

Concetti di base

- T.S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice Hall, 1996

Definizioni

- **Comunicazione**: trasferimento di informazioni secondo convenzioni prestabilite
- **Telecomunicazione**: qualsiasi trasmissione e ricezione di segnali che rappresentano segni, scrittura immagini e suono, informazioni di qualsiasi natura, attraverso cavi, radio o altri sistemi ottici e elettromagnetici
- **Rete di telecomunicazione**: sistema che permette a utenti e/o dispositivi controllati da utenti di comunicare

Funzioni in una rete di telecomunicazione

- SEGNALAZIONE
- COMMUTAZIONE
- TRASMISSIONE
- GESTIONE

Segnalazione

- Segnalazione: lo scambio di informazioni che riguardano l'apertura, il controllo e la chiusura di connessioni e la gestione di una rete di telecomunicazione
- Lo scambio di informazioni tra l'utente e la rete: **segnalazione di utente**
- La costruzione di un circuito richiede scambio di informazioni di controllo internamente alla rete: **segnalazione di rete**

Commutazione

- Commutazione: il processo di interconnessione di unità funzionali, canali di trasmissione o circuiti di telecomunicazione per il tempo necessario per il trasferimento di segnali
- E' il processo di allocazione delle risorse di rete necessarie per il trasferimento dell'informazione
- Commutazione di **circuito**: canali allocati staticamente e dedicati a singole trasmissioni
- Commutazione di **pacchetto**: canali allocati dinamicamente e condivisi tra piu' trasmissioni

Trasmissione

- Trasmissione: il trasferimento di segnali da un punto a uno o più altri punti
- **Unicast**: punto-punto
- **Multicast**: punto-multipunto
- **Broadcast**: punto-tutti

Gestione

- Aggiunta di nuovi utenti: modifica o aggiunta apparati e/o canali
- Evoluzione tecnologica: sostituzione apparati
- Riconfigurazione per guasti
- Monitoraggio prestazioni
- Controllo apparati
- Gestione della configurazione
- Gestione della sicurezza
- Gestione della mobilità
- Tariffazione

La pila ISO/OSI

Open System Interconnection OSI



Comunicazione radio

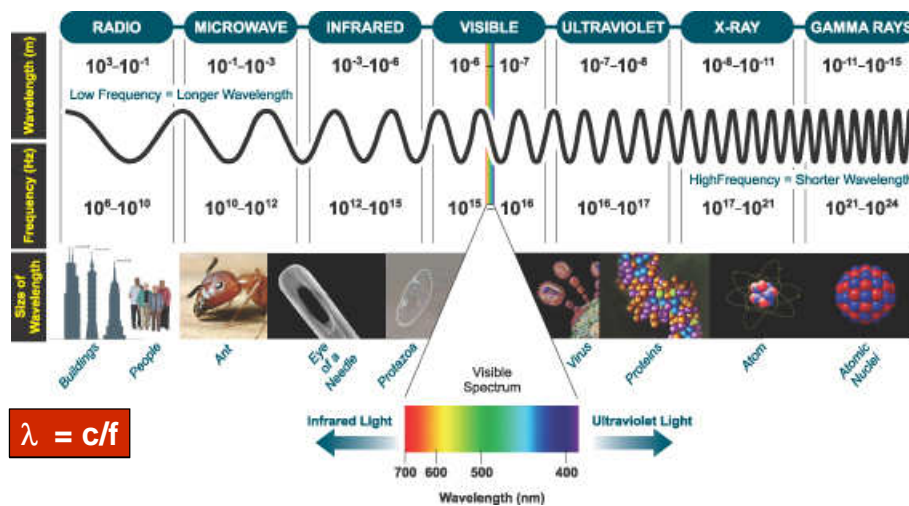
Rete wireless

- Trasmissione: il trasferimento di segnali da un punto a uno o più altri punti
- Rete di telecomunicazione **wireless**: i nodi comunicano tramite un canale “senza filo”
- La trasmissione avviene attraverso un canale radio, a microonde, a infrarossi
- Esempi: *broadcast* radiofonico e televisivo, reti cellulari, reti WiFi, comunicazioni satellitari

RETI RADIOMOBILI

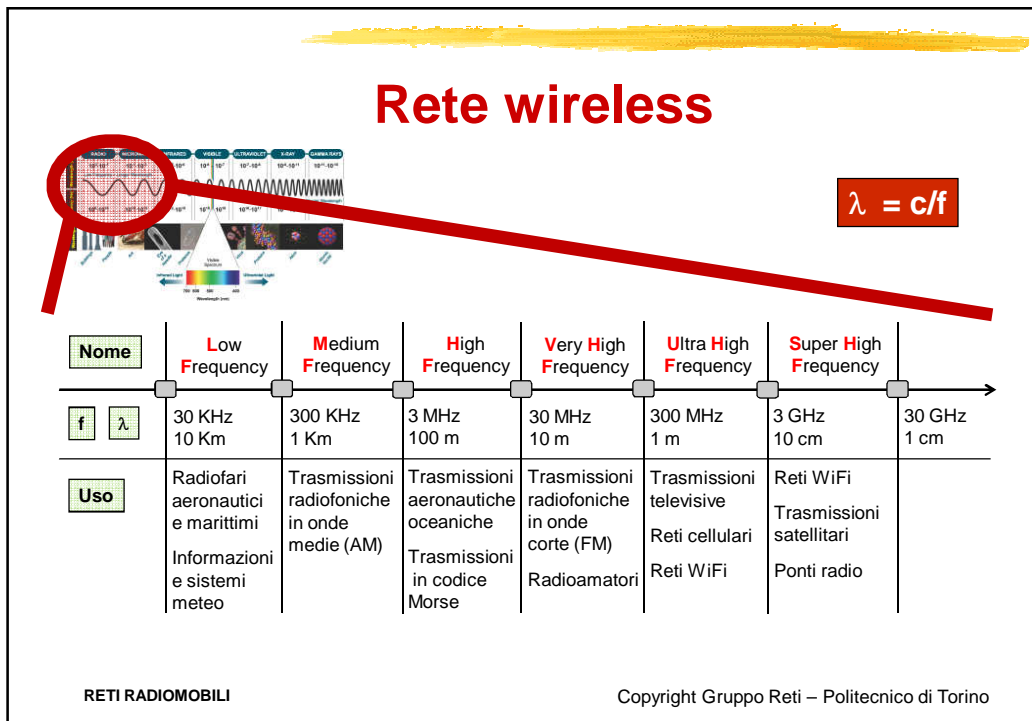
Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Rete wireless

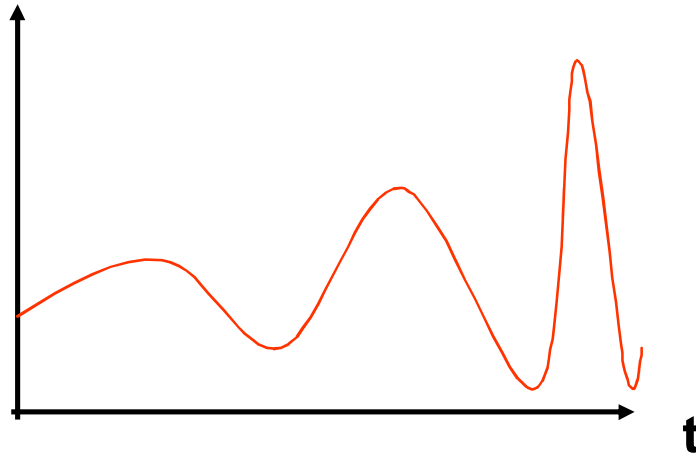


RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino



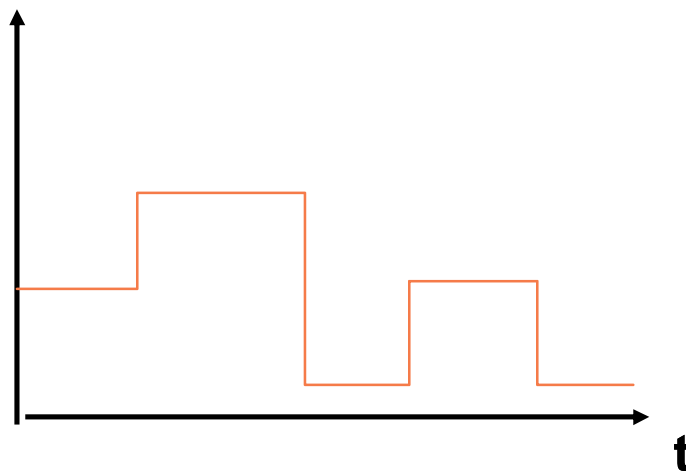
Segnale analogico



RETI RADIOMOBILI

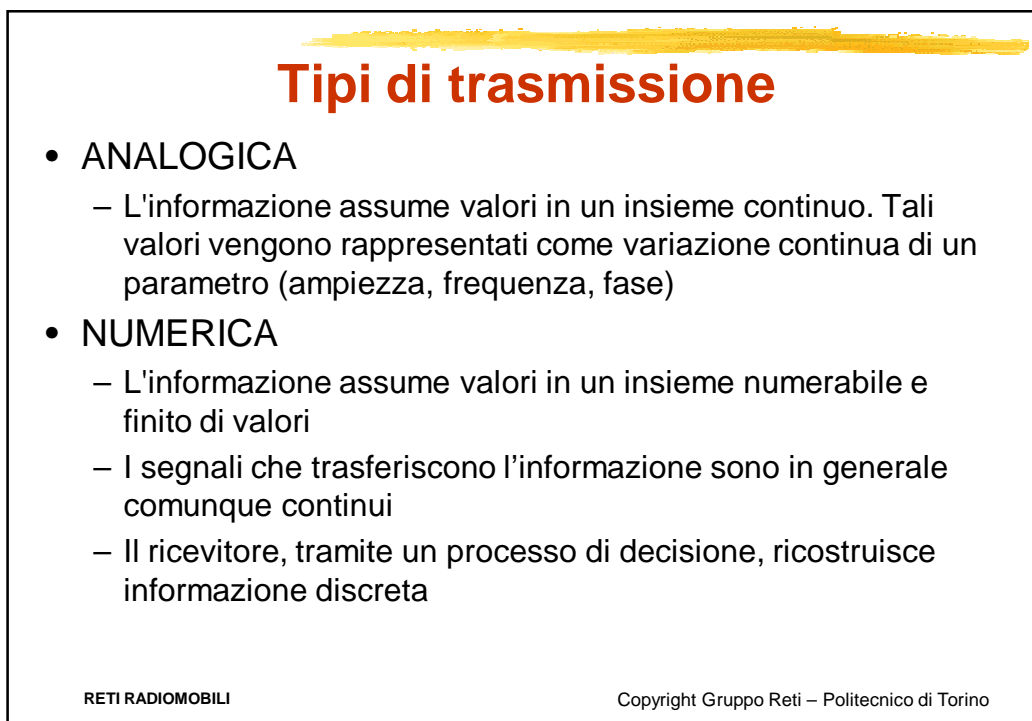
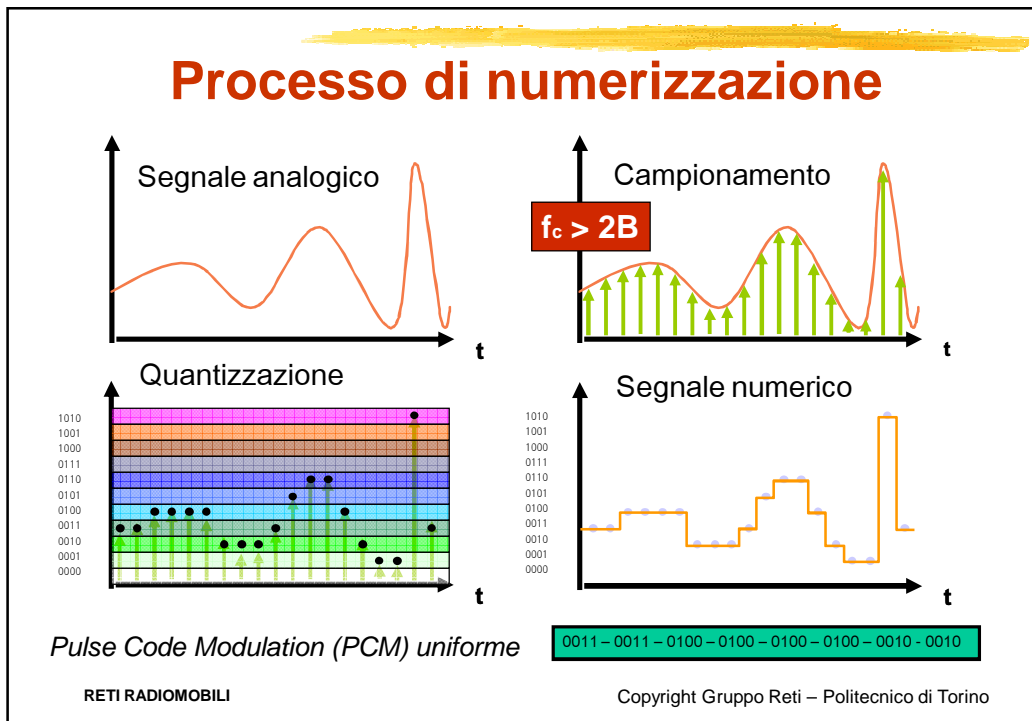
Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Segnale numerico o digitale

