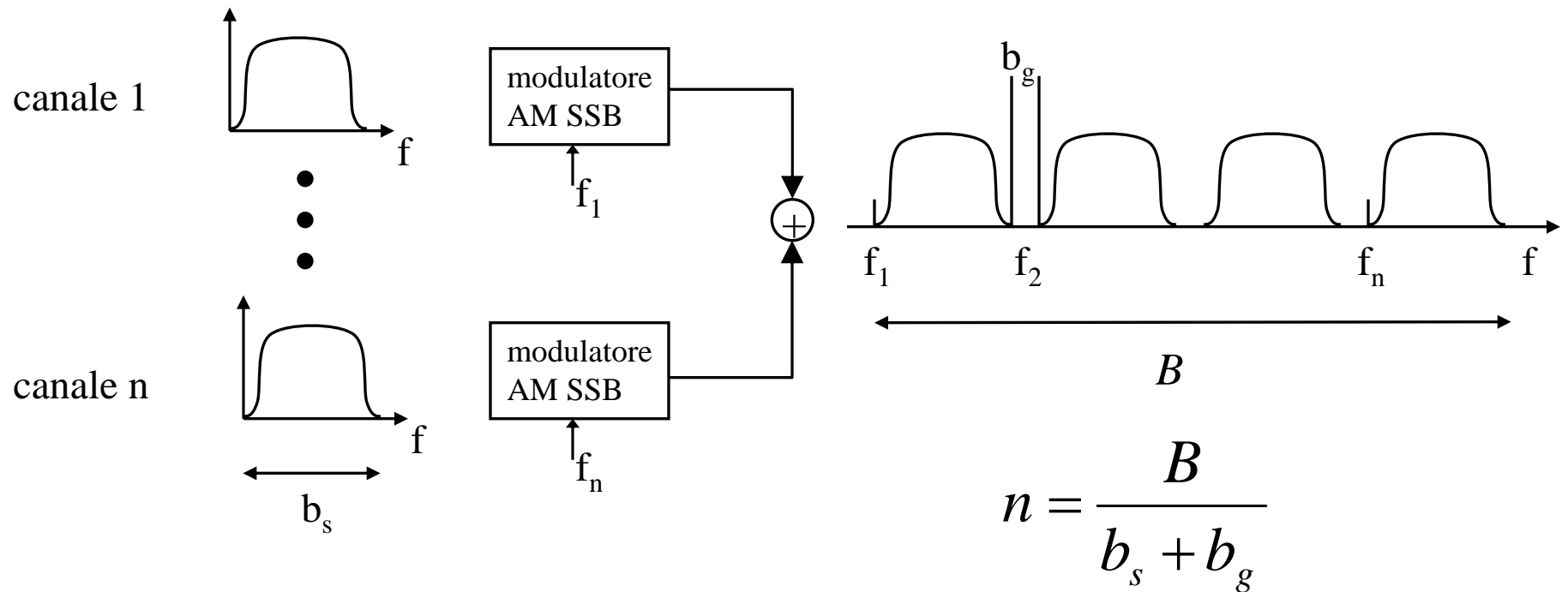


Multiplazione a divisione di frequenza FDM (Frequency Division Multiplexing)

- 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)



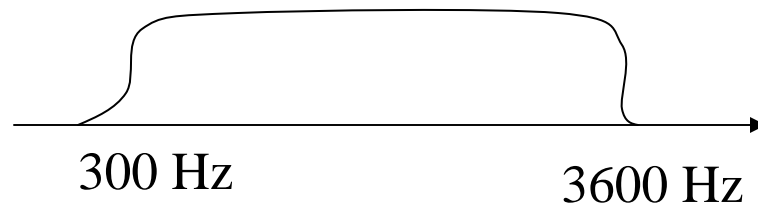
$B =$ banda complessiva utilizzabile del mezzo trasmissivo

$b_s =$ banda del segnale

$b_g =$ banda di guardia

FDM telefonico

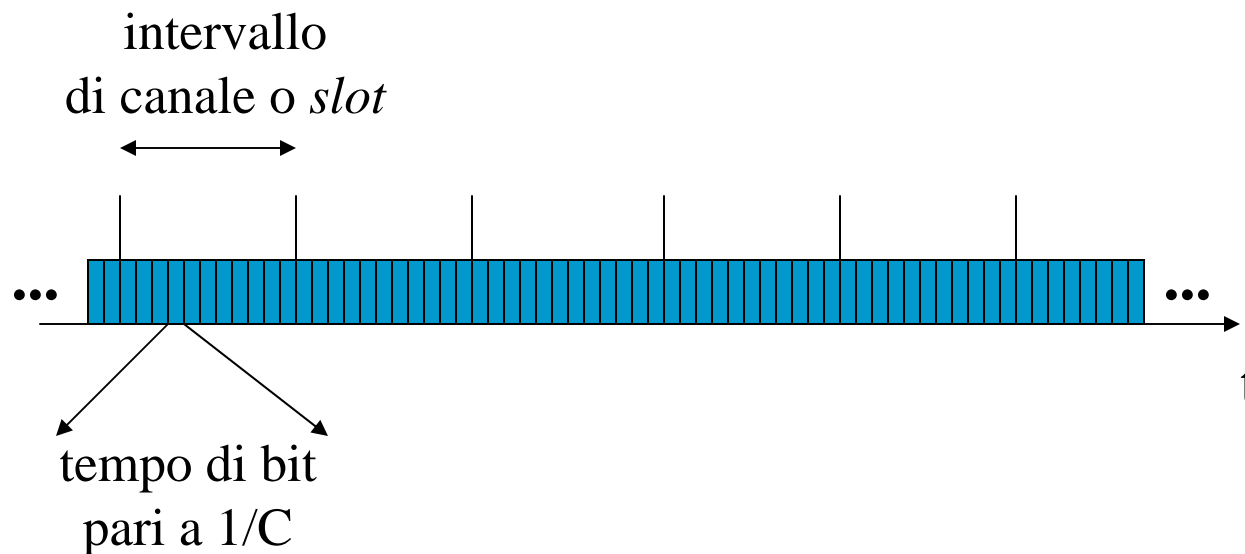
- in passato l'FDM veniva usato come tecnica di moltiplicazione dei canali vocali tra centrali telefoniche
- banda segnale vocale: circa 4 kHz



- 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)

