

# **Lezione sulle Comunicazioni Wireless**

**Andrea Tonello**

**tonello@uniud.it**  
**www.diegm.uniud.it/tlc/tonello**

**5 Giugno 2003**  
**Aula B, ore 13.00 - 17.00**



*UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE*

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA  
ELETTRICA, GESTIONALE E MECCANICA**

# Introduzione

---

- Sistemi Wireless
- Sistemi cellulari e WLAN
- Strato Fisico, ricerca e sviluppo
- Modello Canale Radio Mobile
- Prestazioni in Canali con Fading
- Nuove tecnologie: Antenne Multiple - Modulazione Multiportante

# Sistemi Wireless

---

**Sistemi Radio  
Terrestri**

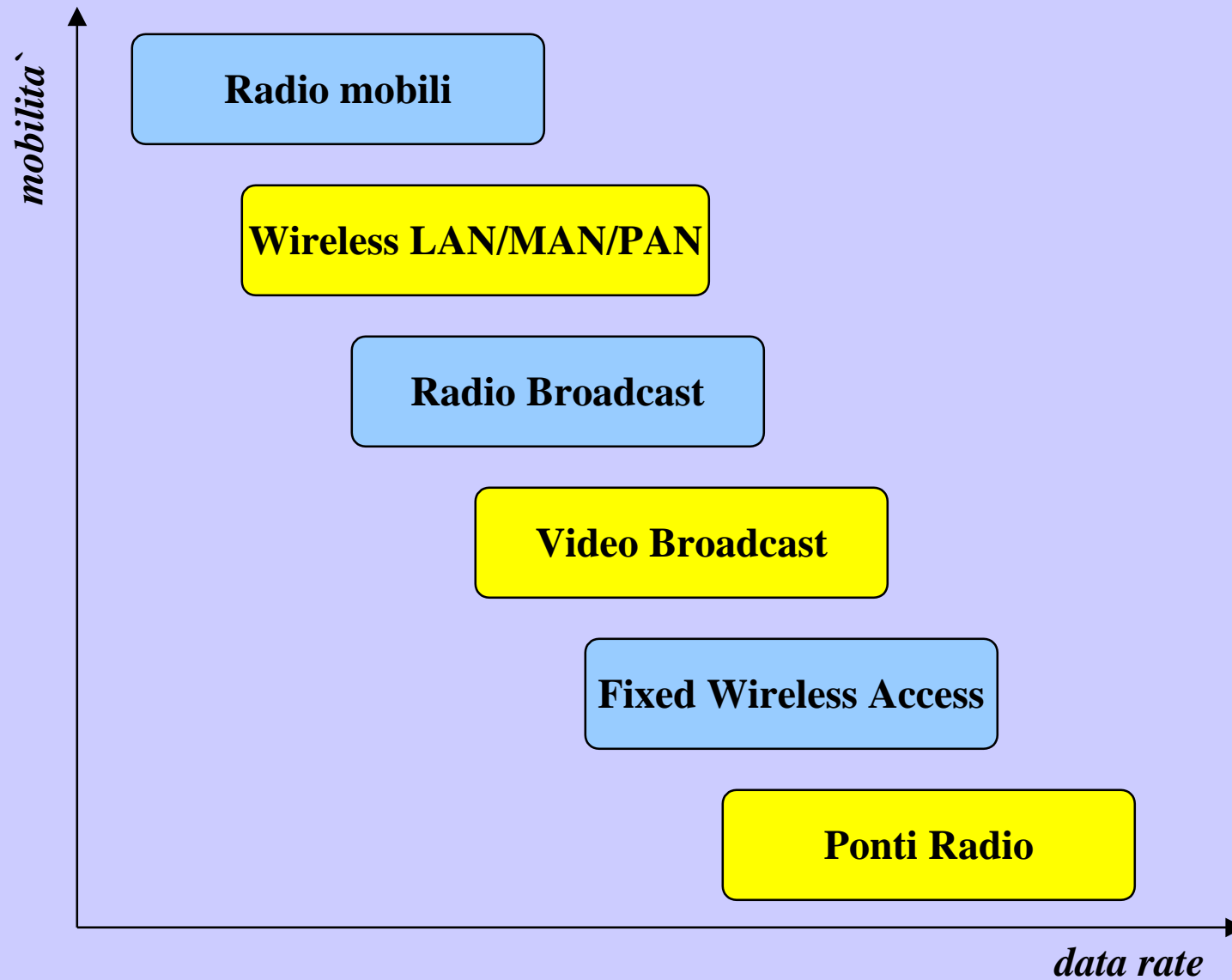
**Sistemi Radio  
Satellitari**

**Sistemi Ottici**

*free space optical. Comm.*

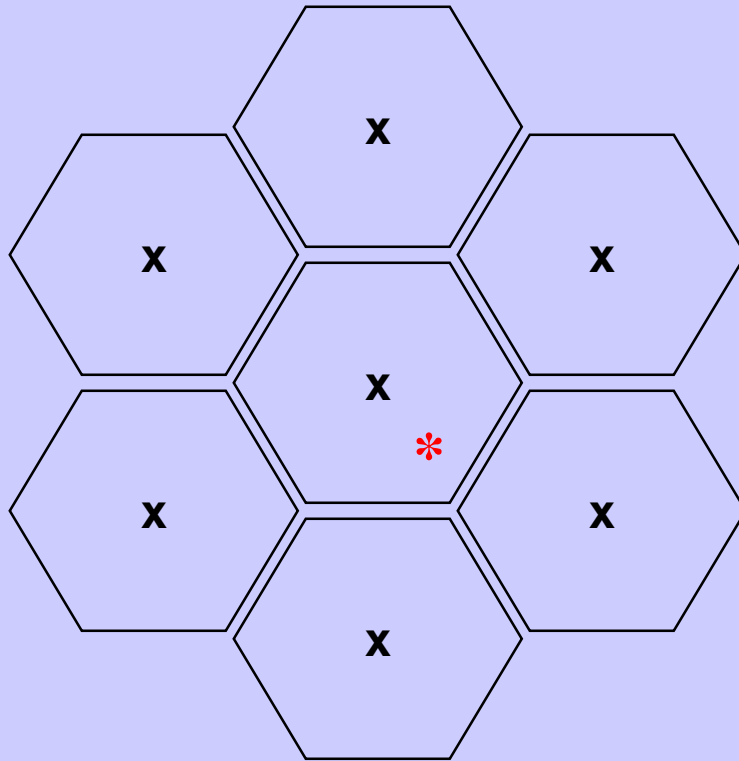
- **trasmissione senza fili**
- **copertura**
- **semplicita` ed economia di installazione**
- **mobilita`**

# Sistemi Wireless Terrestri



# Sistemi Cellulari : Copertura e Mobilita`

---

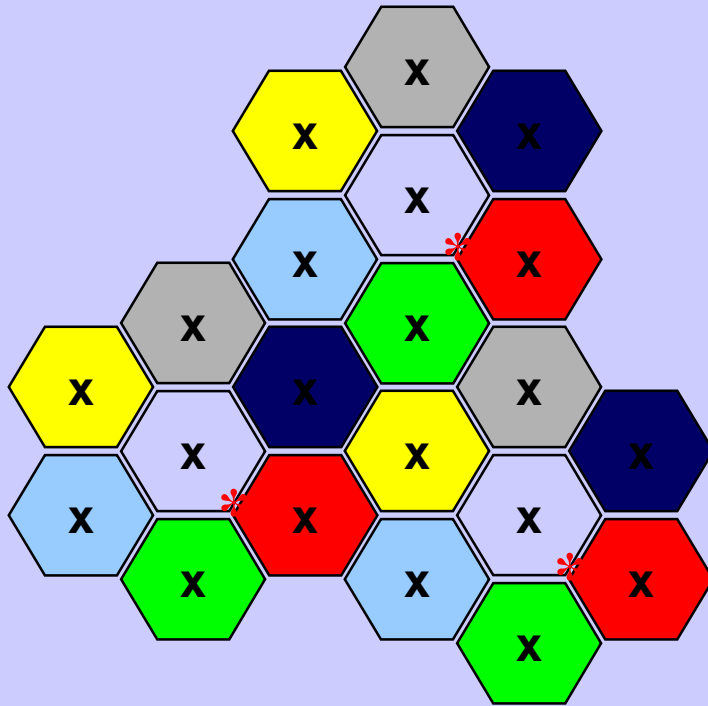


x : SRB, stazione radio base  
\* : SRM, stazione radio mobile

- Multi utente
- Alta copertura
- Alta mobilita`
- Riutilizzo frequenze
- *Handoff* tra due SRB
- *Roaming* tra due operatori

# Riuso Frequenze

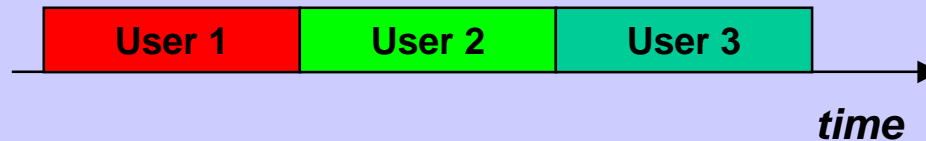
---



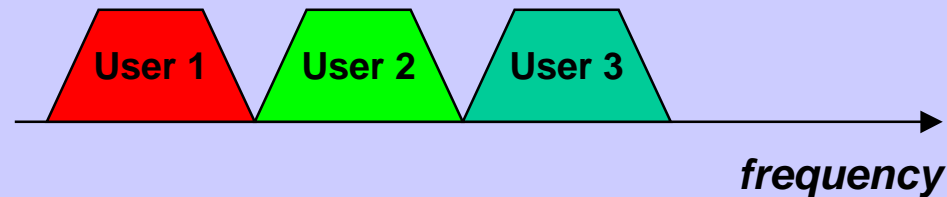
Consente di ri-utilizzare le frequenze e massimizzare lo sfruttamento dello spettro disponibile

# Condivisione dello Spettro: Accesso Multiplo

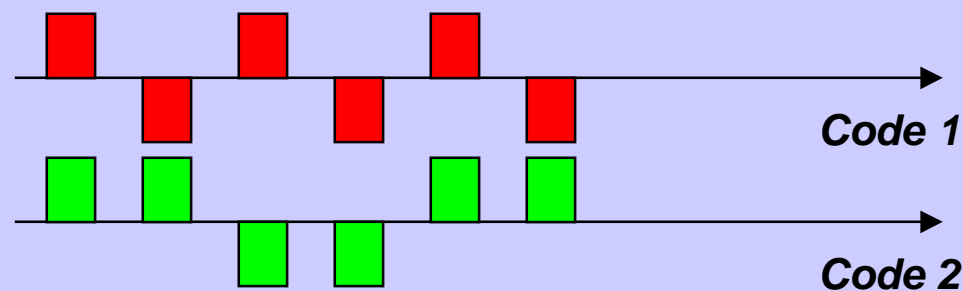
**TDMA : Time Division Multiple Access**



**FDMA : Frequency Division Multiple Access**

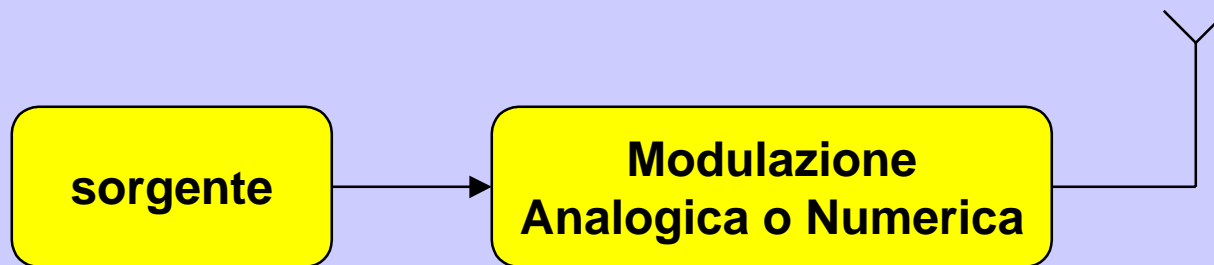


**CDMA : Code Division Multiple Access**



# Modulazione

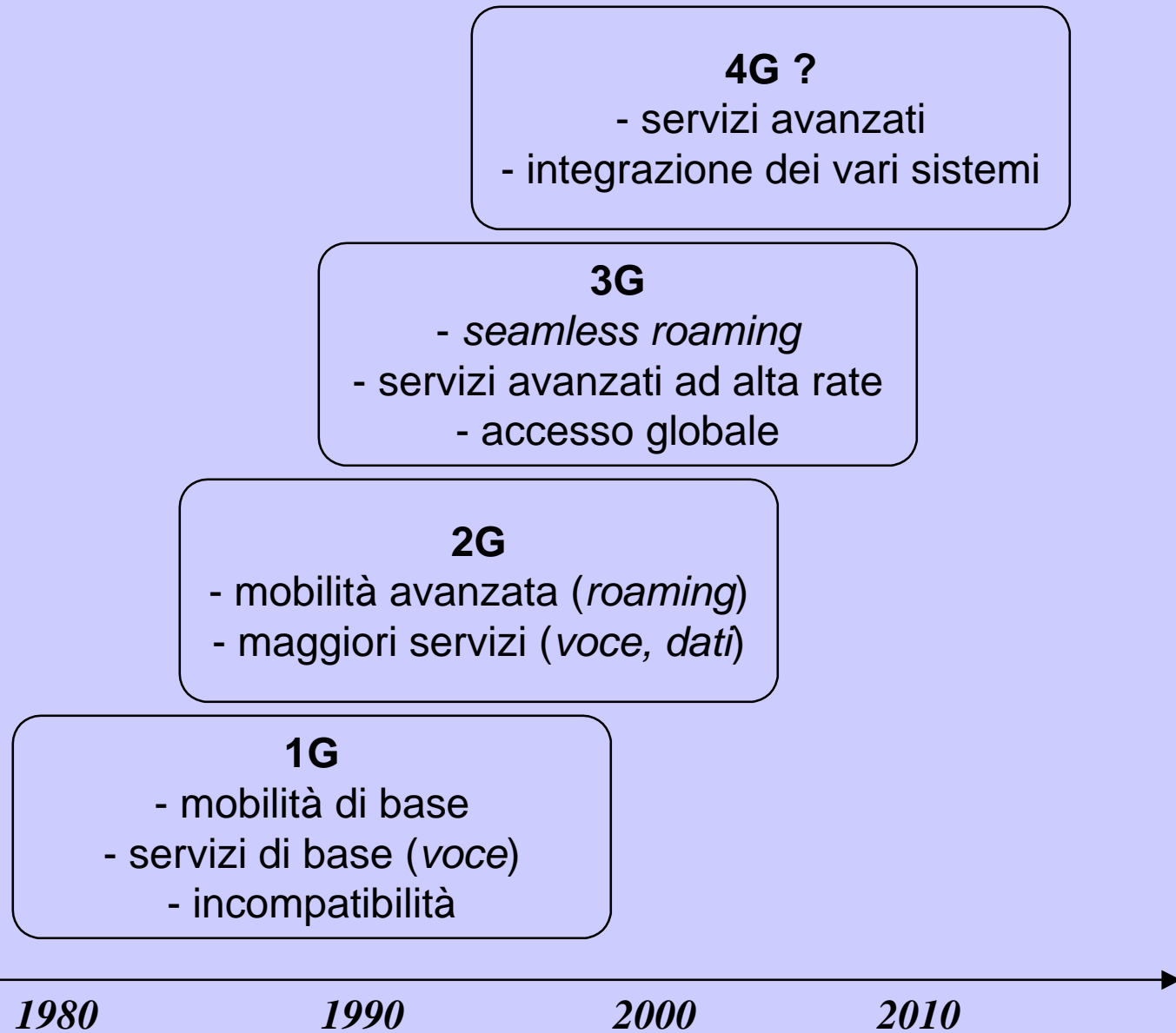
---





# Evoluzione Sistemi Cellulari

---



# Evoluzione Sistemi Cellulari

---

## **1G : Analogici (FM, FDMA, 450 - 800 MHz)**

- RTMS, TACS, ETACS (Europa)
- AMPS (Nord America)
- JTACS, NTACS (Giappone)