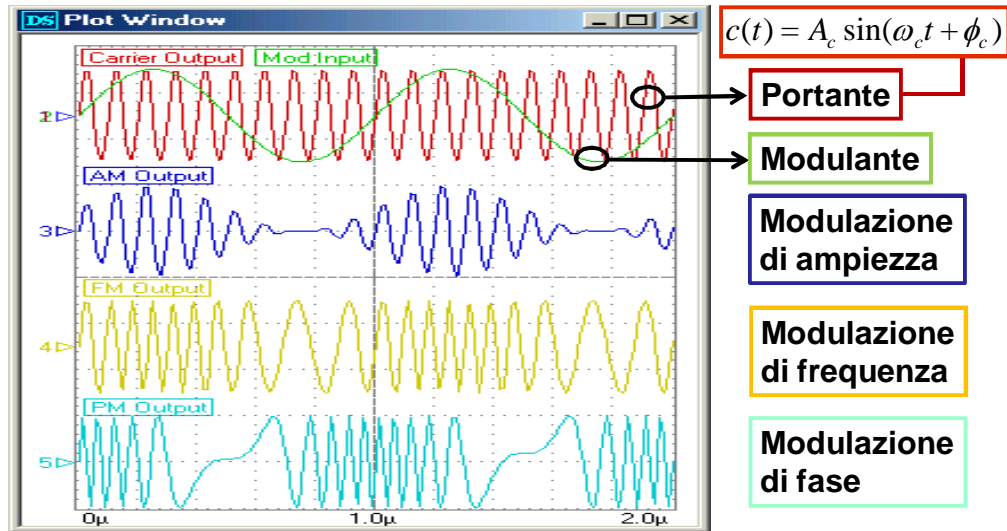


RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino



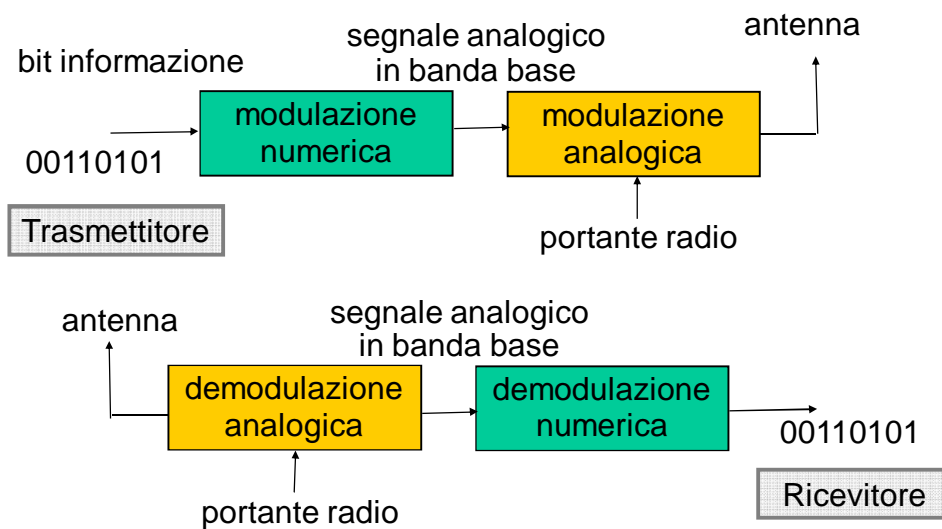
Trasmissione analogica



RETI RADIOMOBILI

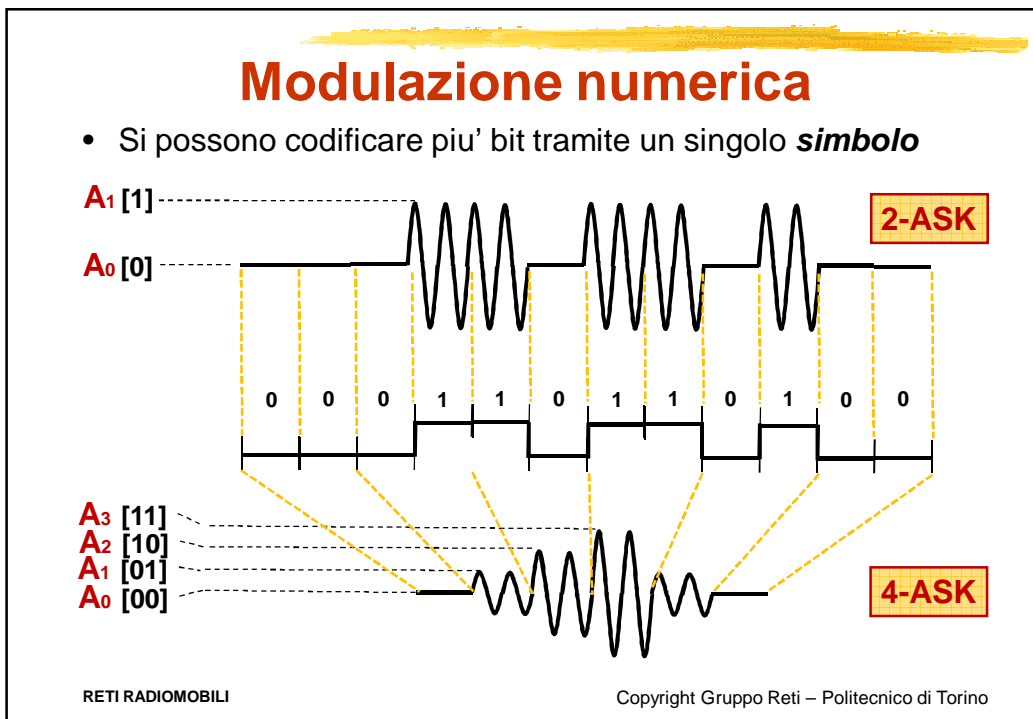
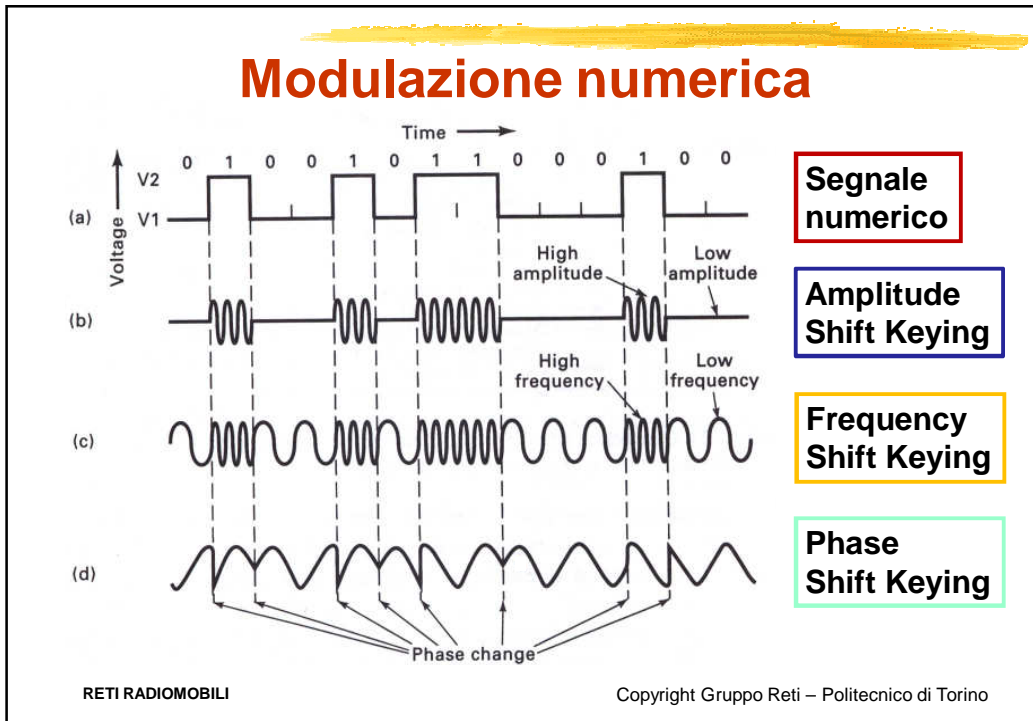
Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Trasmissione numerica



RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino



Modulazione numerica

$$s(t) = A(t) \cos[\omega_c t + \phi(t)] = \underbrace{A(t) \cos[\phi(t)]}_{I(t)} \cos(\omega_c t) - \underbrace{A(t) \sin[\phi(t)]}_{Q(t)} \sin(\omega_c t)$$

2-ASK: 1 bit/simbolo

4-ASK: 2 bit/simbolo

16-QAM: 4 bit/simbolo
Modulazione di fase e ampiezza

2-PSK: 1 bit/simbolo

4-PSK: 2 bit/simbolo

8-PSK: 3 bit/simbolo

RETI RADIOMOBILI Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Modulazione analogica

- Modulazione analogica: frequenza centrale del segnale in banda base è traslato alla frequenza della portante radio
- Necessaria per la trasmissione dei dati
 - **dimensione dell'antenna** proporzionale alla lunghezza d'onda del segnale trasmesso
 - possibilita' di utilizzare contemporaneamente piu' **frequenze diverse** e quindi di effettuare piu' trasmissioni simultanee

RETI RADIOMOBILI Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

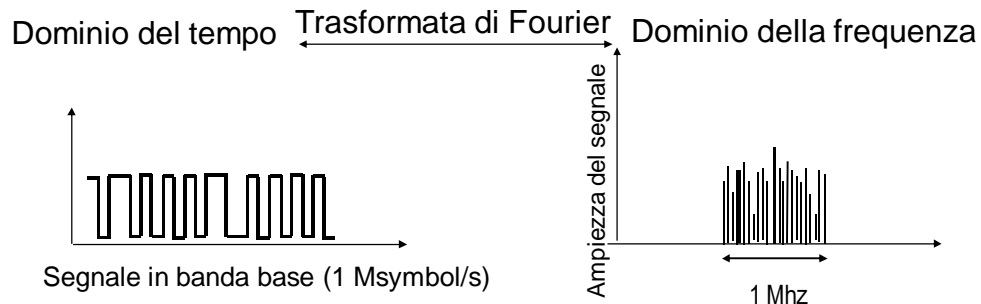
Definizioni

- Spettro di un segnale: insieme delle frequenze che compongono il segnale
- Larghezza di banda (B): ampiezza dello spettro del segnale trasmesso, che dipende dai limiti del trasmettitore e del mezzo di comunicazione (Hz)
- Velocità di trasmissione (R_b): velocità (rate) a cui un utente o un nodo di comunicazione trasmette l'informazione (es. bit/s)
- Tempo di simbolo (t_s): tempo necessario alla trasmissione di un simbolo (es: un bit, $t_s=t_b$)

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Larghezza di banda di un segnale numerico modulato



- **Dal punto di vista del sistema di rete:**
 modulazione t.c.: $R_b/R_s=k \rightarrow$ rate d'informazione= k Mb/s
 corrisponde ad una larghezza di banda del segnale di 1MHz
 - Es. $R_b/R_s=1$, rate d'informazione= 1 Mb/s corrisponde ad una larghezza di banda del segnale di 1MHz

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Frequenze di trasmissione

Frequenza scelta sulla base di:

- Dimensione antenne: dim. antenna $\approx \lambda \rightarrow$ alte f preferibili
- Attenuazione: $\propto f^2 \rightarrow$ basse f preferibili
- Capacità: aumenta al diminuire dell'area coperta, e data la potenza di trasmissione, la copertura decresce al crescere della frequenza \rightarrow alte f preferibili