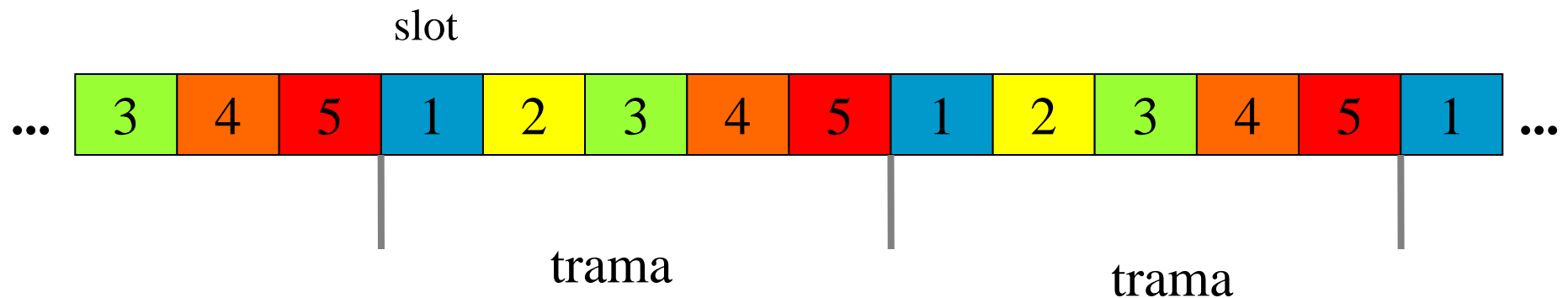
Multiplazione a divisione di tempo TDM (Time Division Multiplexing)

- 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 $t_b=1/C$

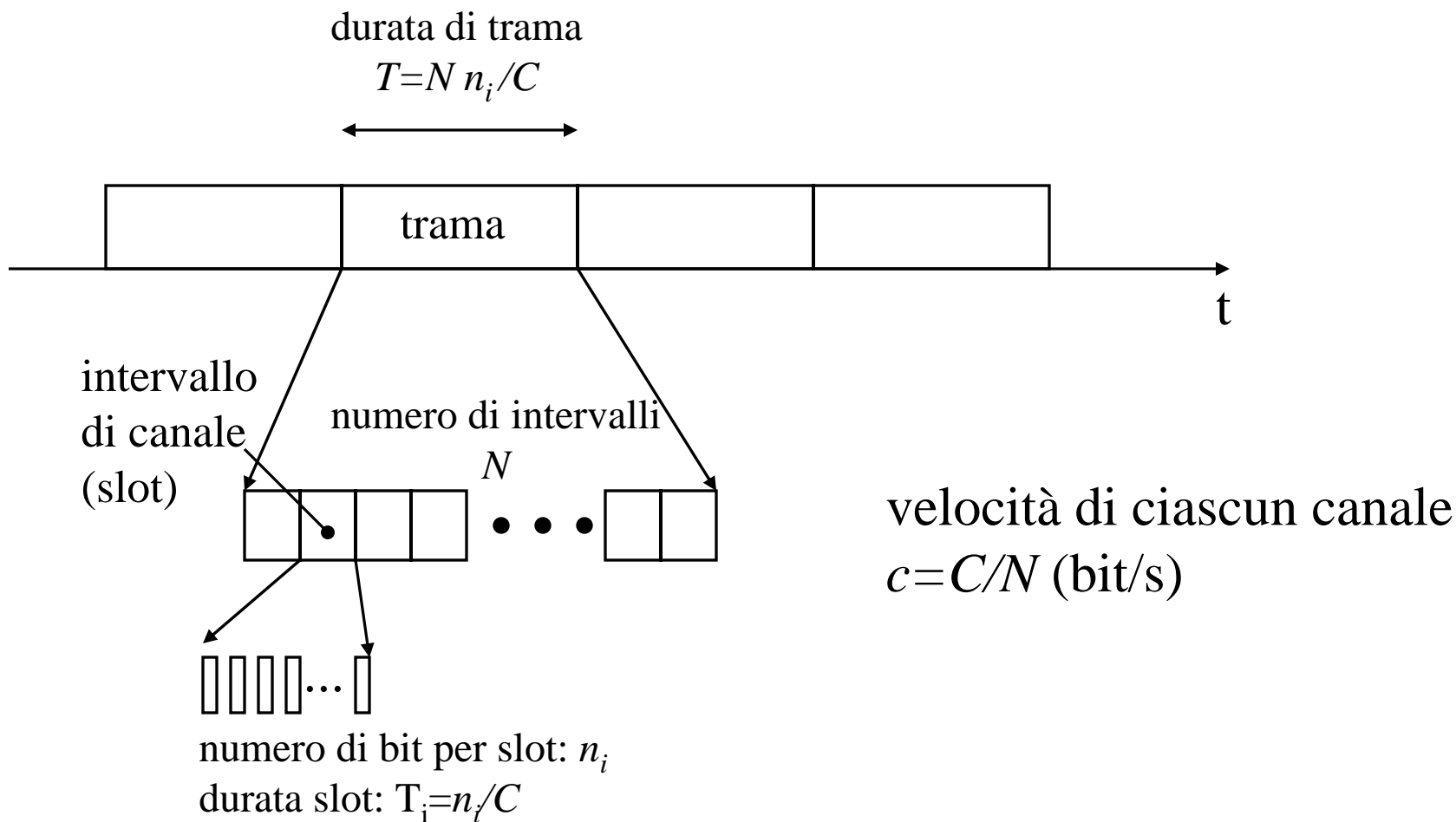


TDM (Time Division Multiplexing)

- 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

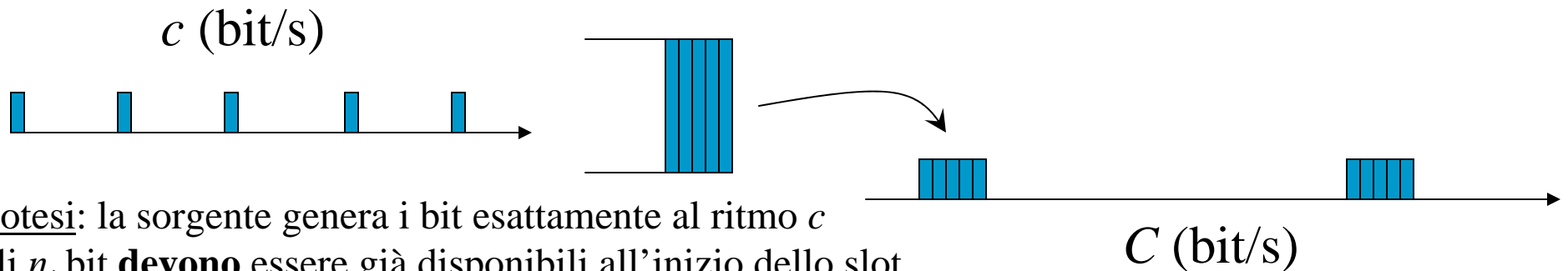


TDM (Time Division Multiplexing)



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)