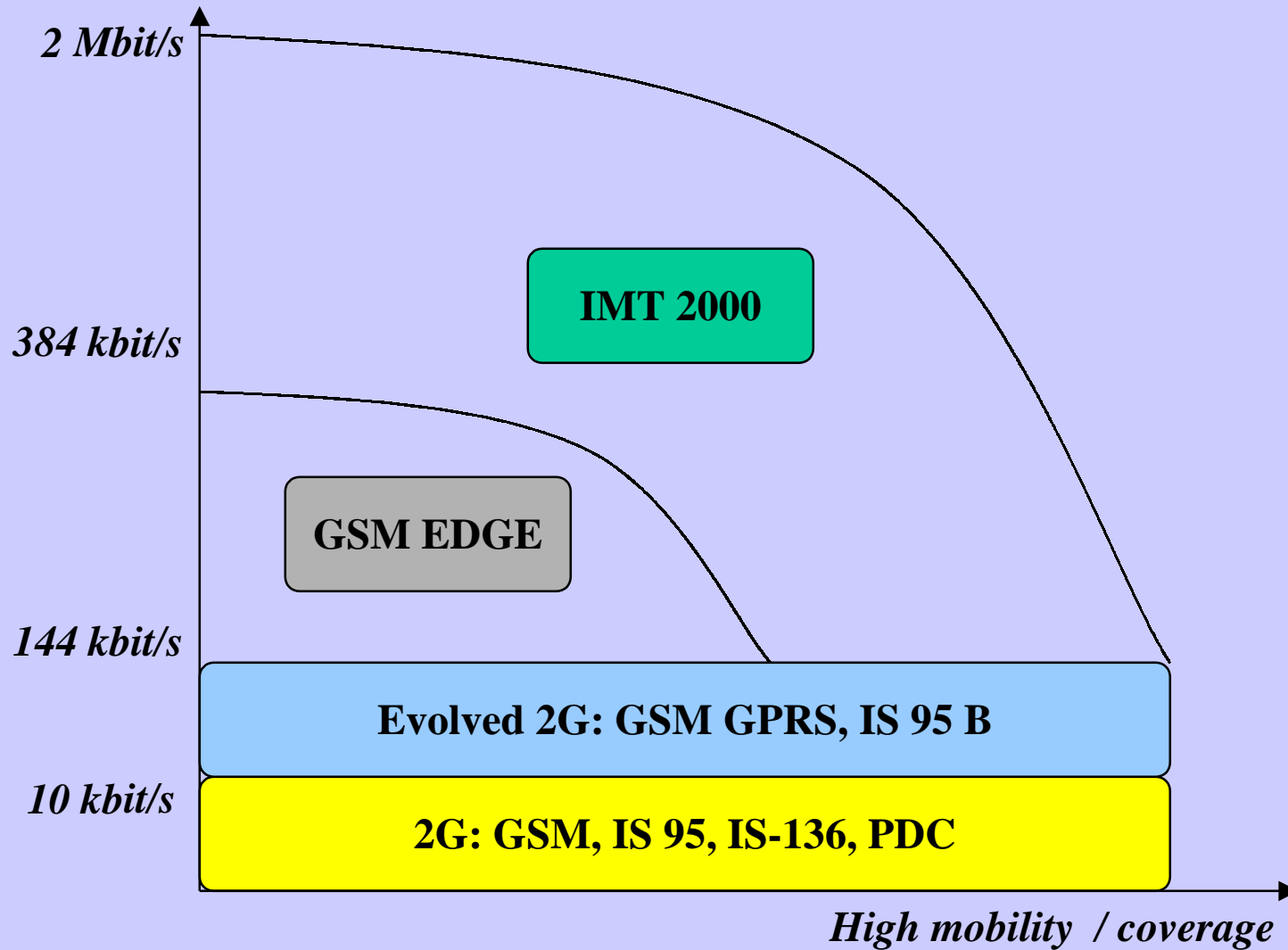
## **2G : Digitali (TDMA - FDMA - CDMA, 800-900 MHz, 1800-1900 MHz)**

- GSM (Europa)
- IS 54/136, IS 95 (Nord America)
- PDC (Giappone)

## **3G : Digitali (CDMA, 1900-2200 MHz)**

- UMTS (Europa)
- CDMA 2000 (Nord America)    ⇔ ITU - IMT 2000
- WCDMA (Giappone)

# Data Rate



# WLAN e WPAN

---

## WLAN: Wireless Local Area Networks

**WLAN 1G : fino a 2 Mb/s, banda 2.4 GHz**

- ETSI Hiperlan
- IEEE 802.11b

**WLAN 2G : fino a 54 Mb/s, banda 5 GHz**

- ETSI Hiperlan II
- IEEE 802.11a

## WPAN: Wireless Personal Area Networks

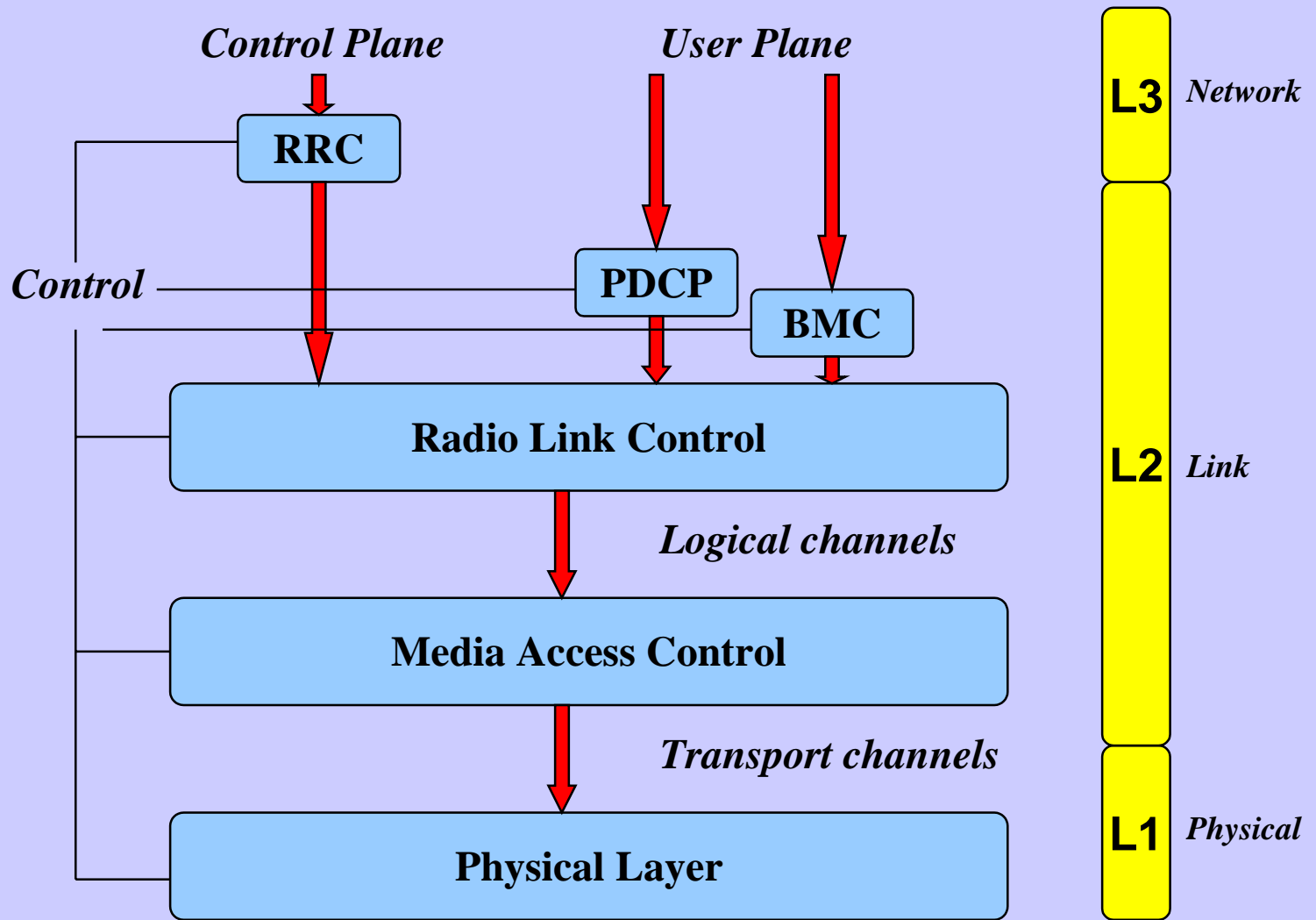
**WPAN 1G: fino a 1 Mb/s**

- IEEE 802.15 Bluetooth

**WPAN 2G: > 10 Mb/s**

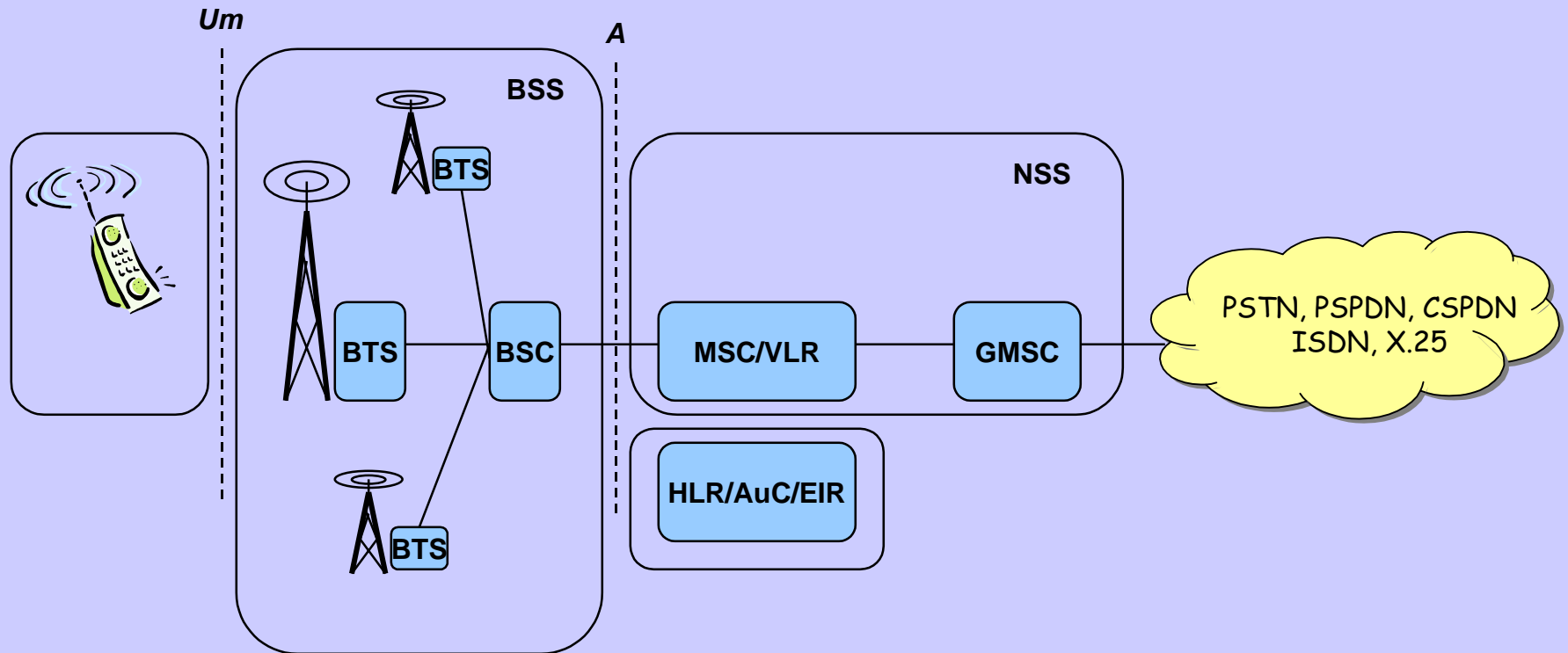
- IEEE 802.15 UWB

# Modello OSI: Protocolli



- RRC: radio resource control
- PDCP: packet data convergence protocol
- BMC: broadcast/multicast control