Propagazione di un segnale radio

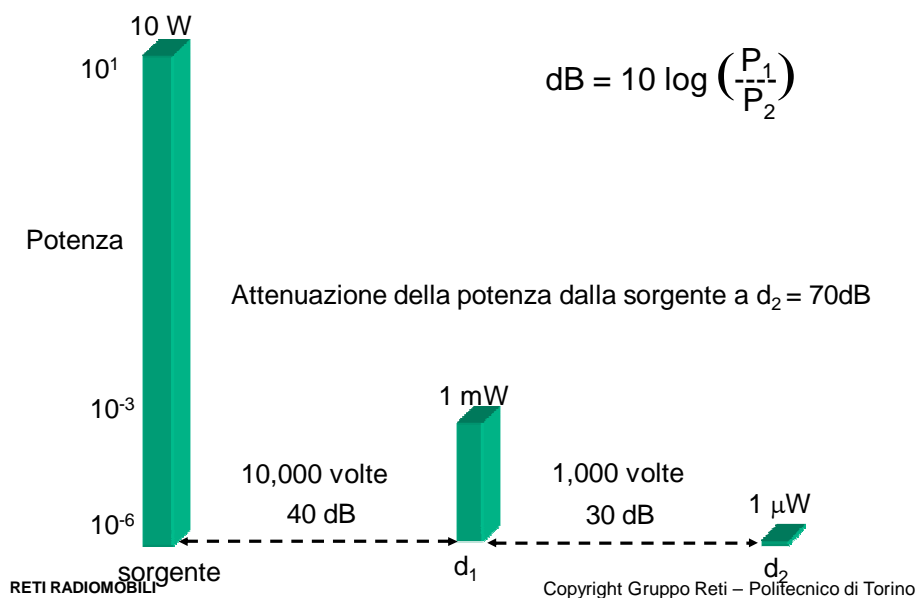
Definizioni

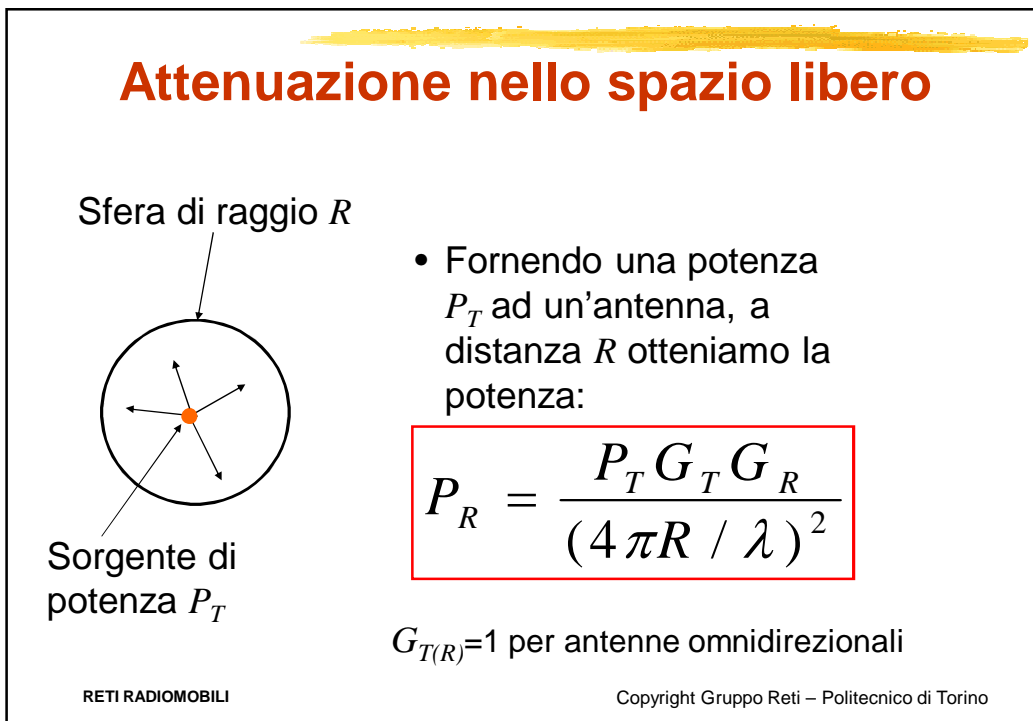
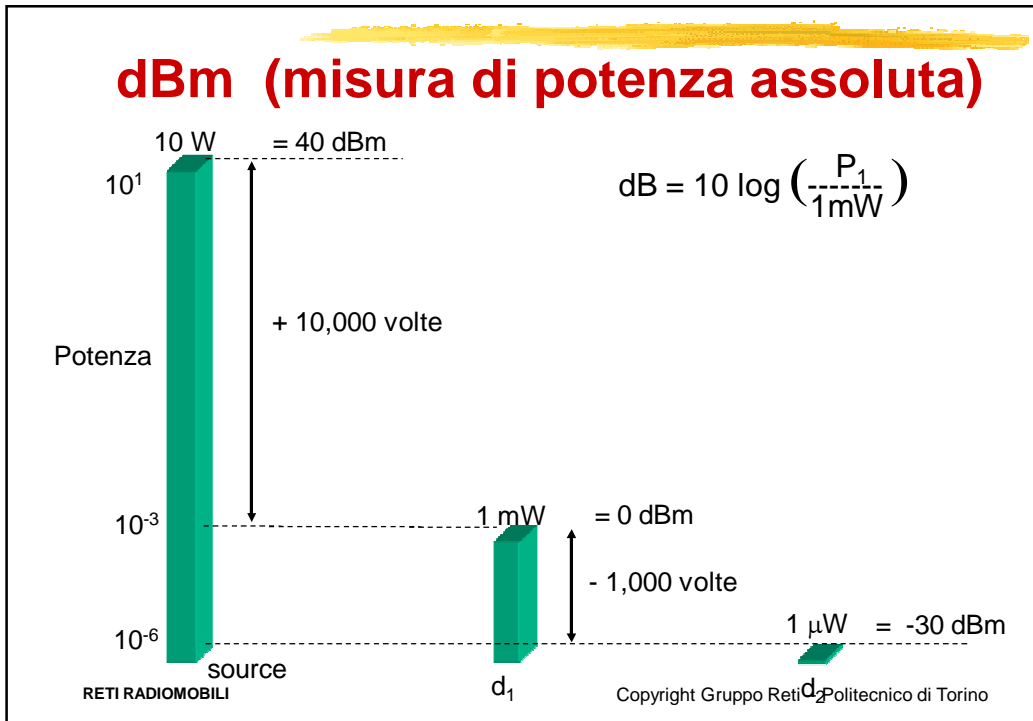
- Energia per bit (E_b): energia trasmessa dal trasmettitore per bit d'informazione
- Potenza del segnale trasmesso: $P_t = E_b R_b$
- Rumore: livello di rumore sul canale di comunicazione. Con N_0 si indica la densità di potenza del rumore

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Potenza in dB





Attenuazione nello spazio libero

Poichè: $\lambda = \frac{c}{f}$ con $c = 3 \cdot 10^8$ m/s

L'attenuazione (*path loss*) è:

$$L = \frac{P_T}{P_R} = \frac{(4\pi R)^2}{G_T G_R} \left(\frac{f}{c} \right)^2$$

dipende dalla frequenza!!

Attenuazione nello spazio libero

Esempio. Valori di attenuazione in dB

R (km)	10	50
f=3 GHz	L _{dB} =122	L _{dB} =136
f=10 GHz	L _{dB} =132.4	L _{dB} =146.2

Attenuazione nello spazio libero

Nello spazio libero:

- P_R decresce in modo quadratico con R
- Le proprietà di direttività dell'antenna cambiano l'attenuazione
- Attenuazione cresce all'aumentare della frequenza
- Segnale si propaga in linea retta

Propagazione reale

- Mezzi trasmissivi diversi dal vuoto
- Presenza di elementi che assorbono e diffondono il segnale
- Presenza di elementi che rifraggono il segnale
- Ostacoli che diffrangono e riflettono il segnale
- Ostacoli in movimento e variabili nel tempo
- Mobilità del trasmettitore e/o ricevitore

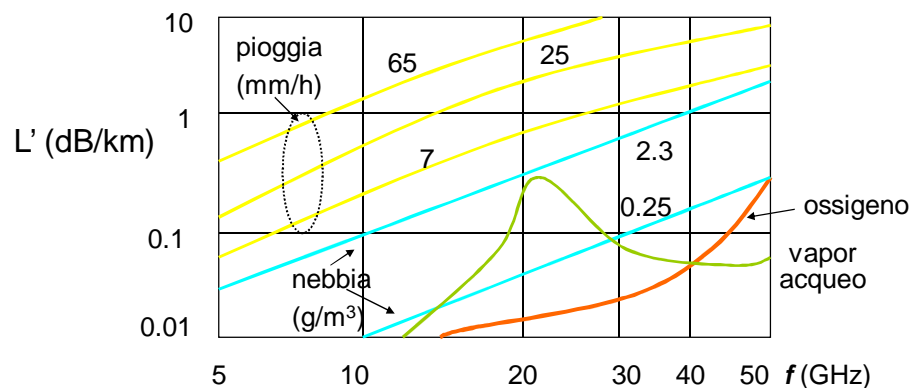
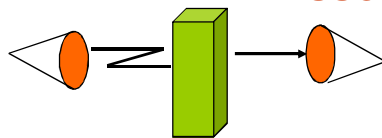
Attenuazione nell'atmosfera

- Interazione tra onde elettromagnetiche e atmosfera:
 - Gas che compongono l'atmosfera
 - Componenti corpuscolari (gocce d'acqua in caso di pioggia o nebbia)
- L'atmosfera causa: assorbimento e diffusione delle onde elettromagnetiche, rifrazione, diffrazione e riflessione
- Attenuazione aggiuntiva a quella dovuta allo spazio libero
- Ci si basa su misure sperimentali e si deducono modelli matematici

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

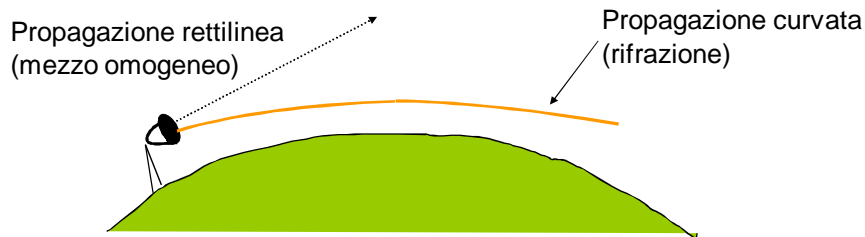
Attenuazione nell'atmosfera Assorbimento con diffusione



RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Attenuazione nell'atmosfera Rifrazione



- Max distanza ("line of sight") raggiungibile da un'antenna con altezza h :

$$d_{\max} = \sqrt{2KR_T h}$$

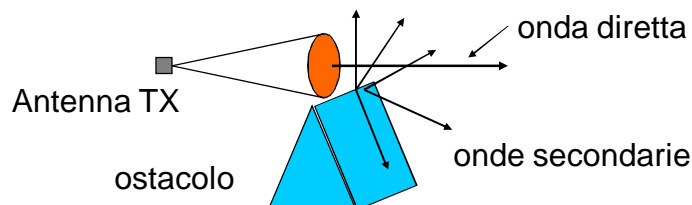
$R_T=6370$ km raggio della terra, K va da 4/3 in zone temperate a 0.4-0.5 in zone tropicali

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Attenuazione nell'atmosfera Diffrazione

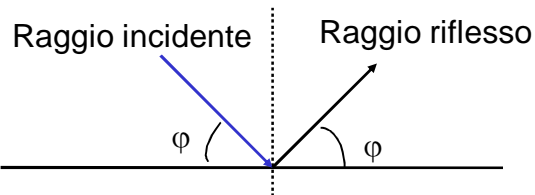
- Ostacoli di **dimensione paragonabile** alla lunghezza d'onda λ
- Tali ostacoli vicini al percorso del segnale colpiti dall'onda e.m. si comportano come **sorgenti secondarie**



RETI RADIOMOBILI

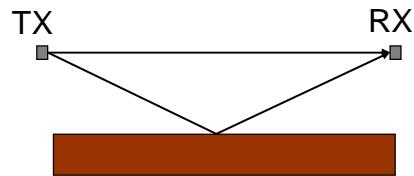
Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Attenuazione nell'atmosfera Riflessione



- Superfici di **dimensione molto maggiore** rispetto alla lunghezza d'onda λ

- Causa problemi quando segnale diretto e segnale riflesso si combinano al ricevitore

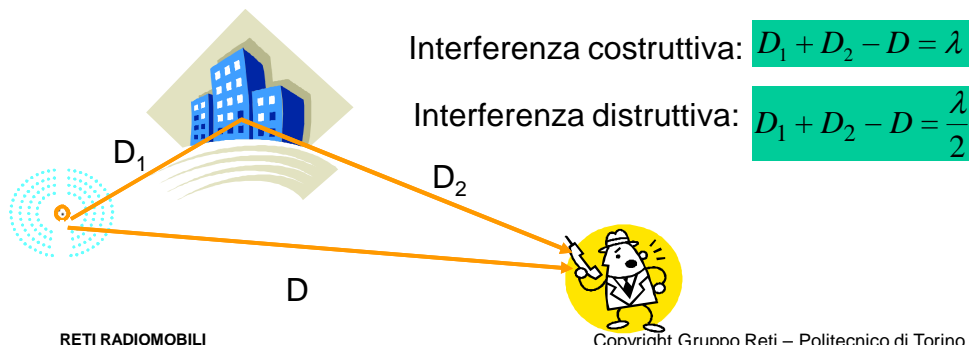


RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

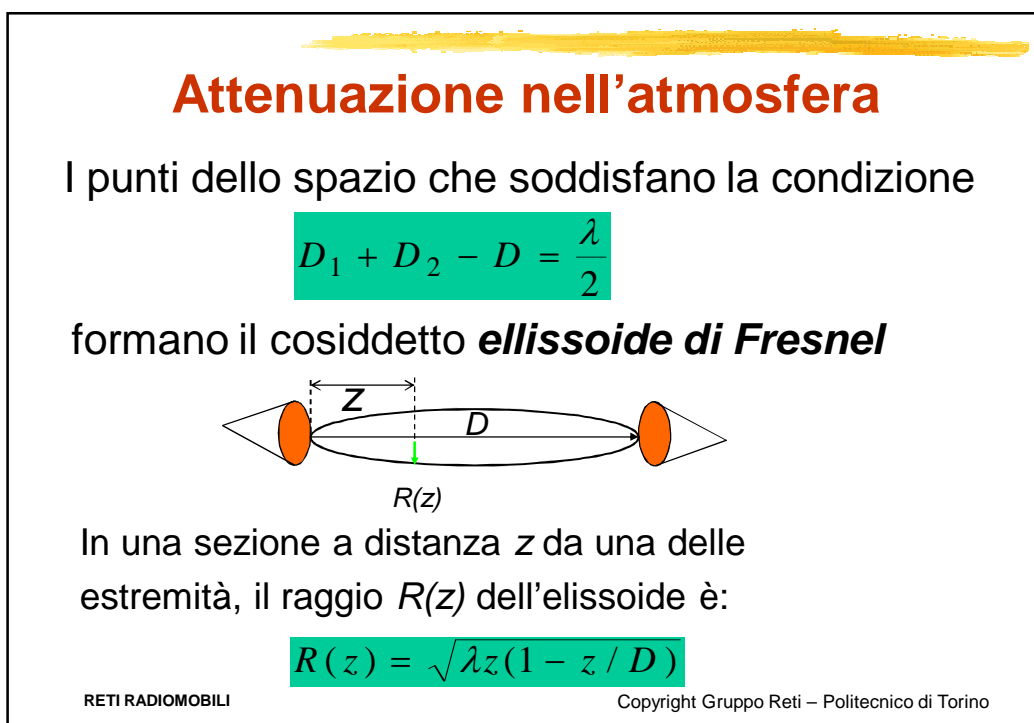
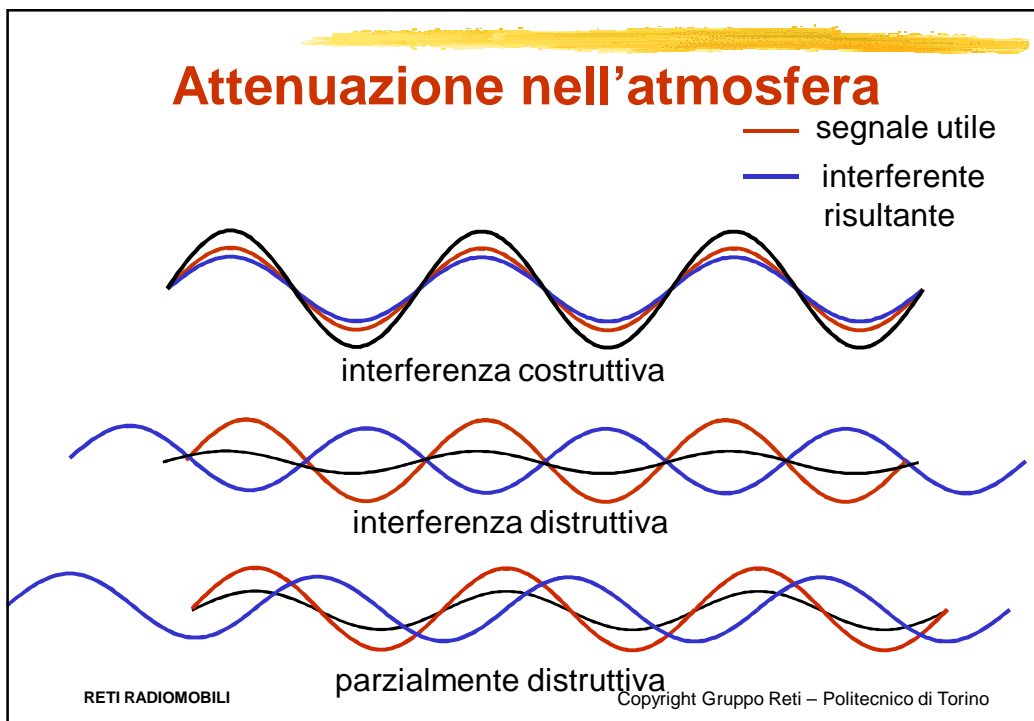
Attenuazione nell'atmosfera