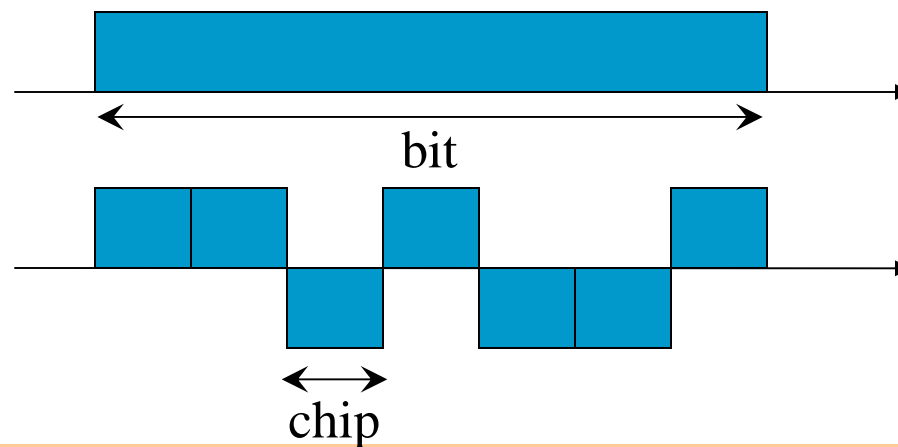
Esercizio

- Si consideri un canale di velocità $C=900$ kbit/s
- si vogliono 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 moltiplicazione sia un byte (ottetto).

da fare a casa

Multiplazione a divisione di codice CDM (Code Division Multiplexing)

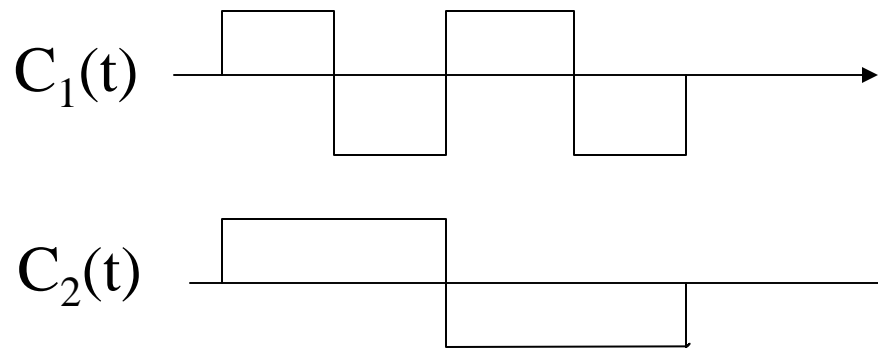
- La tecnica CDM consiste nel miscelare N flussi di bit previa moltiplicazione di ciascuno di questi per una parola di codice C_i scelta fra le N parole di un codice ortogonale
- le parole del codice sono costituite da N simboli binari, chiamati *chip* per distinguerli dai bit di informazione, di durata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

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

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

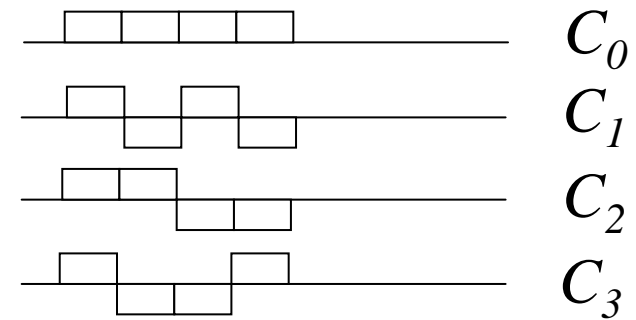
Esempio N=4

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

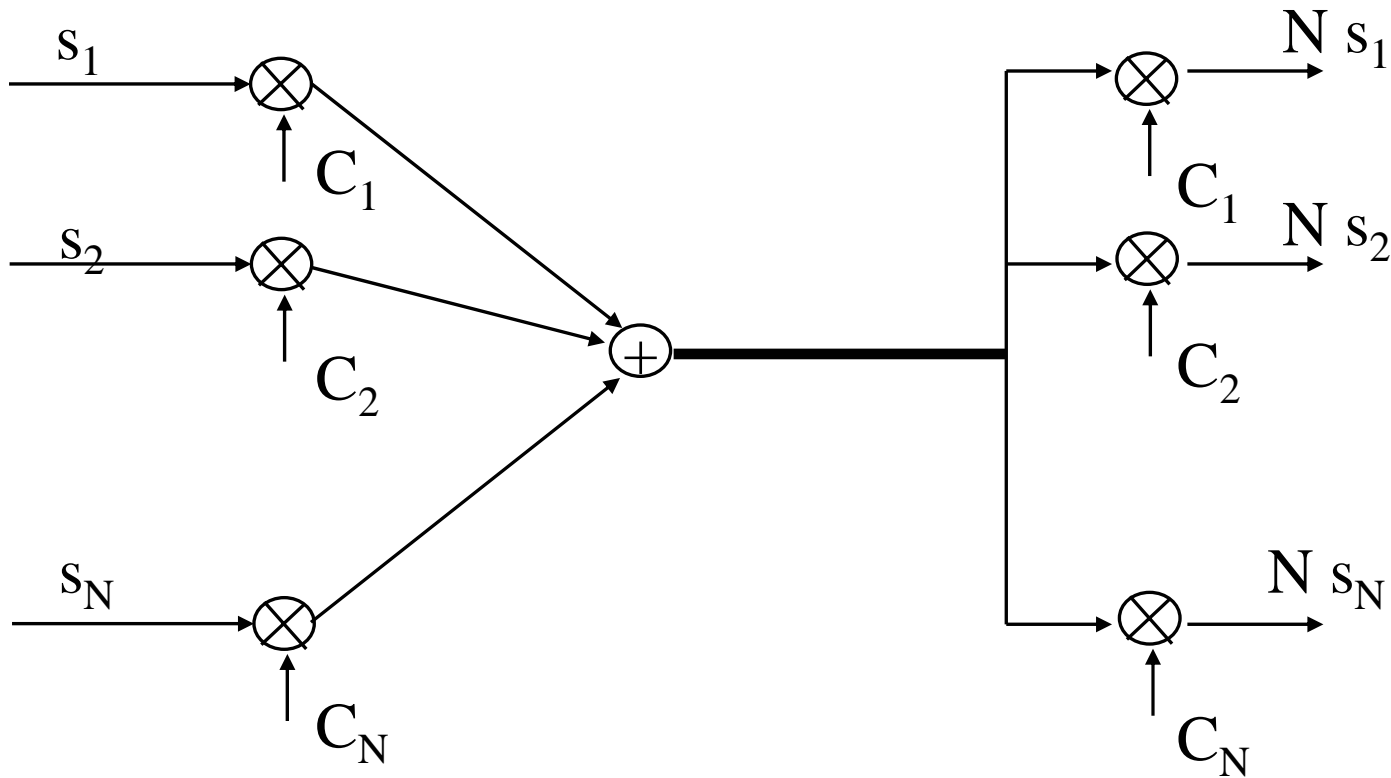
$$C_1 = \{1, -1, 1, -1\}$$

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

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



CDM (Code Division Multiplexing)



