

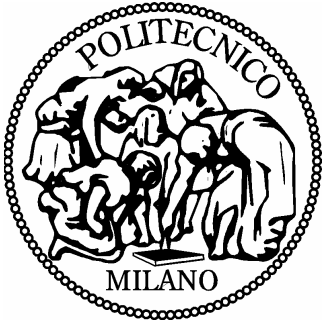


Politecnico di Milano

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione

Reti mobili distribuite

Prof. Antonio Capone



Politecnico di Milano

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione

1 – Introduzione

Reti Mobili Distribuite

Prof. Antonio Capone



Il docente

- Prof. Antonio Capone
- Ufficio:
 - Dip. di Elettronica e Informazione
 - 3° piano
 - stanza 335
- Tel: (02 2399) 3449
- E-mail: capone@elet.polimi.it
- Web page:
<http://home.dei.polimi.it/capone/>
- Orario di ricevimento:
 - Martedì 14.00-16.00



Materiale didattico

- ☐ Articoli e testi disponibili sulla pagina web del corso
- ☐ Lucidi del corso
- ☐ Link disponibili sul sito web



Home page del corso

Advanced Network Technologies Lab - Reti Mobili Distribuite - Mozilla Firefox

File Edit View History Bookmarks Tools Help

http://antlab.elet.polimi.it/index.php?option=com_content&task=view&id=103&Itemid=120

Home People Research Publications

ANT LAB

Advanced Network Technologies Laboratory

Antonio Capone

- Home
- Biography
- Publications
- Teaching
 - Infrastrutture e protocolli per Internet
 - Reti Mobili Distribuite**
 - Programma
 - Materiale didattico
 - Temi d'esame
 - Reti Radiomobili
 - CISCO Networking Academy

Reti Mobili Distribuite

Attenzione: nell'anno accademico 2007-2008 il contenuto del corso subirà alcune modifiche in relazione all'attivazione del corso di Reti Radiomobili per la laurea specialistica. I link che seguono sono relativi al materiale dello scorso anno che verrà aggiornato a breve.

Programma AA 2007-2008.

Materiale didattico

Temi d'esame



Scopo del corso

- **Reti wireless distribuite e a pacchetto**
 - Tecnologie e protocolli per reti d'accesso wireless (WiFi, WiMax, Bluetooth, Zigbee)
 - Architettura e i protocolli delle reti wireless multihop (reti ad hoc e reti di sensori)
 - Metodologie per l'analisi dei meccanismi d'accesso al canale radio
 - Algoritmi distribuiti per la gestione e il controllo delle reti wireless
 - Progetto sperimentale su reti ad hoc e reti di sensori
- **Prerequisiti:** Fondamenti delle reti di telecomunicazione, dei protocolli TCP/IP, e delle basi della teoria delle code.





Modalità d'esame

- ☐ Esame scritto
- ☐ Progetto sperimentale
 - Si può svolgere in piccoli gruppi.
 - Il progetto sperimentale non è obbligatorio ma fortemente consigliato
 - Può essere sostituito da una prova scritta sugli strumenti hw/sw utilizzati per le attività sperimentali.
- ☐ A discrezione del docente può essere richiesta una prova orale



Programma

- Tecnologie per reti wireless
 - Wi-Fi (Architettura e protocolli delle reti WLAN, specifiche IEEE 802.11, meccanismo d'accesso multiplo, formato delle trame, sistema di distribuzione, gestione della mobilità),
 - Bluetooth (Le specifiche Bluetooth, picocelle e scatternet, accesso al canale, stati dei terminali, formazione delle rete e segnalazione),
 - Zigbee (Le specifiche IEEE 802.15.4 e Zigbee alliance, architetture di rete a stella ad albero e mesh, meccanismo d'accesso multiplo),
 - WMAN (Lo standard IEEE 802.16 – WiMaX, architettura di rete, modalità Point-To-Multipoint, modalità MESH, accesso al canale e scheduling).



Programma

- Livello rete e trasporto.
 - Meccanismi di gestione della mobilità a livello rete (Mobile IP, protocolli di micromobilità).
 - TCP su wireless (meccanismi di gestione degli errori del canale, soluzioni end-to-end, soluzioni TCP indiretto, soluzione a livello di linea, modelli analitici).



Programma

- Accesso multiplo al canale radio (modelli di analisi)
 - Il protocollo Aloha (modello a popolazione infinita, modello a popolazione finita, modello single-buffer, algoritmi di stabilizzazione)
 - Modelli per l'analisi di CSMA (Carrier Sense Multiple Access), CSMA/CD (CSMA with Collision Detect), CSMA/CA (CSMA with Collision Avoidance),
 - Meccanismi a polling (modelli per il calcolo del tempo d'attesa in coda, servizio esaustivo, servizio gated, servizio limitato e round robin)
 - Meccanismi di scheduling per sistemi radio (problematiche di segnalazione dello stato delle code, scheduling dipendente dallo stato del canale radio, scheduling per sistemi multiportante).



Programma

□ Reti ad hoc

- Fondamenti delle reti ad-hoc e delle reti MESH.
- Meccanismi di accesso al mezzo per reti ad hoc (MAC casuali e ordinati).
- Routing per reti ad-hoc (routing proattivo, routing reattivo, routing geografico, meccanismi ibridi).
- Broadcast e multicast nelle reti ad-hoc (modelli per la minimizzazione della potenza, protocolli).



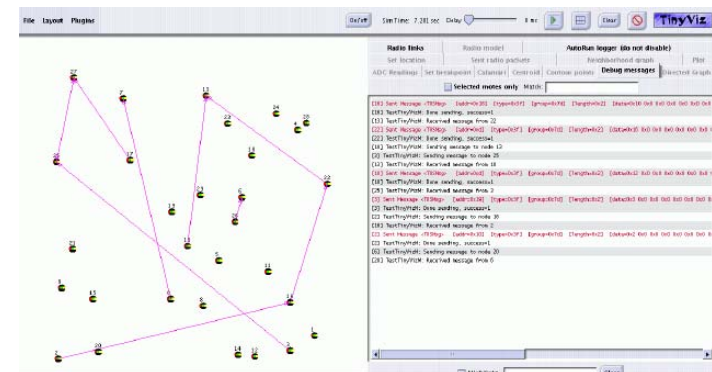
Programma

- Reti di sensori
 - Scenari applicativi e differenze con le reti ad hoc mobili
 - Fattori che influenzano il progetto e l'implementazione di reti di sensori
 - Meccanismi di accesso multiplo e di gestione dei periodi di attività
 - Meccanismi e protocolli di instradamento a basso consumo energetico
 - Approcci cross-layer
 - Trasporto dei dati e meccanismi per la loro aggregazione
 - Modelli ed algoritmi per la pianificazione ed il controllo



Programma

- Attività progettuale (prof. Matteo Cesana)
 - Introduzione agli strumenti hardware e software
 - TinyOS
 - NesC
 - Tossim
 - Tool di supporto
 - Esempi applicativi e pianificazione dell'attività sperimentale





Concetti propedeutici



Reti Wireless

- L'unica differenza sembra consistere nel mezzo trasmissivo radio, eppure:
 - Le particolari caratteristiche del mezzo hanno un grosso impatto sulle caratteristiche del sistema
 - le reti wireless consentono agli utenti di muoversi e gestiscono automaticamente la loro mobilità

Meglio wireless o wired?



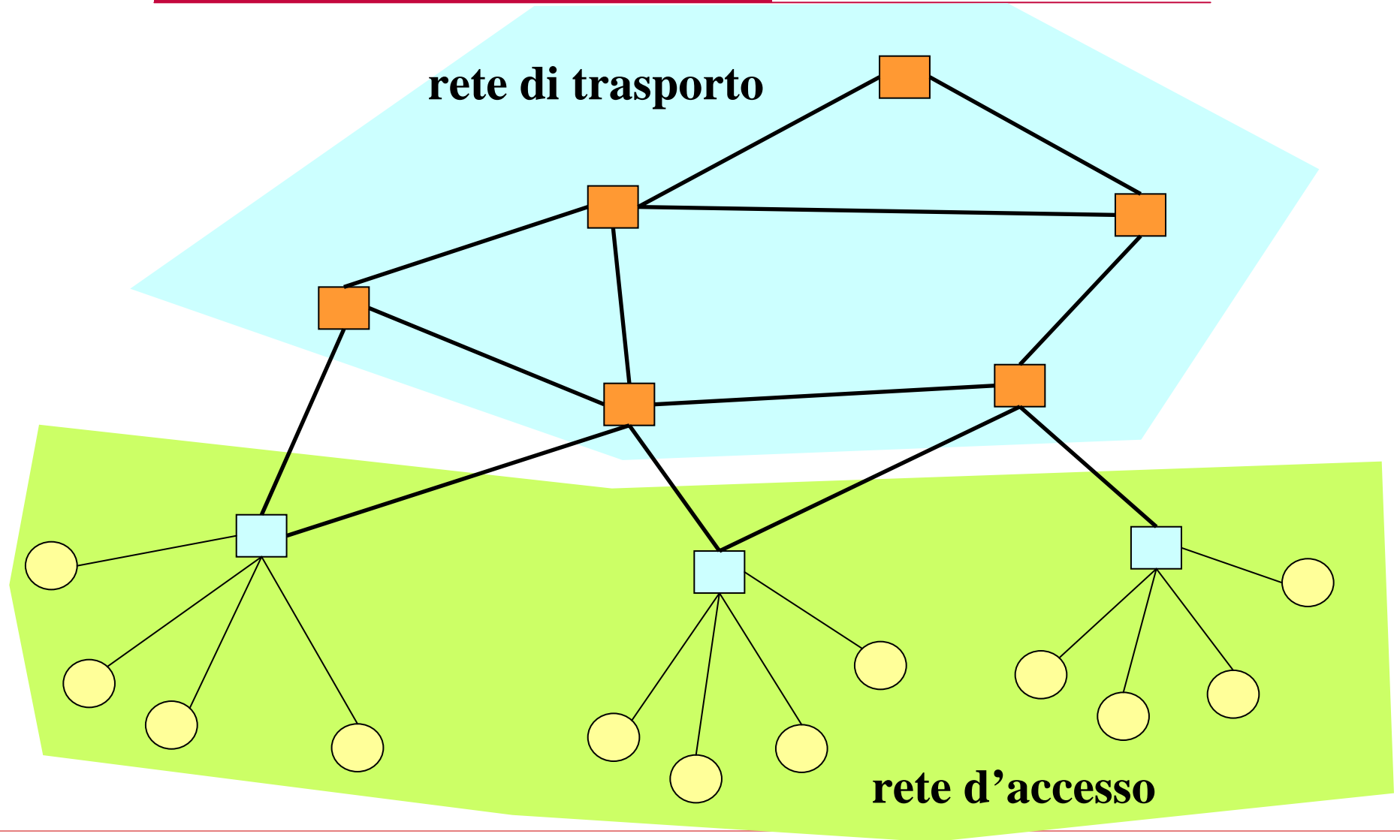


Mezzo Trasmissivo

- ❑ Le reti wireless esistono grazie alle tecniche di trasmissione su canale radio
- ❑ Nei primi sistemi cellulari si è fatto uso di tecniche analogiche mentre nei più recenti di tecniche numeriche
- ❑ Il mezzo radio è un mezzo intrinsecamente broadcast (la trasmissione di un terminale è ascoltabile da tutti gli altri)



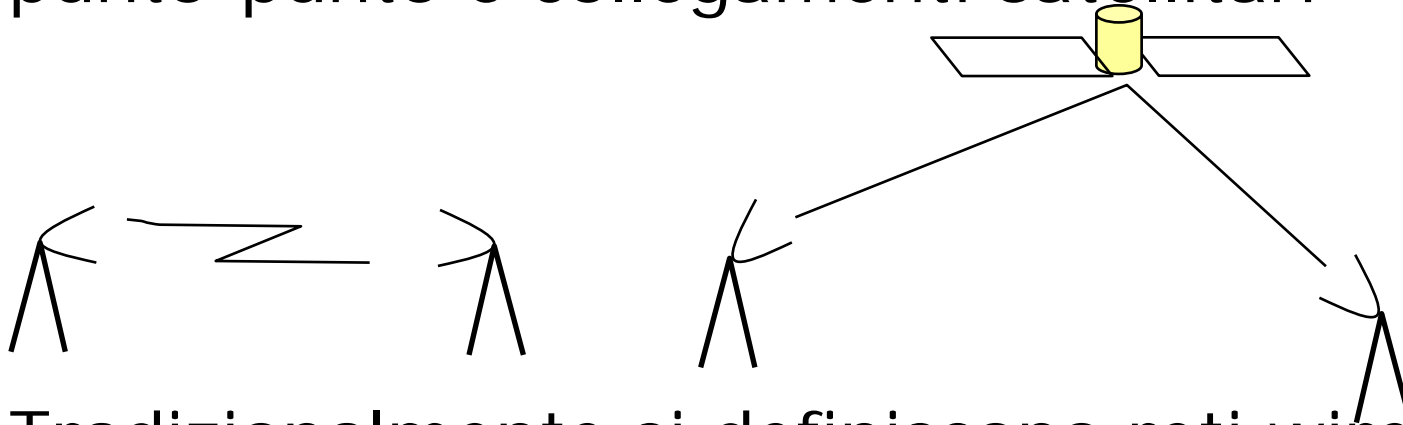
Architettura di una rete





Reti (di accesso) Wireless

- ❑ Le grandi reti di trasporto moderno fanno comunemente uso di collegamenti radio punto-punto e collegamenti satellitari