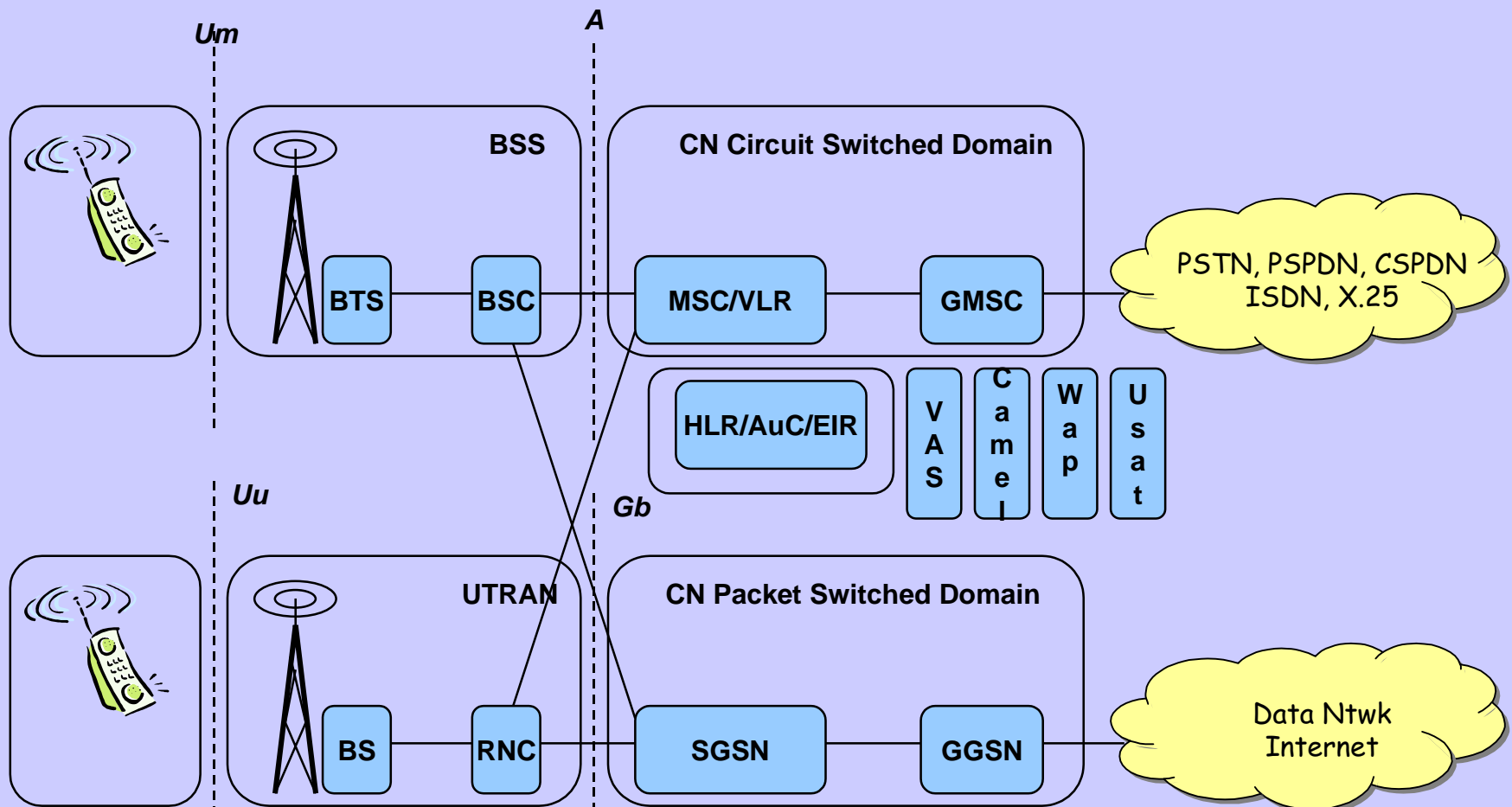
# Rete GSM



- *Um*: radio interface
- *BSS*: base station system
- *BTS*: base transceiver station
- *BSC*: base station controller

- *NSS*: network subsystem
- *MSC*: mobile switching center
- *VLR*: visitor location register
- *GMSC*: gateway MSC
- *HLR*: home location register
- *Auc*: authentication register
- *EIR*: equipment identification register

# Rete UMTS R99



- *VAS*: value added service platform
- *Camel*: customized application for MN enhanced logic
- *Wap*: wireless application protocol
- *Usat*: UMTS SIM application kit

- *RNC*: radio network controller
- *GPRS*: general packet radio service
- *SGSN*: serving GPRS support node
- *GGSN*: gateway GPRS support node

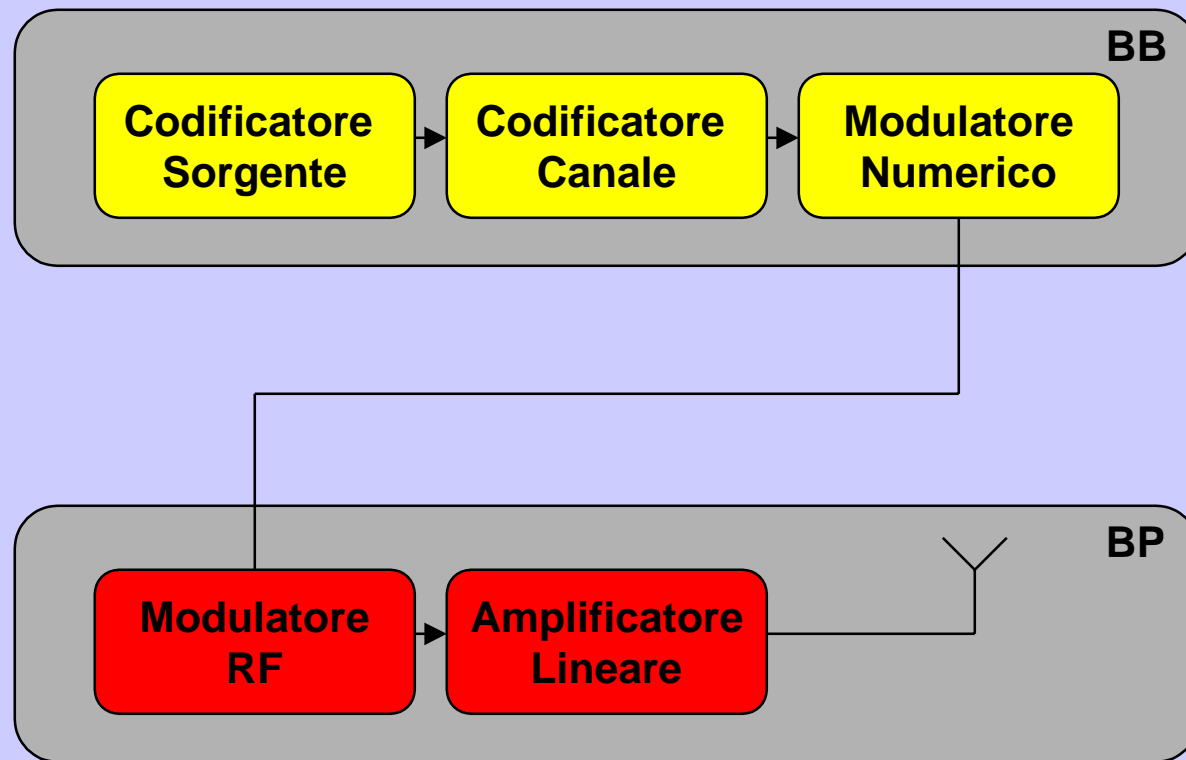
---

# Trasmissione

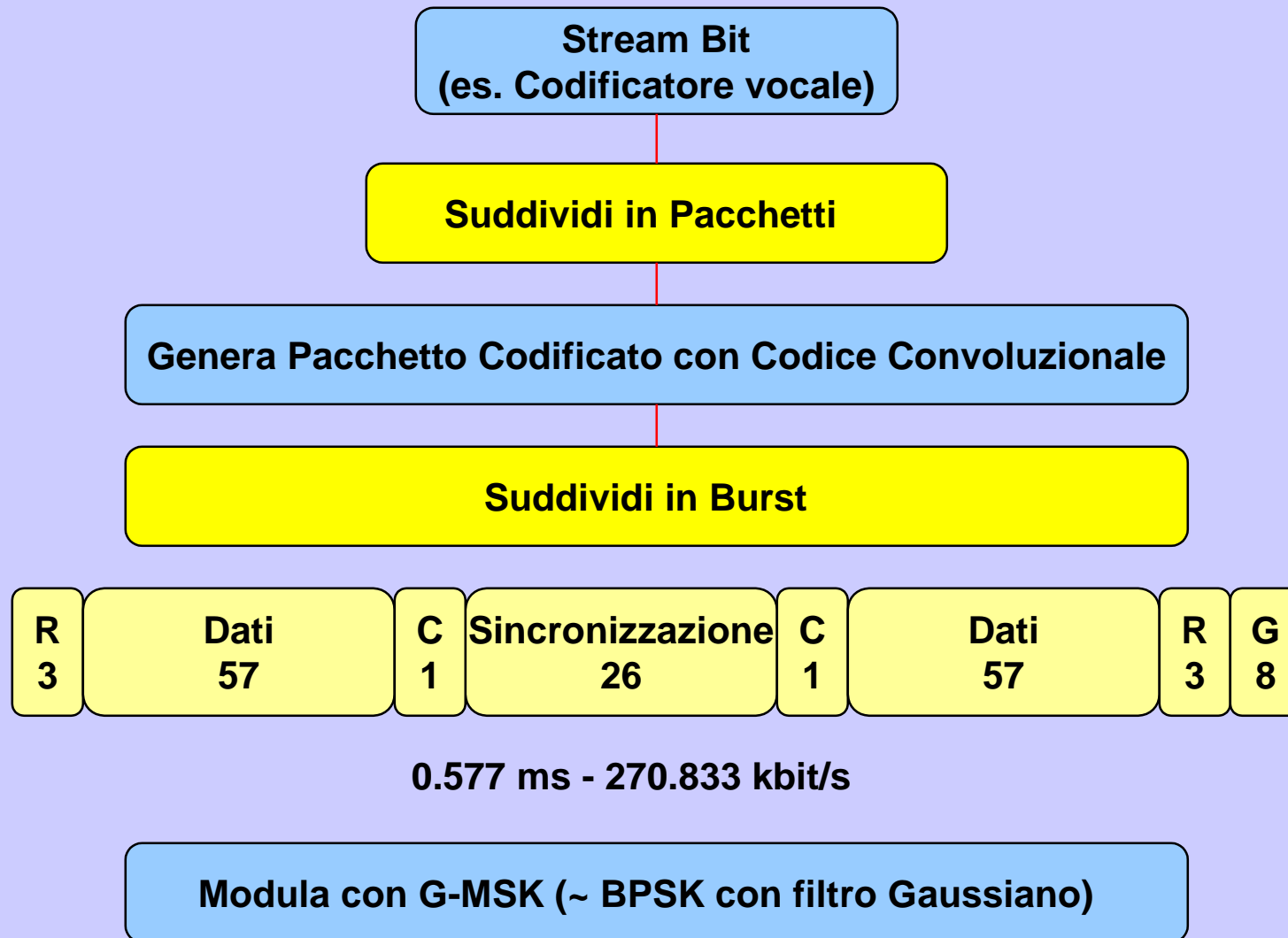


# Schema di Principio Trasmissione

---

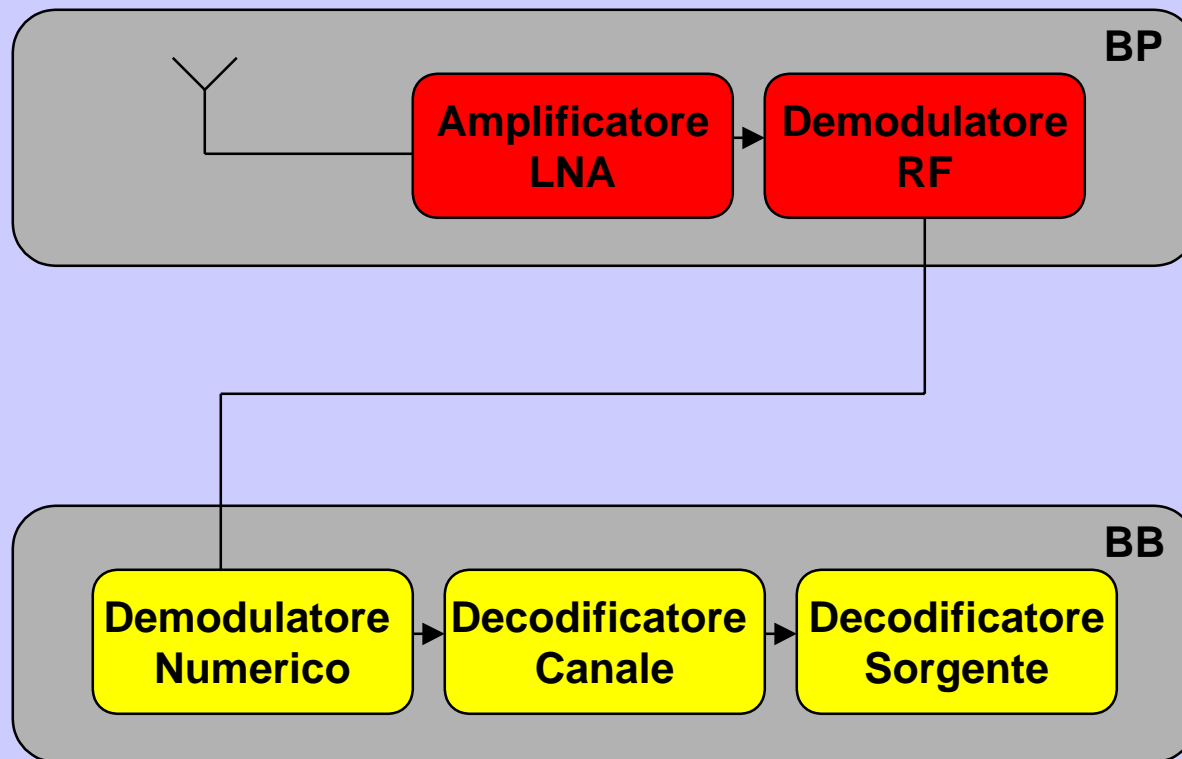


# Principi di Trasmissione nel GSM



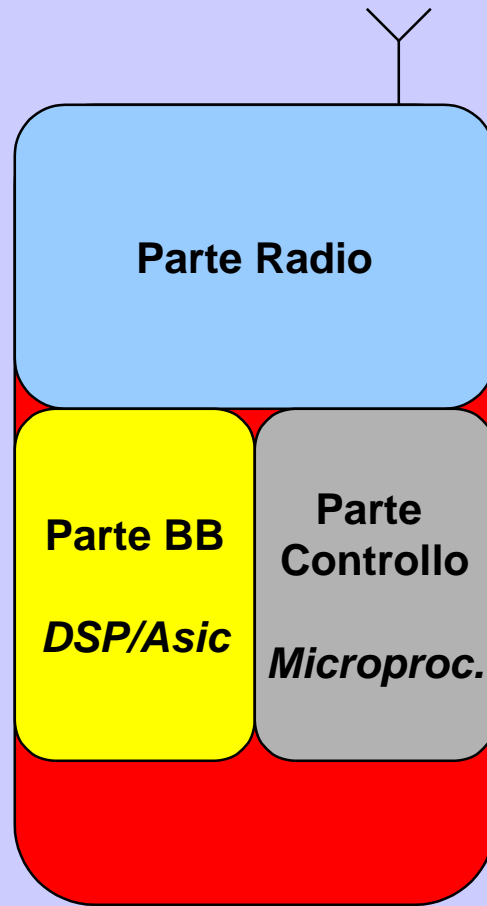
# Schema di Principio Ricezione

---



# Blocchi Fondamentali Cellulare

---



# Aspetti Critici Parte Banda Passante

---

## Progetto Amplificatori:

- Potenza
- Linearita`
- Bassa figura di Rumore
- Consumo
- Dimensioni e Costo

## Progetto Modulatore RF:

- Filtri Analogici
- Oscillatori di Precisione
- DAC e ADC

## Progetto Antenne:

- Impatto ambientale
- Dimensione (critica se si adottano schiere di antenne)