In ricezione: estraggo il k-esimo segnale

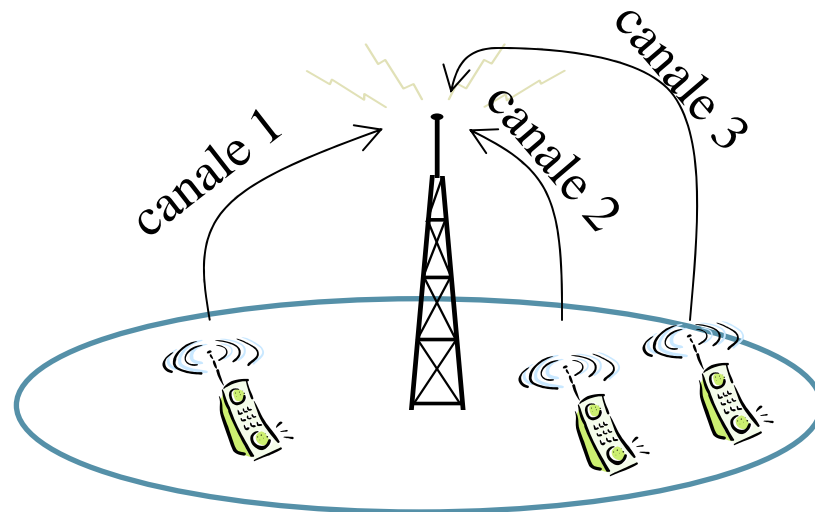
$$\left(\sum_{i=1}^N s_i C_i \right) \cdot C_k = N \cdot s_k$$

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

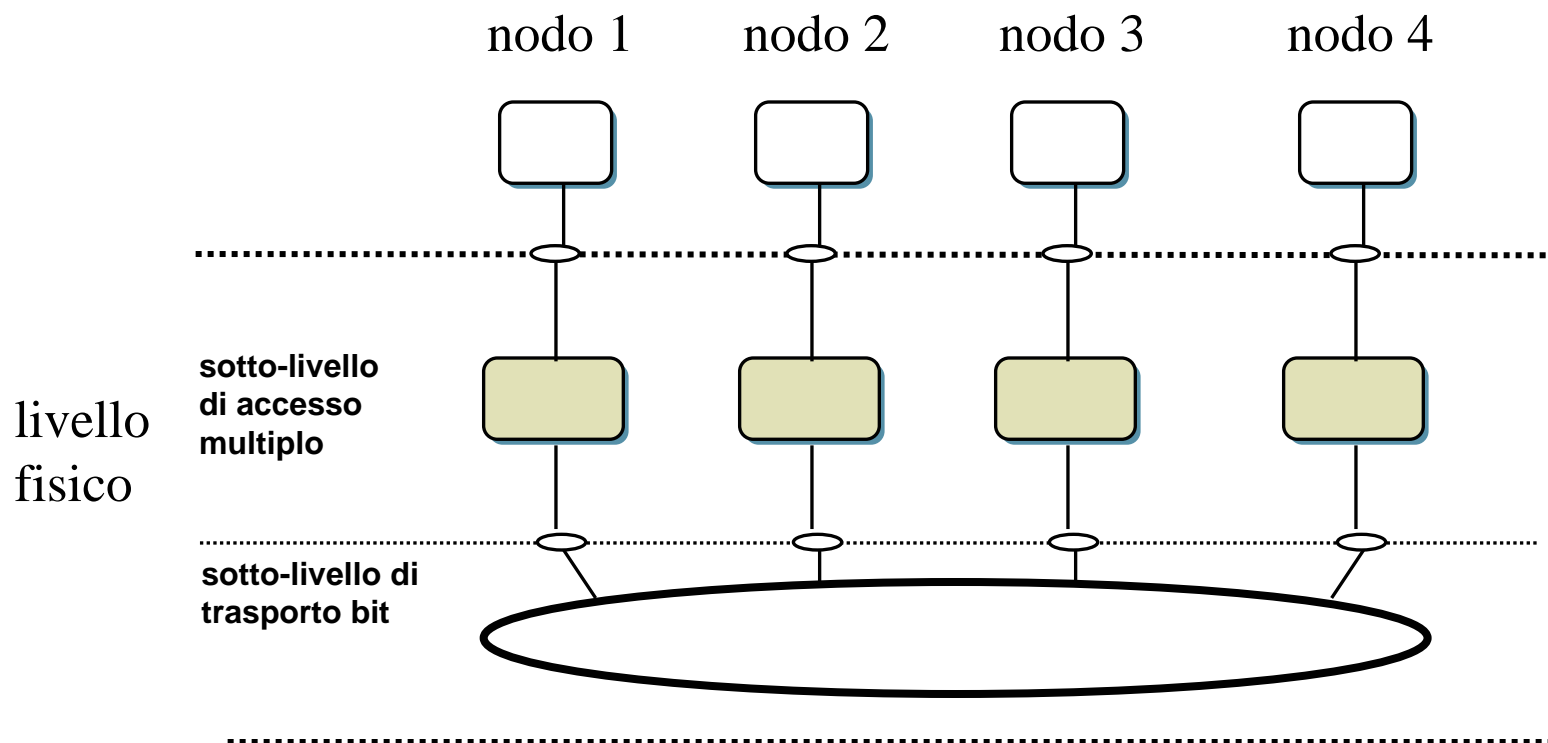
- è la stessa cosa che FDM, si chiama WDM per ragioni storiche legate allo sviluppo della fibra ottica
- le diverse portanti ottiche alle diverse lunghezze d'onda sono gestite con dispositivi ottici
- ciascuna portante ottica viene modulata ai limiti delle velocità elettroniche (5-10 Gbit/s)
- il limite 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 moltiplicazione 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