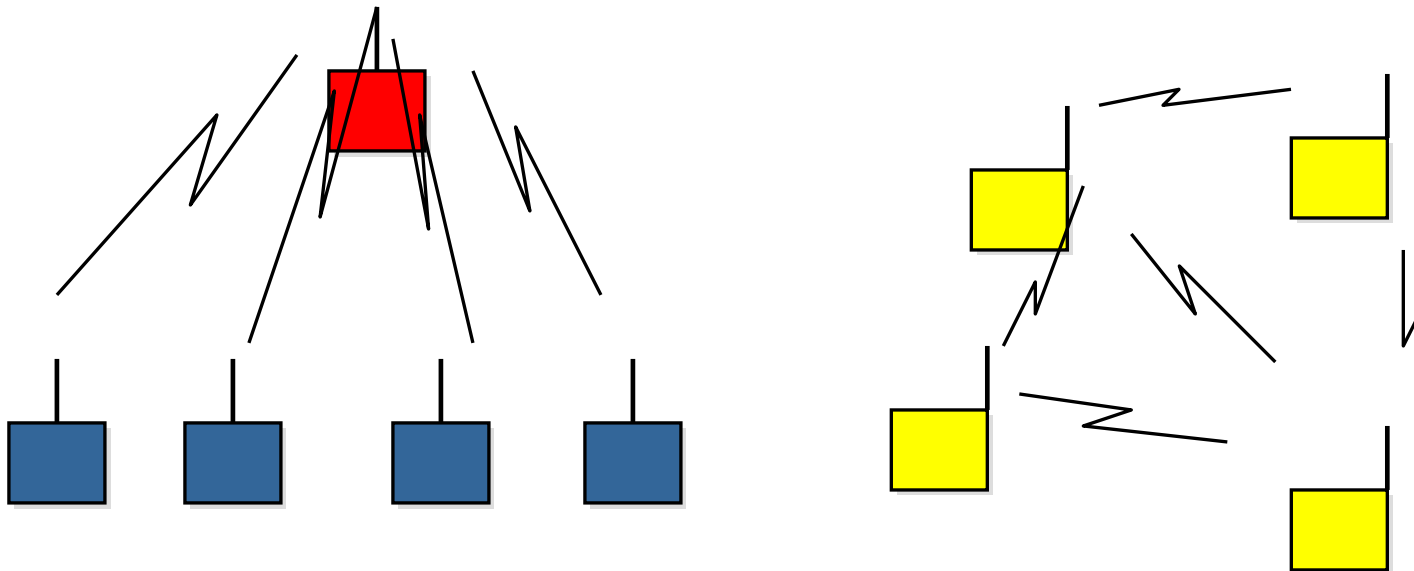


- ❑ Tradizionalmente si definiscono reti wireless solo quelle nelle quali l'accesso dell'utente è wireless
- ❑ Le reti wireless comprendono di solito anche una rete di trasporto di tipo wired



Canali broadcast

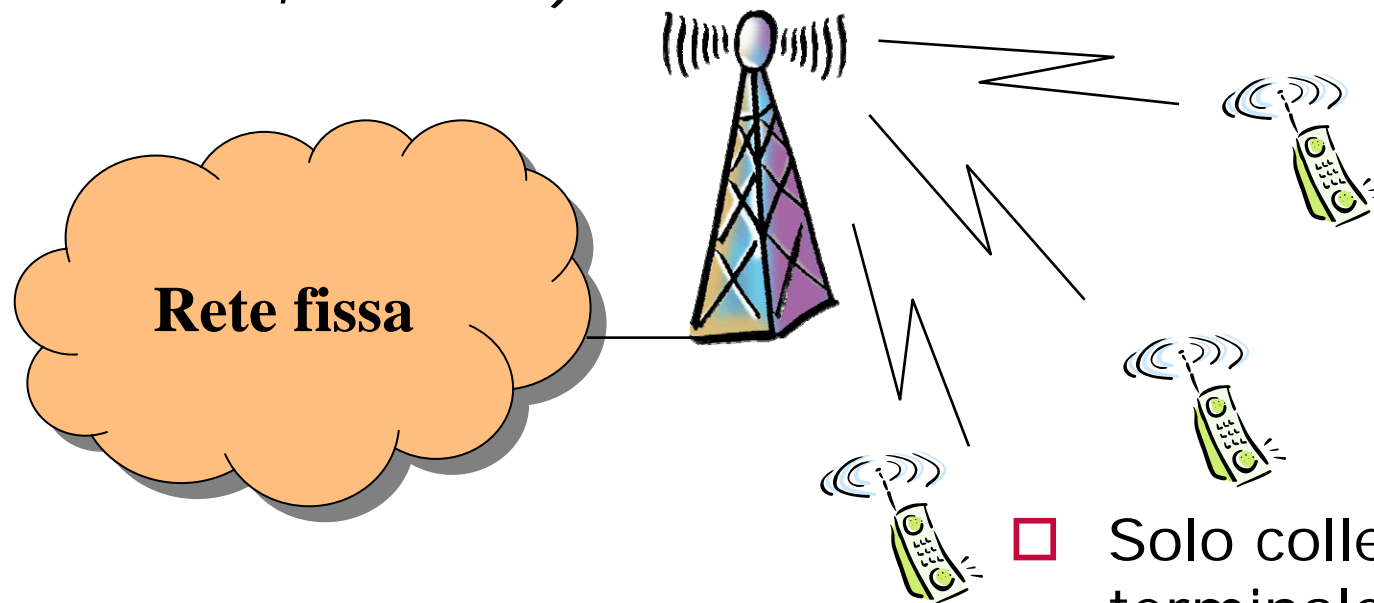
canali broadcast centrali
canali broadcast non-centrali





Reti Wireless

- ❑ Ai due tipi di canali broadcast corrispondo due tipologie di rete wireless
- ❑ 1) Reti con punto di accesso fisso (cellulari, WLAN, WMAN)

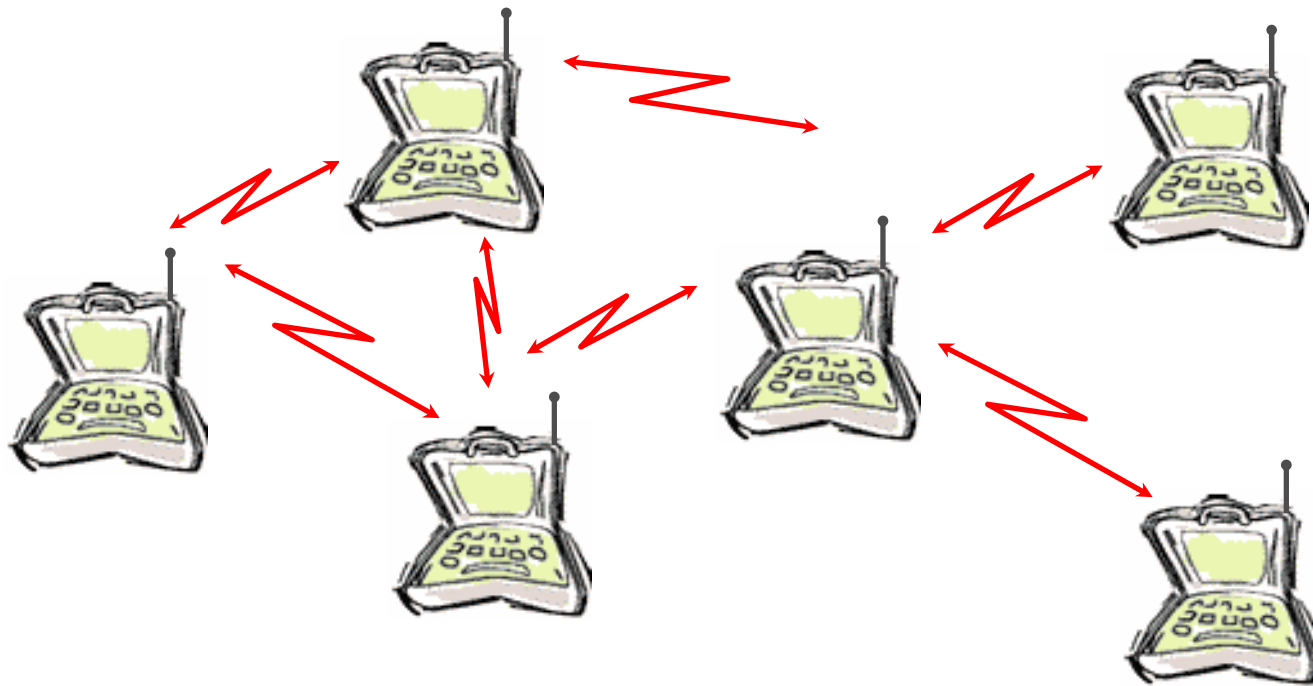


- ❑ Solo collegamenti terminale mobile – punto di accesso fisso



Reti Wireless

- Ai due tipi di canali broadcast corrispondono due tipologie di rete wireless
- 2) Reti wireless ad-hoc (Wireless LAN)

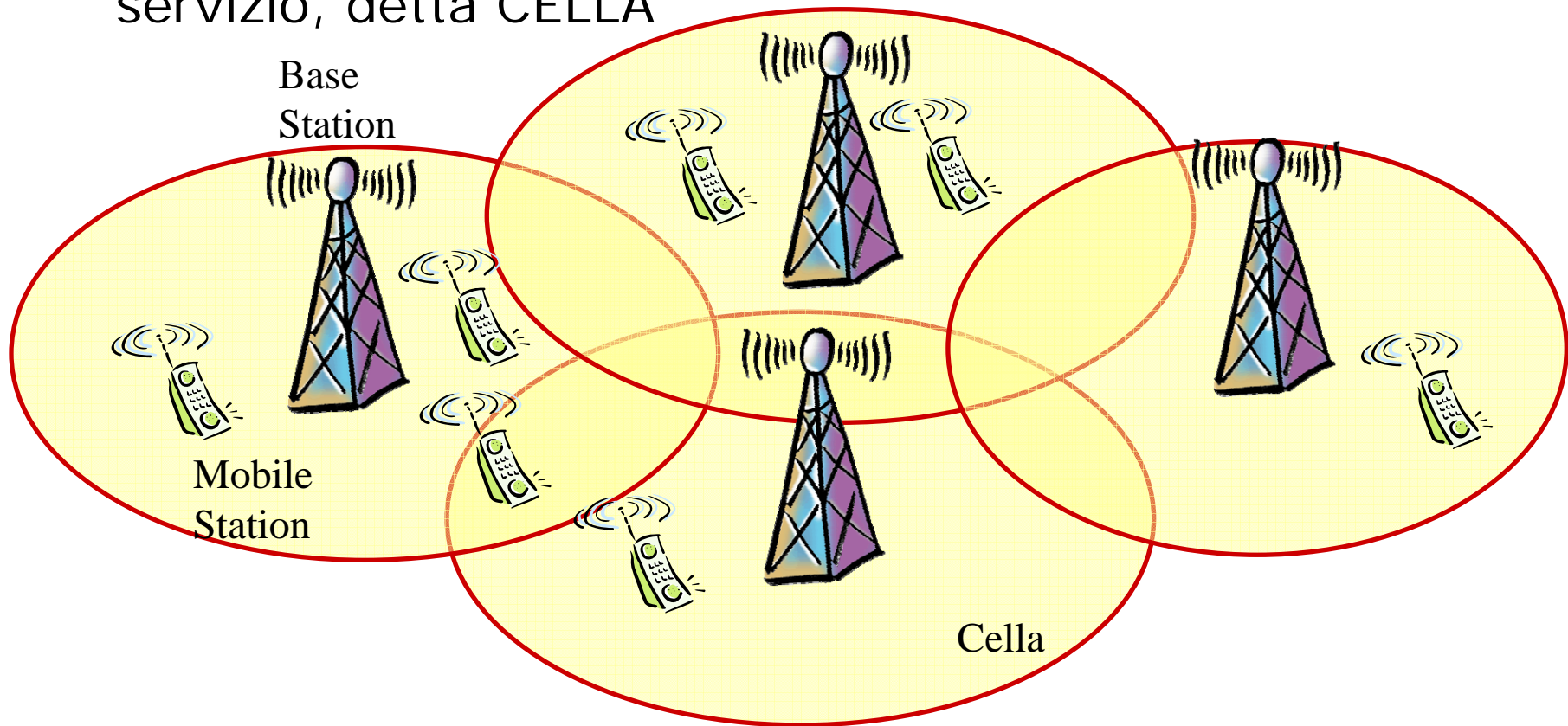


- Anche collegamenti mobile-mobile
- nella modalità multi-hop i mobile hanno funzionalità di inoltro dei pacchetti



Copertura Cellulare

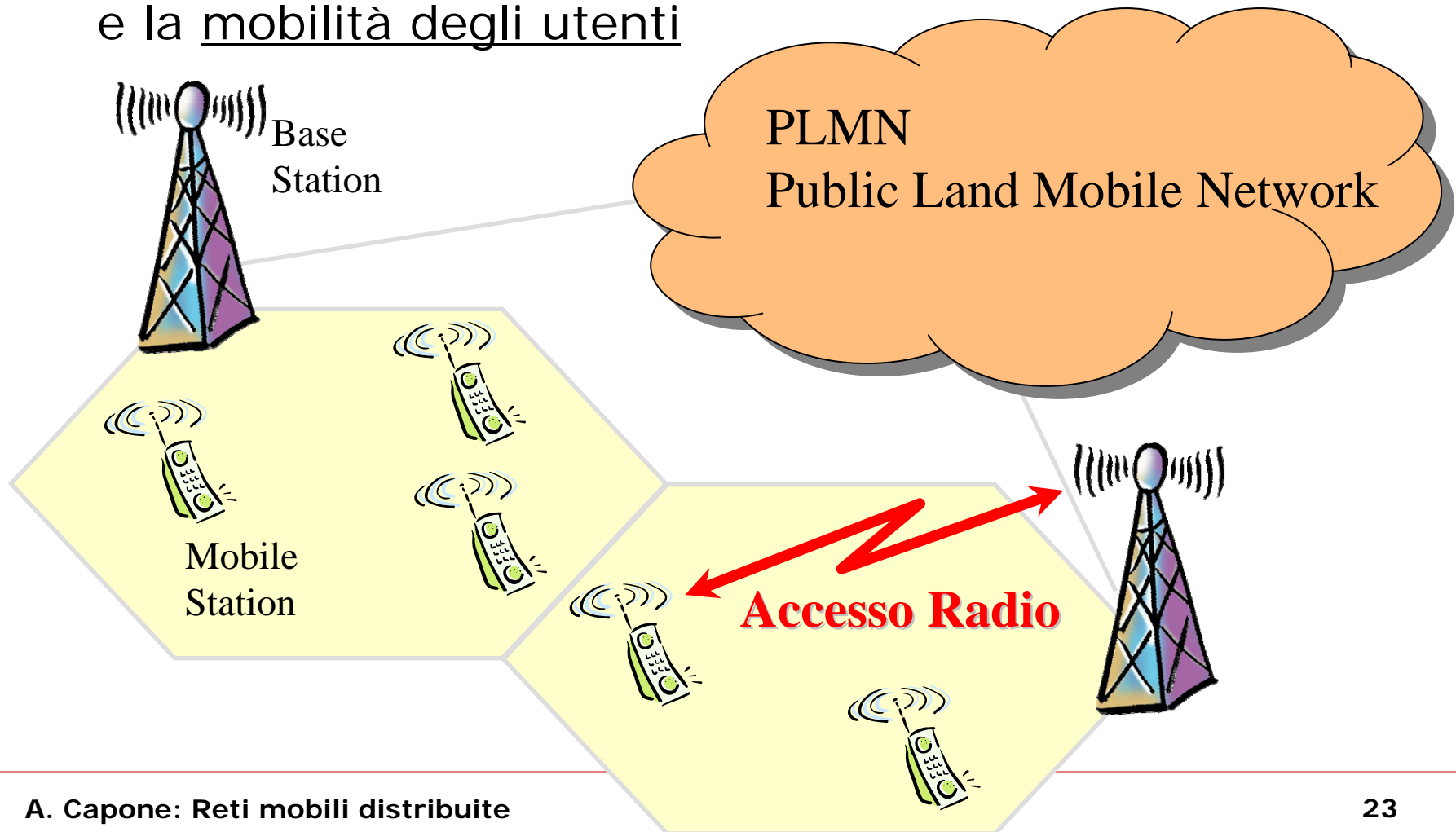
- La copertura del territorio è ottenuta con stazioni radio base (o punto d'accesso) che offrono accesso radio ai terminali mobili (stazioni mobili) nella loro area di servizio, detta CELLA