# Aspetti Critici Parte Banda Base

---

## **Progetto Codifica di Canale e Modulazione:**

- Efficienza Spettrale in Canali Wireless:
  - robustezza al rumore  $\Rightarrow$  maggiore copertura
  - robustezza all'interferenza  $\Rightarrow$  maggiore capacità
- Complessità computazionale

## **Progetto Codifica di Sorgente:**

- Compressione (basso rate ed alta qualità)
- Complessità computazionale

# Algoritmi Trasmissione

---

- **Stima di Canale**
- **Equalizzazione**
- **Tecniche di cancellazione dell'interferenza**
- **Progetto di Codici**
- **Sistemi ad antenne multiple**

---

# Canale Radiomobile



# Canale Radio

---

- **Il canale dipende dall'applicazione e frequenza di lavoro:**
  - LOS, line of sight (ponti radio).
  - Satellitare
  - Radiomobile terrestre
- **I segnali radio (30 Mhz - 30 GHz;  $\lambda = 10$  m - 1 cm) si propagano per:**
  - onda diretta, scattering troposferico, non riflesse dalla ionosfera
  - riflessione ( $\lambda <$  Dim. ostacolo)
  - diffrazione
  - scattering ( $\lambda \sim$  Dim. ostacolo)

# Canale Radio Sistemi Cellulari

---

- **Fenomeni associati alla propagazione:**
  - **attenuazione (path-loss)**
  - **fading lento (shadow fading)**
    - variazioni lente della potenza media ricevuta, dovute a spostamenti dell'antenna ricevente dell'ordine di 10-100 m.
    - causato da ostruzioni quali alberi, fogliame.
  - **fading rapido (fast fading)**
    - variazioni rapide della potenza ricevuta, dovute a spostamenti dell'antenna ricevente dell'ordine di  $\lambda$ .
    - causato dai cammini multipli.

# Path Loss e Shadow Fading

---

- Propagazione spazio libero

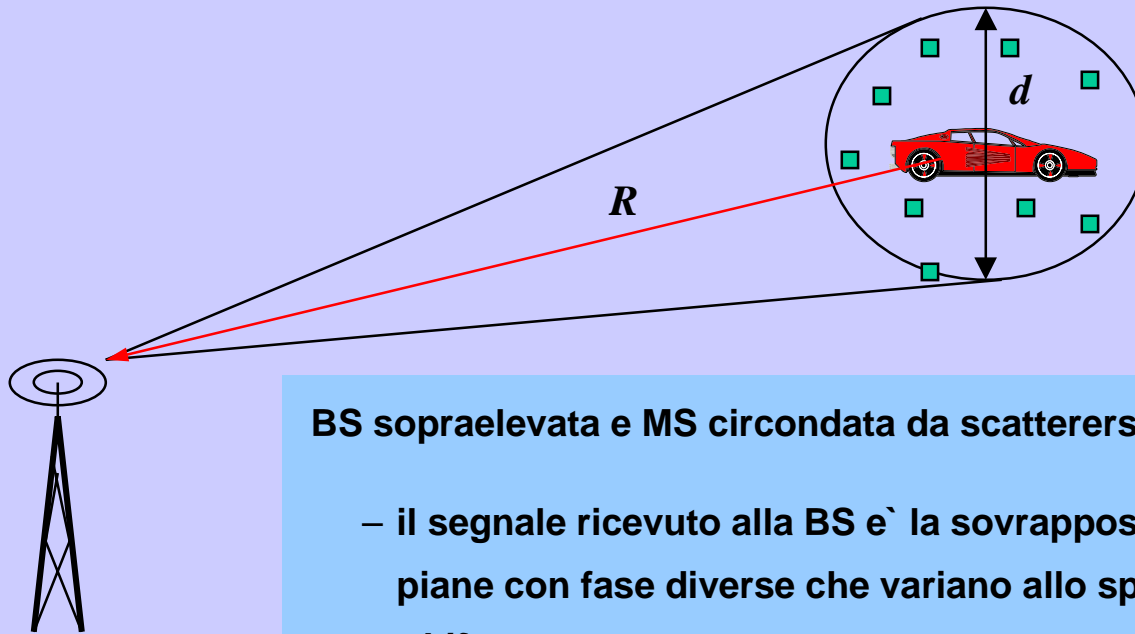
$$P_r(d) = \alpha P_t \left( \frac{\lambda_c}{4\pi d} \right)^2 \quad \lambda_c = c / f_c$$

- Propagazione ambiente radiomobile dipende da:
  - ambiente circostante, altezza antenne BS, MS.

$$10 \log_{10} \frac{P_r(d)}{1 \text{ mW}} = \underbrace{\mu(d_0)}_{\text{media}} - 10 \underbrace{\beta}_{\text{path loss exponent (2-8)}} \log_{10}(d / d_0) + \underbrace{\varepsilon}_{\text{v.a. Gaussiana, } m=0} \quad [\text{dBm}]$$

# Multi-path Fading

## Scattering Cluster Principale



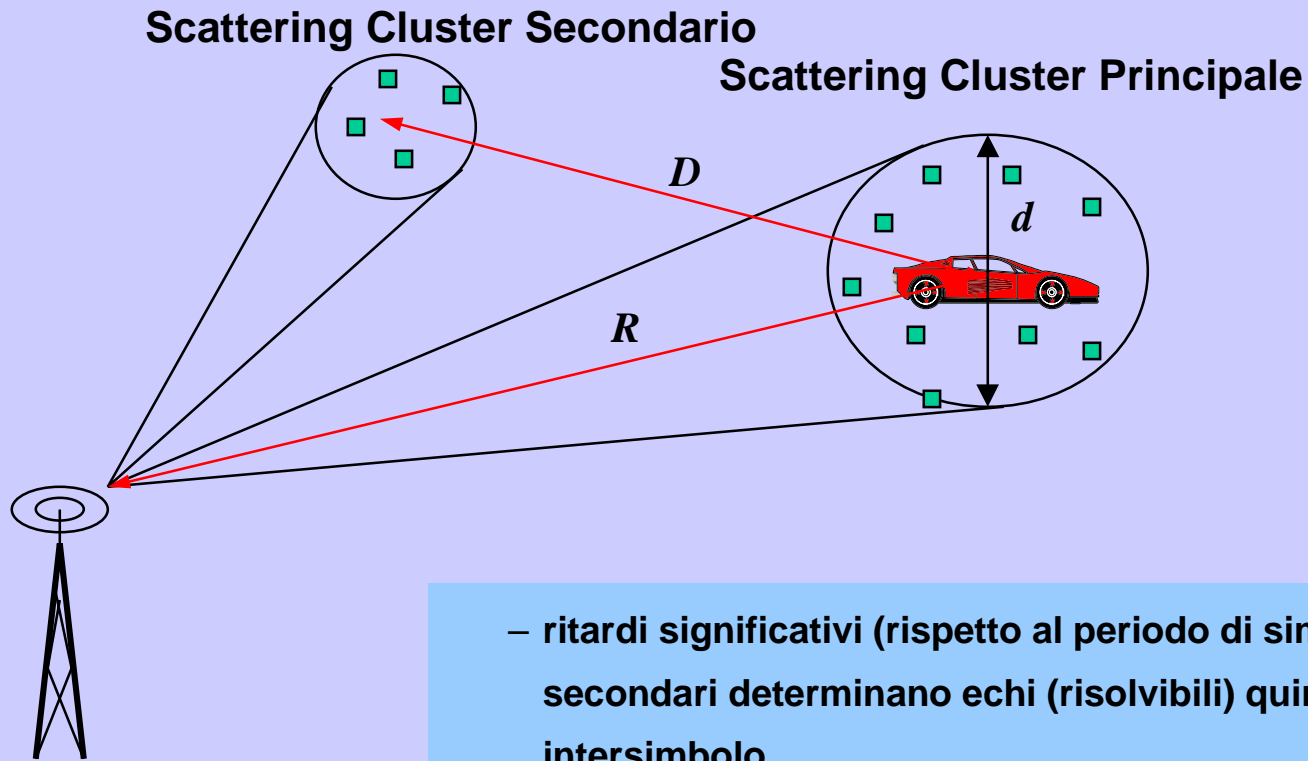
**BS sopraelevata e MS circondata da scatterers:**

- il segnale ricevuto alla BS è la sovrapposizione di innumerevoli onde piane con fase diverse che variano allo spostarsi del mobile per *Doppler shift*
- poiché  $\lambda=30$  cm (900 MHz) piccoli spostamenti determinano ampi cambiamenti di fase



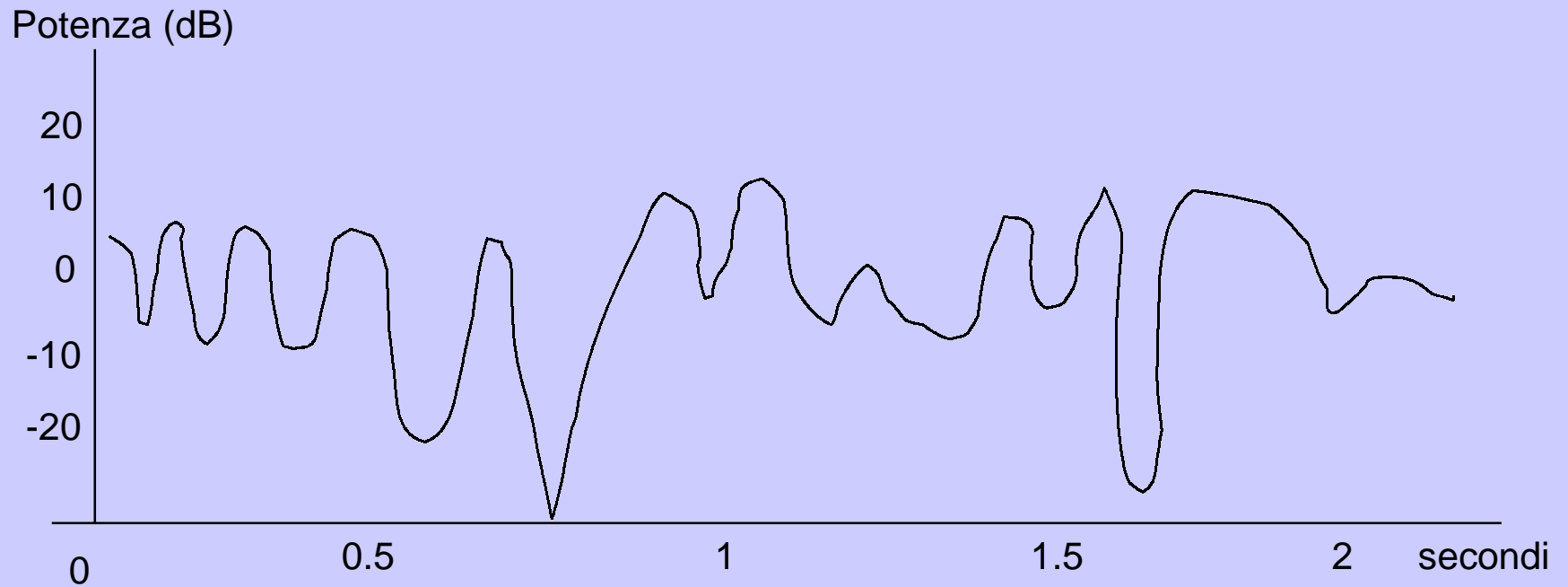
**l'involuppo del segnale ricevuto varia rapidamente con forti attenuazioni.**

# Multi-path Fading



- ritardi significativi (rispetto al periodo di simbolo) dovuti a clusters secondari determinano echi (risolvibili) quindi interferenza di intersimbolo.

