

Reti di Calcolatori

Il livello fisico

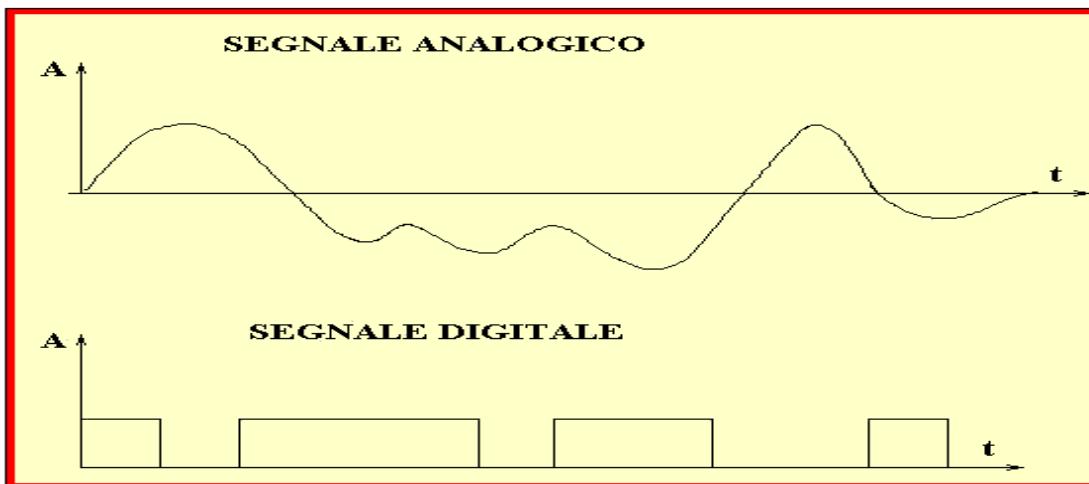
I Segnali

I segnali sono variazioni di grandezze fisiche che trasportano informazioni.

Le telecomunicazioni studiano la trasmissione di informazioni a distanza per mezzo di segnali che possono essere di vario tipo: **acustico, elettrico, luminoso, elettromagnetico, ecc.**

I segnali elettrici trasmessi da una linea possono essere essenzialmente di due tipi:

- **ANALOGICI:** Sono analogici quei segnali che, al variare del tempo, possono assumere tutti i valori compresi fra i valori massimo e minimo consentiti dal canale di comunicazione.
- **DIGITALI:** Con il termine digitale, o numerico, si intende invece un segnale che può assumere solo due valori, o comunque soltanto un numero discreto di valori, come, ad esempio avviene per i dati che sono generati dai computer.



Trasmissione digitale dei dati

- Questi valori discreti si ottengono facendo variare, nel modo quanto più brusco possibile, il valore del segnale da un livello all'altro.
- Uno schema ideale di segnale digitale è quello della figura seguente:

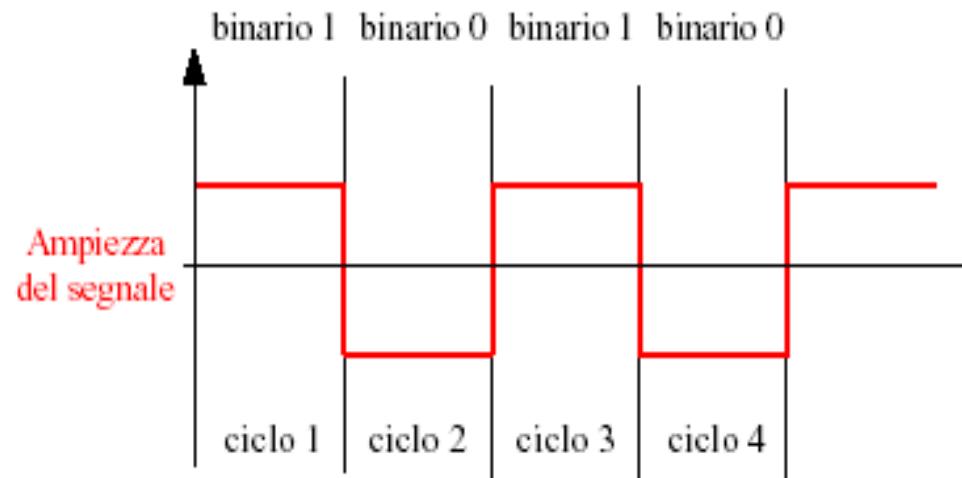


Figura 18 - Esempio di segnale digitale ideale (onda quadra)

Serie di Fourier

All'inizio del XIX secolo Jean-Baptiste Fourier ha dimostrato che: *una funzione periodica $y(t)$ è sviluppabile in una serie costituita da un termine costante A_0 e da una somma di infinite sinusoidi:*

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega_0 t)$$

le cui frequenze f_n sono multiple intere della frequenza fondamentale f_0 della funzione data:

$$f_0 = \frac{1}{T} \quad f_n = n f_0$$

e di ampiezze A_n e B_n (di sin e cos della n-esima armonica) calcolabili secondo le formule:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(n\omega_0 t) dt$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(n\omega_0 t) dt$$