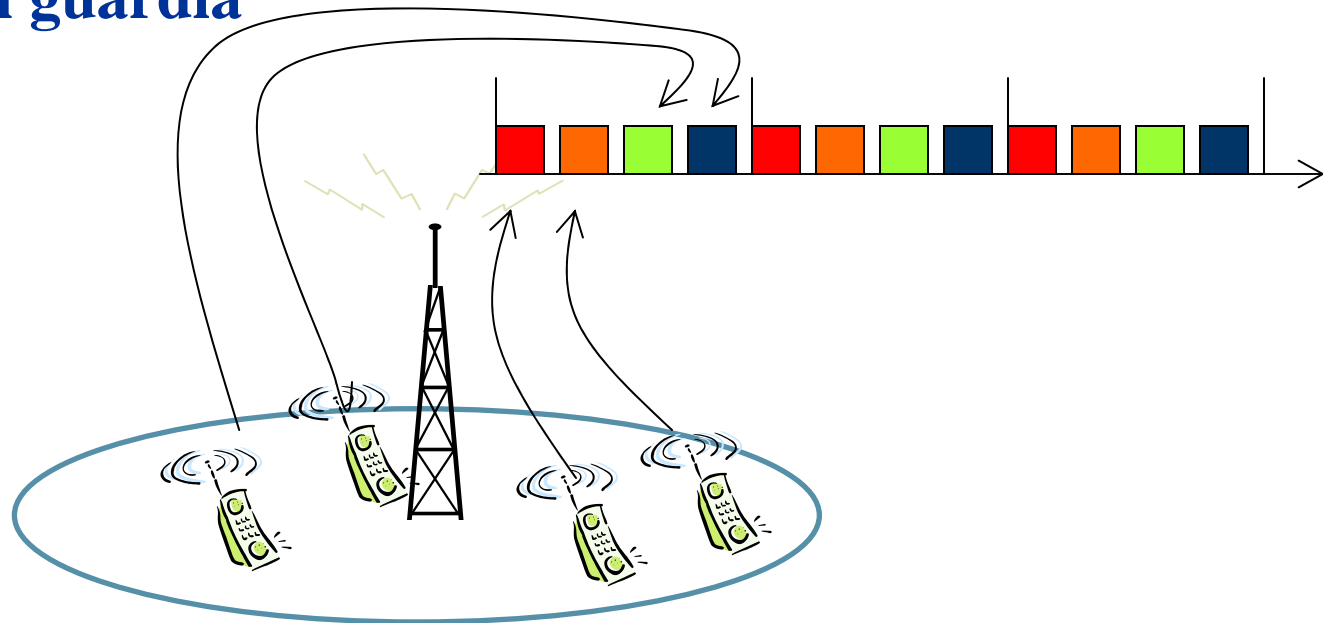
Frequency Division Multiple Access

- **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

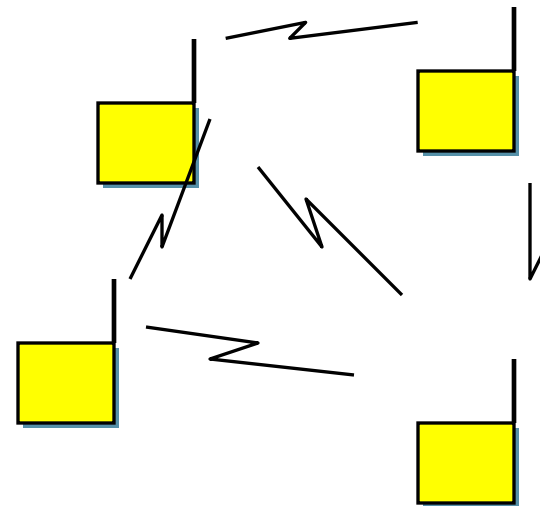
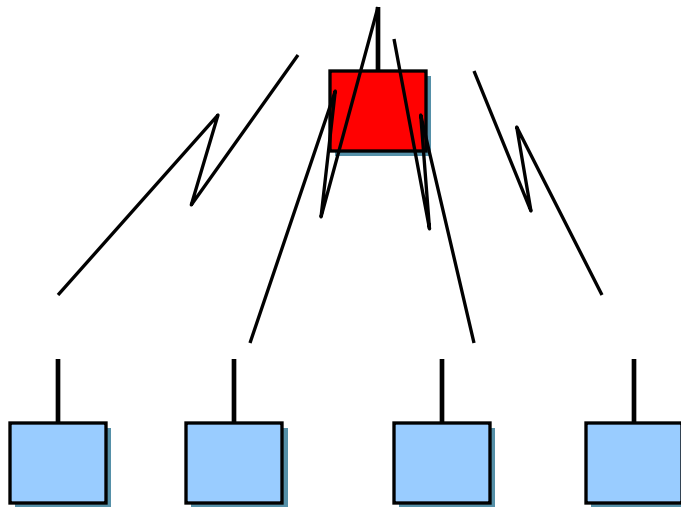
Time Division Multiple Access