# Tipico Andamento Segnale Soggetto a Fading



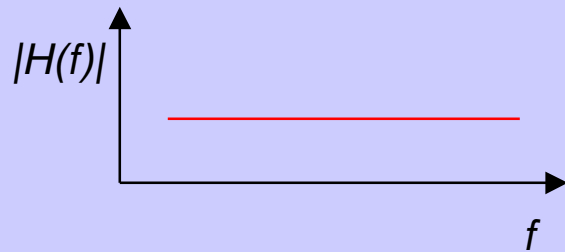
# Canale Radio Sistemi Cellulari

## Flat Fading

Risposta in frequenza piatta  
Non introduce ISI

$$h(t; \tau) = \alpha(t) \delta(\tau)$$

$$H(t; f) = \alpha(t)$$

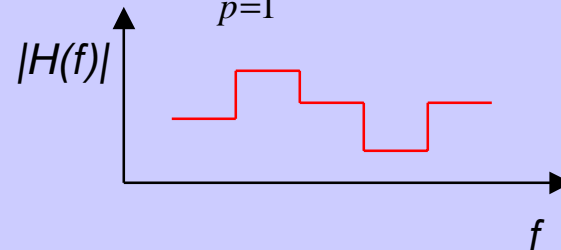


## Frequency Selective Fading

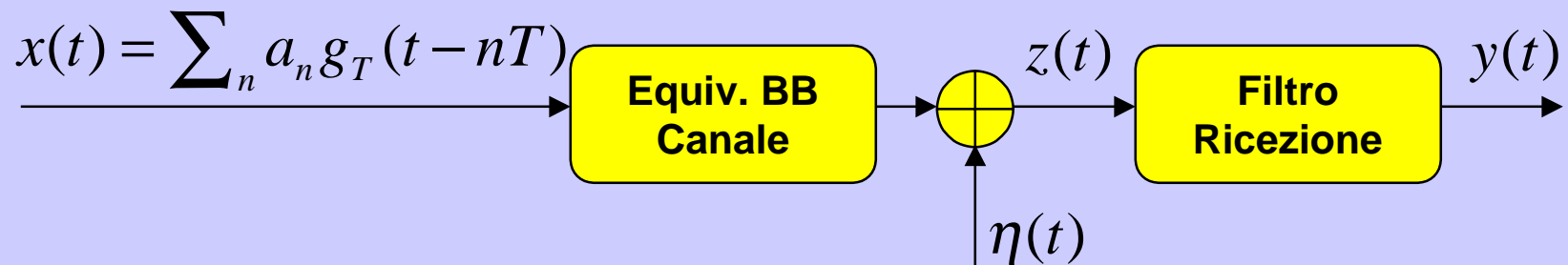
Risposta in frequenza non costante  
Introduce ISI

$$h(t; \tau) = \sum_{p=1}^{N_p} \alpha_p(t) \delta(\tau - \tau_p)$$

$$H(t; f) = \sum_{p=1}^{N_p} \alpha_p(t) e^{-j2\pi f \tau_p}$$



# Equivalente in Banda Base



$$z(t) = \int x(t - \tau) h(t; \tau) d\tau + \eta(t)$$

**Flat Fading**

$$z(t) = \alpha(t)x(t) + \eta(t)$$

**Frequency Selective Fading**

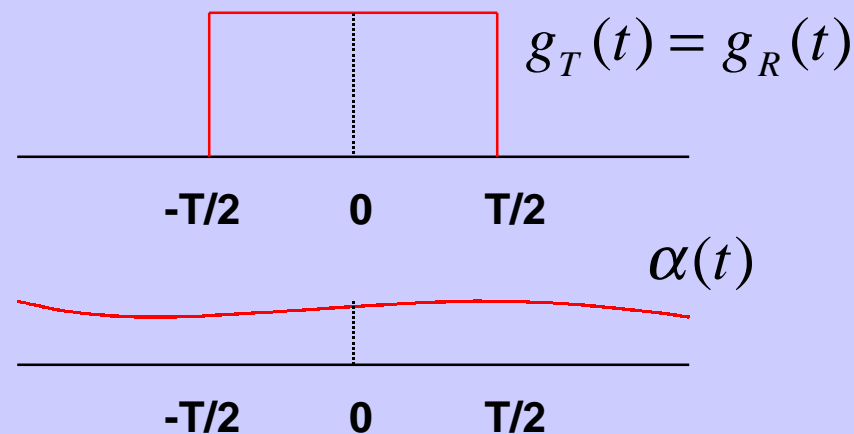
$$z(t) = \sum_{p=1}^{N_p} \alpha_p(t)x(t - \tau_p) + \eta(t)$$

$$\tau_p - \tau_{p-1} \sim T$$



# Flat Fading Lento Rispetto a T

$$y(kT) = \sum_n a_n \int_R \alpha(t) g_T(t - nT) g_R(kT - t) dt + \int_R \eta(t) g_R(kT - t) dt$$

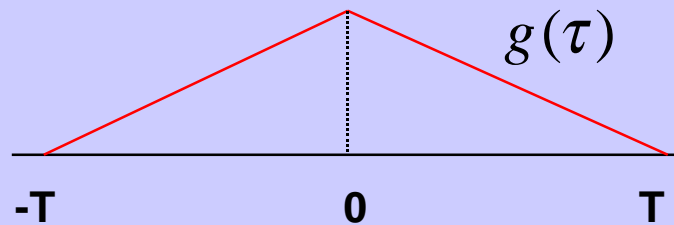


$$y(kT) = \sum_n a_n \alpha(nT) \int_{-T/2}^{T/2} g_T(t) g_R(kT - nT - t) dt + w(kT)$$

# Flat Slow Fading

---

$$g(\tau) = \int g_T(t) g_R(\tau - t) dt$$

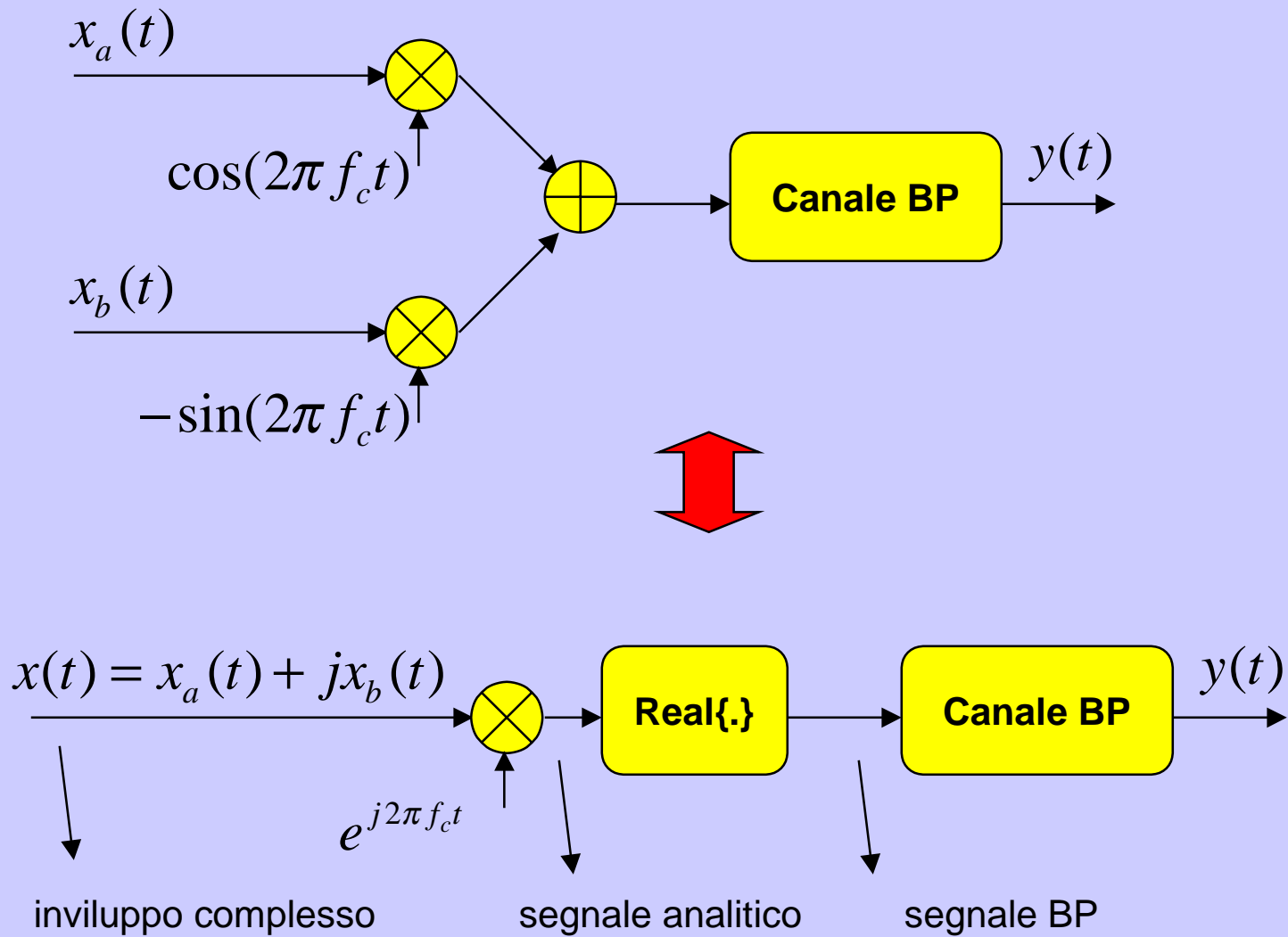


$$y(kT) = \sum_n a_n \alpha(nT) g(kT - nT) + w(kT)$$

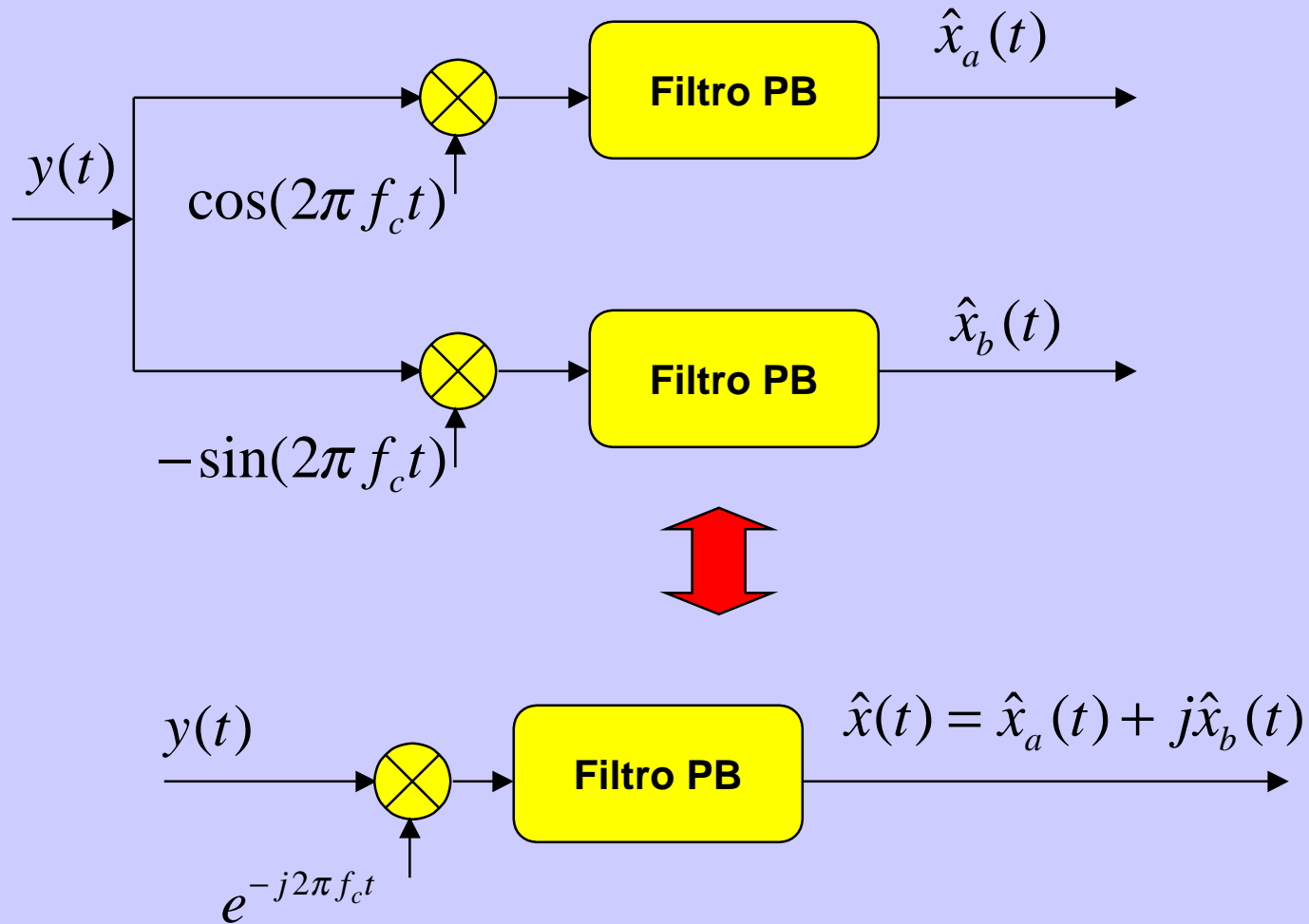
$$y(kT) = a_k \alpha(kT) g(0) + w(kT)$$

$$y(kT) = a_k V_0 \alpha(kT) + w(kT)$$

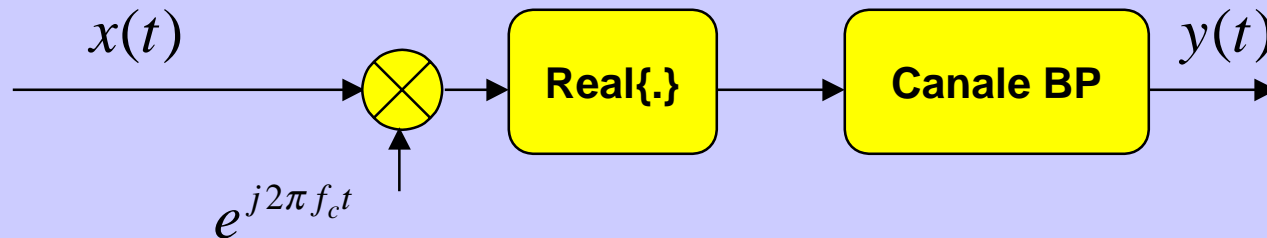
# Modulatore in Quadratura



# De-Modulatore in Quadratura



# Flat Fading



- Supponiamo che il canale comprenda  $N$  cammini con
  - ampiezza  $C_n$
  - ritardo  $\tau_n$
  - Doppler  $f_{D,n}$

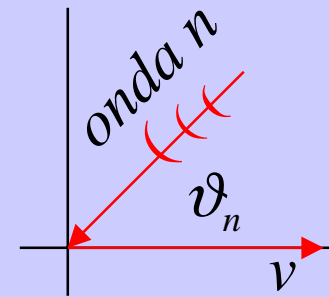
$$y(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{n=1}^N C_n e^{j2\pi(f_c + f_{D,n})(t - \tau_n)} x(t - \tau_n) \right\}$$

$$\tau_n \sim \bar{\tau}$$

$$y(t) = \text{Re} \left\{ x(t - \bar{\tau}) \sum_{n=1}^N C_n e^{j2\pi(f_c + f_{D,n})(t - \tau_n)} \right\}$$

# Supponiamo $x(t)=1$ , portante non modulata

$$\alpha_{BP}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{n=1}^N C_n e^{j2\pi(f_c + f_{D,n})(t - \tau_n)} \right\}$$



$$f_{D,n} = \frac{v}{\lambda_c} \cos \vartheta_n$$

- $v$ : velocità del mobile

# Equivalente in Banda Base (Complesso)

---

$$\begin{aligned}\alpha(t) &= \sum_{n=1}^N C_n e^{-j2\pi\{(f_c + f_{D,n})\tau_n - f_{D,n}t\}} \\ &= \sum_{n=1}^N C_n e^{-j\phi_n(t)} \\ &= \sum_{n=1}^N C_n \cos \phi_n(t) - j \sum_{n=1}^N C_n \sin \phi_n(t)\end{aligned}$$