- Onda diretta e secondaria arrivano al RX seguendo cammini di lunghezza diversa -> diverso sfasamento
- Differenza di fase al RX = $D_1 + D_2 - D$



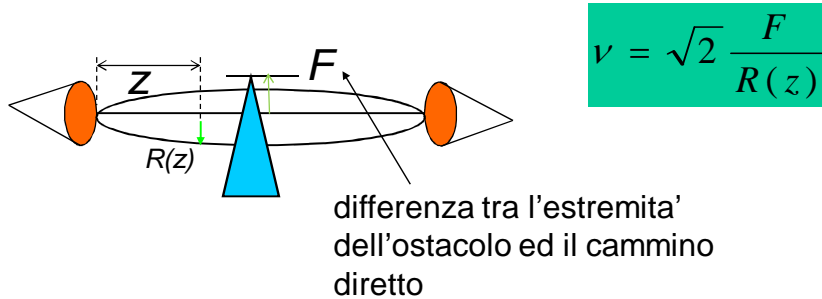
RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino



Attenuazione nell'atmosfera

- L'ellissoide di Fresnel rappresenta l'area dove si concentra la **maggior parte dell'energia** dell'onda e.m.
- Gli effetti di un **ostacolo all'interno** del cammino di propagazione sono espressi in funzione del parametro v

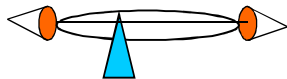


RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

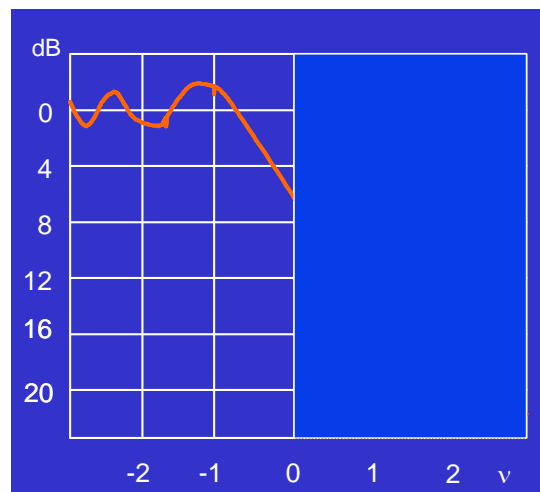
Attenuazione nell'atmosfera

$$v \geq 0$$



L'ostacolo ostruisce il cammino diretto:

LOSS > 6 dB

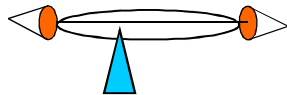


RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

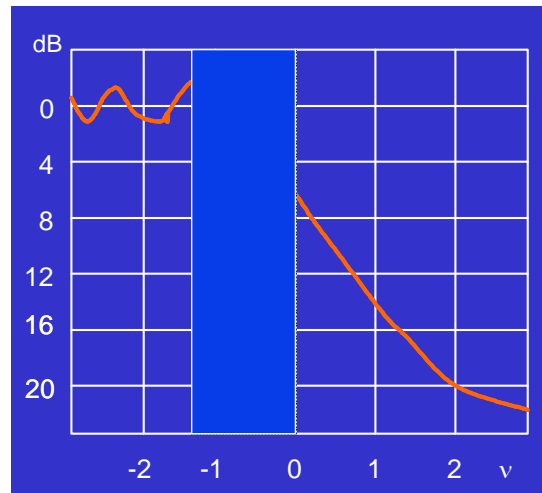
Attenuazione nell'atmosfera

$$-\sqrt{2} < v < 0$$



L'ostacolo è all'interno dell'elissoide di Fresnel:

$$0 \leq \text{LOSS} \leq 4 \text{ dB}$$

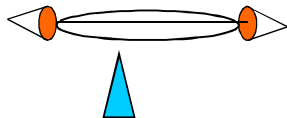


RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

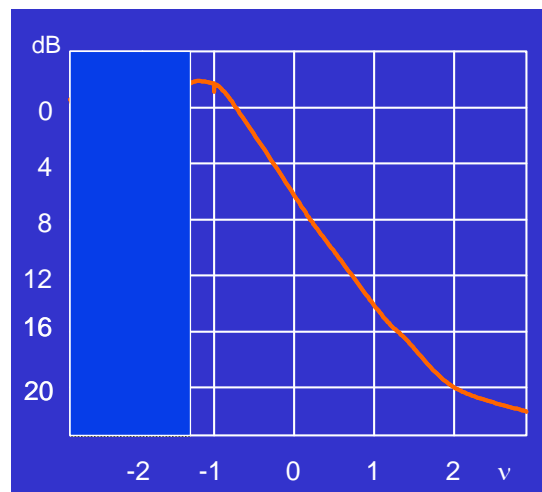
Attenuazione nell'atmosfera

$$v < -\sqrt{2}$$



L'ostacolo è al di fuori dell'elissoide di Fresnel:

$$\text{LOSS} \geq 0$$



RETI RADIOMOBILI

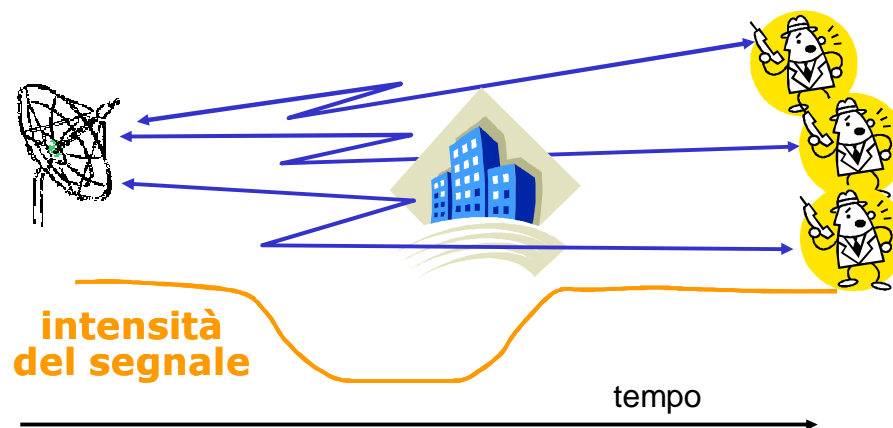
Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

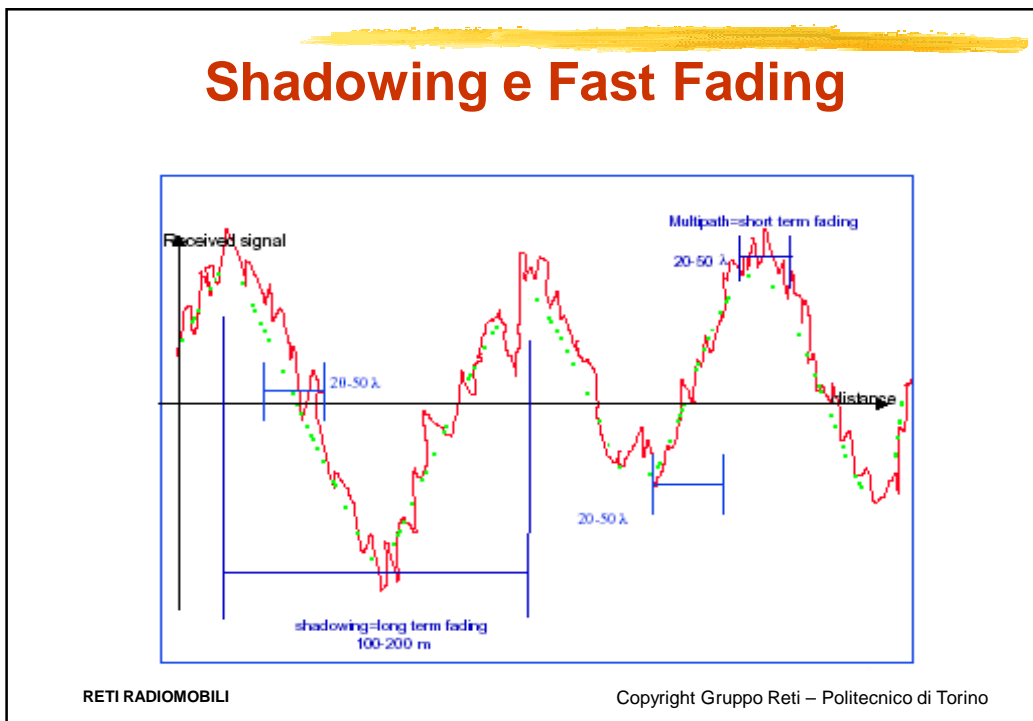
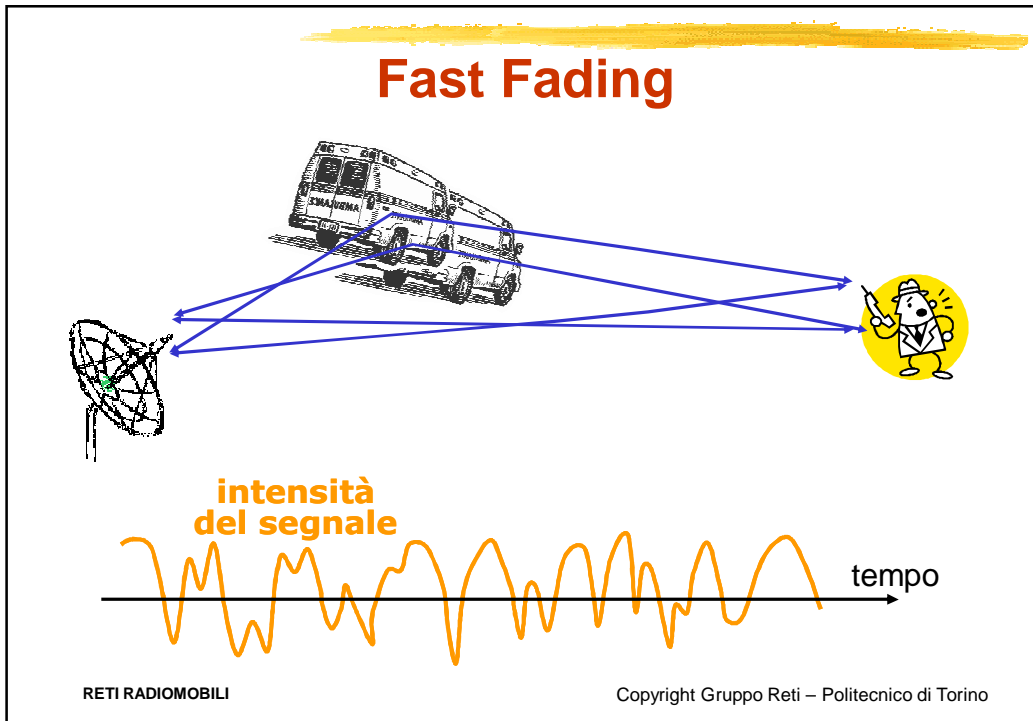
Attenuazione nell'atmosfera

Per effetto dei vari fenomeni sopracitati, la potenza di un segnale subisce:

- Un'attenuazione causata dalla **distanza**
- Un'attenuazione dovuta a un fenomeno "di ombreggiatura" che varia lentamente nel tempo, detto **shadowing**
- Un'attenuazione dovuta ai cammini multipli (canale multipath) che agisce su scale temporali molto veloci, detto **fast fading**

Shadowing





Modelli matematici

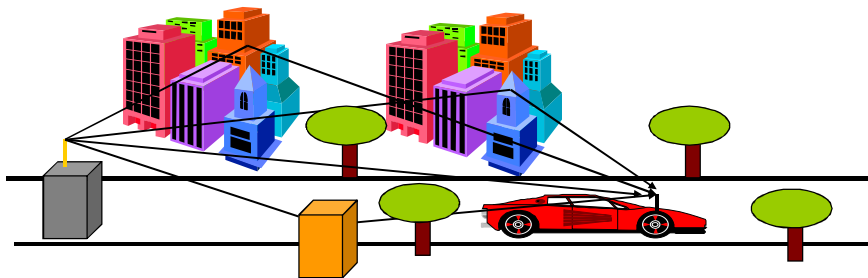
- L'attenuazione subita da un segnale si puo' rappresentare tramite **modelli matematici**
- Nel caso di attenuazione dovuta a **distanza e shadowing**:
 - **Variabile casuale log-normale**: media dipendente dalla distanza (con esponente α) e deviazione standard σ

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \varepsilon$$

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Propagazione in ambiente urbano

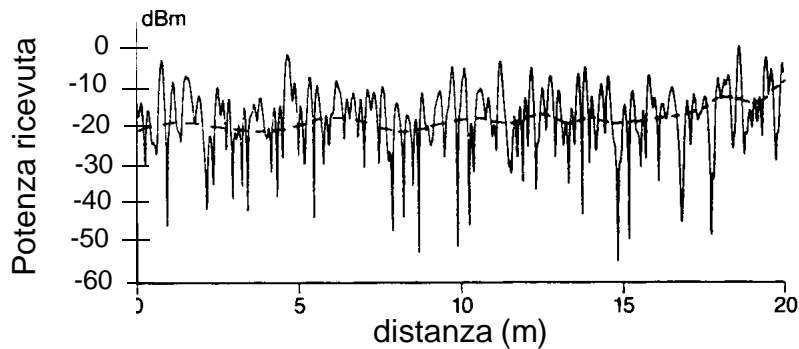


- Al RX arrivano segnali da direzioni diverse e con ritardi diversi, a causa di diffusione, diffrazione, riflessione → cammini multipli (*multipath*)
- Un RX in movimento vede la variazione spaziale come variazione del canale nel tempo

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Propagazione in ambiente urbano: canale multipath

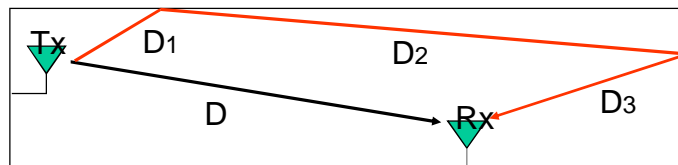


Fast fading: 20-30 dB di attenuazione

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Multipath



Multipath:

- RX riceve diverse copie del segnale originale (*echi*)
- Echi arrivano al RX con diversa **ampiezza** (attenuazione) e **fase** (ritardo di propagazione)
- La differenza di fase dipende da λ (interferenza costruttiva, $D_1 + D_2 + D_3 - D = \lambda$) \rightarrow l'interferenza degli stessi echi e' diversa a **frequenze diverse**

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

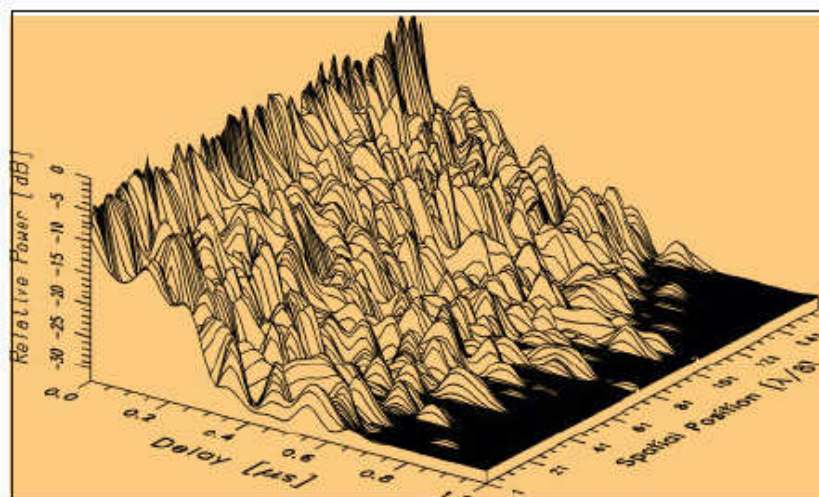
Parametri del canale multipath

- τ : **dispersione temporale** introdotta dal canale; è il massimo ritardo di propagazione introdotto dal canale
- B_C : **banda di coerenza** del canale multipath. Intervallo di frequenze entro cui tutte le componenti di un segnale subiscono la stessa variazione di ampiezza e di fase
- $\tau = 1 / B_C$
- τ e B_C sono proprietà *statiche* del canale

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Profili di ritardo Indoor: parcheggio auto



RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Flat Fading

- Un segnale di banda B si attenua/rafforza → **flat fading**
 - Avviene quando $B \ll B_c$
 - Rapida fluttuazione dell'ampiezza del segnale in un breve periodo di tempo dovuta al sovrapporsi di echi dello stesso segnale con *fase leggermente diversa*, ma il ritardo introdotto dal canale sugli echi è trascurabile
 - Il guadagno del canale varia velocemente nel tempo ma *tutte le componenti in frequenza del segnale sono trattate allo stesso modo*

Frequency-selective Fading

- Dispersione di un segnale di banda B nel tempo → **frequency-selective fading**
 - Avviene quando $B > B_c$
 - Gli echi sono attenuati e ritardati nel tempo, *il segnale al RX è distorto in frequenza*
 - Interferenza intersimbolica: simboli adiacenti si sovrappongono a causa della dispersione temporale e il RX non riceve correttamente nessun simbolo
 - Per evitarlo occorre limitare la velocità di trasmissione

Oggetti in movimento e mobilità

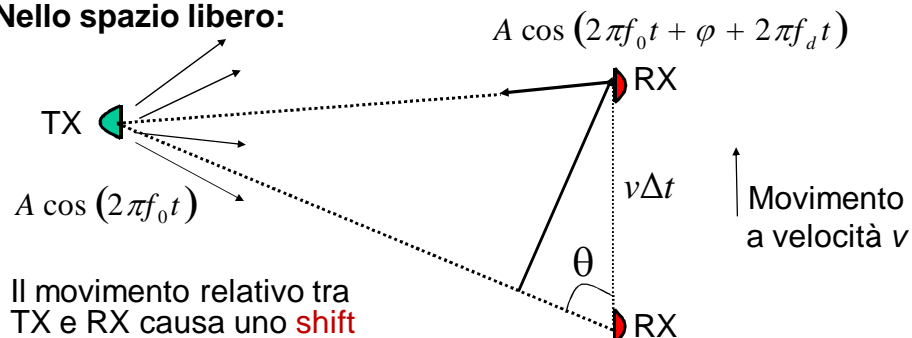
- Se consideriamo il movimento degli oggetti circostanti e/o del TX e RX, il fenomeno del multipath è influenzato dall'**effetto Doppler**

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Effetto Doppler (1)

Nello spazio libero:



- Il movimento relativo tra TX e RX causa uno **shift in frequenza f_d** di ciascuna eco al RX
- $f_d = f_0 v/c \cos(\theta)$ ($f_d =$ frequenza di Doppler)
- $f_d > 0$ se il mobile si sposta verso la direzione di arrivo del segnale, $f_d < 0$ altrimenti
- Frequenza percepita al ricevitore: $f_0 + f_d$

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

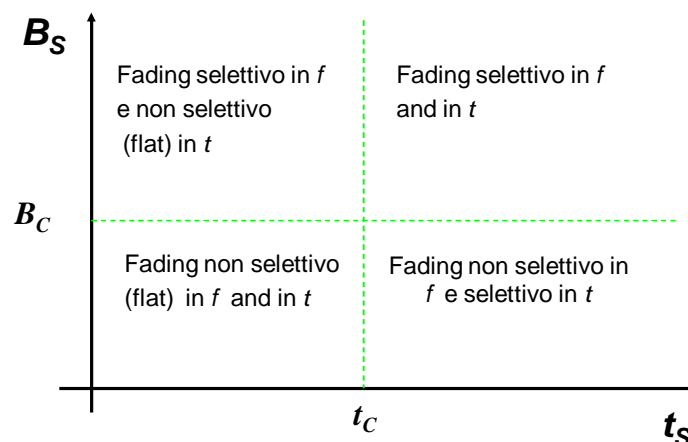
Effetto Doppler (2)

- f_{d0} è la massima frequenza del segnale ricevuto in seguito alla presenza dell'effetto Doppler
- $t_c = 1/f_{d0}$ è il **tempo di coerenza** del canale
- f_{d0} e t_c sono proprietà *dinamiche* del canale, perchè dipendono dal movimento del RX rispetto al TX
- **Slow fading**: se $t_c \gg t_s$ (tempo di simbolo)
 - canale 'statico' durante la trasmissione di uno o piu' simboli
- **Time selective (fast) fading**: se $t_c < t_s$ (tempo di simbolo)
 - attenuazione diversa durante la trasmissione di un simbolo
- l'effetto doppler sui raggi multipath dovuto al movimento di oggetti intorno diventa **trascurabile** solo quando il movimento del RX rispetto al TX è piccolo rispetto a quello degli oggetti intorno

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Canale multipath: sommario



RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Capacità del canale

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Rapporto segnale rumore (SNR)

- Rapporto tra:
 - La potenza del **segnale utile** al ricevitore (P_r) e
 - La potenza del **rumore** presente sul canale di comunicazione (N_0B)
$$SNR = P_r / (N_0B) = P_t L / (N_0B) = E_b R_b L / (N_0B)$$
 - Alto SNR -> alta qualità del segnale ricevuto ($SNR \geq \gamma$)
 - SNR limita la massima velocità di trasmissione che può essere raggiunta (Shannon)

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Capacità del canale

- Capacità (C): la velocità massima a cui l'informazione può essere trasmessa su un canale sotto certe condizioni

Formula della capacità di Shannon (capacità analogica)

$$C = W \log_2 (1 + \text{SNR}) = W \log_2 [1 + E_b R_b / (N_0 W)]$$

- Rappresenta il *massimo limite teorico* della capacità di un canale con banda limitata e rumore bianco gaussiano additivo, *in trasmissione analogica*
- C [bit/s], W [Hz]
- Se $R_b < C$, la trasmissione priva di errori è possibile
- Dato un valore di $R_b < C$, trasmetto senza errori:
 - con un canale a banda stretta (W piccolo) ed elevato SNR
 - con un canale a banda larga (W grande) e SNR piccolo
- Un canale può essere limitato in potenza (basso SNR) o in banda (SNR alto e B piccola)

Capacità del canale

- Esempio: la linea telefonica analogica ha
 - banda di 3000 Hz (da 300 Hz a 3300 Hz)
 - rapporto Segnale/Rumore 35 dB (3162)
- Capacità del canale risultante:
 $C=3000 \log_2(3163)=34860$ bit/s
- Il teorema di Shannon dice che il rumore limita la velocità di trasmissione a cui l'informazione può essere trasferita correttamente sul canale
- Sottintende l'esistenza di modulazione e codici di canale che permettono di raggiungere un certo rate (ma non dice come farli)

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Efficienza spettrale

- Per valutare la bontà del canale reale, si misura la capacità di avvicinarsi al limite di Shannon
 - bit rate: $R_b = m/T_S$ (bit/s) ; m : bit/simbolo
 - banda del canale: W
 - **Efficienza spettrale:** R_b / W [bit/s²]

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Tecniche per la protezione dagli errori

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Tecniche per la protezione dagli errori di trasmissione

- **FEC** (Forward Error Correction): codifica di canale
- **ARQ** (Automatic Retransmission reQuest)
- Tecniche a **diversità**

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

FEC

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Codifica FEC



- **k** bit in ingresso
- **n** bit in uscita
 - **n-k** bit aggiunti per la codifica FEC
- Corregge al massimo **t** bit errati per ciascun blocco di **k** bit in ingresso
- Tipi di codifica: **a blocco**, **convoluzionale**

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Codifica FEC

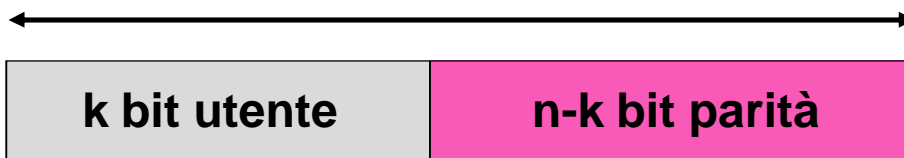
- Il TX aggiunge un codice per la correzione d'errore a una stringa di bit d'informazione
 - Il codice è una funzione dei bit d'informazione
- Il RX calcola il codice per la correzione d'errore dai bit d'informazione ricevuti
 - Se il codice calcolato è uguale a quello ricevuto
 - > nessun errore
 - Altrimenti, il RX cerca di determinare i bit errati e correggerli

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Codifica a blocco per controllo di errore

n bit



2^k possibili combinazioni

- Rate del codice (code rate)= k/n
- E' possibile correggere al più **t** errori per blocco

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Esempi di protezione dagli errori

- codice a ripetizione
(decisione a
maggioranza: permette
di correggere errori)

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

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Esempi di protezione dagli errori

- parità di riga e colonna
(consente la correzione
di errori singoli)

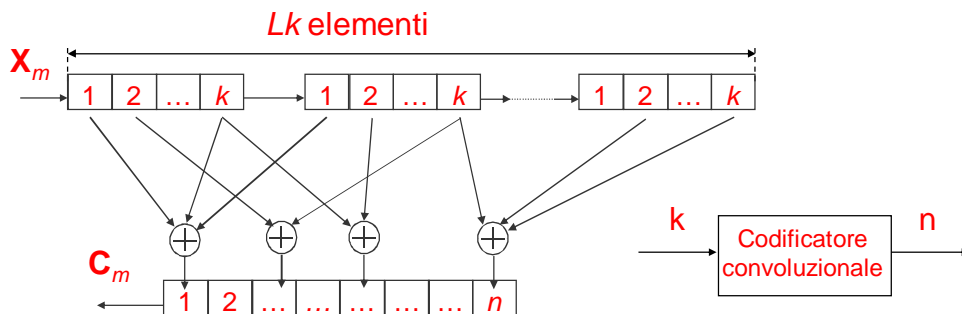
0	1	1	0	1	0	1	0	0
0	1	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	0	1	0	1	1
1	1	0	0	0	0	1	0	1
1	1	1	0	1	0	1	0	1
0	0	0	0	1	0	1	0	0
0	1	1	1	1	0	1	0	1
0	1	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	1	1	1	1

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Codici convoluzionali

- Bit d'informazione passano in uno shift register
- Shift register con L elementi di k bit ciascuno e n generatori di funzioni algebriche
- k-bit alla volta sono immessi/rimossi nello/dallo shift register
- Per ogni k-bit, si generano n bit (code rate=k/n)

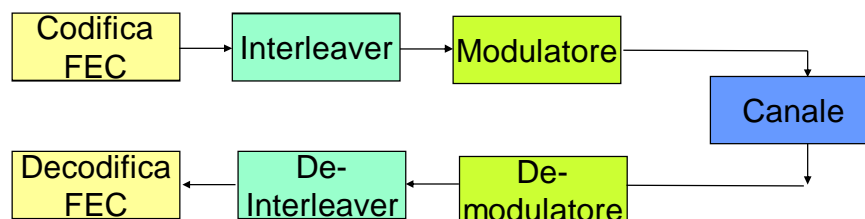


RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Interleaving

- **Interleaver:** modifica l'ordine dei simboli inviati sul canale radio per "distruggere" la correlazione tra gli errori (errori molto correlati indeboliscono la codifica di canale)



RETI RADIOMOBILI

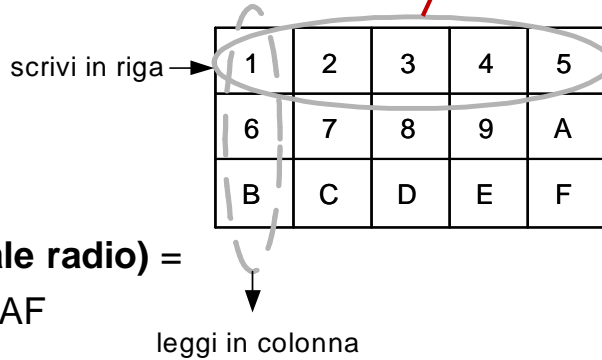
Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Interleaving

- Esempio: $n=5$

Input = 123456789ABCDEF

Blocco di n bit in uscita da codificatore FEC



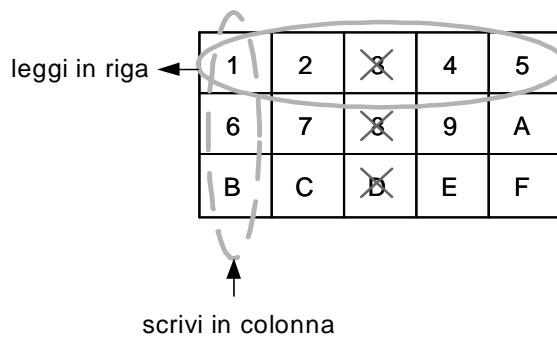
Output (sul canale radio) =
16B27C38D49E5AF