- 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



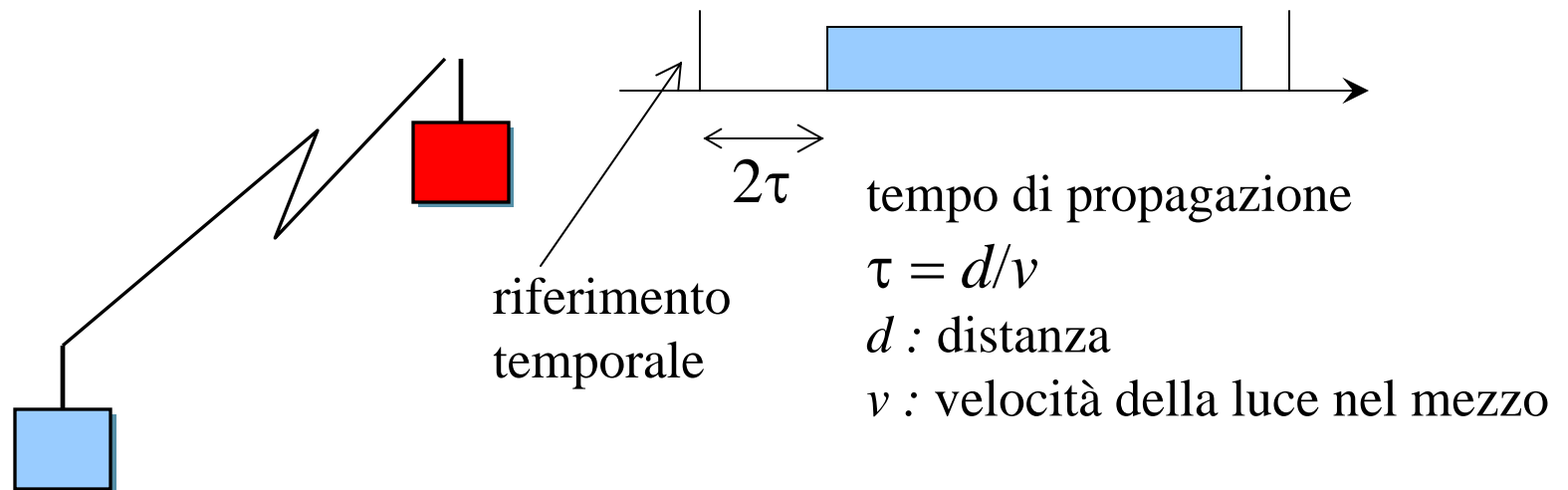
Sincronismo di trama

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



Canali broadcast centrali

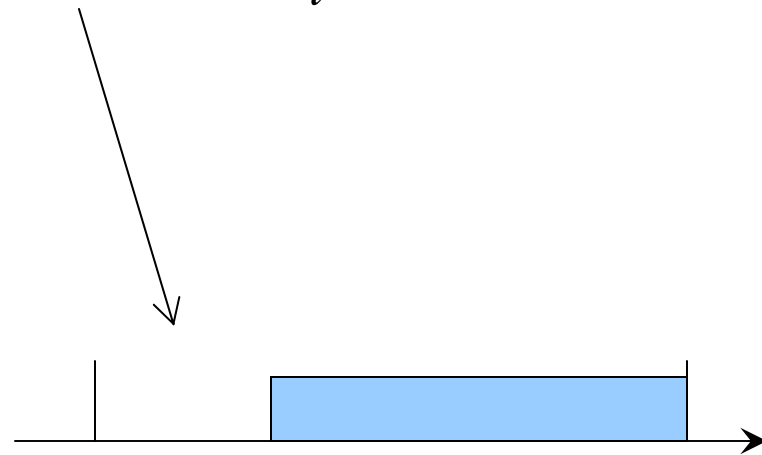
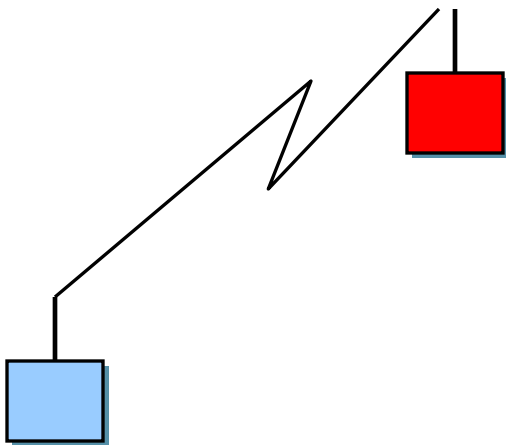
- il punto centrale può essere di riferimento per il sincronismo
- le sue trasmissioni regolari possono sincronizzare le trasmissioni delle altre (ad es. una trasm. ogni trama, o ad intervalli multipli)



Canali broadcast centrali

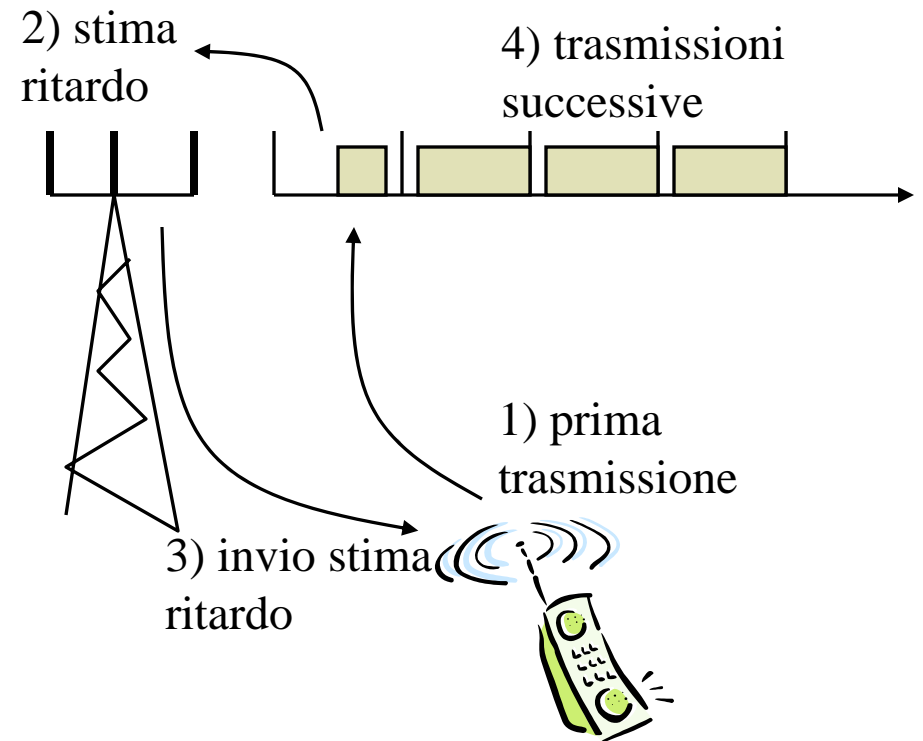
- tempo di guardia:

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



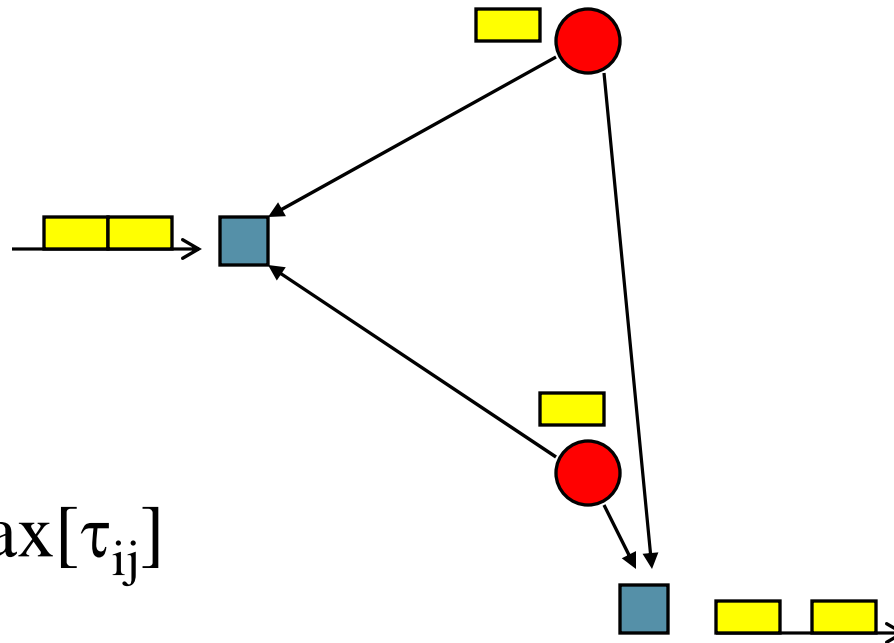
Canali broadcast centrali

- **Timing Advance:**
 - noti i tempi di propagazione le stazioni possono compensarli con una trasmissione anticipata
 - necessità di stimare i τ (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