- **Le fasi si possono assumere indipendenti ed uniformemente distribuite in  $[0, 2\pi)$**
- **Per il teorema limite centrale le componenti in quadratura di  $\alpha(t)$  sono processo aleatori Gaussiano.  $\alpha(t)$  e` un processo aleatorio Gaussiano complesso**

# Fading di Rayleigh

---

- Prendiamo un campione  $\alpha(kT) = \alpha_a(kT) + j \alpha_b(kT)$ 
  - ha parte reale ed immaginaria Gaussiane ed indipendenti a media nulla
  - la sua fase è uniformemente distribuita
  - il modulo  $\sqrt{\alpha_a^2(kT) + \alpha_b^2(kT)}$  ha distribuzione di Rayleigh

$$p_{|\alpha|}(a) = \frac{2a}{P_r} e^{-\frac{a^2}{P_r}} \quad a \geq 0 \quad F_{|\alpha|}(a) = 1 - e^{-\frac{a^2}{P_r}} \quad a \geq 0$$

- Il modulo quadro ha distribuzione esponenziale

$$p_{|\alpha|^2}(a) = \frac{1}{P_r} e^{-\frac{a}{P_r}} \quad a \geq 0 \quad F_{|\alpha|^2}(a) = 1 - e^{-\frac{a}{P_r}} \quad a \geq 0$$



# Flat Fading: Spettro Doppler

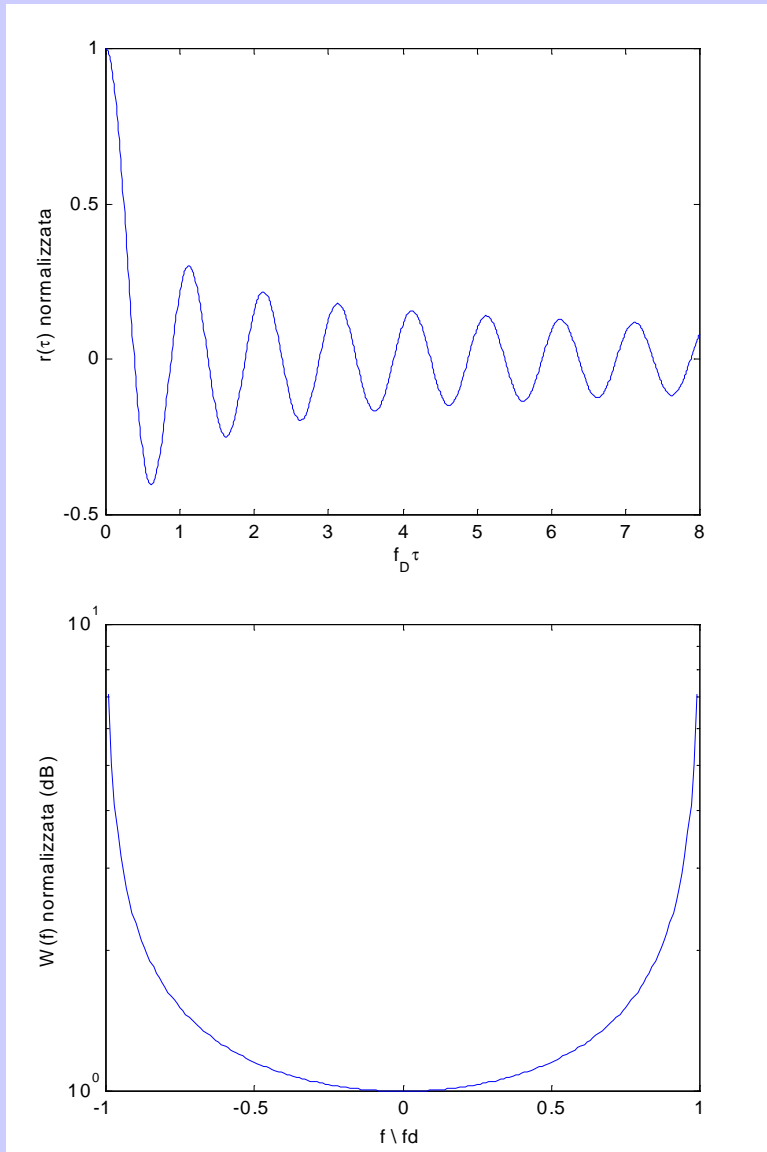
---

- $\alpha(t)$  si puo' assumere stazionario in senso lato.
- la sua correlazione (e densita` spettrale di potenza) e` funzione della distribuzione angolare degli scatteres relativamente alla velocita` del mobile.
- Modello isotropico di Clarke (valido nelle macrocelle):
  - la distribuzione angolare delle onde incidenti e` uniforme
  - si puo` dimostrare che le componenti in quadratura sono processi indipendenti, ciascuno con autocorrelazione, e densita` spettrale

$$r_{\alpha_I}(\tau) = r_{\alpha_Q}(\tau) = P_r J_0(2\pi f_D \tau)$$

$$W_{\alpha_I}(f) = W_{\alpha_Q}(f) = \frac{P_r}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{1 - (f / f_D)^2}}$$

# Funzione di Bessel



$$f_D = f_c \frac{v}{c}$$

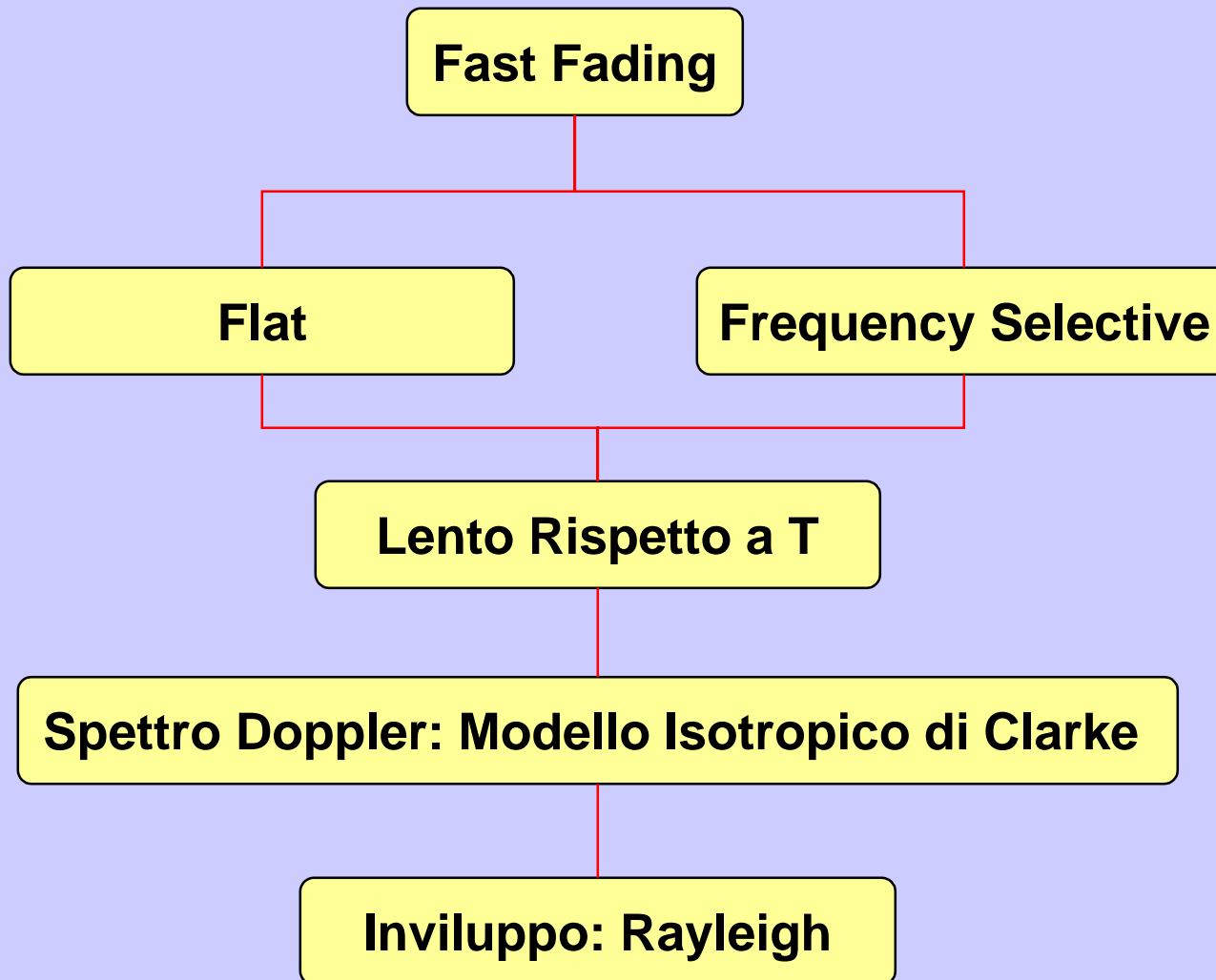
$$T_{\text{coerenza}} \sim \frac{1}{f_D}$$

$$\left. \begin{array}{l} f_c = 1 \text{ GHz} \\ v = 100 \text{ km/h} \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{l} f_D \approx 93 \text{ Hz} \\ T_{\text{coer.}} = 10.8 \text{ ms} \end{array}$$

$$T_{\text{pacchetto GSM}} = 0.577 \text{ ms}$$

# Sintesi

---



---

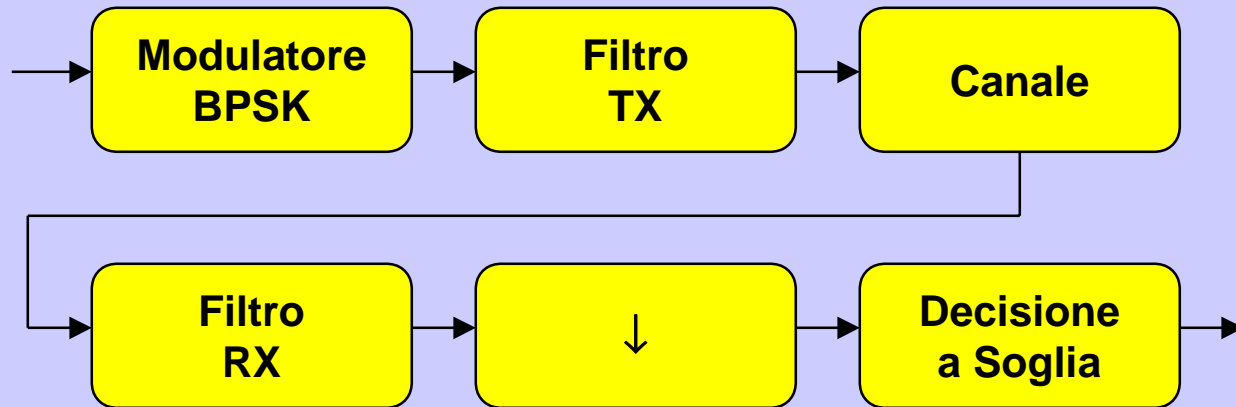
# **Prestazioni Modulazione Numerica**

# Prestazioni Modulazione BPSK

---

- **Consideriamo:**
  - sistema di trasmissione numerica BPSK
  - canale con flat fading e rumore termico
- **Valutiamo la probabilità di errore**

# Equivalente in BB Sistema BPSK con Fading



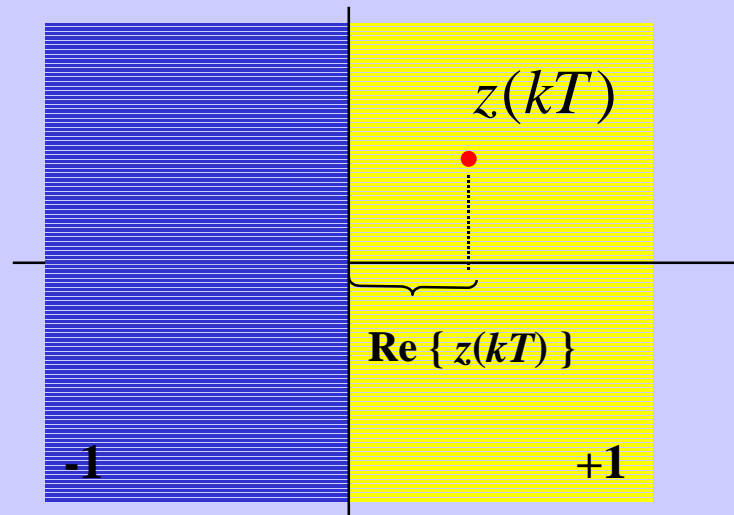
$$y(kT) = \underbrace{\beta e^{j\phi}}_{\alpha(kT)} \sqrt{E_S} d_k + \eta(kT) \quad d_k = \pm 1$$

- Supponiamo di potere stimare la fase e di correggerla:

$$z(kT) = y(kT)e^{-j\phi} = \beta \sqrt{E_S} d_k + w(kT)$$

# Regioni di Decisione

---



$$U = \text{Re}\{z(kT)\} = \beta \sqrt{E_S} d_k + \text{Re}\{w(kT)\}$$

↓  
Gaussiana,  $m=0$ , varianza  $\sigma^2=N_0/2$

# Probabilità di Errore Condizionata

---

- La probabilità di errore condizionata da  $\beta$  è data da:

$$P_e = \frac{1}{2} P[U > 0 | \beta, d_k = -1] + \frac{1}{2} P[U < 0 | \beta, d_k = 1]$$

$$= P[U > 0 | \beta, d_k = -1]$$

$$= P[\text{Re}\{w(kT)\} > \beta \sqrt{E_s} | \beta, d_k = -1]$$

$$= Q\left(\frac{\beta \sqrt{E_s}}{\sigma}\right) = Q\left(\sqrt{\beta^2 \overline{SNR}}\right)$$

$$\overline{SNR} = E[\beta^2] \frac{2E_s}{N_0} = \frac{2E_s}{N_0}$$



# Probabilità di Errore Media

---

- Ora, la probabilità media si ottiene:

$$\begin{aligned}\bar{P}_e &= E_{\beta} \left[ Q \left( \sqrt{\beta^2 SNR} \right) \right] \\ &= \int_0^{+\infty} Q \left( \sqrt{a SNR} \right) p_{\beta^2}(a) da\end{aligned}$$

- Poiché  $\beta^2$  è esponenziale a con  $m=1$

$$\begin{aligned}\bar{P}_e &= \int_0^{+\infty} e^{-a} Q \left( \sqrt{a SNR} \right) da \\ &= \frac{1}{2} \left[ 1 - \sqrt{\frac{SNR}{2 + SNR}} \right] \approx \frac{1}{2} \frac{1}{SNR}\end{aligned}$$