Reti Cellulari

- La rete cellulare è costituita anche da una parte “fissa” che gestisce tutti i servizi di comunicazione e la mobilità degli utenti





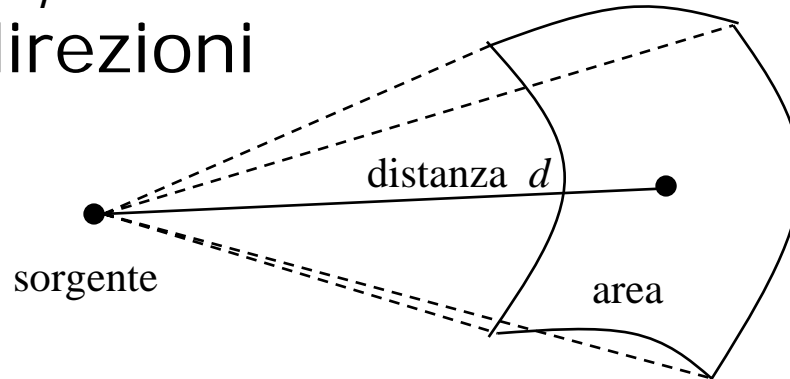
Canale wireless

- Rispetto ai mezzi cablati il canale radio è un mezzo di trasmissione molto “cattivo” (lo scenario cambia dinamicamente)
- I segnali che si propagano in aria sono soggetti a fenomeni di:
 - Attenuazione funzione della distanza tra trasmettitore e ricevitore
 - Attenuazione dovuta ad ostacoli
 - Propagazione per cammini multipli (multipath)



Canale wireless: attenuazione da distanza

- Una sorgente puntiforme (isotropic radiator) che trasmetta un segnale di potenza P_T lo irradia in modo uniforme in tutte le direzioni



- La densità di potenza sulla superficie di una sfera centrata nella sorgente puntiforme e con raggio d è data da:

$$F = \frac{P_T}{4\pi d^2} \quad [\text{W/m}^2]$$



Canale wireless : attenuazione da distanza

- ❑ In molti casi vengono adottate antenne che concentrano la potenza irradiata principalmente in una direzione
- ❑ Questa caratteristica è espressa mediante il guadagno d'antenna $g(\theta)$ nella direzione θ

$$g(\theta) = \frac{P(\theta)4\pi}{P_0}$$

- ❑ dove P_0 rappresenta la potenza totale irradiata
- ❑ Normalmente si assume che il guadagno massimo sia nella direzione principale (lobo principale dell'antenna) corrispondente a $\theta = 0$



Canale wireless : attenuazione da distanza

- Indicando con g_T il guadagno massimo abbiamo che la densità di potenza in tale direzione risulta:

$$F = \frac{P_T g_T}{4\pi d^2} \quad [\text{W/m}^2]$$

- Il prodotto $P_T g_T$ è chiamato EIRP (Effective Isotropically Radiated Power) e rappresenta la potenza necessaria con una sorgente isotropica per raggiungere la stessa densità di una antenna direttiva



Canale wireless : attenuazione da distanza

- La potenza al ricevitore può essere espressa come:

$$P_R = P_T g_T g_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

- dove P_T rappresenta la potenza irradiata dal trasmettitore, g_T e g_R i guadagni delle antenne del trasmettitore e ricevitore, λ la lunghezza d'onda e d la distanza tra trasmettitore e ricevitore
- Nell'ipotesi che $g(\theta)$ sia uniforme nell'angolo "di apertura" dell'antenna (lobo principale) tale formula può essere usata nei sistemi radiomobili dove non sempre trasmettitore e ricevitore sono allineati nella direzione di massima radiazione



Canale wireless : attenuazione da distanza

□ La

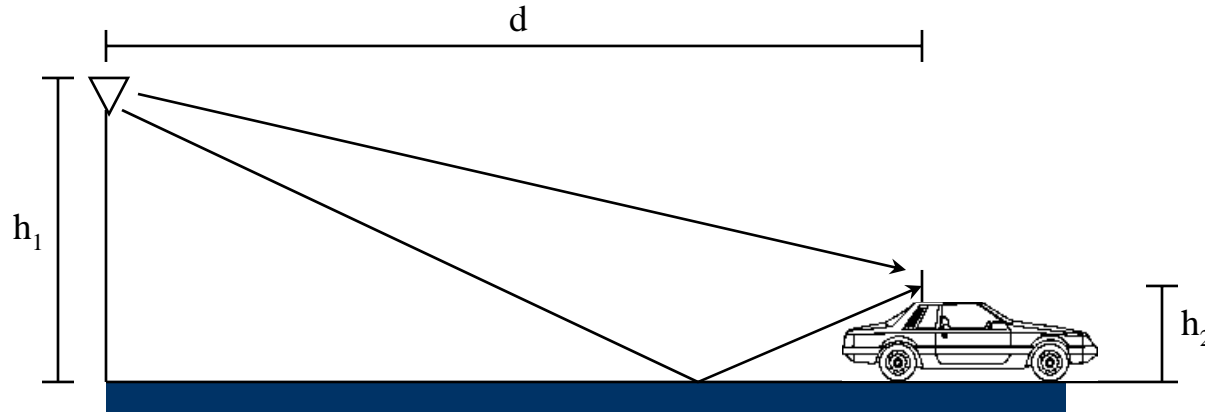
$$L = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^{-2}$$

- rappresenta l'attenuazione da spazio libero.
- Tale attenuazione non è l'unica che subisce il segnale ma anche altre attenuazioni possono essere presenti a causa dell'atmosfera (dipendente dalla frequenza e da nebbia, pioggia, ecc.) e di ostacoli (assorbimento, riflessione, diffrazione, ecc.)
- Inoltre la propagazione in prossimità della superficie terrestre ha caratteristiche diverse da quelle in spazio libero ...



Canale wireless : attenuazione da distanza

- Si può far vedere che nel semplice caso di propagazione con due raggi, uno diretto ed uno riflesso completamente, il rapporto tra potenza ricevuta e potenza trasmessa assume la forma:



- il rapporto tra potenza ricevuta e potenza trasmessa assume la forma:

$$\frac{P_R}{P_T} = g_R g_T \left(\frac{h_1 h_2}{d^2} \right)^2$$



Canale wireless : attenuazione da distanza

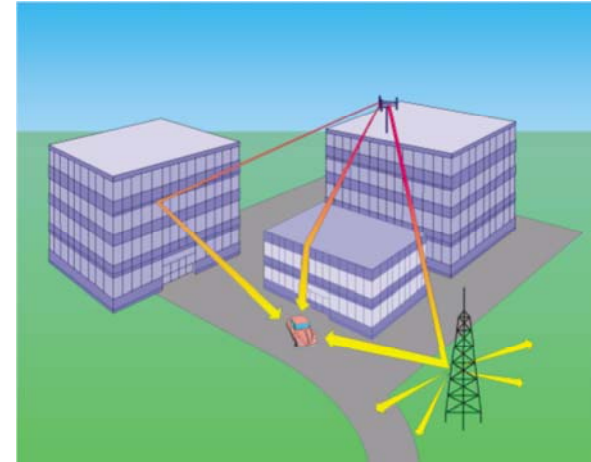
- Nell'ipotesi della propagazione per due raggi la potenza ricevuta decresce, a causa dell'attenuazione dovuta alla distanza, molto più velocemente ($\sim 1/d^4$) che nel caso di propagazione in spazio libero ($\sim 1/d^2$)
- In realtà la propagazione tipica dei sistemi wireless è spesso diversa e più complessa di questi due casi
- Nonostante ciò di solito si utilizza una formula simile anche nel caso generale dove però l'esponente di della distanza (coefficiente di propagazione η) può assumere valori compresi tra 2 (spazio libero) e 5 (forte attenuazione ambiente urbano):

$$P_R = P_T g_T g_R \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{1}{d^\eta}$$



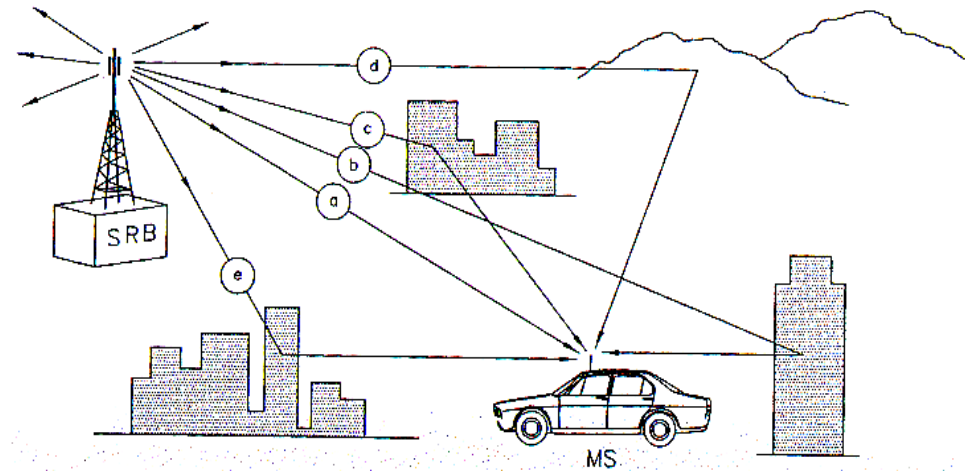
Canale wireless : fading multipath

- Nella propagazione tra sorgente e destinazione il segnale può seguire più percorsi a causa della riflessione totale o parziale da parte di ostacoli
- Il comportamento delle onde sugli oggetti dipende dalla frequenza del segnale e dalle caratteristiche e dimensioni degli oggetti
- In generale, onde a bassa frequenza possono attraversare senza attenuazione molti oggetti (trasparenti), mentre all'aumentare della frequenza i segnali tendono ad essere assorbiti o riflessi dagli ostacoli (ad altissima frequenza – oltre 5 GHz – è possibile quasi solo la propagazione diretta).





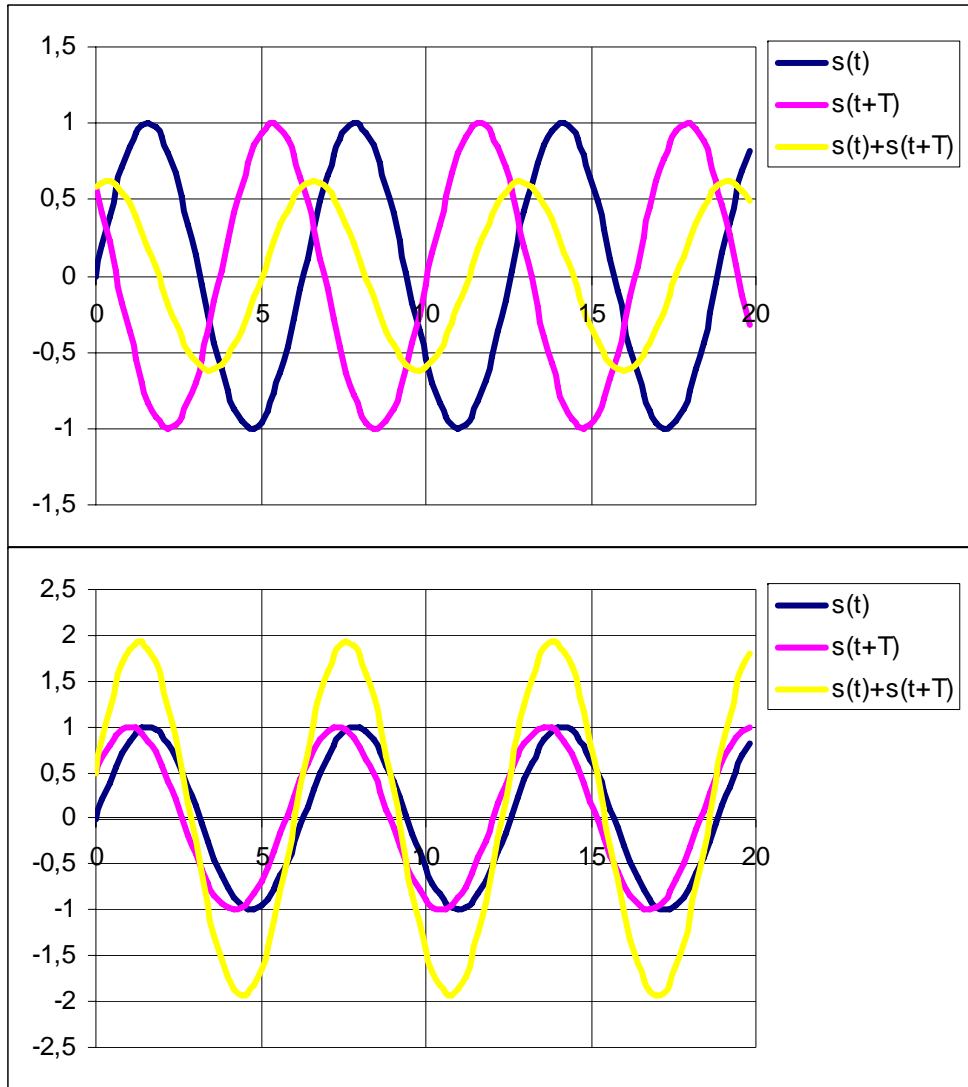
Canale wireless : fading multipath



- Le repliche del segnale che giungono dai diversi cammini si ricombinano al ricevitore
- Il risultato della ricombinazione dipende:
 - numero delle repliche
 - fasi relative
 - ampiezze
 - frequenza