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Interleaving

- Supponiamo che “38D” siano in errore
- Gli errori sul canale radio in genere sono vicini, cioè sono **correlati**



- In ricezione:**

12x4567x9ABCxEF

- Ora gli errori sono spazialmente distanti, quindi la loro correlazione è **diminuita**. Se $t \geq 1$, riesco a correggere tutti gli errori

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

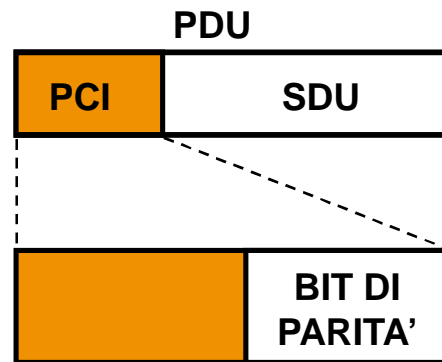
Interleaving

- Svantaggio: introduce **ritardo**
- A seconda del ritardo che si ritiene accettabile, è possibile effettuare un interleaving più o meno **profondo**
- Regola per definire le dimensioni della matrice di interleaving, con $t=1$:
 - Numero di colonne uguale a **k**
 - Numero di righe maggiore o uguale alla lunghezza massima del burst di errore

ARQ

Intestazione pacchetti

- Si introducono bit di parità tra le informazioni di controllo all'interno delle PDU

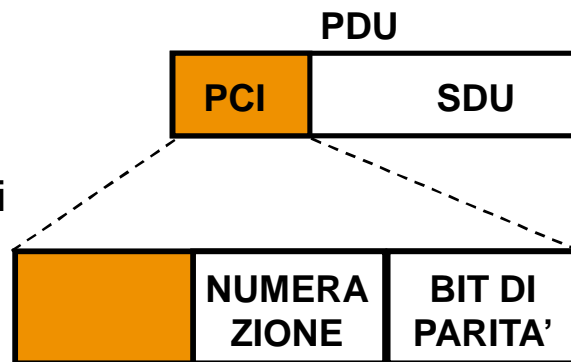


FEC e ARQ

- FEC (forward error correction): i bit di parità sono usati per cercare di correggere gli errori
- ARQ (automatic retransmission request): i bit di parità sono usati per cercare di rivelare gli errori (CRC)

ARQ

- Controllo congiunto su una connessione di
 - errore
 - flusso
 - sequenza
- Si introducono bit di numerazione tra le informazioni di controllo all'interno delle PDU

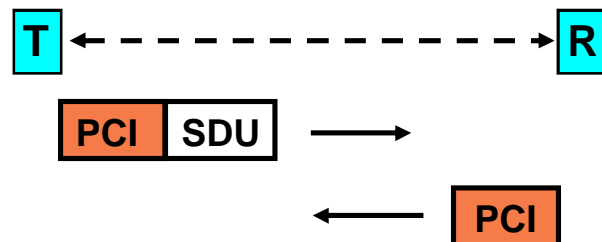


RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

ARQ

- Tre tecniche ARQ:
 - Stop and wait (Alternating bit)
 - Go back N
 - Selective repeat



RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Tecniche a diversità

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Diversità

- Basata sul concetto che canali diversi sono soggetti a fenomeni di fading indipendenti
- **Diversità spaziale:** si usano più antenne in ricezione in modo da avere segnali che subiscono attenuazioni statisticamente indipendenti. Es. antenne multiple (antenne in ricezione devono distare $10-20 \lambda$)
- **Diversità di frequenza:** il segnale è trasmesso allo stesso momento su portanti di frequenza diverse
- **Diversità di tempo:** la trasmissione è ripetuta in istanti di tempo diversi

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

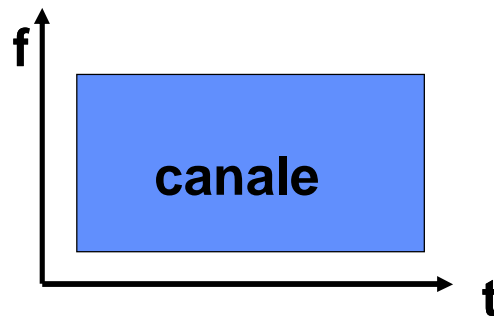
Accesso multiplo

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Accesso Multiplo

- Permette agli utenti di condividere un canale comune (la banda a disposizione):
 - **FDMA:** Frequency Division Multiple Access
 - **TDMA:** Time-DMA
 - **CDMA:** Code-DMA
 - **SDMA:** Space-DMA



RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Rapporto segnale (interferenza + rumore)

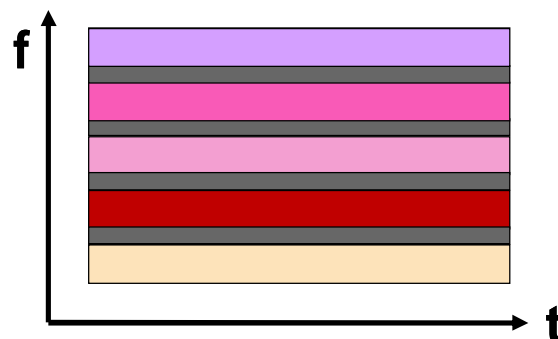
- Rapporto tra:
 - La potenza del segnale utile al ricevitore e
 - La potenza dell'interferenza + rumore presenti sul canale di comunicazione

$$\text{SINR} = P_r / (N_0 B + I) = E_b R_b / L (N_0 B + I)$$

- Alto SINR -> alta qualità del segnale ricevuto

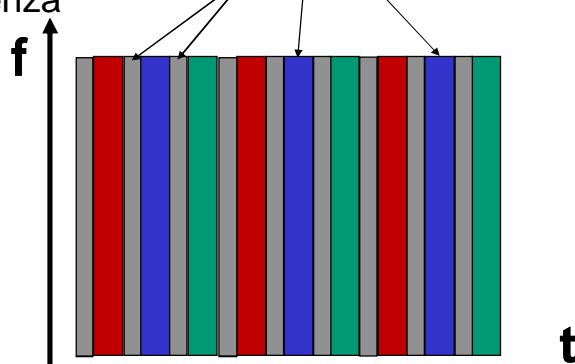
FDMA

- Divisione del canale in bande di frequenza
- Occorrono bande di guardia per evitare interferenza



TDMA

- Divisione in intervalli di tempo distinti
- Occorrono trame temporali che si ripetono
- Occorrono intervalli di tempo di guardia per evitare interferenza

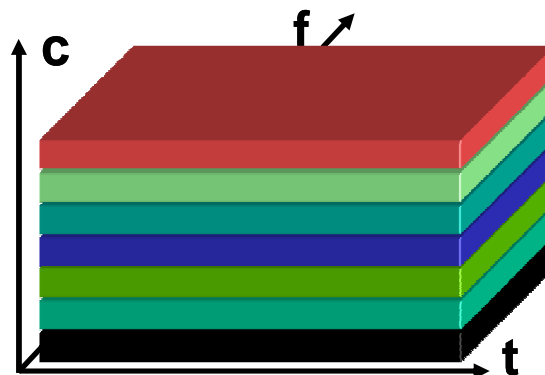


RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

CDMA

- Divisione ottenuta tramite codici diversi
- Occorrono codici ortogonali per evitare interferenza



RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

CDMA

"Bonjour" "Shalom"
 "Hello" "Guten Tag" "Buenos Dias"

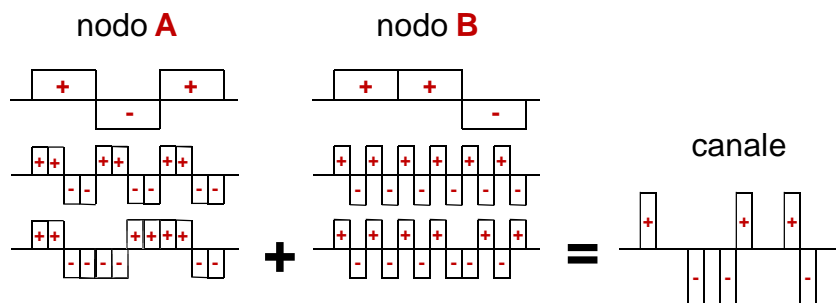


RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

CDMA

- Ciascun bit del segnale digitale e' combinato con uno **spreading code**
- Gli utenti che accedono al medesimo canale usano chipping code **ortogonali** (prodotto scalare nullo)
 - $[1,1,-1,-1] \times [1,-1,-1,1] = (1*1)+(1*-1)+(-1*-1)+(-1*1) = 1-1+1-1 = 0$

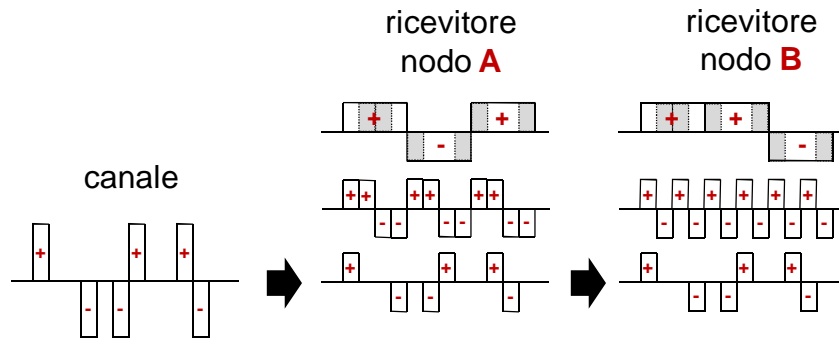


RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

CDMA

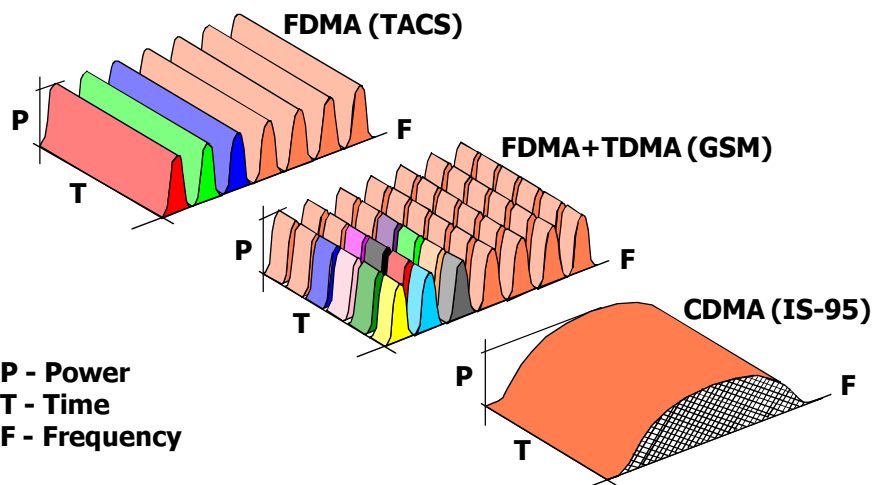
- Ciascun ricevitore e' in grado di ricostruire l'informazione usando lo **spreading code** corrispondente al proprio trasmettitore



RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Tecniche di accesso per comunicazioni mobili

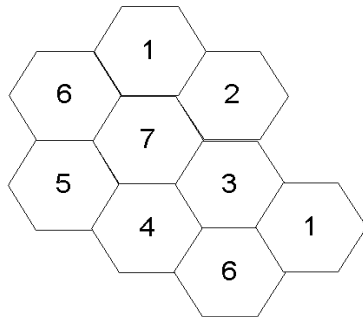


RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

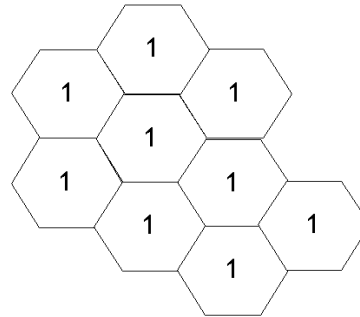
Fattore di riuso della frequenza

FDMA/TDMA



RETI RADIOMOBILI

CDMA



Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Comunicazione full-duplex

- **Frequency-division duplex (FDD):** ogni canale bi-direzionale usa 2 frequenze opportunamente distanziate sullo spettro
 - ricevitore discrimina tra le 2 frequenze (filtraggio), fatto all'interno della stessa antenna (*duplexer*)
- **Time division duplex (TDD):** ogni canale bidirezionale usa un'unica frequenza
 - posso o trasmettere o ricevere su questa frequenza in un dato istante
 - trasmissione e ricezione sono disgiunte temporalmente e sincronizzate in modo da rispettare le relative finestre

RETI RADIOMOBILI

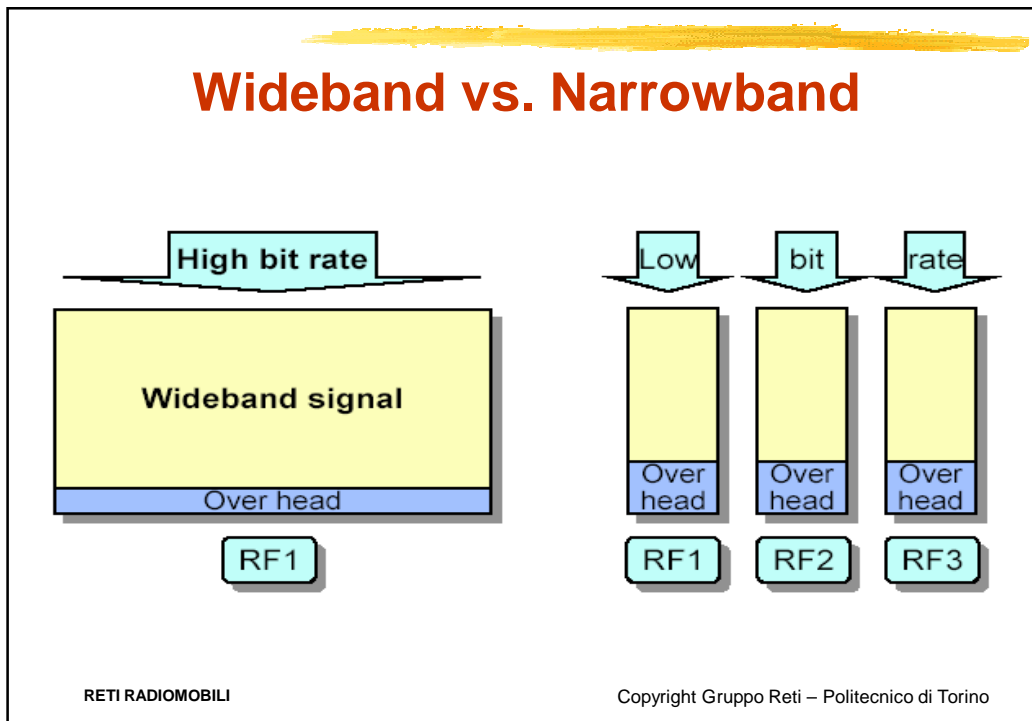
Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Trasmissione a larga banda