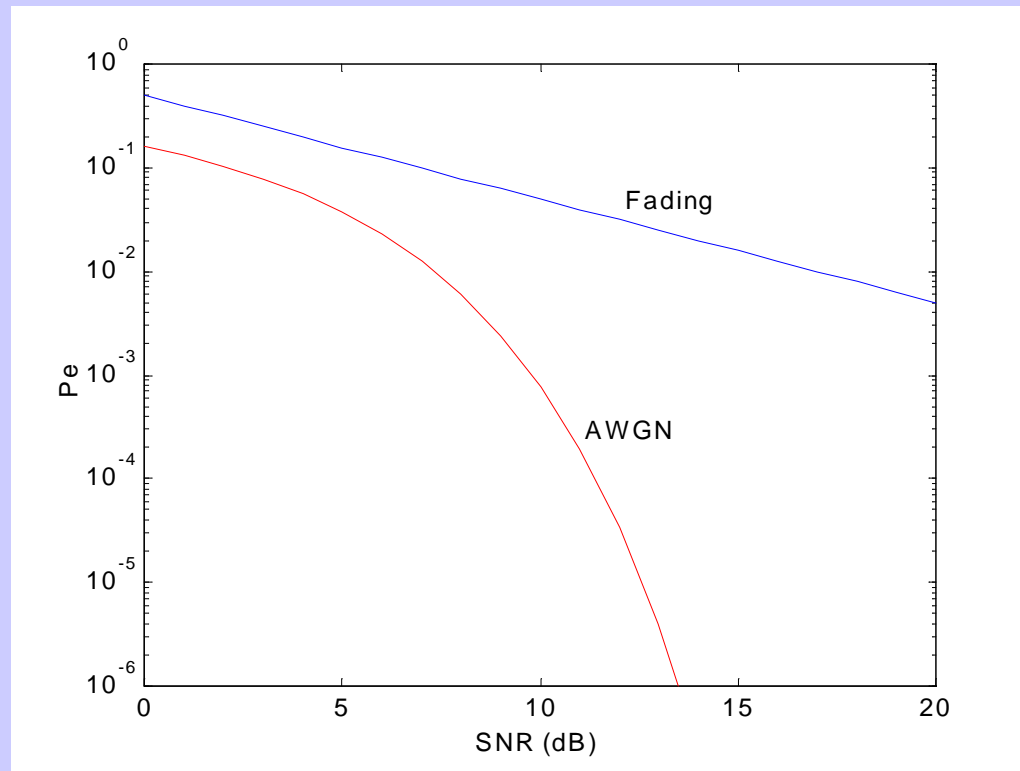
# Confronto

Probabilità errore canale AWGN

$$P_e = Q\left(\sqrt{SNR}\right)$$

Probabilità errore canale con Fading

$$\overline{P_e} \approx \frac{1}{2SNR}$$



# Come Migliorare le Prestazioni ?

---

A) Codifica di Canale per Correzione Errori

B) Utilizzare Antenne Multiple in Ricezione per Ottenere Diversita`

# Diversita` d'Antenna

---

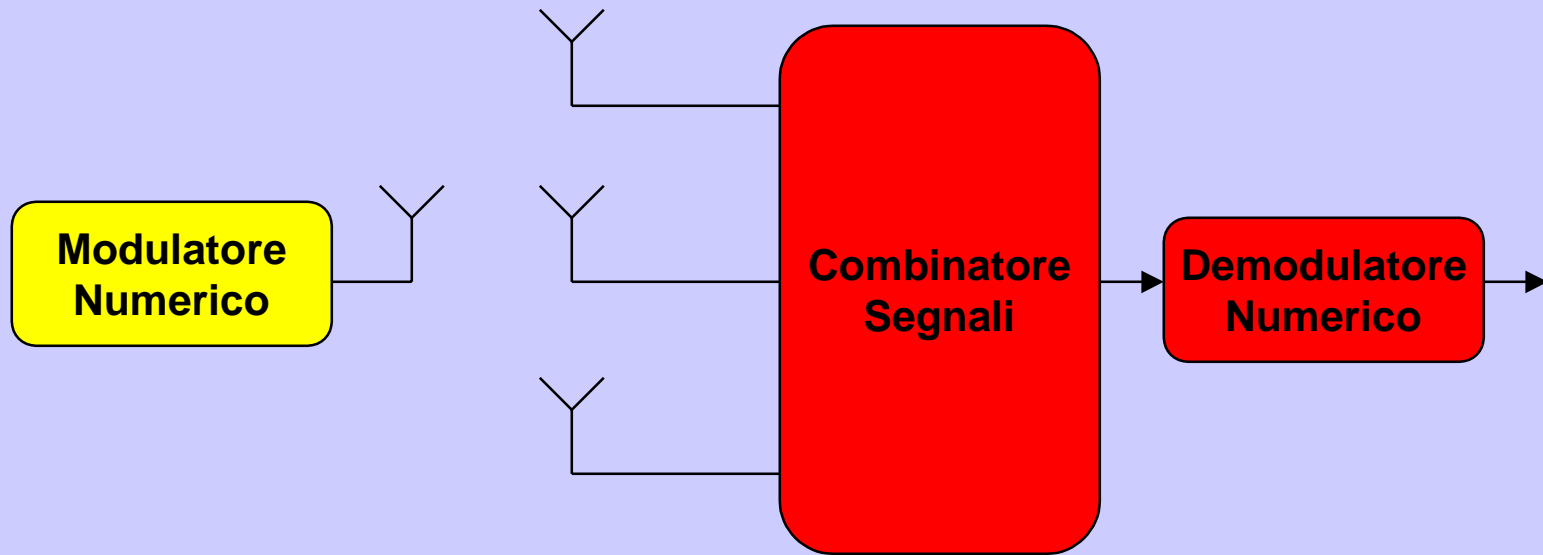


**2 GHz 2-Rami**  
**Diversita' spaziale**



**2 GHz 4-Rami**  
**Diversita' di Polarizzazione**

# Come Migliorare le Prestazioni ?



$$z_r(kT) = \beta_r e^{j\phi_r} \sqrt{E_s} d_k + w_r(kT) \quad r = 1, \dots, N_A$$

- $\beta_r$  v.a. di Rayleigh a varianza unitaria
- Indipendenti se le antenne sono spaziate di almeno  $\lambda \setminus 2$
- $w_r$  v.a. con componenti reale ed immaginarie Gaussiane a media nulla, varianza  $\sigma^2 = N_0/2$  ed indipendenti

# Tecniche di Diversita'

---

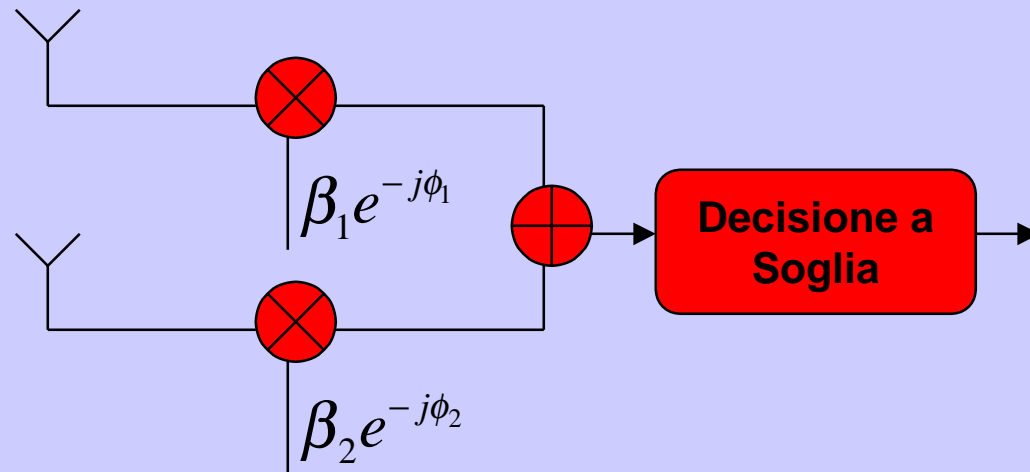
- **Selection Combining:**

scegli l'antenna con il migliore SNR !

- **Maximal Ratio Combining:**

combina i segnali in maniera ottima !

# MRC



$$\hat{z}(kT) = d_k \sqrt{E_s} \sum_{r=1}^{N_A} \beta_r^2 + \sum_{r=1}^{N_A} \beta_r e^{-j\phi_r} w_r(kT)$$

# Probabilità di Errore Condizionata

---

$$P_e = P[\operatorname{Re}\{z(kT)\} < 0 \mid \beta, d_k = 1] = P[U(d_k = 1) < 0]$$

$$U(d_k = 1) = V_0 \sum_{r=1}^{N_A} \beta_r^2 + \operatorname{Re} \left\{ \sum_{r=1}^{N_A} \beta_r e^{-j\phi_r} w_r(kT) \right\}$$

Gaussiana, media  $\sqrt{E_s} \sum_{r=1}^{N_A} \beta_r^2$ , varianza  $N_0 / 2 \sum_{r=1}^{N_A} \beta_r^2$

$$P_e = 1 - Q \left( \frac{0 - \sqrt{E_s} \sum_{r=1}^{N_A} \beta_r^2}{\sqrt{N_0 / 2 \sum_{r=1}^{N_A} \beta_r^2}} \right) = Q \left( \sqrt{\frac{2E_s}{N_0} \sum_{r=1}^{N_A} \beta_r^2} \right)$$



# Probabilità di Errore Media

---

$$\overline{P_e} = E_\gamma \left[ Q \left( \sqrt{\gamma \overline{SNR}} \right) \right] \quad \overline{SNR} = \frac{2E_s}{N_0}$$

$$\gamma = \sum_{r=1}^{N_A} \beta_r^2$$

$$\overline{SNR}_{TOT} = N_A \frac{2E_s}{N_0}$$

Somma di  $N_A$  v.a. esponenziali, indipendenti, equidistribuite,  $m=1$



Erlang indice  $N_A$ : 
$$p_\gamma(a) = \frac{a^{N_A-1}}{(N_A-1)!} e^{-a} \quad a \geq 0$$

# Probabilità di Errore Media

---

$$\bar{P}_e = \left[ \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\overline{SNR}}{2 + \overline{SNR}}} \right) \right]^{N_A} \sum_{k=0}^{N_A-1} \binom{N_A - 1 + k}{k} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{\frac{\overline{SNR}}{2 + \overline{SNR}}} \right) \right]^k$$

$\downarrow$   
 $\overline{SNR} \gg 0$

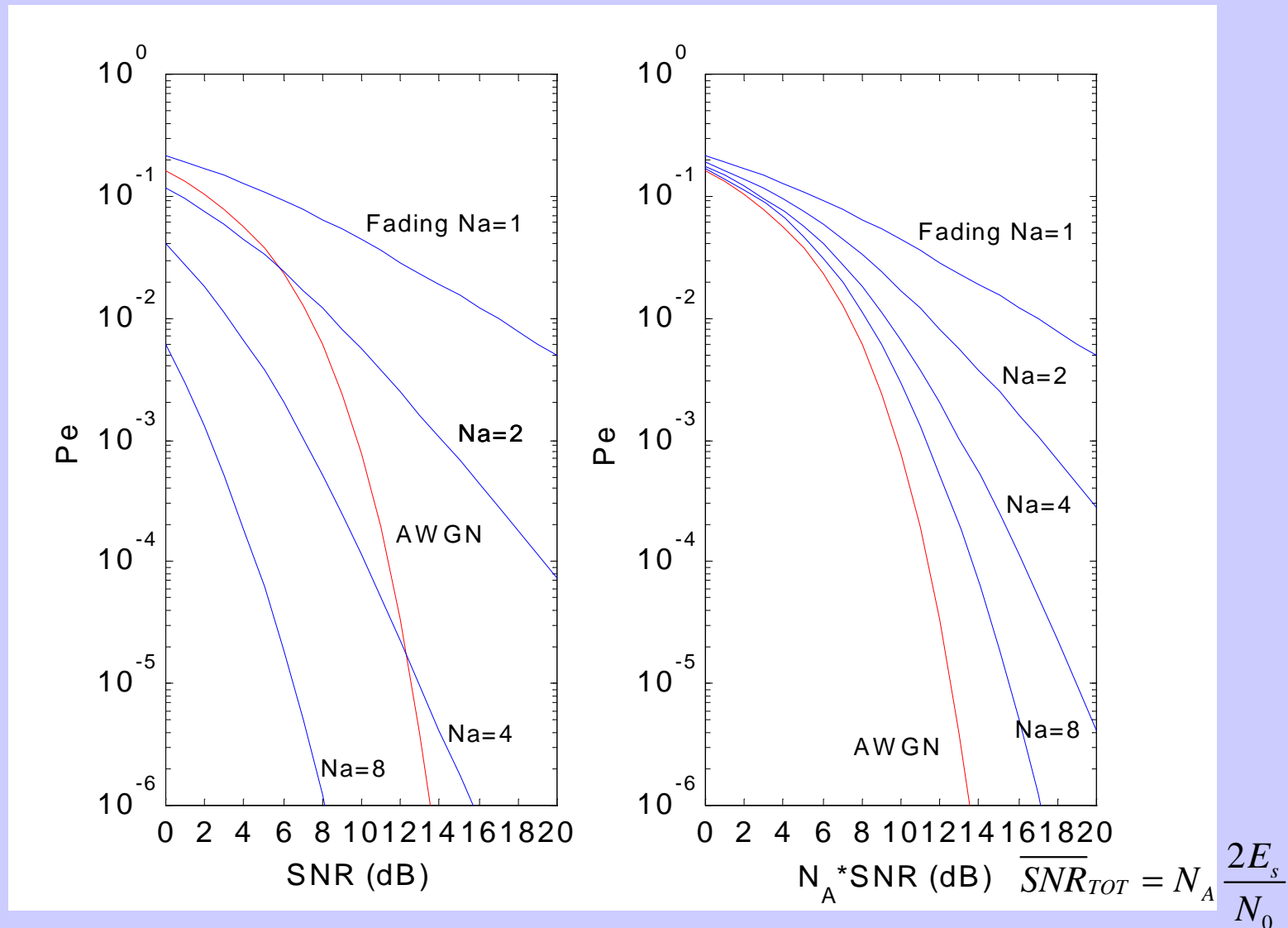
$\downarrow$   
 $1/2\overline{SNR}$

$\downarrow$   
 $\binom{2N_A - 1}{N_A}$

$\downarrow$   
 $1$

$$\bar{P}_e \approx \left( \frac{1}{2\overline{SNR}} \right)^{N_A} \binom{2N_A - 1}{N_A}$$