Canale wireless : fading multipath



□ Il segnale risultante può essere attenuato

$$T=4/5\pi$$

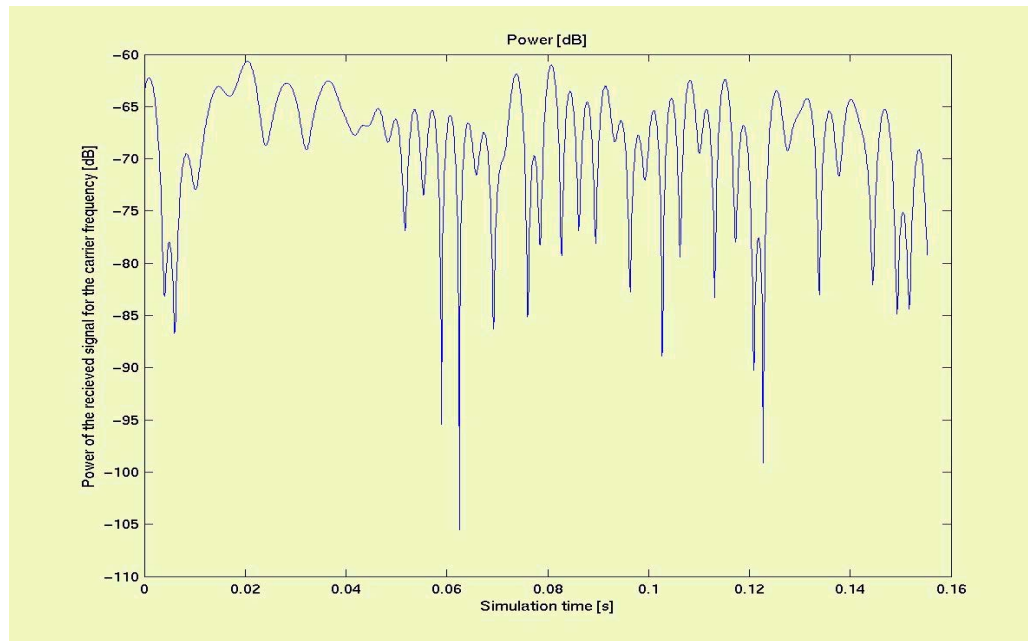
□ O anche amplificato

$$T= \pi /6$$



Canale wireless : fading multipath

- Se il terminale si muove le caratteristiche della ricombinazione variano nel tempo

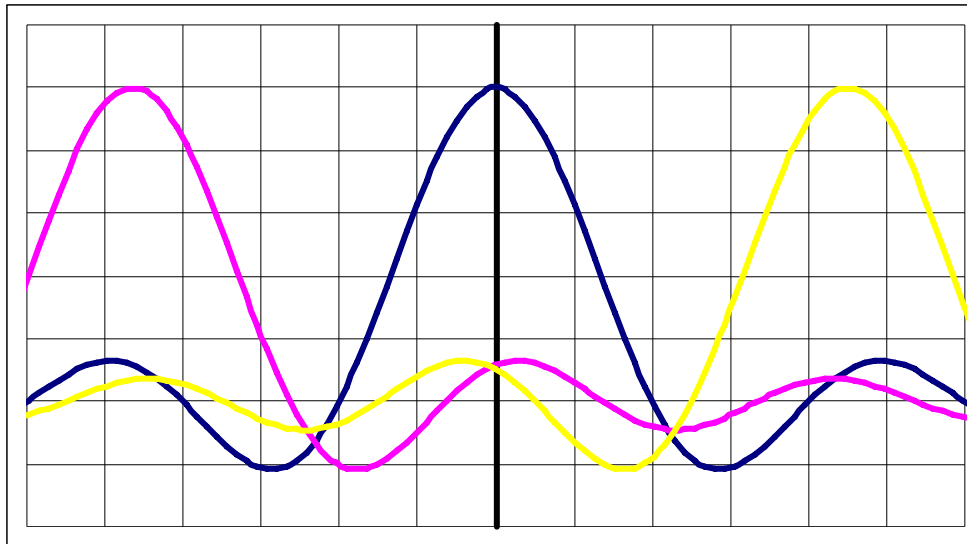


- I buchi di fading tendono ad essere distanziati di circa il tempo necessario a percorrere metà della lunghezza d'onda



Canale wireless : fading multipath

- Il realtà la propagazione per cammini multipli può provocare altri più complessi problemi nel caso di trasmissione digitale
- In questo caso, infatti, i diversi ritardi delle repliche del segnale trasmesso (*delay spread*) provocano un allargamento della risposta all'impulso del canale che può portare a interferenza intersimbolica (ISI – Inter-Symbol Interference)





Canale wireless : fading multipath

- La rilevanza del delay spread può essere quantificata calcolando il suo valore quadratico medio (RMS Delay Spread):

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n P_i} \sum_{i=1}^n (\tau_i^2 P_i) - \tau_d^2}$$

- con

$$\tau_d = \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

τ_{RMS}

RMS delay spread

τ_i

ritardo del path i

P_i

potenza ricevuta path i

n

numero di path



Canale wireless : fading multipath

- ❑ L'inverso del delay spread fornisce la banda di coerenza
- ❑ Se la banda di coerenza è molto maggiore della banda del segnale il delay spread non pone problemi
- ❑ Se al contrario la banda di coerenza è comparabile con quella del segnale il delay spread provoca interferenze intersimbolica non trascurabile e errori in ricezione
- ❑ In questo caso per ovviare alla distorsione in frequenza del canale occorre equalizzare con un opportuno filtro adattativo in ricezione
- ❑ Le tecniche di equalizzazione di solito si basano su una stima del canale effettuata su sequenze di simboli noti (vedi GSM), ma possono anche essere fatte senza tali simboli (blind equalization)



Canale wireless : fading multipath

- In alcuni scenari semplificati è possibile dare una rappresentazione statistica dell'attenuazione dovuta al fading da multipath
- 1 – Fading di Rayleigh
 - si assume un numero infinito di cammini incidenti e nessuna componente dominante (di solito verificate quando ci sono solo cammini riflessi)
 - fasi casuali
 - da queste assunzioni deriva che, rappresentando il segnale come un vettore, le componenti del segnale lungo gli assi sono due variabili Gaussiane indipendenti

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$



Canale wireless : fading multipath

□ 1 – Fading di Rayleigh (... continua)

- L'ampiezza del vettore con componenti gaussiane indipendenti ha una distribuzione di Rayleigh:

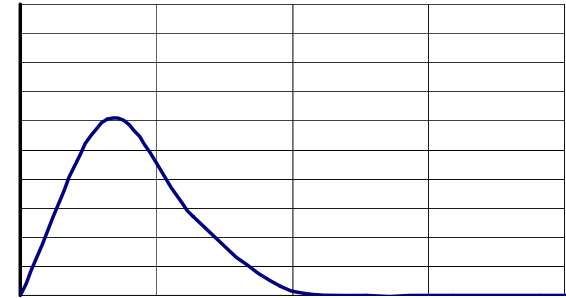
$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad r \geq 0$$

- con

$$E(r) = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad E(r^2) = 2\sigma^2, \quad \sigma_r^2 = \sigma^2 \left(\frac{4 - \pi}{2} \right).$$

- di solito si assume una distribuzione normalizzata con

$$E(r^2) = 1$$

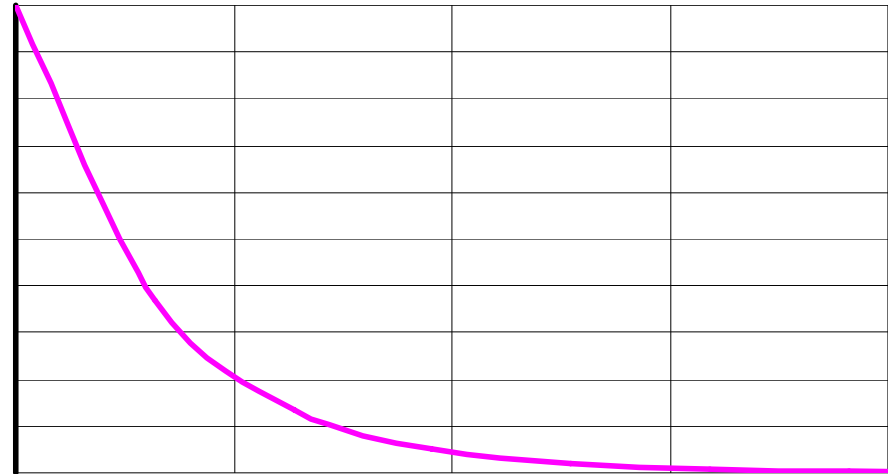




Canale wireless : fading multipath

- 1 – Fading di Rayleigh (... continua)
 - La potenza di una segnale che subisce fading di Rayleigh ha una distribuzione esponenziale negativa

$$p(x) = \frac{1}{m} e^{-x/m}$$





Canale wireless : fading multipath

□ 2 – Fading di Rice

- Le assunzioni del fading di Rayleigh non sono verificate quando esiste un cammino diretto e molti cammini riflessi
- In questo caso di solito si usa rappresentare l'ampiezza del segnale con una variabile casuale di Rice:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2 + r_s^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{rr_s}{\sigma^2}\right)$$

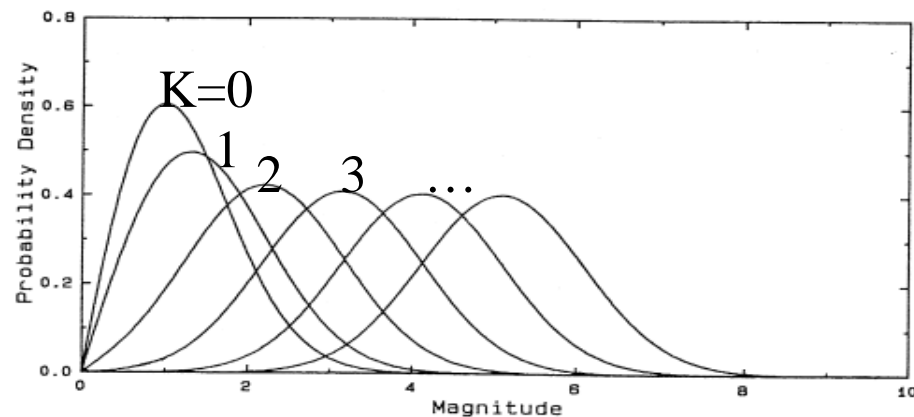
- in concreto il termine r_s^2 rappresenta la potenza del raggio diretto mentre σ^2 la potenza degli altri raggi
- I_0 funzione di Bessel di 1° tipo e ordine 0



Canale wireless : fading multipath

□ 2 – Fading di Rice (... continua)

- Il fattore $K = \frac{r_s}{\sigma^2}$
- indica quanto la componente diretta domina le altre
- per $K=0$ ritroviamo la distribuzione di Rayleigh
- La figura mostra le distribuzioni con $\sigma^2 = 1$ al crescere di K





Canale wireless: shadowing

- Nella propagazione il segnale attraversa o viene riflesso da ostacoli che assorbono parzialmente il segnale
- Questo genera ulteriore attenuazione che di solito viene identificata con il nome di shadowing
- Di solito tale attenuazione viene modellata mediante una variabile log-normale x , quindi $L = \log(x)$ è una variabile gaussiana con deviazione standard σ che assume valori compresi tra 0 e 12 dB



Canale wireless: modelli empirici

- ❑ Esistono tecniche molto sofisticate per la stima della potenza ricevuta che si basano sulla conoscenza dettagliata delle caratteristiche dell'area dove il segnale si propaga (*ray tracing techniques*); queste tecniche sono però molto onerose in termini di complessità computazionale
- ❑ Spesso si fa dunque ricorso a modelli empirici che calcolano la attenuazione da distanza con formule approssimate e aggiungono attenuazioni casuali per fading e shadowing



Canale wireless: modelli empirici

- La più nota espressione dell'attenuazione da distanza è data dalla formula di Okumura/Hata:

$$L_p = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_T - a(h_R) + (44.9 - 6.55 \log h_T) \log d \quad [\text{dB}]$$

- dove

- f è la frequenza in MHz (valida da 150 a 1500 MHz)
- h_T è l'altezza della stazione base (in m)
- h_R è l'altezza della stazione mobile (in m) – $a(h_R)$ fattore di correzione dipendente dal profilo dell'area
- d è la distanza (in km)

- Nel caso di sistema a 900 MHz, $h_T = 30$ m, $a(h_R) \approx 0$:

$$L_p = 126.42 + 35.22 \log d \quad \text{dove quindi il coefficiente di propagazione } \eta = \mathbf{3.522}$$



Accesso Multiplo



La moltiplicazione

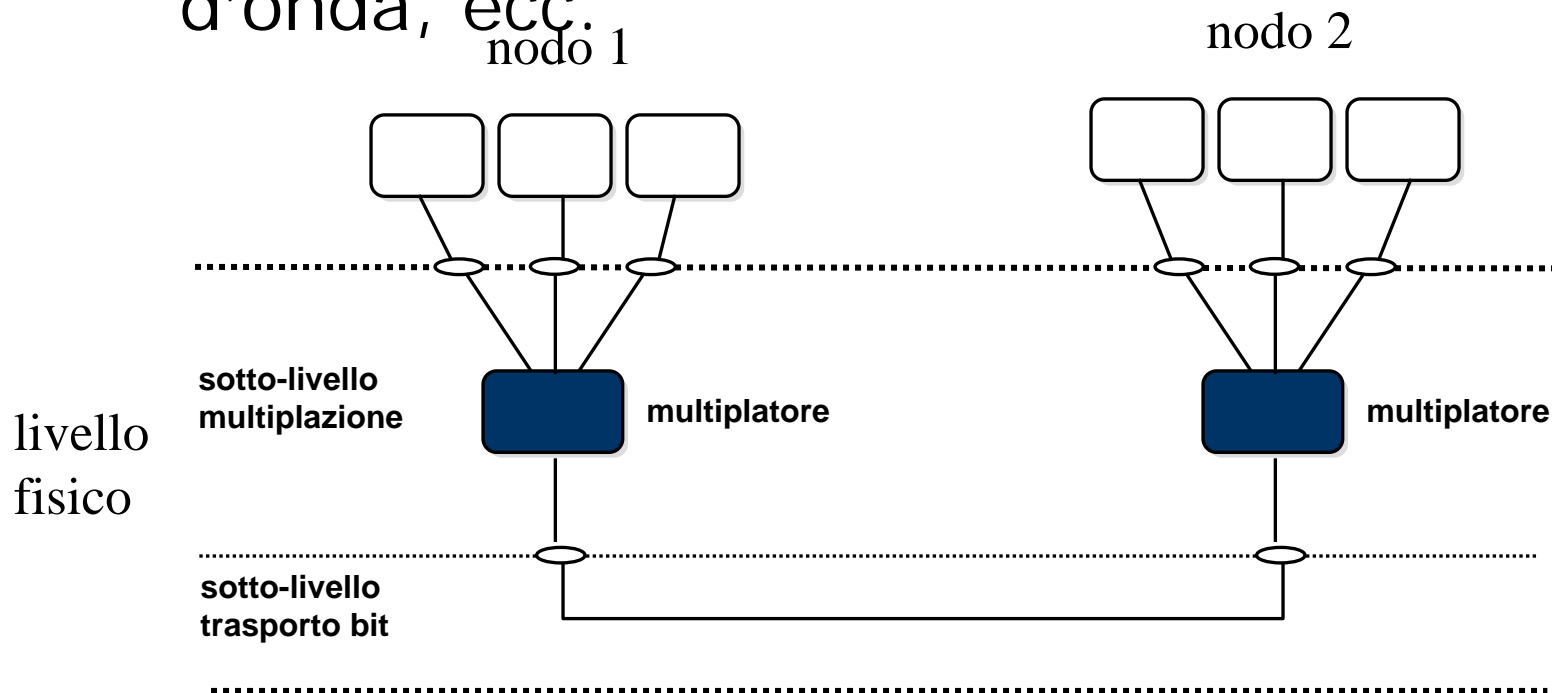
- la capacità dei mezzi trasmissivi fisici può essere divisa per ottenere più canali di velocità più bassa





La multiplazione fisica

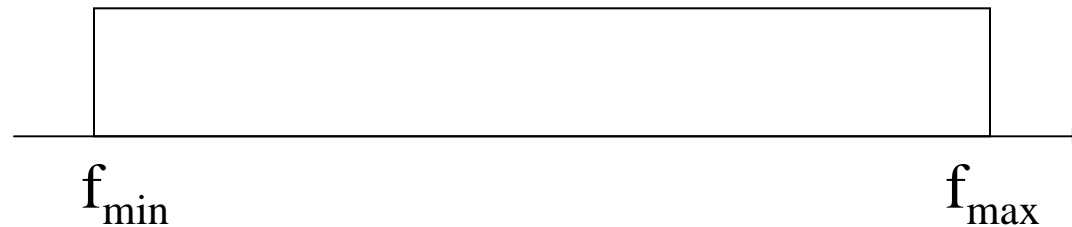
- la distinzione tra i flussi avviene solo sulla base di parametri del livello fisico come frequenza, tempo, codice, lunghezza d'onda, ecc.