Tecniche spread spectrum

Wideband vs. Narrowband

- Banda stretta (*Narrowband*): FDMA, FDMA/TDMA
- Banda larga (*Wideband*): CDMA
 - *Utilizza la tecnica spread spectrum*
 - Esempio:
 - AM and FM (radio) trasmettono su una banda stretta (4 kHz and 15 kHz) e l'intera energia del segnale è concentrata intorno alla frequenza centrale
 - In CDMA l'energia del segnale è distribuita equamente (spread) sull'intera banda di frequenza



Banda larga: caratteristiche

- Un segnale d'informazione è tipicamente a banda stretta (es., segnale vocale ~10 kHz) → la larghezza di banda del segnale d'informazione viene allargata
- **La densità di potenza**, potenza per ogni componente in frequenza, è piccola
- In un sistema a larga banda, gli utenti trasmettono sotto il rumore di fondo
 - In TDMA gli utenti trasmettono **sopra**

RETI RADIOMOBILI Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Spreading del segnale

- Due tecniche utilizzate per fare *spread spectrum*

1. Frequency Hopped Spread Spectrum

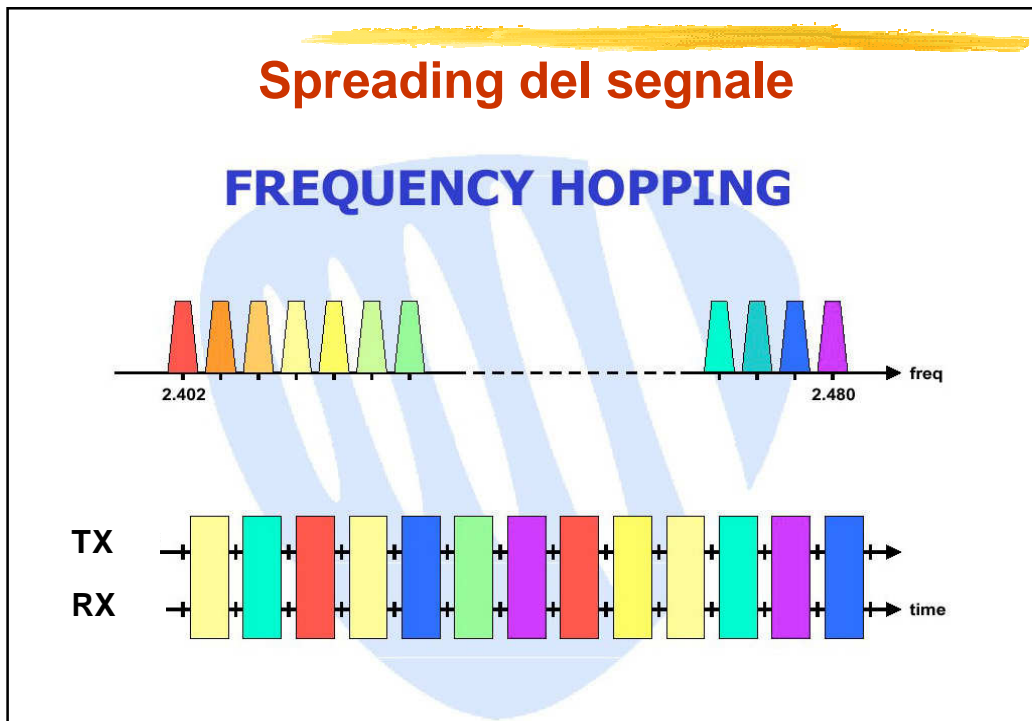
2. Direct Sequence Spread Spectrum

Spreading del segnale

1. Frequency Hopped Spread Spectrum

(FHSS): il segnale originale è trasmesso saltando da una frequenza all'altra, secondo una sequenza pseudo-casuale. TX e RX condividono:

- seme
- generatore di numeri casuali
- fase



Spreading del segnale

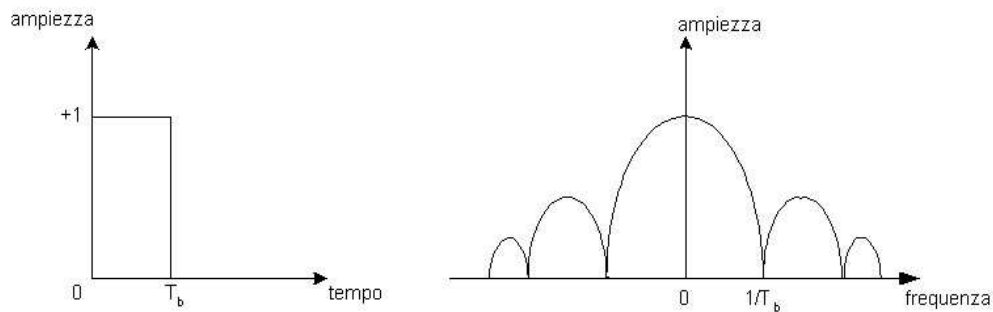
2. Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS): il segnale originale è moltiplicato per una sequenza pseudocasuale di *spread* (*spreading code* o *pseudo-random code (PC)*), che è un segnale a larga banda (*wideband*)

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

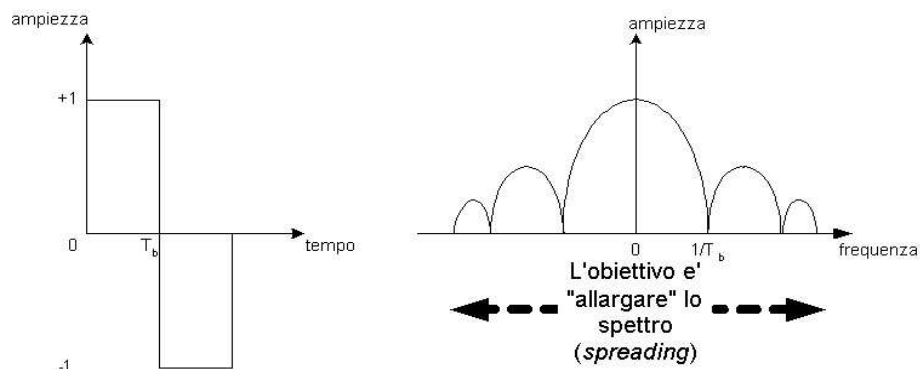
Direct Sequence Spread Spectrum

- Consideriamo un impulso rettangolare $R(t)$ di ampiezza $+1$ e durata T_b (1 bit/simb.)
- La sua trasformata di Fourier è un $\text{sinc}(x)=\sin(x)/x$, dove il primo zero si trova a $f=1/T_b$.



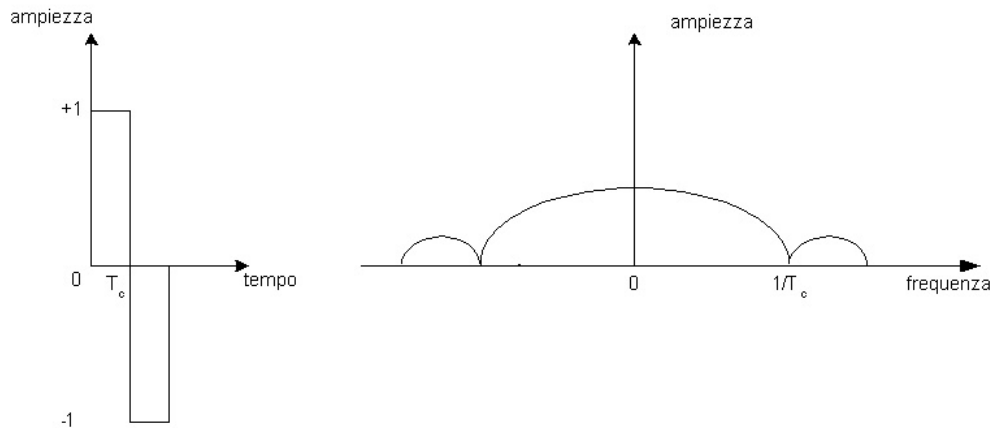
Direct Sequence Spread Spectrum

- Consideriamo ora un treno di impulsi periodici, con ampiezza $+1$ e -1 , e durata T_b .
- La trasformata di Fourier è di nuovo del tipo $\sin(x)/x$
- Obiettivo: "allargare" nel dominio della frequenza



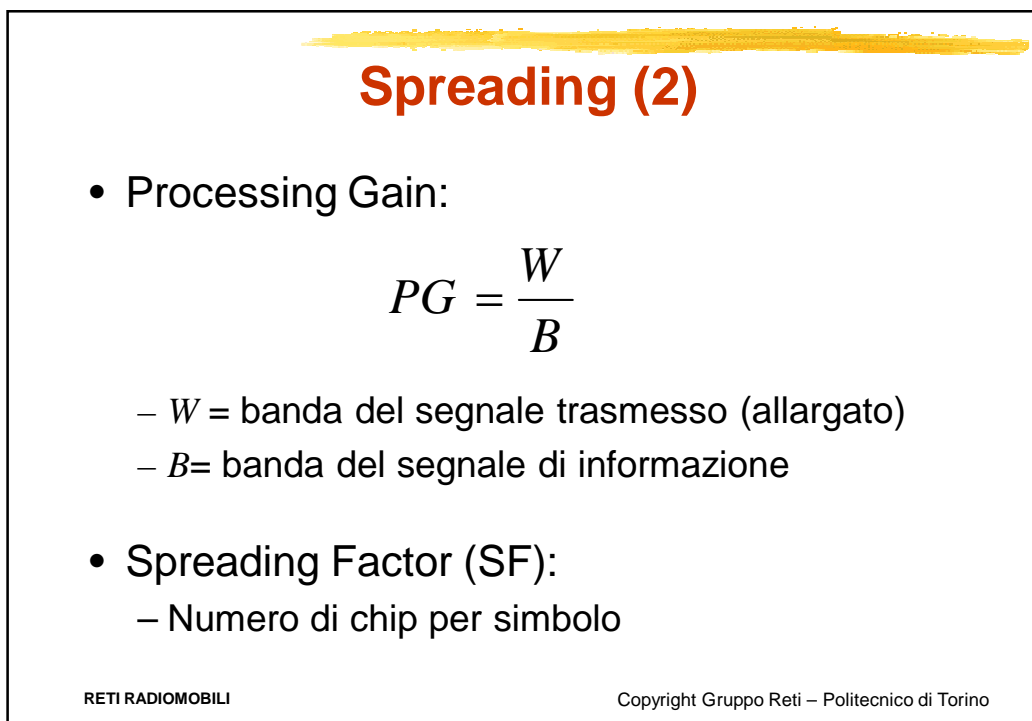
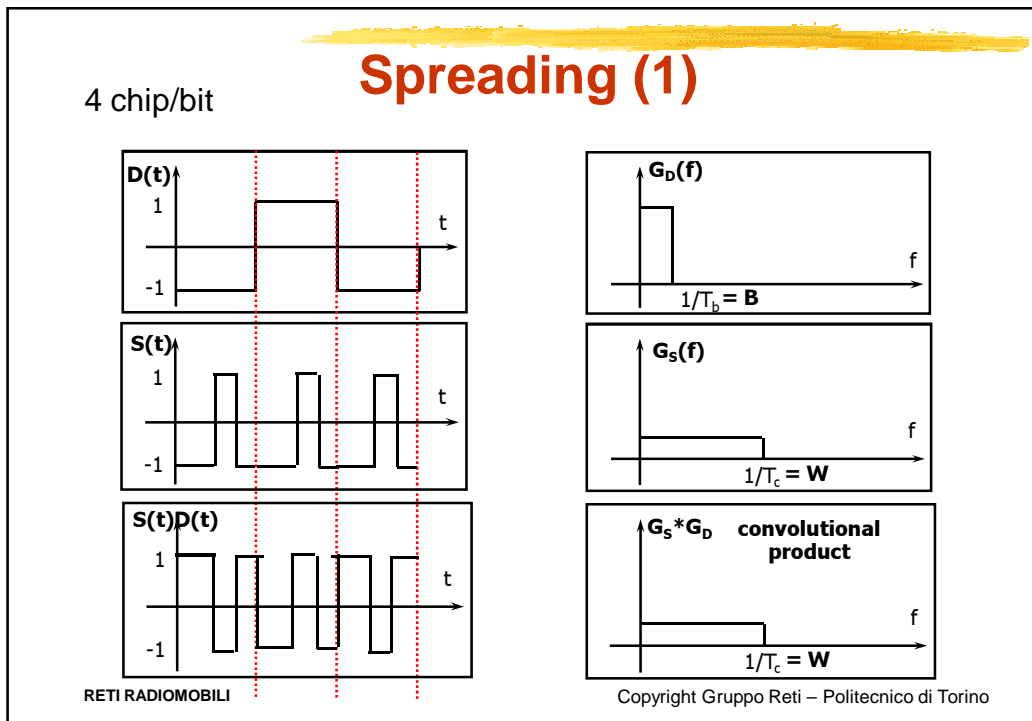
Direct Sequence Spread Spectrum

- “Allargare” nel dominio della frequenza significa “ridurre” T_b



Direct Sequence Spread Spectrum

- Ridurre T_b è equivalente ad aumentare $1/T_b$ (R_b), che è il bit rate
- Il segnale originale $D(t)$ non può essere modificato direttamente, quindi viene moltiplicato per un codice $S(t)$ che ne aumenti il bit rate e ne allarghi la banda
- Ad ogni singolo bit (“+1” o “-1”) si fa corrispondere una sequenza di “+1” e “-1”, ognuno dei quali è detto **chip** (per semplicità: “+” e “-”)
- La trasmissione di un chip ha durata T_c