# Pe Media BPSK in Fading di Rayleigh



# Guadagno d'Antenna e di Diversita`

---

- Guadagno di antenna, cioe' di SNR:

$$\overline{SNR}_{TOT} = N_A \frac{2E_s}{N_0}$$

- Guadagno di diversita`, cioe' pendenza curve  $P_e$  in scala logaritmica

$$\log \overline{P_e} \sim -N_A \log 2\overline{SNR}$$

---

# **Antenne Multiple in Trasmissione e Ricezione**

# Capacita` ed Efficienza Spettrale

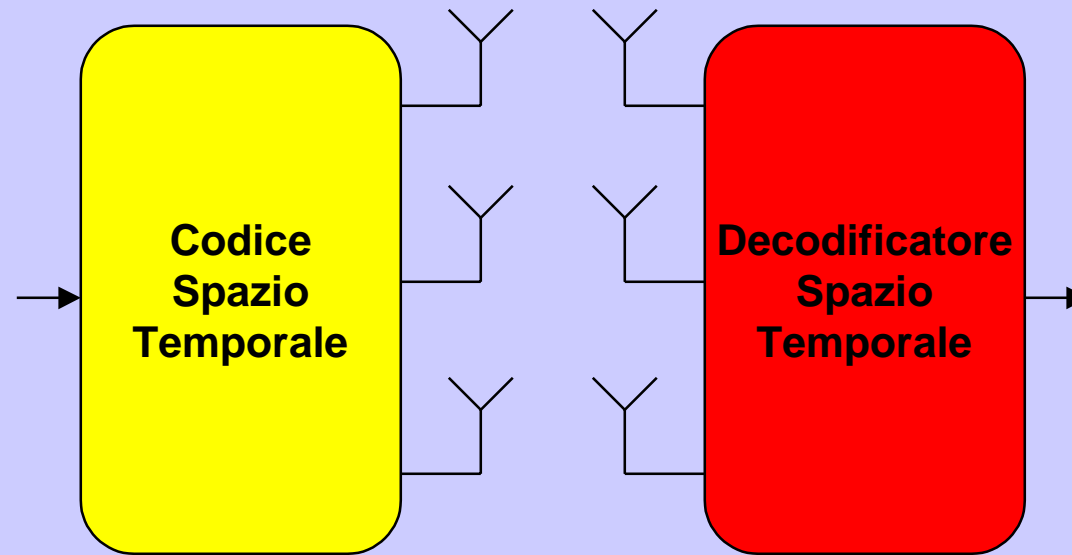
---

Capacita' = Efficienza Spettrale

Numero di Bit/s/Hz che possiamo trasmettere con Probabilita` di Errore  
Arbitrariamente Piccola

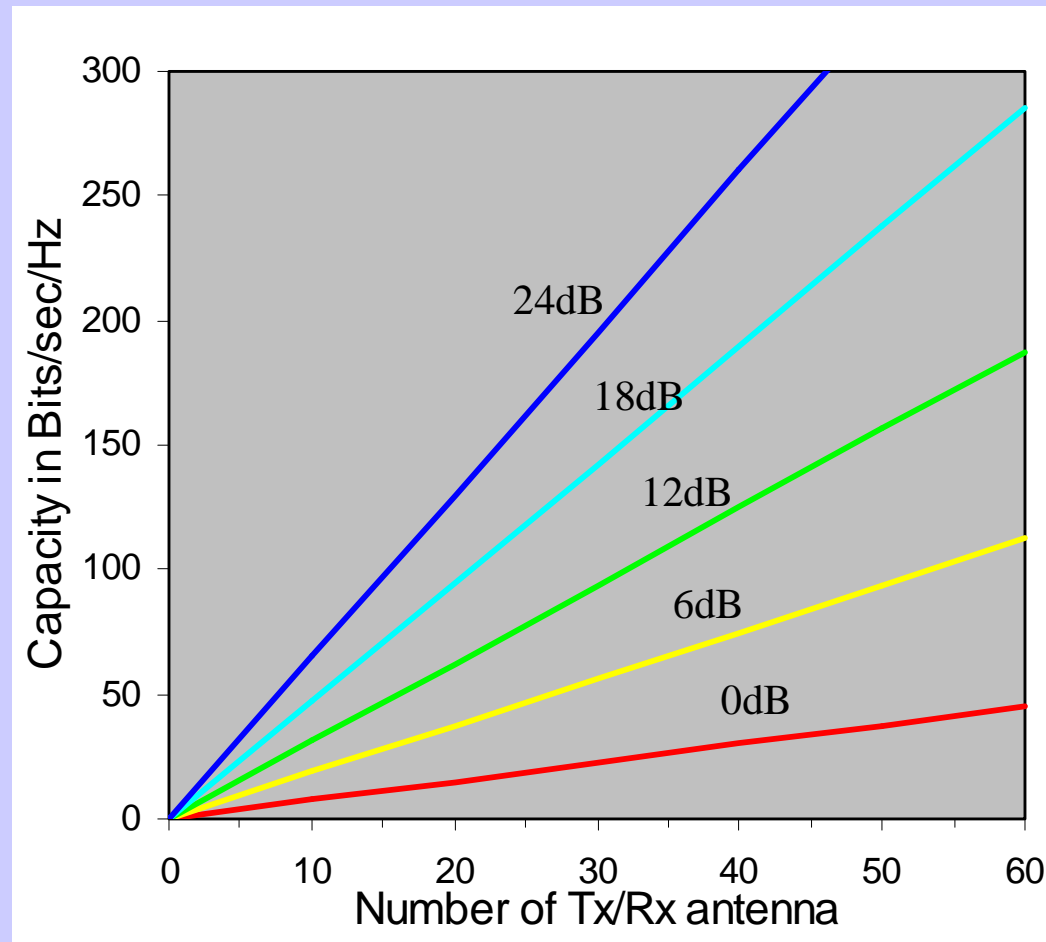
# Capacita` Sistemi ad Antenne Multiple

---



- Si e' recentemente dimostrato a Bell Labs che la capacita' cresce linearmente con il numero di antenne trasmettenti se il numero di riceventi e' almeno pari alle trasmettenti.

# Capacita` Teorica (di Shannon)



Curve per una Probabilita` di 0.99 che la Capacita` sia Tale



# Integrazione di Antenne in un Laptop

---



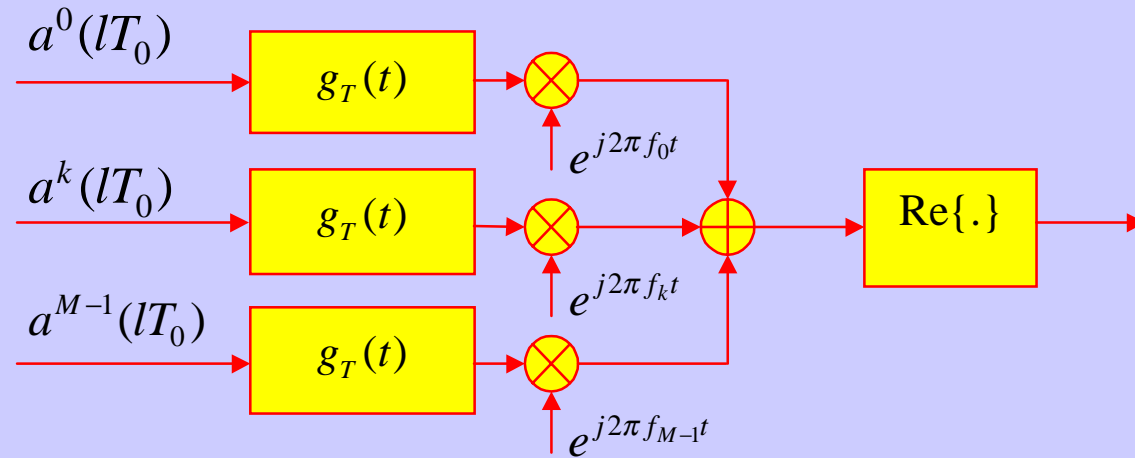
16 Elementi

*source: Bell Labs*

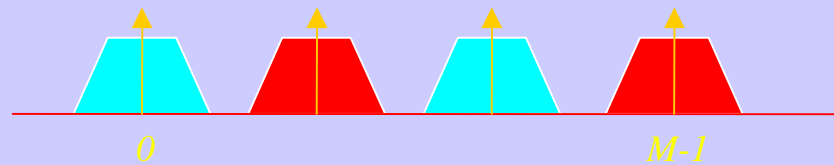
---

# Sistemi Multiportante

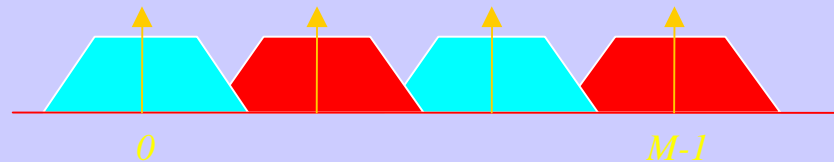
# Modulazione Multiportante



*Non-minimale*



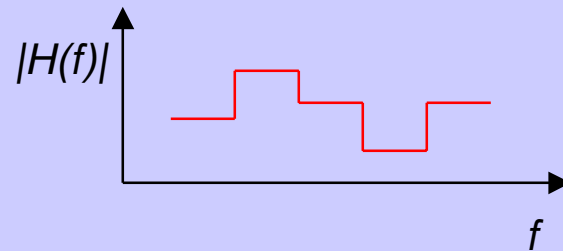
*Minimale*



# Motivazioni

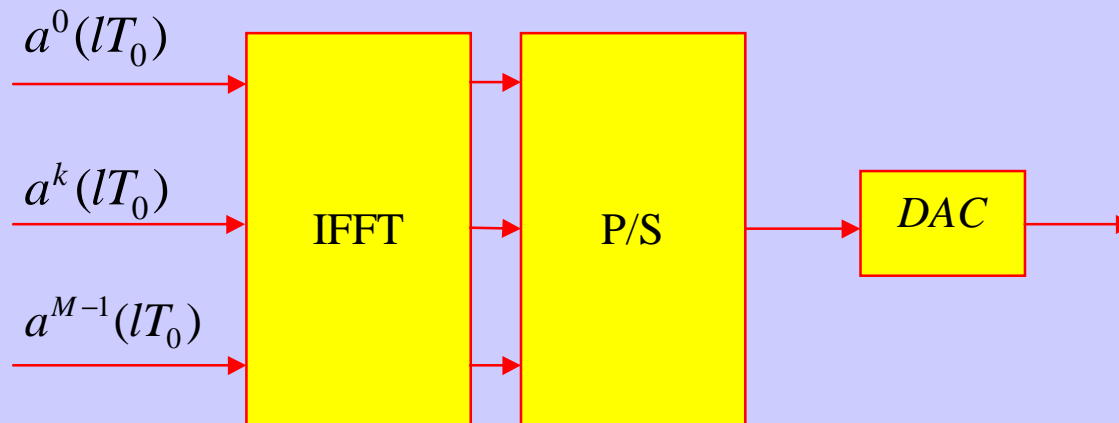
---

- Viene impiegata quando il canale è selettivo in frequenza:
  - suddivido la banda in tante sottobande ove il canale è flat
  - ciascun sottocanale vede flat fading, dunque privo di ISI



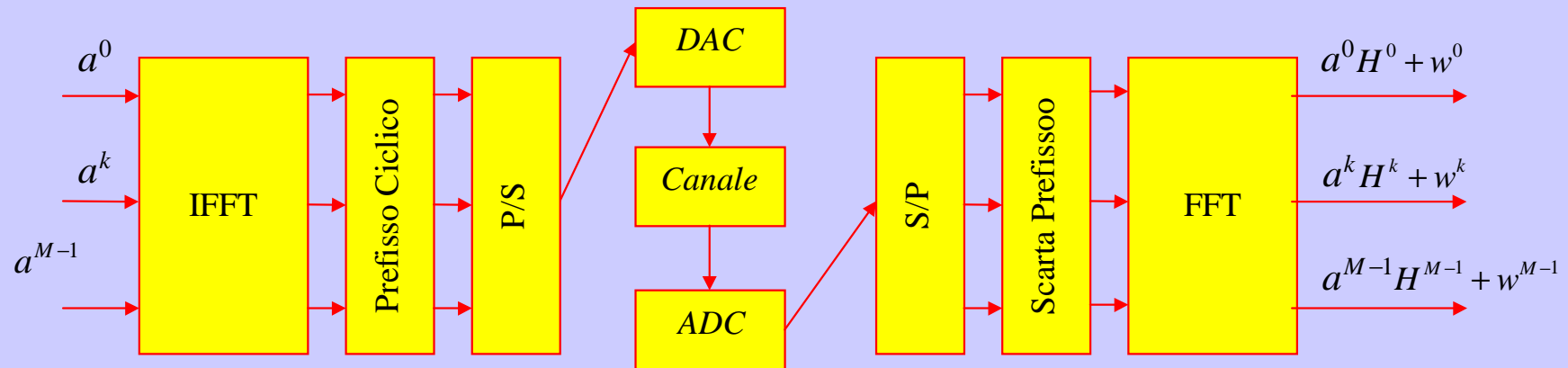
# OFDM

- OFDM: orthogonal frequency division multiplexing
- E' una particolare tecnica di modulazione multiportante che adotta filtri rettangolari e spaziatura di portante  $1/MT$ .
- E' implementabile digitalmente:



$$T_0 = MT \quad f_k - f_{k-1} = 1/MT$$

# OFDM con Prefisso Ciclico



- Supponiamo canale selettivo in frequenza e modellato come

$$h(kT) = \sum_{p=0}^{N_p} \alpha_p \delta(kT - pT) \quad y(kT) = \sum_{p=0}^{N_p} \alpha_p x(kT - pT) + w(kT)$$

$$z^n = a^n \sum_{p=0}^{N_p} \alpha_p e^{-j \frac{2\pi}{M} pn} + w^n$$

- Se il prefisso e' piu' lungo della durata del canale eliminiamo l'ISI

# Conclusioni

---

- **Nelle Trasmissioni Radio Mobili sono importantissimi sia**
  - **lo stato fisico**
  - **che lo stato di rete.**
- **Il canale radio e' soggetto a fading. Cio' rende difficile ma avvincente l'ottimizzazione delle prestazioni.**
- **Il sistema deve essere progettato per ottimizzare l'efficienza spettrale con i vincoli di complessita'.**
- **Le nuove "enabling technologies" sono**
  - **Modulazione multiportante**
  - **Sistemi ad antenne multiple**
  - **Ultra Wide Band Modulation.**