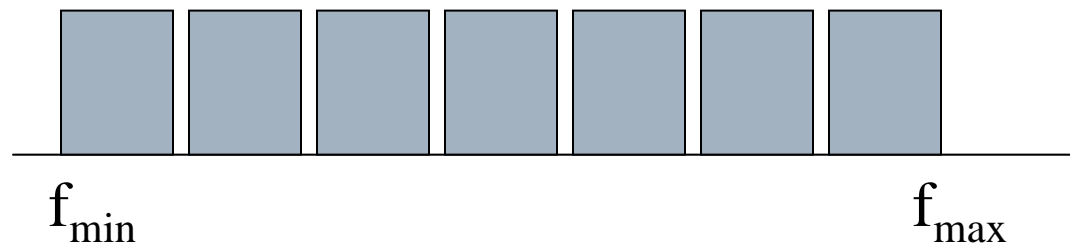


FDM (Frequency Division Multiplexing)

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



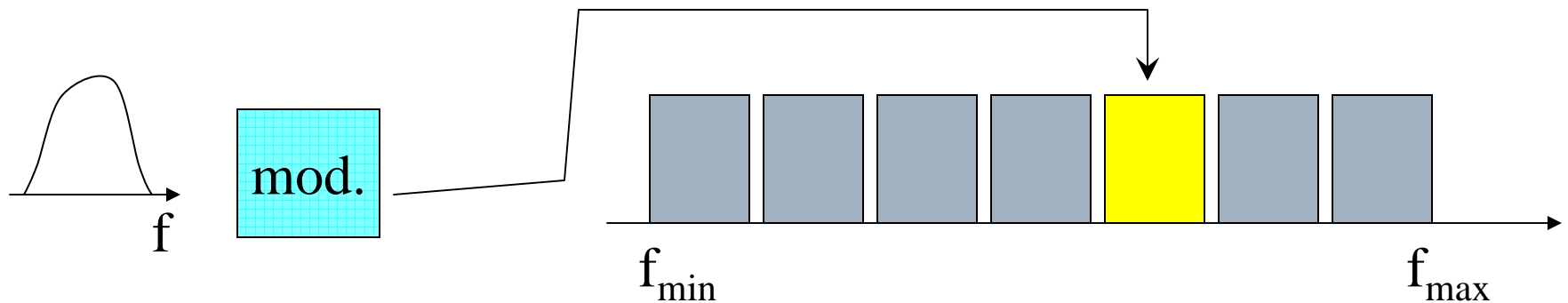
- la banda complessiva può essere divisa in sotto-bande cui associare un canale





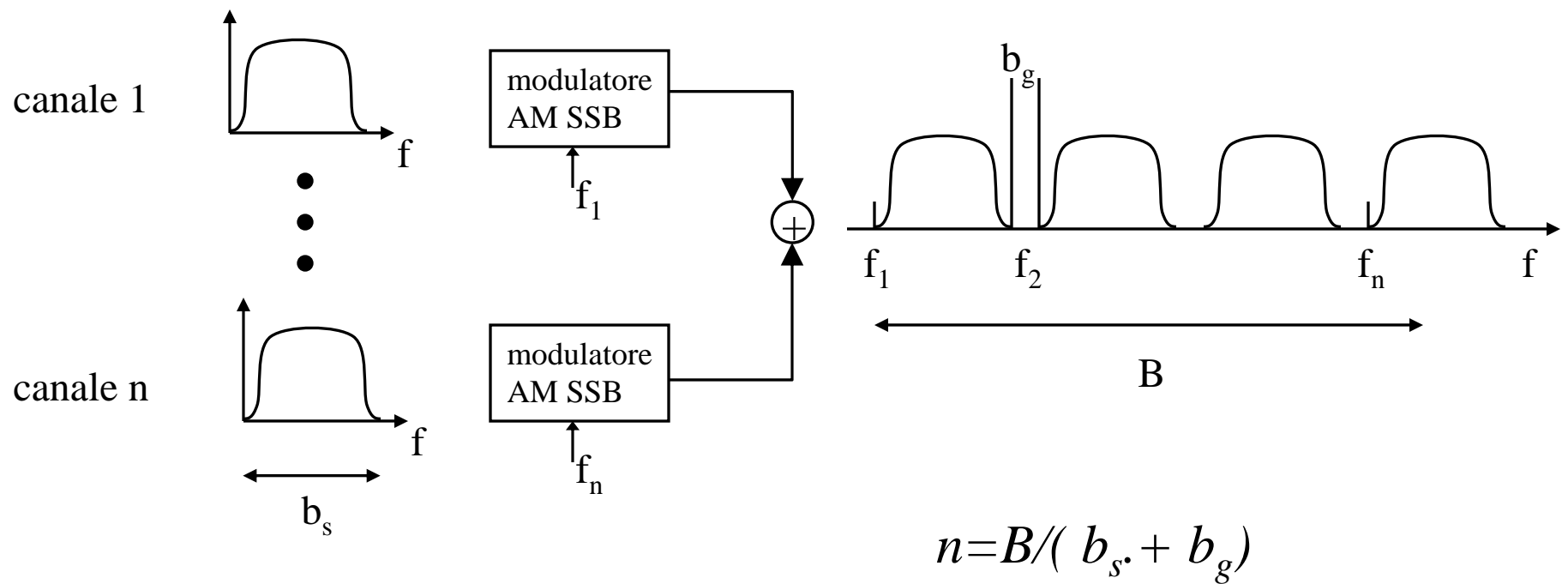
FDM (Frequency Division Multiplexing)

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





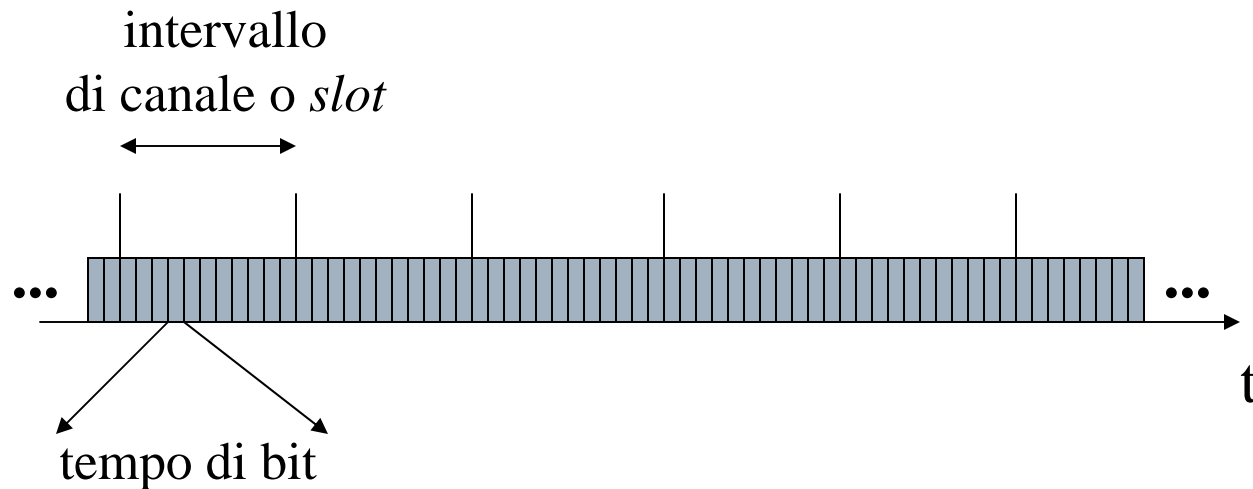
FDM (Frequency Division Multiplexing)





TDM (Time Division Multiplexing)

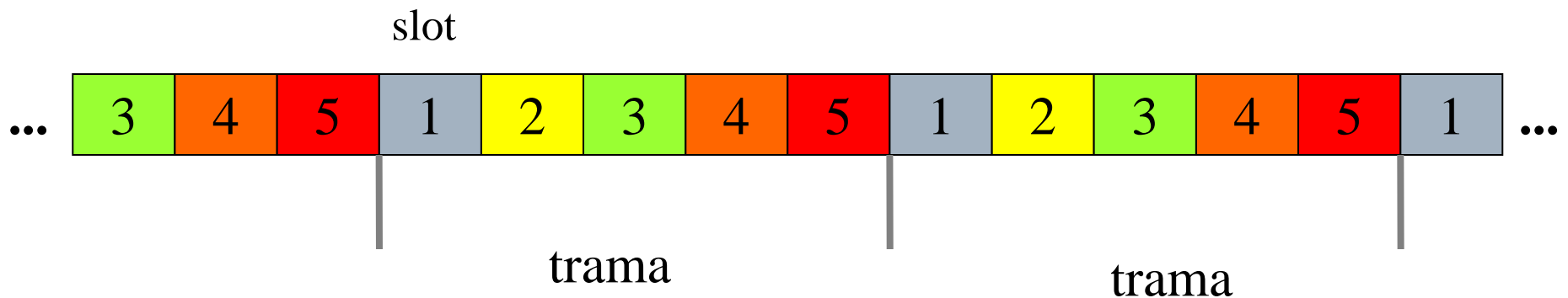
- E' una tecnica usata per segnali digitali (...)
- Dato un canale numerico a velocità C (bit/s) si costruiscono intervalli di tempo di canale costituiti da multipli del tempo di bit $t_b = 1/C$





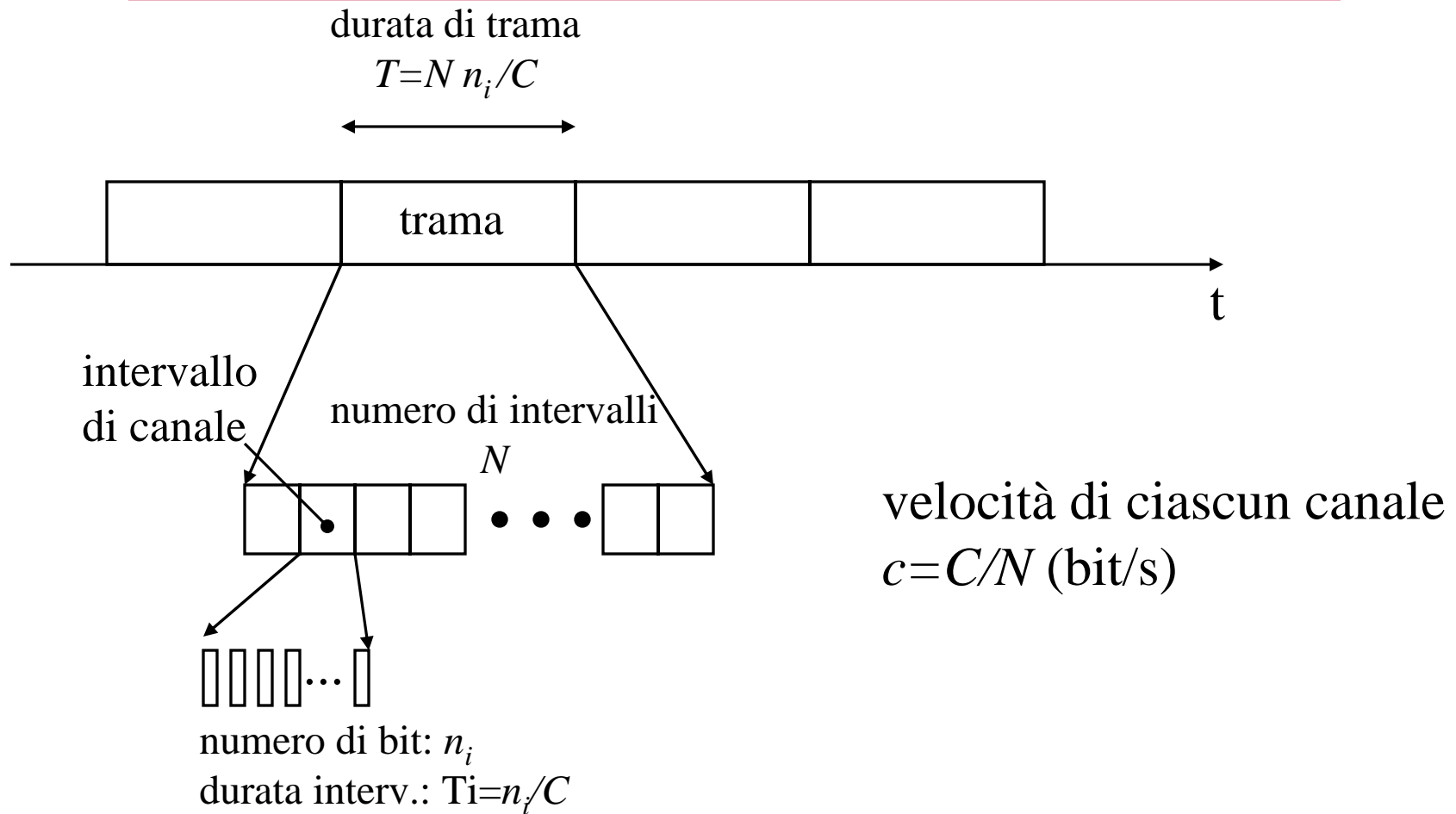
TDM (Time Division Multiplexing)

- Un canale 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 a un numero di slot