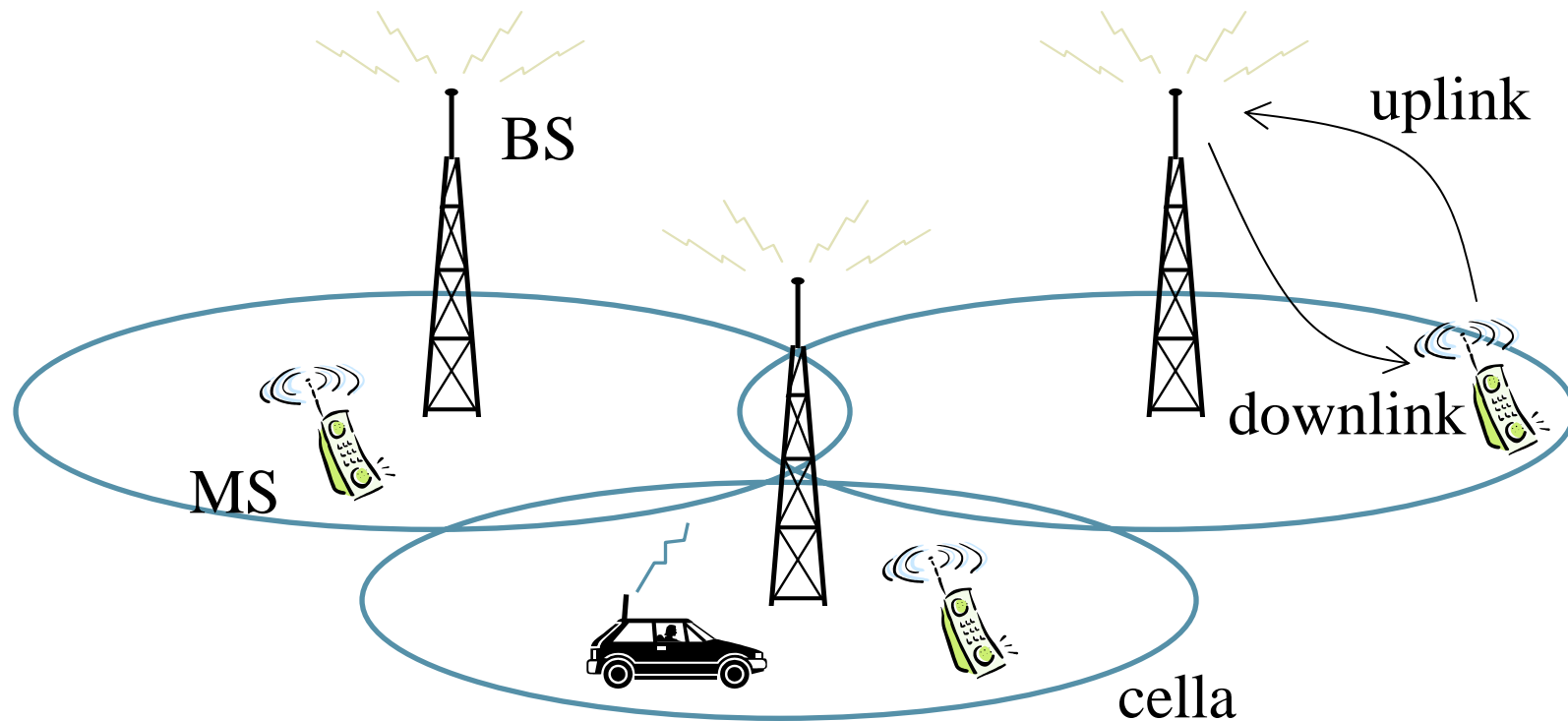
Code Division Multiple Access

- 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^a generazione)

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

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

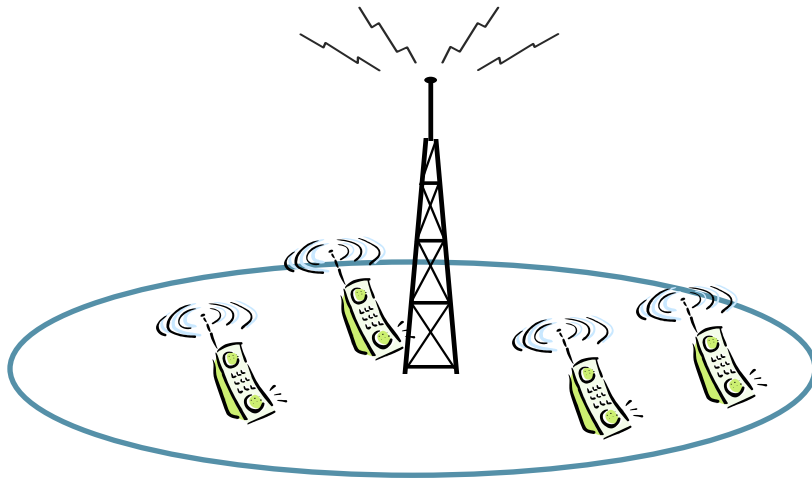
Sistemi radiomobili



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

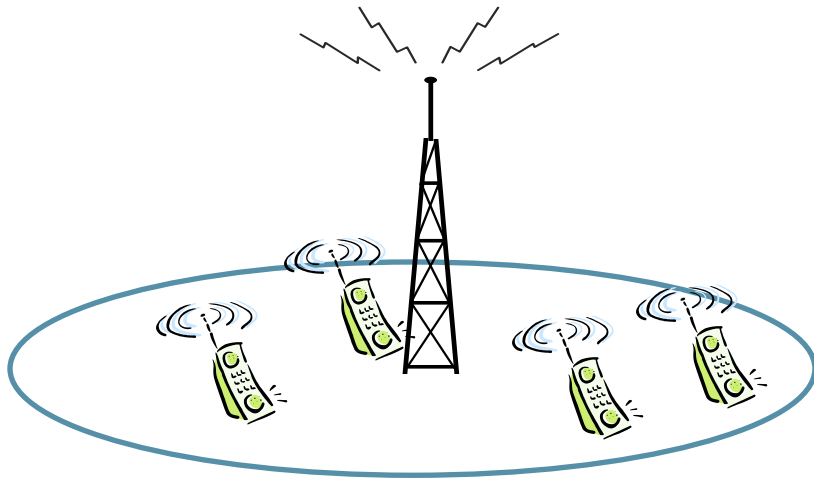
- **downlink:**

- multiplazione dei canali verso gli utenti

- **uplink:**

- accesso multiplo delle stazioni mobili

Accesso radio



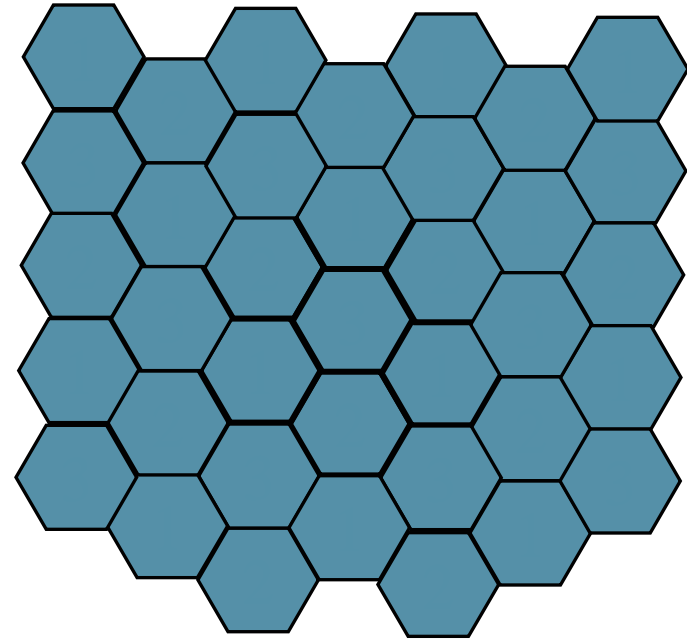
- **Sistemi di prima generazione:**
 - TACS (Europa)**
 - AMPS (Stati Uniti)**
 - **FDM/FDMA**
(downlink/uplink)
- **Sistemi di seconda gen.:**
 - GSM (Europa)**
 - D-AMPS (Stati Uniti)**
 - **multi-carrier TDM/TDMA**
- **Sistemi di terza gen.:**
 - UMTS (Europa e ???)**
 - **CDM/CDMA**