DSSS: Procedura

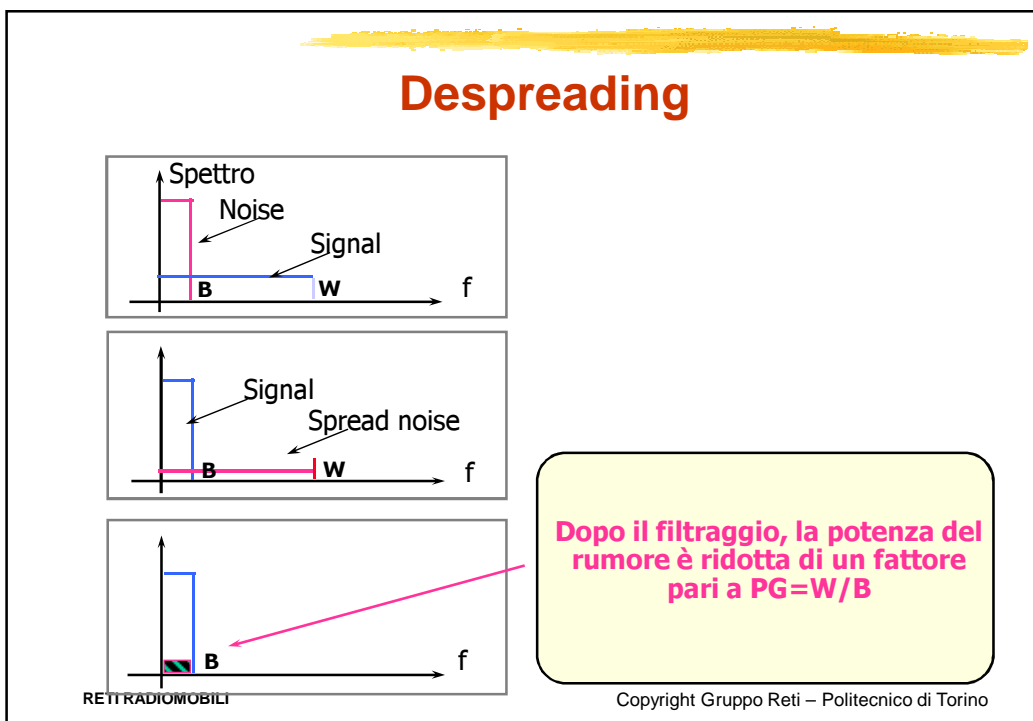
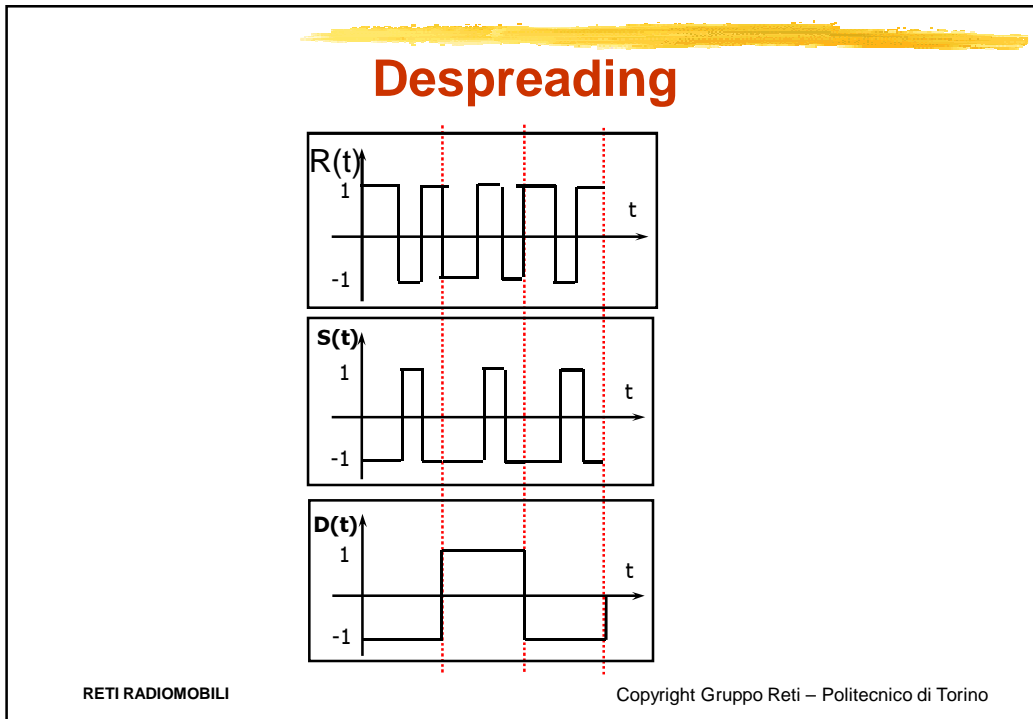
Regola (al TX)

- XOR del bit d'informazione e i bit della sequenza di spreading
 - Per ogni bit d'informazione pari a 1, lo **pseudo-random code (PC)** è lasciato inalterato e mandato al RX
 - Per ogni bit d'informazione pari a -1, i chip del **PC sono invertiti**, e mandati al RX
- Il numero di chip inviati al secondo per bit d'informazione è detto **chip rate**

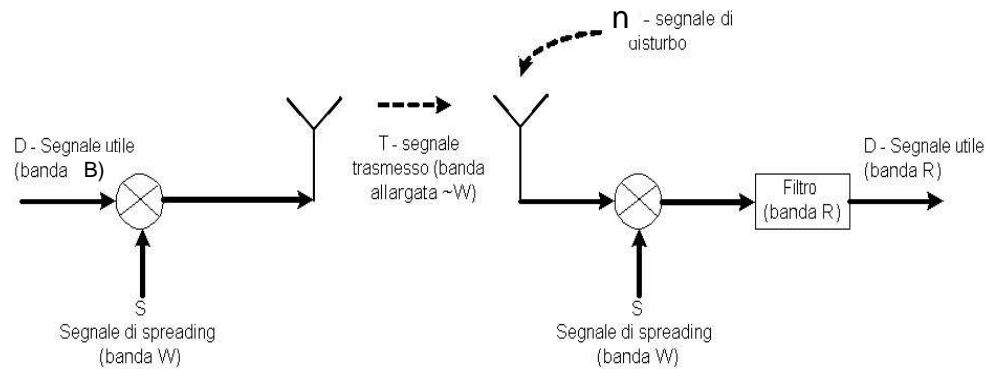
DSSS: Procedura

Regola (al RX)

- La sequenza di spreading deve essere nota al TX e al RX
- **Il RX effettua il despreading eseguendo l'operazione di XOR** tra il segnale ricevuto e il PC



Allargamento della banda (DSSS)



$$R(t) = D(t)S(t) + n(t)$$

$$R(t)S(t) = D(t)S^2(t) + n(t)S(t) = D(t) + n(t)S(t)$$

noise spreading

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Codici e segnali ortogonali

$$PC^1 \perp PC^2: \quad \frac{\sum_{i=1}^{SF} PC_i^{(1)} PC_i^{(1)}}{SF} = 1 \quad \frac{\sum_{i=1}^{SF} PC_i^{(1)} PC_i^{(2)}}{SF} = 0$$

Definendo il prodotto scalare tra due segnali:

$$\langle S_1(t), S_2(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(t) S_2(t) dt$$

Due segnali ortogonali (supponiamo segnali a energia unitaria) sono t.c.:

$$\langle S_1(t), S_1(t) \rangle = 1 \quad \langle S_1(t), S_2(t) \rangle = 0$$

RETI RADIOMOBILI

Copyright Gruppo Reti – Politecnico di Torino

Spreading e despreading

Spreading

$$Tx_1(t) = \langle D_1(t), S_1(t) \rangle ; Tx_2(t) = \langle D_2(t), S_2(t) \rangle$$

Segnale ricevuto

$$R_1(t) = \langle D_1(t), S_1(t) \rangle + n(t) + \langle D_2(t), S_2(t) \rangle$$

Despreading

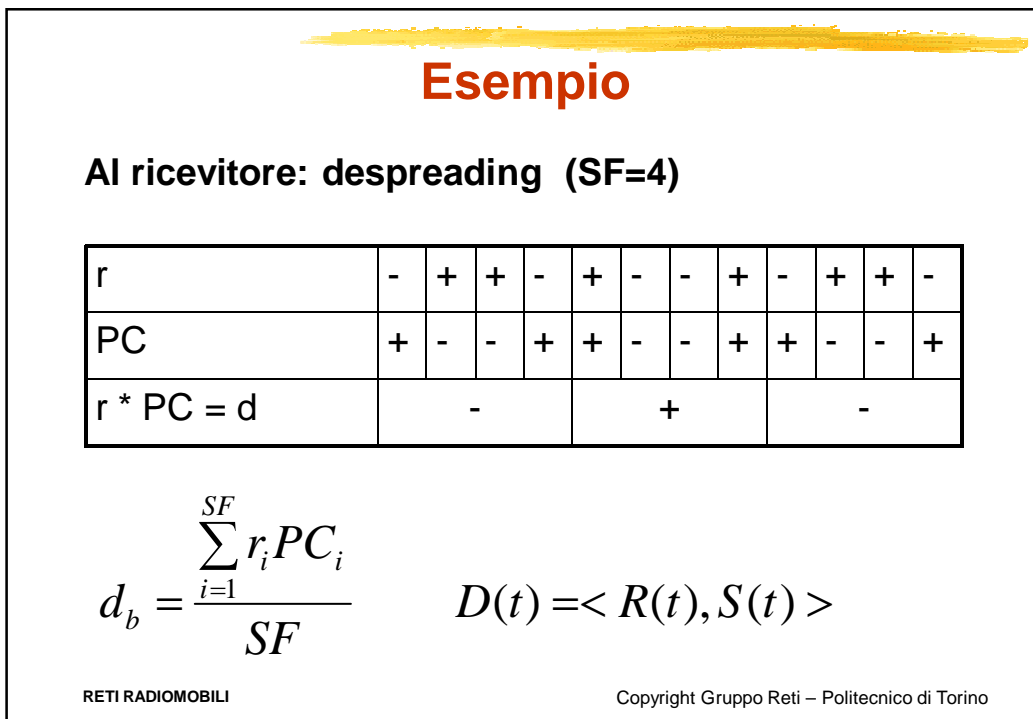
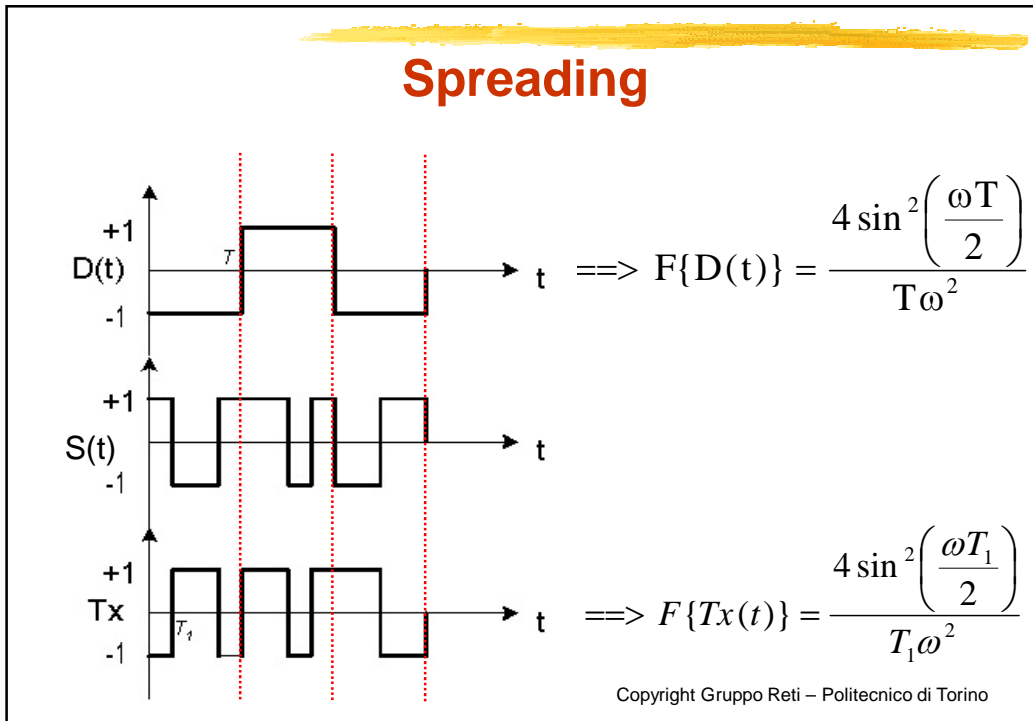
$$\langle R_1(t) S_1(t) \rangle = \langle D_1(t), S_1(t), S_1(t) \rangle + \langle n(t), S_1(t) \rangle +$$

$$\langle D_2(t), S_2(t), S_1(t) \rangle = D_1(t) + \langle n(t), S_1(t) \rangle$$

Esempio

Al trasmettitore: spreading (SF=4)

d	-				+				-			
PC	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+
tx = d * PC	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-



Robustezza all'interferenza: multipath

- In sistemi a banda larga siamo in grado di distinguere tra le diverse copie create dal multipath
 - Si può fare solo in sistemi a larga banda: per distinguere gli echi occorre che T_s sia sufficientemente piccolo
- Si può usare un **rake receiver** (*receiver temporal diversity*): possiede diverse “fingers”, ognuna delle quali riesce a ricevere una delle tante copie del segnale originale che arrivano al ricevitore

Robustezza all'interferenza: multipath

- Grazie all'uso del rake receiver, le tecniche SS sono in grado di combattere il multipath
- Lo SF varia in base:
 - Al tipo di informazione da trasmettere (e quindi del bit rate del servizio)
 - Se si ha flessibilità nella scelta del bit rate, al grado di protezione al multipath che si vuole ottenere

Banda larga: vantaggi

- **Maggiore robustezza all'interferenza**
 - Auto-interferenza (**multipath**)
 - Interferenza causata intenzionalmente (jamming)
 - Interferenza dovuta all'accesso multiplo
- **Potenza di trasmissione più bassa**
 - Grazie al controllo di potenza
 - Meno pericolosa e meno interferenza verso altre tecnologie
- **Facile da implementare** (non richiede un'accurata pianificazione delle frequenze)