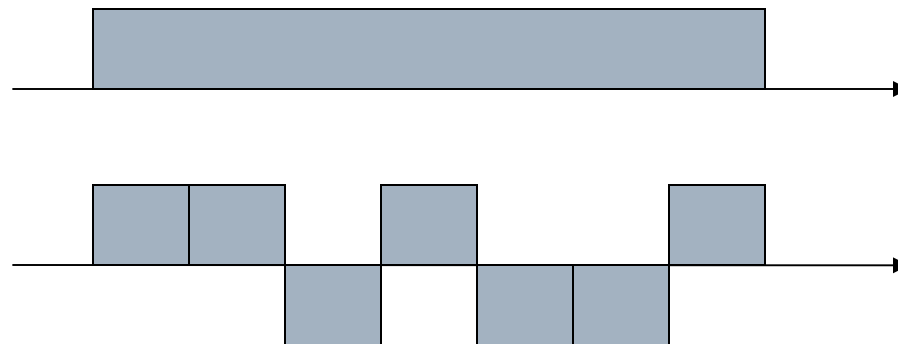
TDM (Time Division Multiplexing)





CDM (Code Division Multiplexing)

- La tecnica CDM consiste nel miscelare N flussi di bit previa moltiplicazione di ciascuno di questi con 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

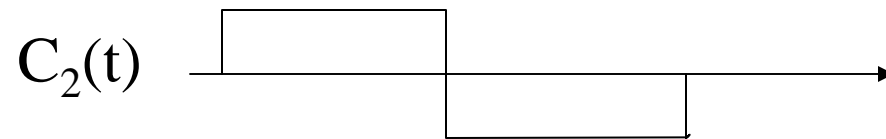
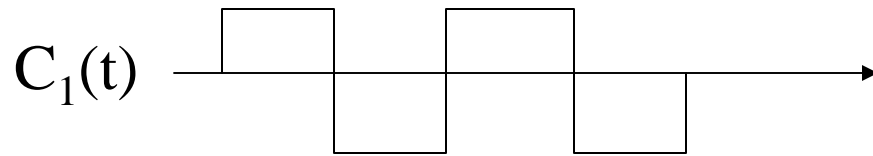




Codici ortogonali

□ 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 Hadamart:

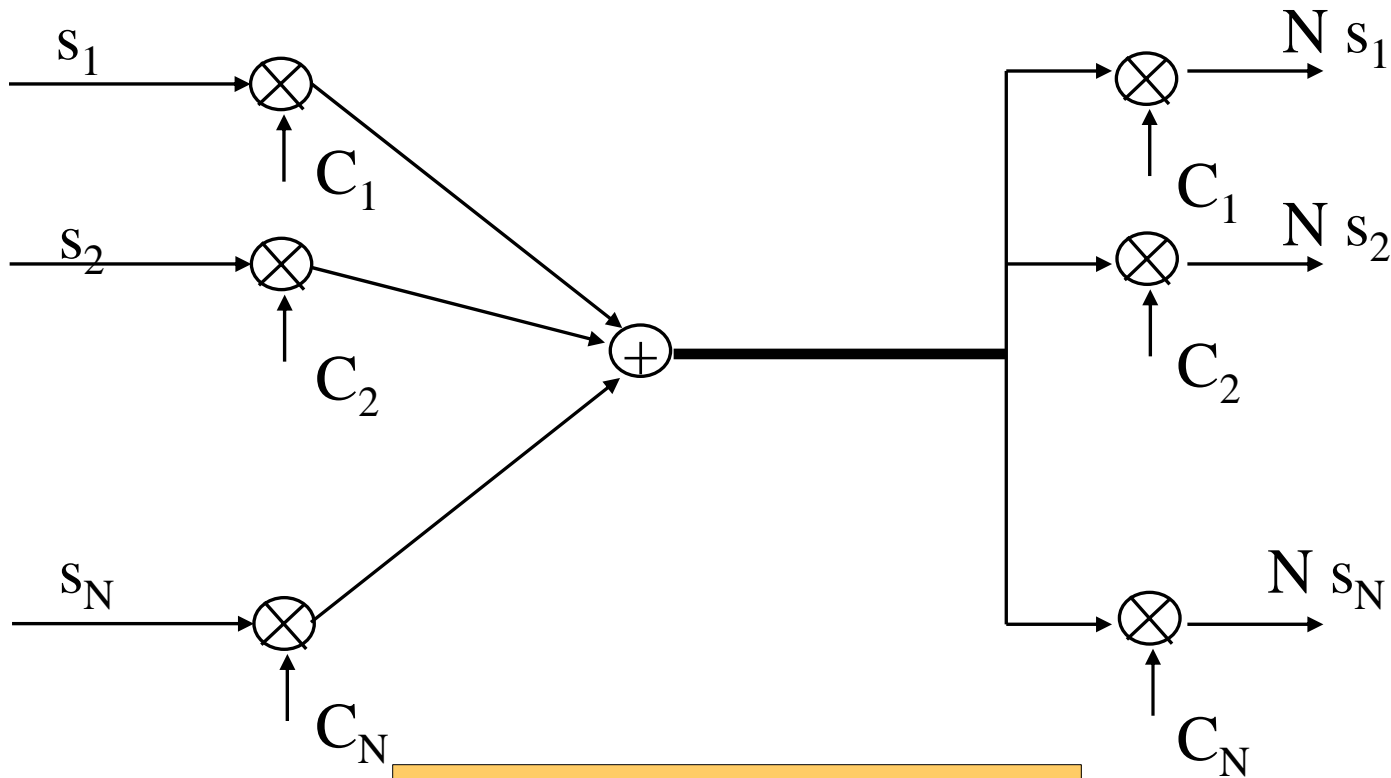
$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$
$$H_{2n} = \begin{bmatrix} H_n & H_n \\ H_n & -H_n \end{bmatrix}$$

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)

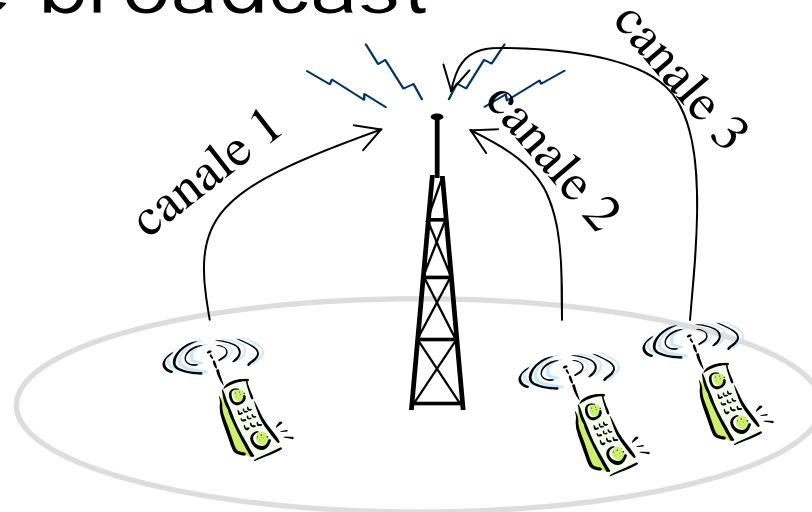


$$\left(\sum_{i=0}^{N-1} s_i C_i \right) \cdot C_k = N \cdot s_k$$



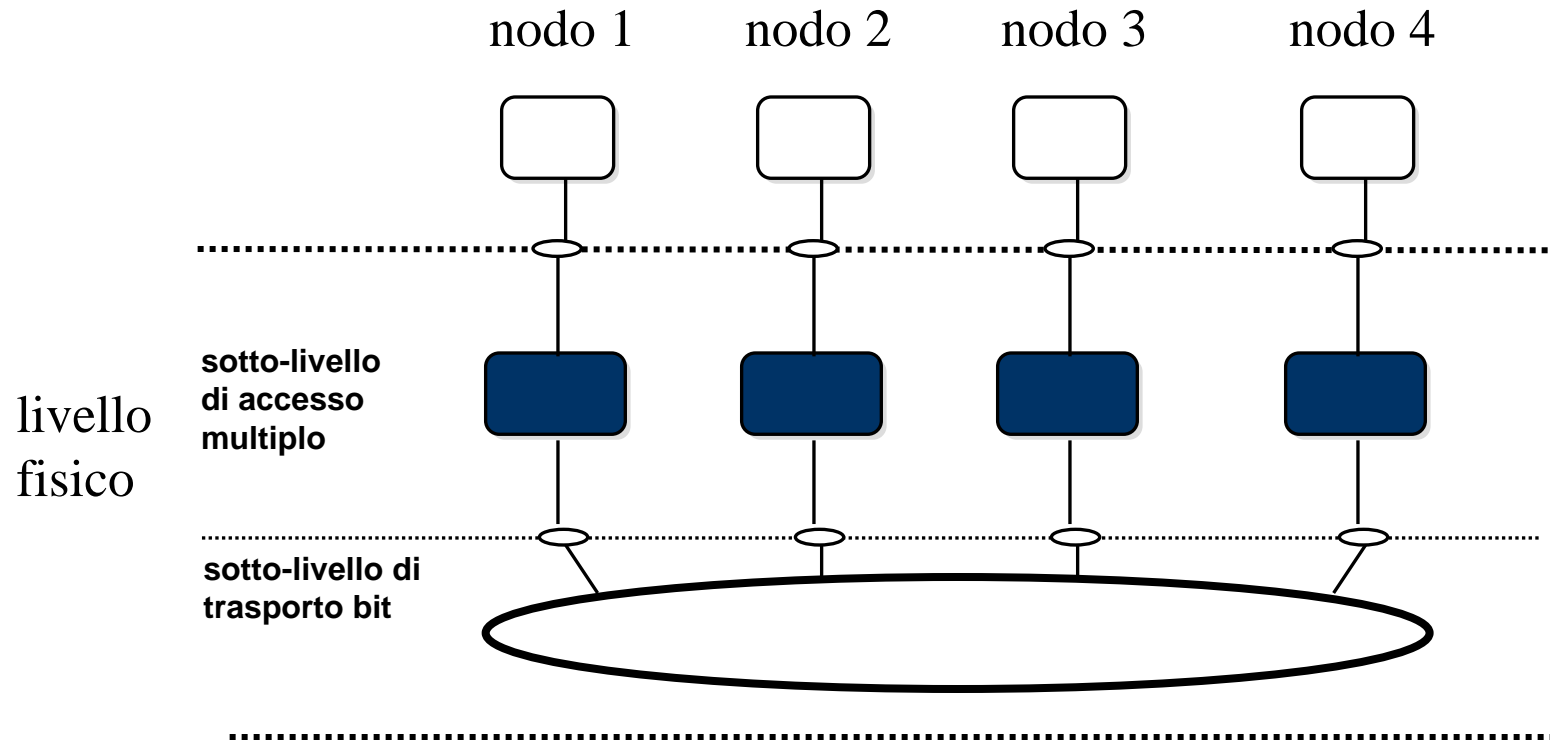
Accesso Multiplo

- ❑ E' l'analogo della multiplazione ma per canali broadcast
- ❑ le stazioni che accedono sono distanti e devono coordinarsi per accedere al canale broadcast





Accesso multiplo fisico





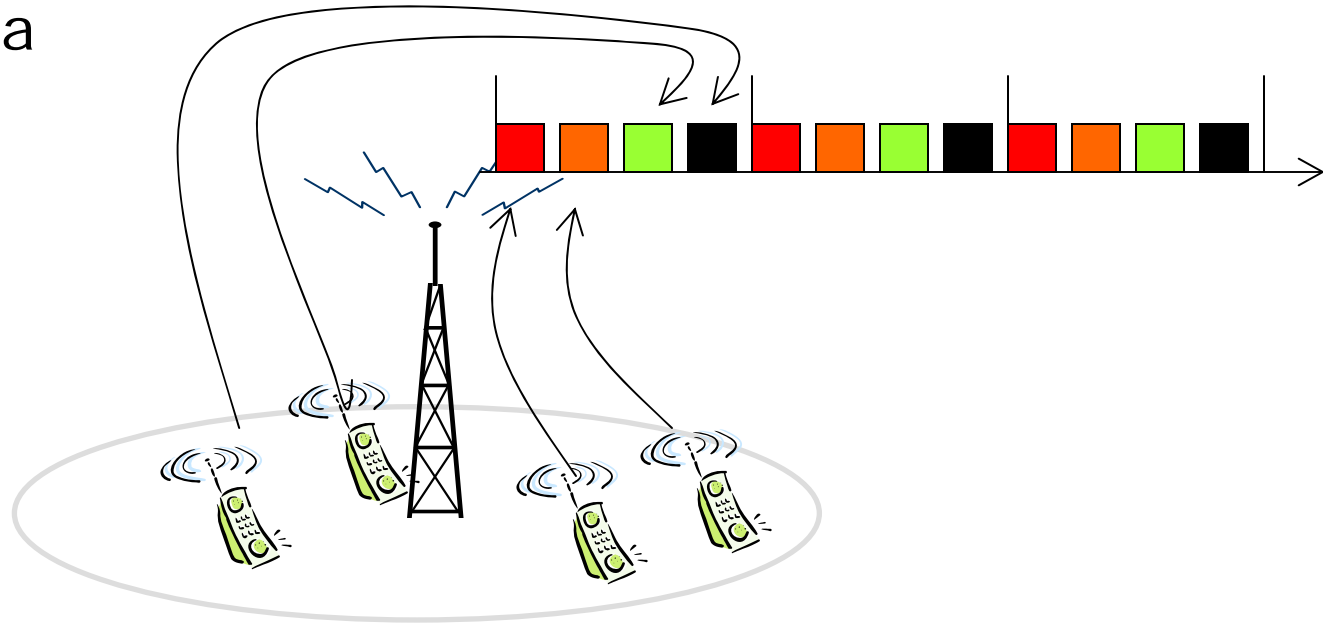
Frequency Division Multiple Access

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



Time Division Multiple Access

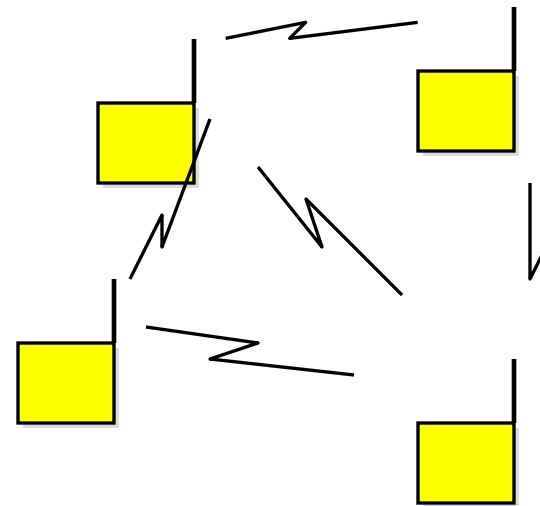
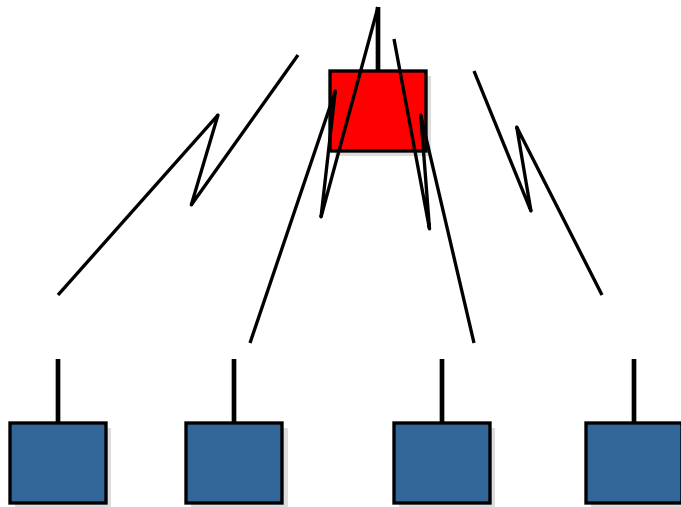
- ❑ L'analogo del TDM
- ❑ Necessario un coordinamento per trovare una base temporale comune alle stazioni (sincronismo di trama)
- ❑ Il sincronismo non può essere perfetto: tempi di guardia