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)

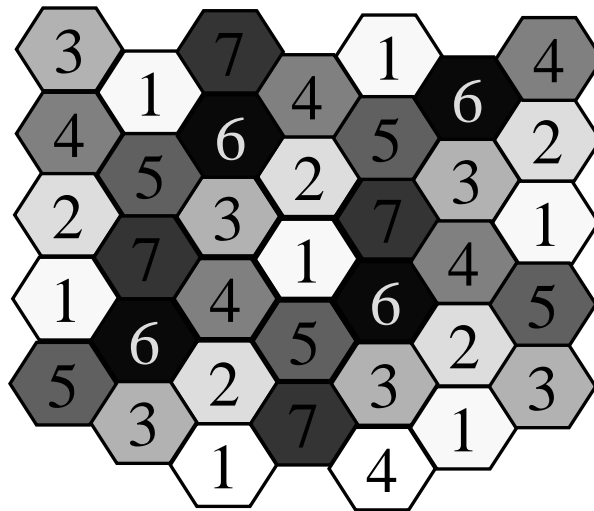
Riuso di frequenza

- 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}

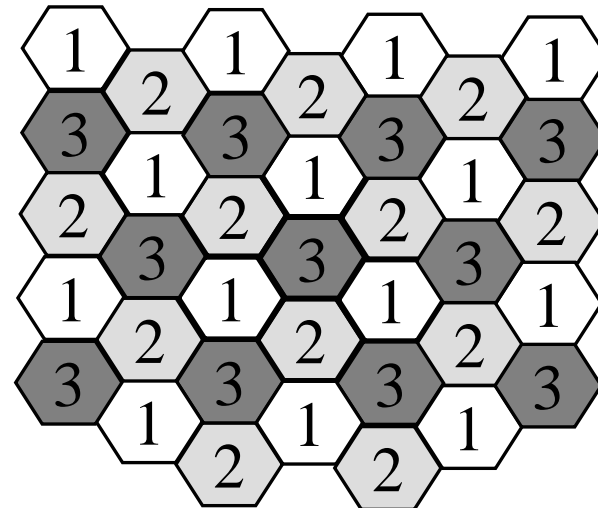


Cluster

- 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:

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

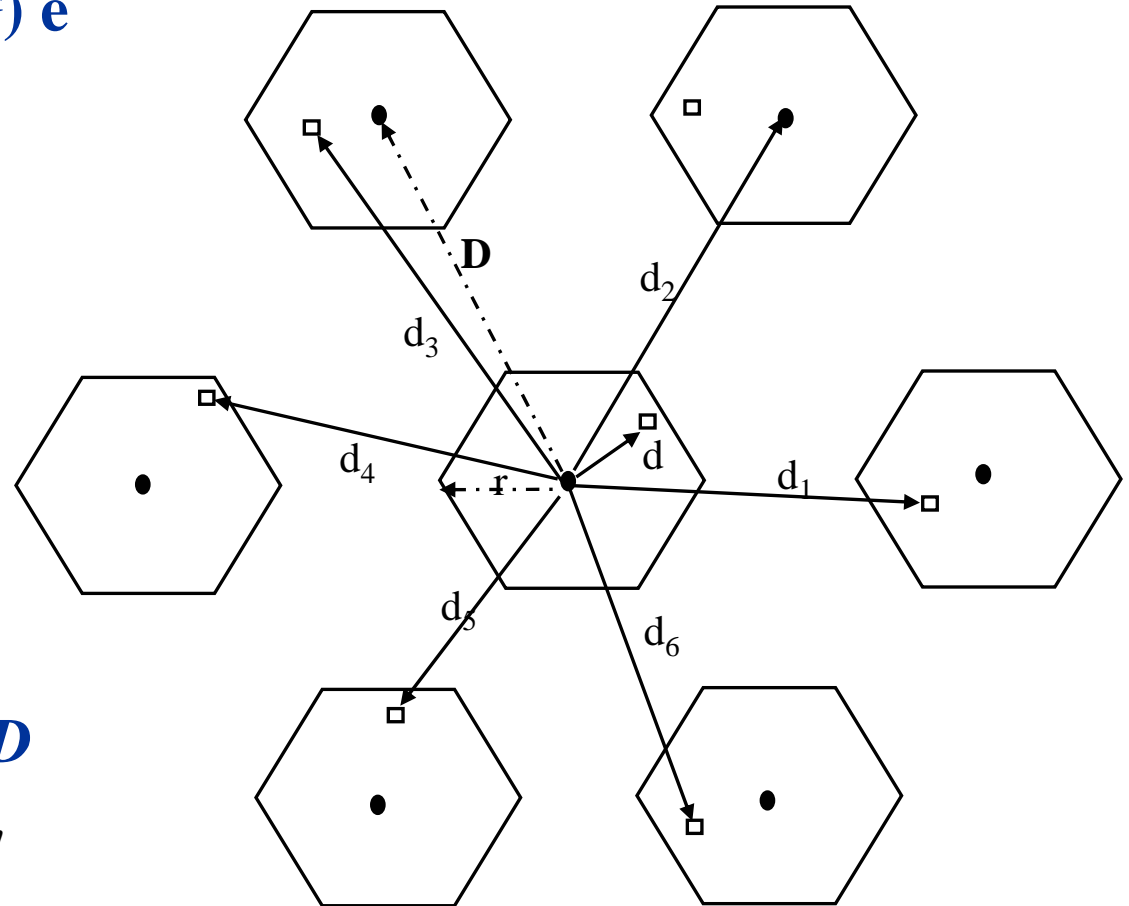
Cluster

- 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 η) 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 i cui l'esponente di attenuazione della distanza η 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**

$$2 \rightarrow 3dB$$

$$3 \rightarrow 4.77dB$$

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

$$5 \rightarrow 7dB$$

$$6 \rightarrow 7.77dB$$

$$8 \rightarrow 9dB$$

$$9 \rightarrow 9.54dB$$

$$10 \rightarrow 10dB$$

$$100 \rightarrow 20dB$$

$$1000 \rightarrow 30dB$$