TDMA: Sincronismo di trama

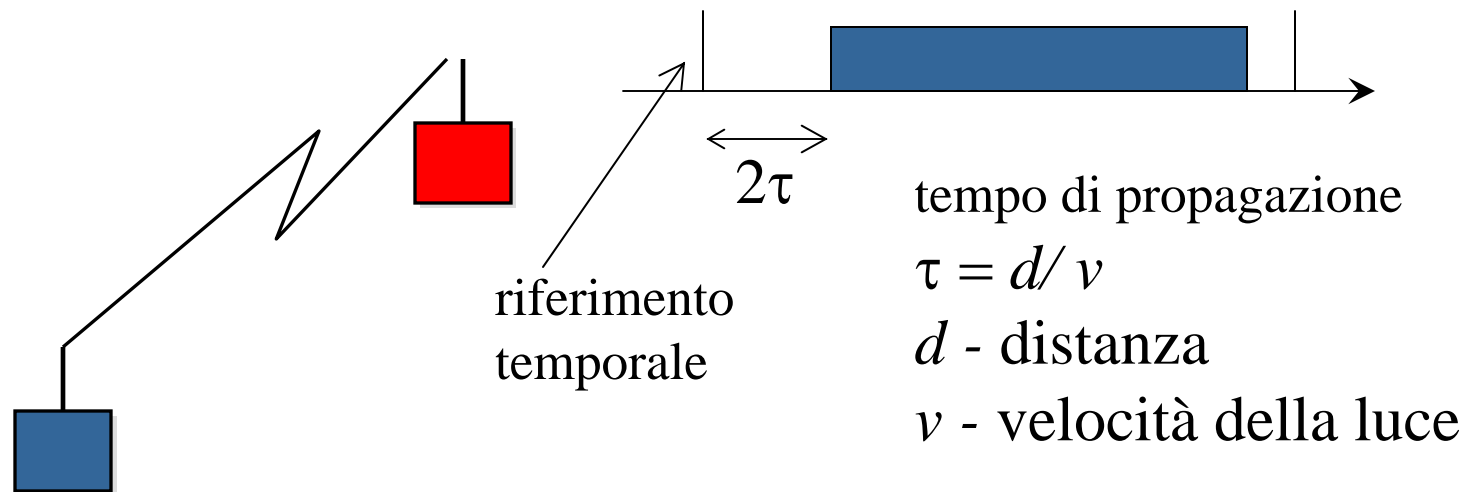
canali broadcast centrali
canali broadcast non-centrali





TDMA: 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)

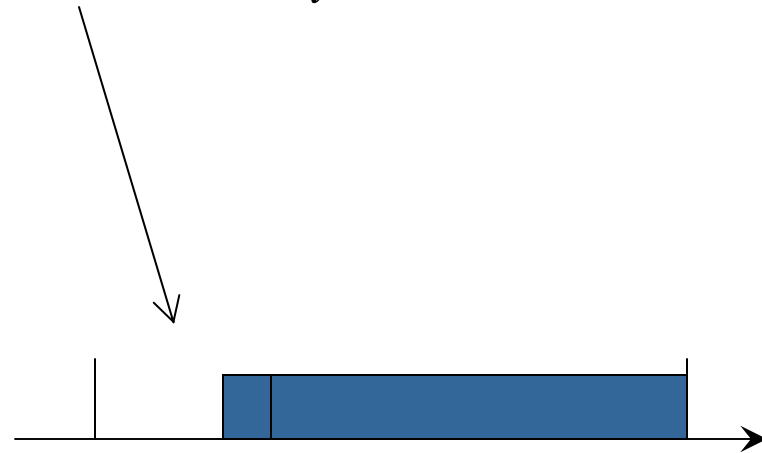
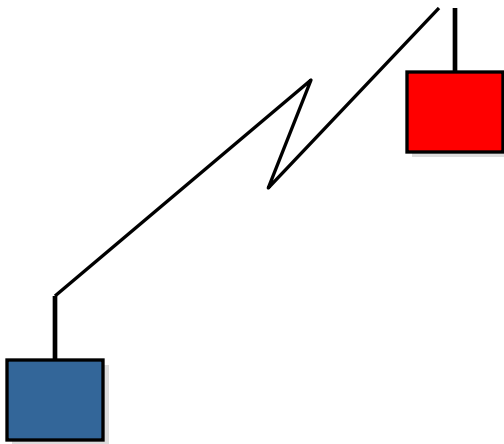




TDMA: Canali broadcast centrali

□ tempo di guardia:

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

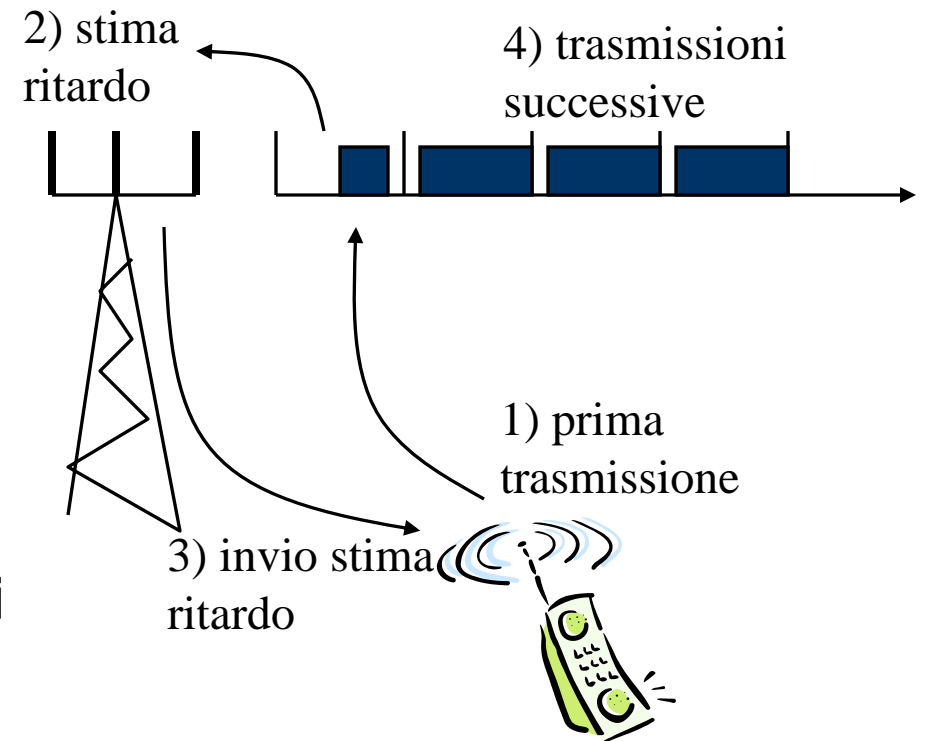




TDMA: Canali broadcast centrali

□ Timing Advance:

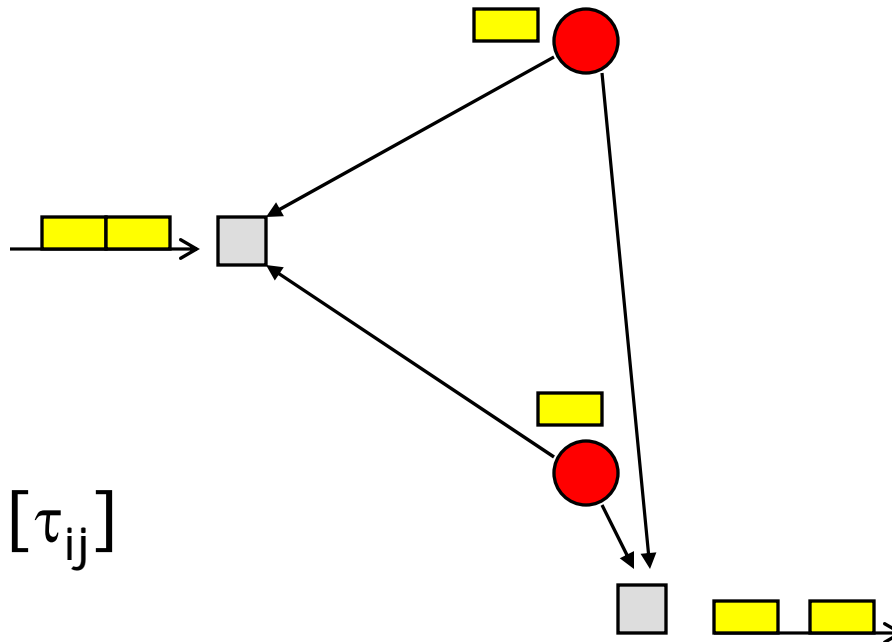
- noti i tempi di propagazione le stazioni possono compensarli con una trasmissione anticipata
- necessità di stimare τ (possono essere variabili)
- errore di stima: tempi di guardia
- tecnica usata in GSM/WiMax e altri sistemi





TDMA: Canali broadcast non centrali

- ❑ Non c'è il riferimento
- ❑ Trasmissioni diverse possono combaciare in un punto ed essere distanti in un altro



❑ $T_g = 2 \max[\tau_{ij}]$



TDMA: Efficienza

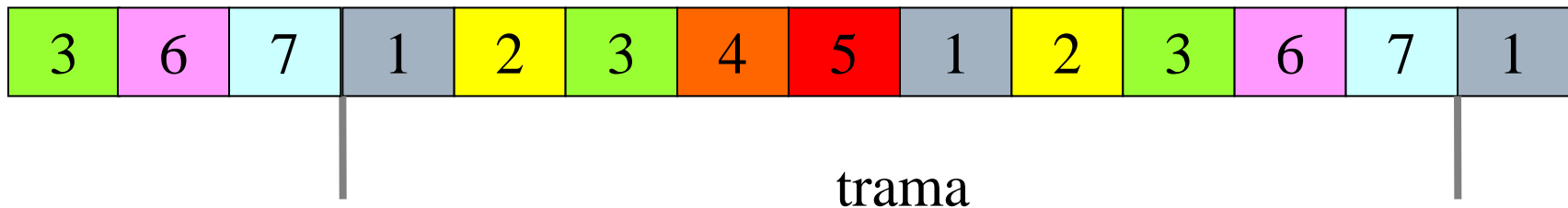
$$\eta = \frac{T_i}{T_i + T_g} = \frac{1}{1 + \frac{T_g}{T_i}} = \frac{1}{1 + T_g \frac{C}{n_i}}$$

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



TDM/TDMA: Canali a differenti velocità

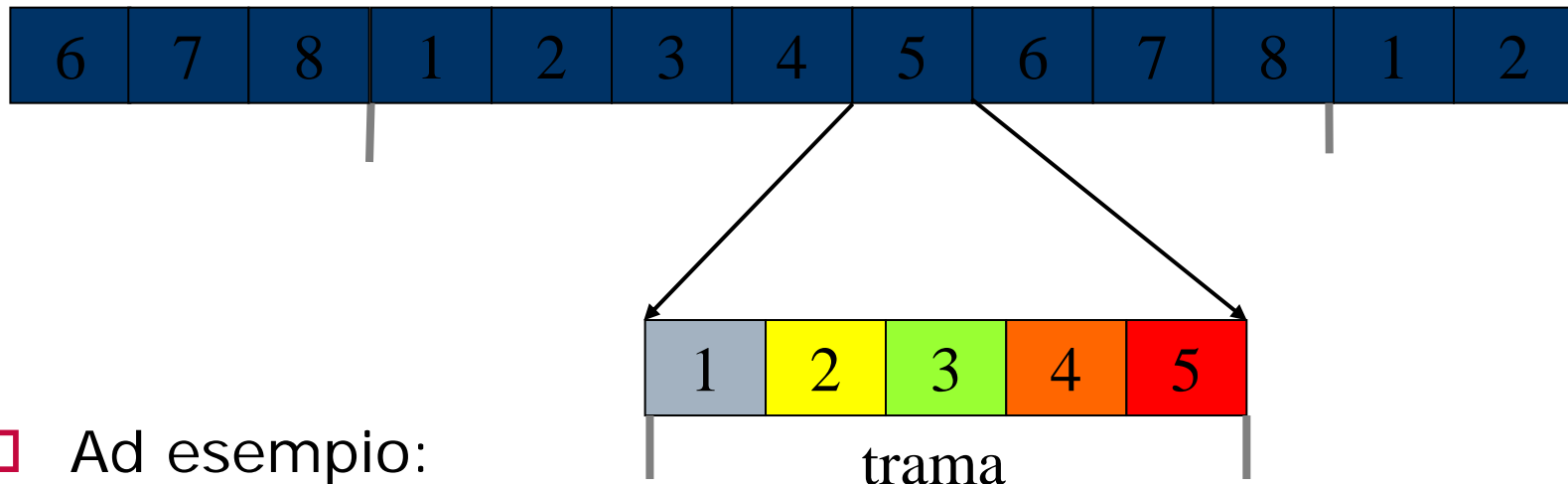
- ❑ Se ad ogni canale viene assegnato uno slot per trama tutti i canali risultano avere la stessa velocità
- ❑ In molti casi è però necessario moltiplicare canali con differenti velocità
- ❑ Allo scopo è possibile usare strutture di trama più complesse dove ad ogni canale può essere associato più di uno slot





TDM/TDMA: Canali a differenti velocità

- Per comodità di descrizione di solito queste strutture di trama più complesse vengono descritte mediante una gerarchia di trame super-trama



- Ad esempio:
 - canale A = slot 1 in ogni trama ($C/5$)
 - canale B = slot 2 nelle trame pari ($C/10$)
 - canale C = slot 2 nelle trame 1 e 5 ($C/20$)



Code Division Multiple Access

- non è possibile avere trasmissioni sincrone e quindi non si riesce a conservare l'ortogonalità dei codici
- si usano codici pseudo-casuali con bassa correlazione per qualunque sfasamento temporale
- usato nel sistema UMTS

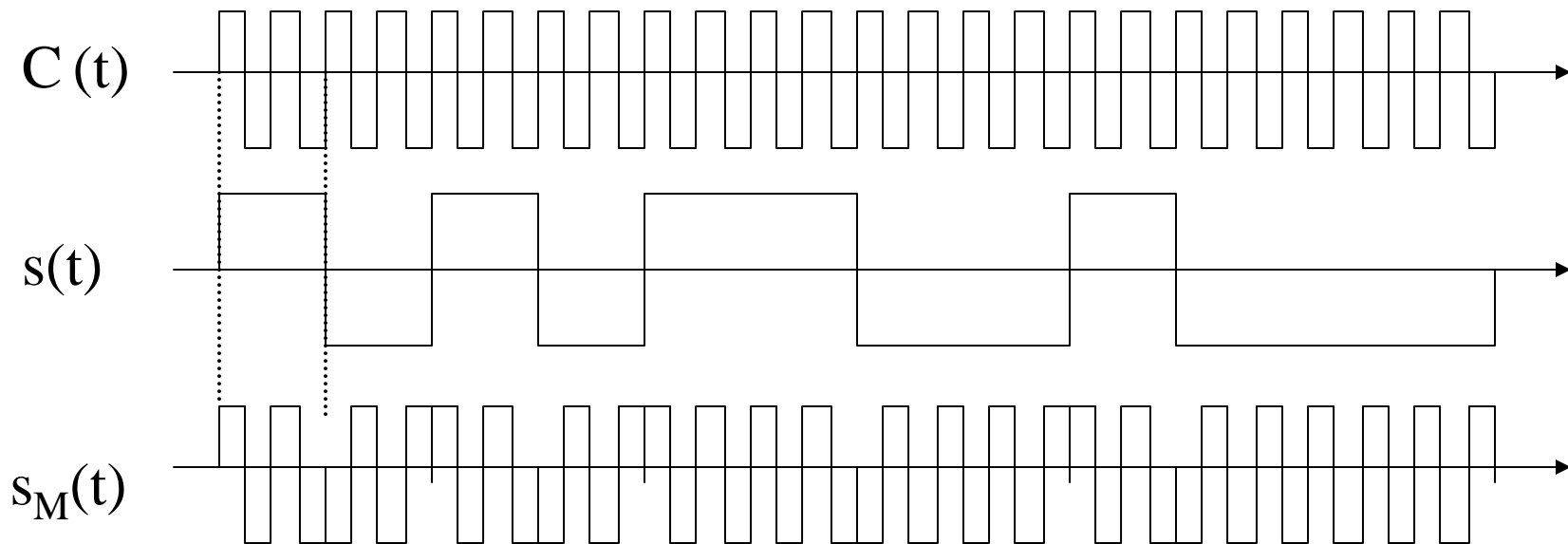
$$\int_0^T C_1(t) \cdot C_2(t) \neq 0$$

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



Code Division Multiple Access

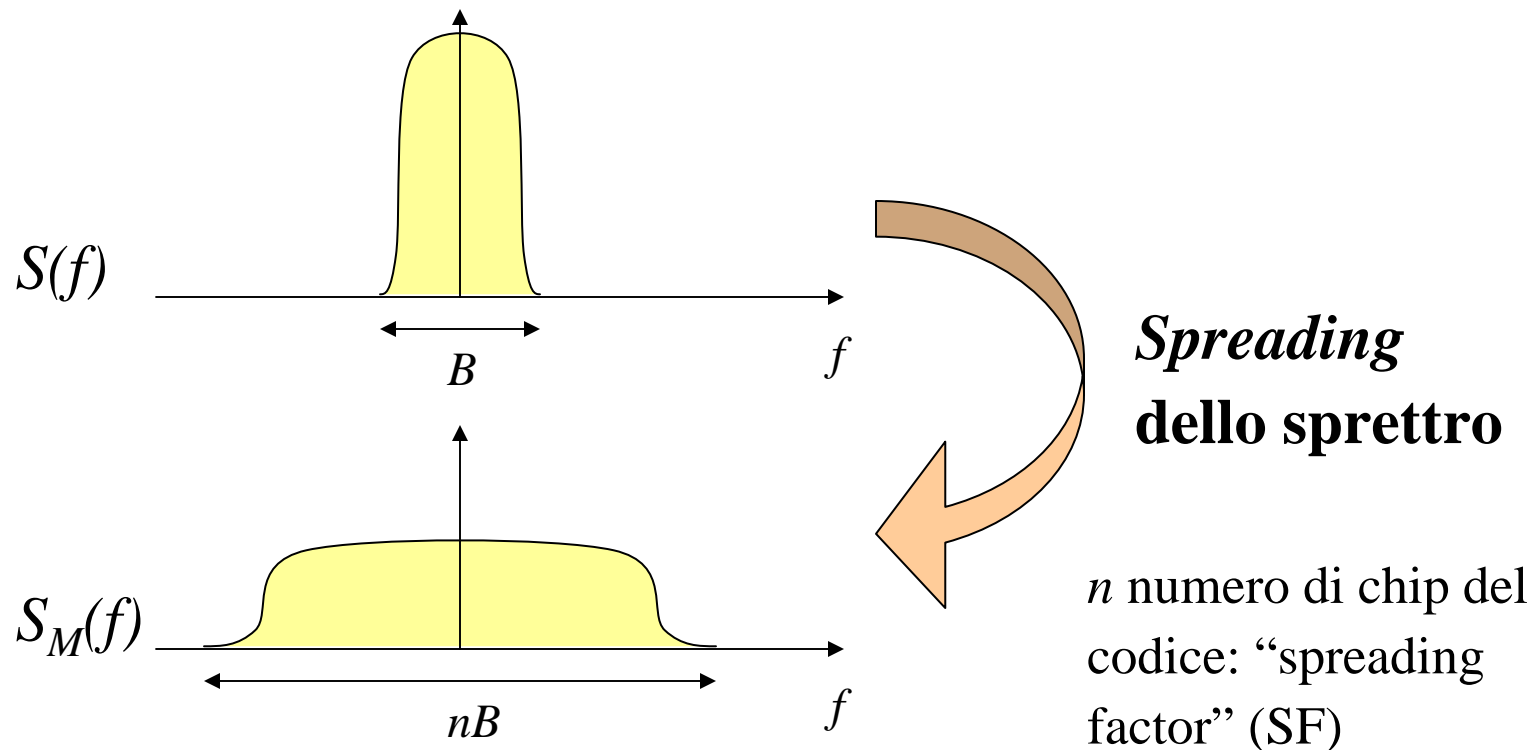
- i codici non ortogonali consentono di andare più a fondo nell'interpretazione dell'effetto di questa tecnica sui segnali





Code Division Multiple Access

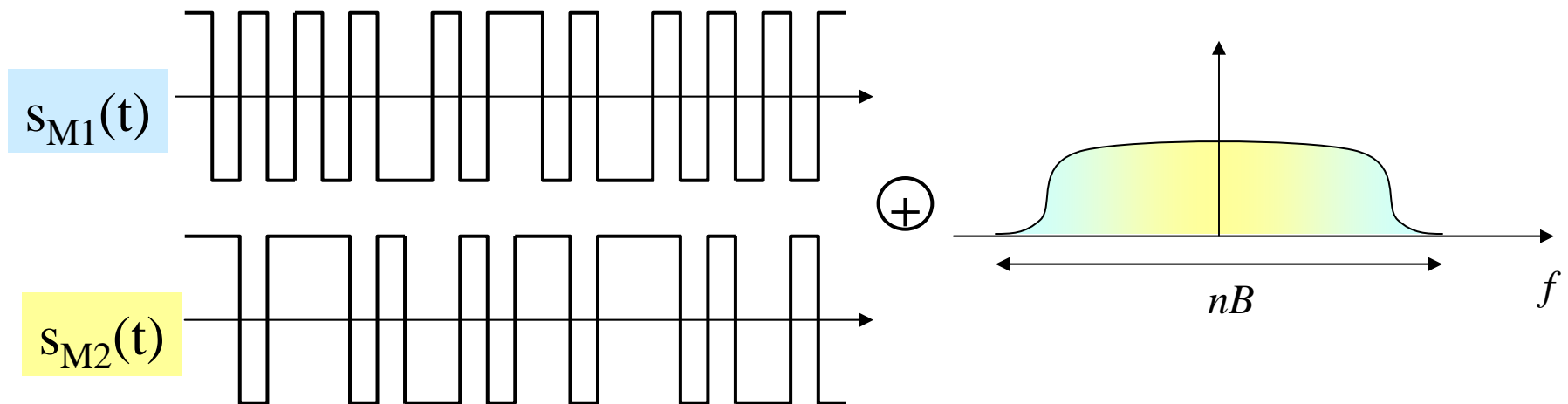
- i codici non ortogonali consentono di andare più a fondo nell'interpretazione dell'effetto di questa tecnica sui segnali





Code Division Multiple Access

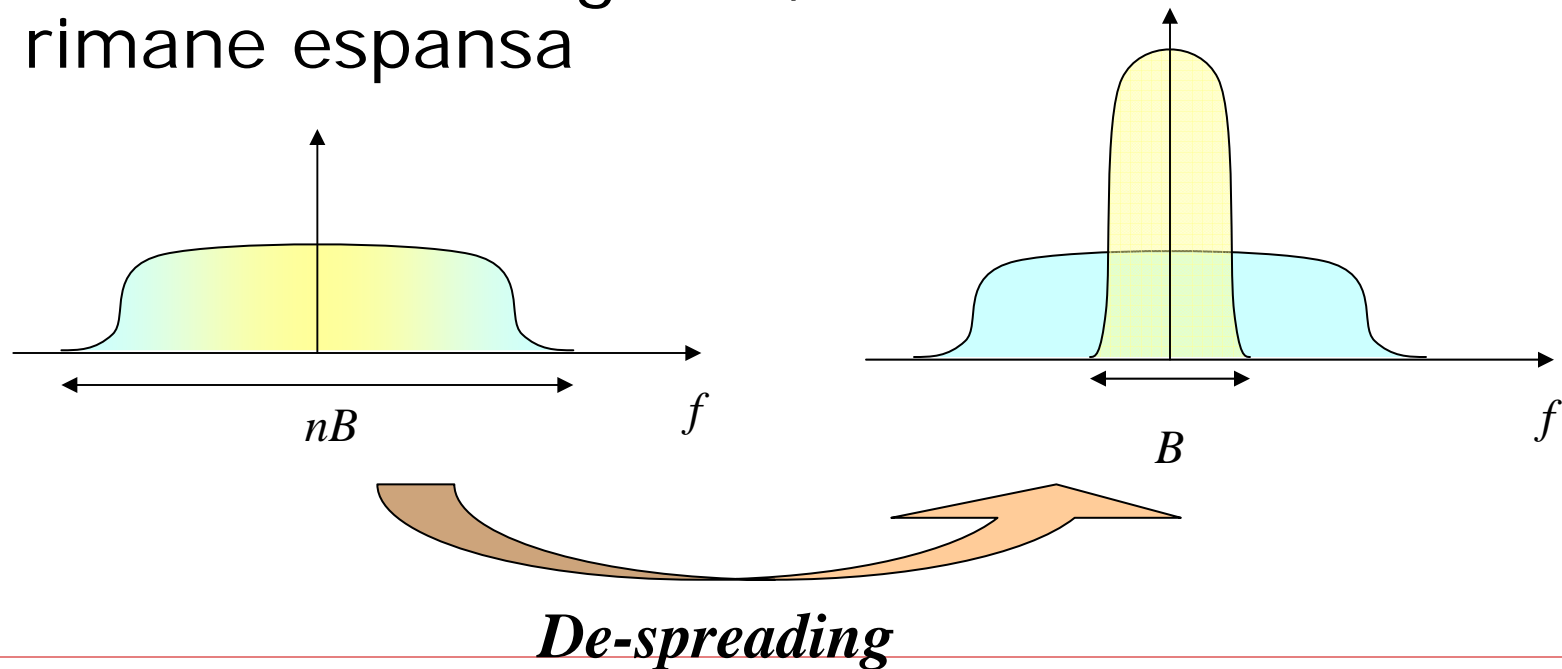
- I segnali dopo lo spreading si sovrappongono in banda





Code Division Multiple Access

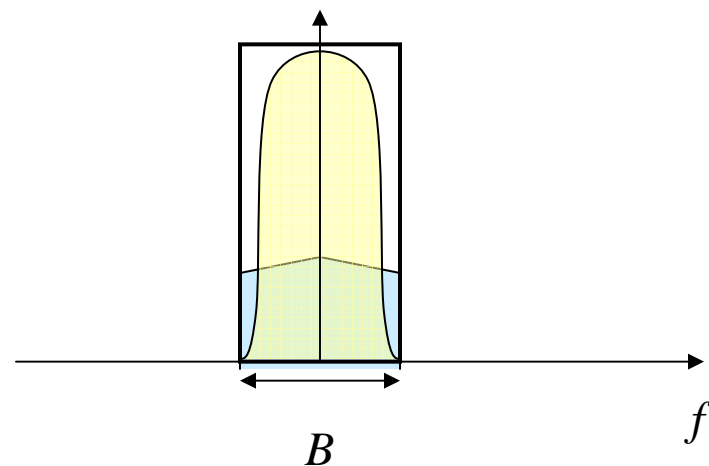
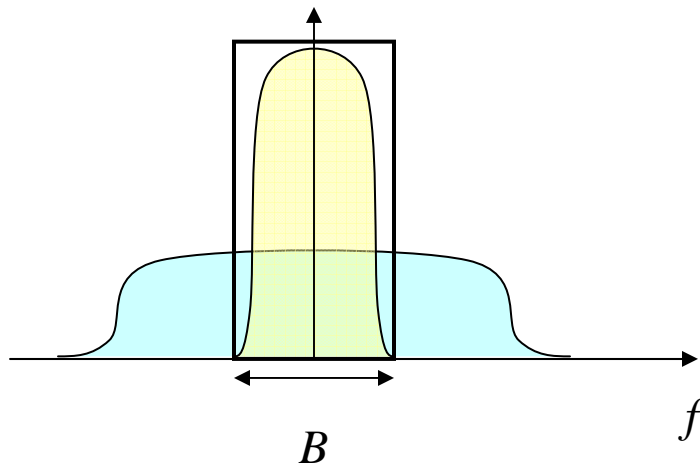
- Dopo il despreading con il codice del canale desiderato, la componente relativa a tale segnale viene riportata nella banda originale
- Gli altri invece, non vengono annullati come con i codici ortogonali, ma la loro banda rimane espansa





Code Division Multiple Access

- Filtrando nella banda del segnale è possibile dunque ridurre la potenza del segnale interferente di n volte





Accesso Multiplo: sguardo d'insieme