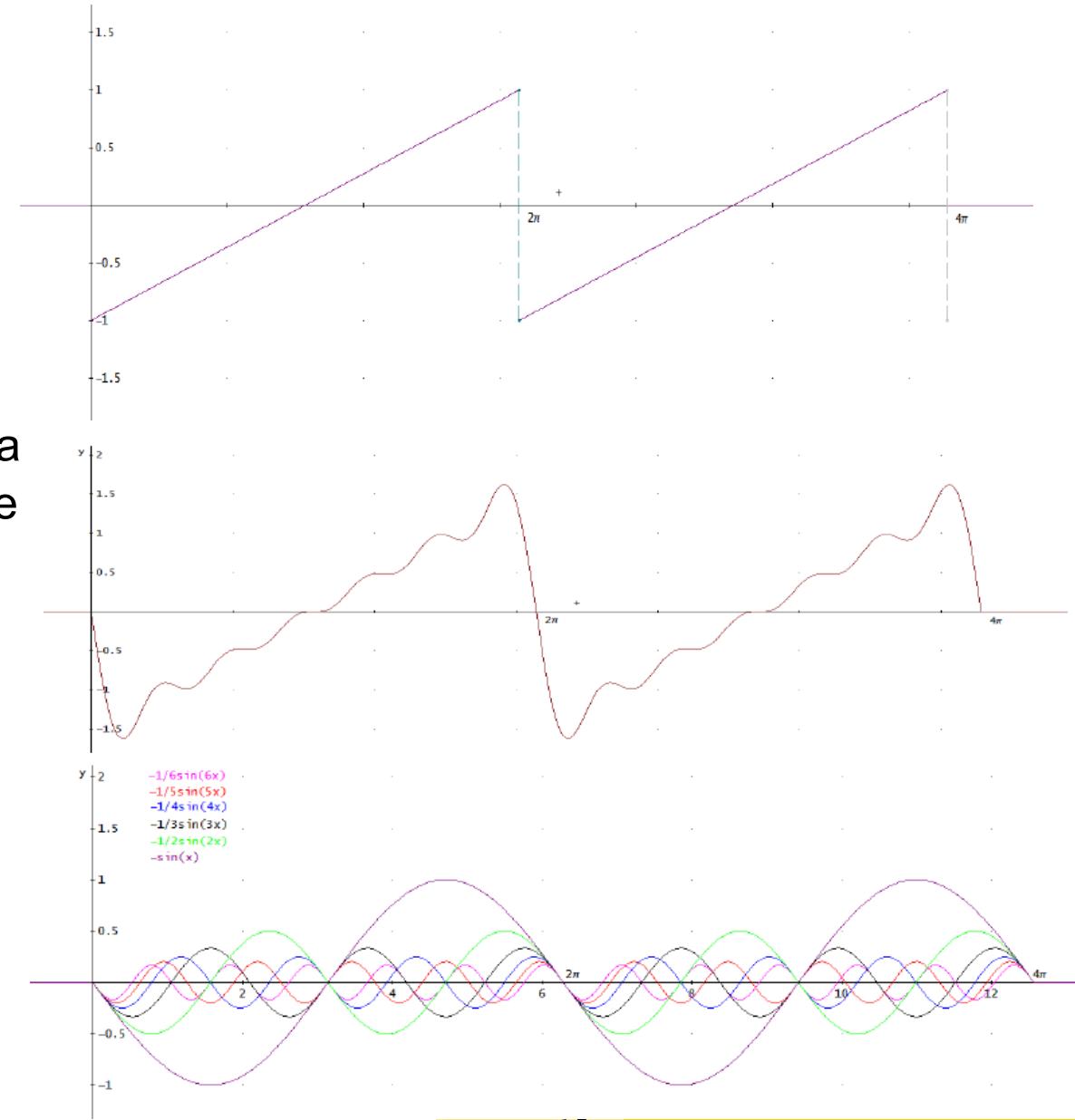
Sviluppo in serie di Fourier

La classica funzione a
“dente di sega”

Può essere approssimata
con una curva del genere

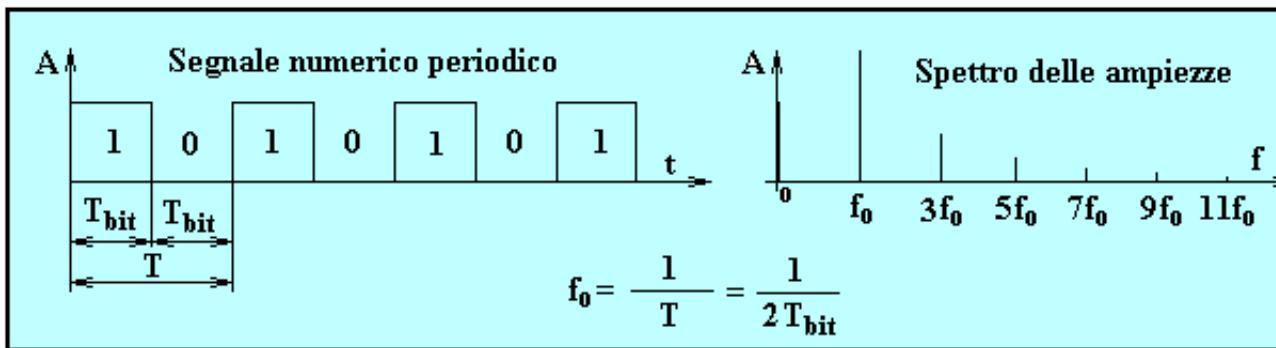
Ottenuta sommando:

- $-1/6 \sin(6x)$
- $-1/5 \sin(5x)$
- $-1/4 \sin(4x)$
- $-1/3 \sin(3x)$
- $-1/2 \sin(2x)$
- $\sin(x)$



Lo spettro di un segnale

Un segnale numerico di periodo T può essere sviluppato in serie di **Fourier** in una somma di infinite sinusoidi di ampiezza variabile.



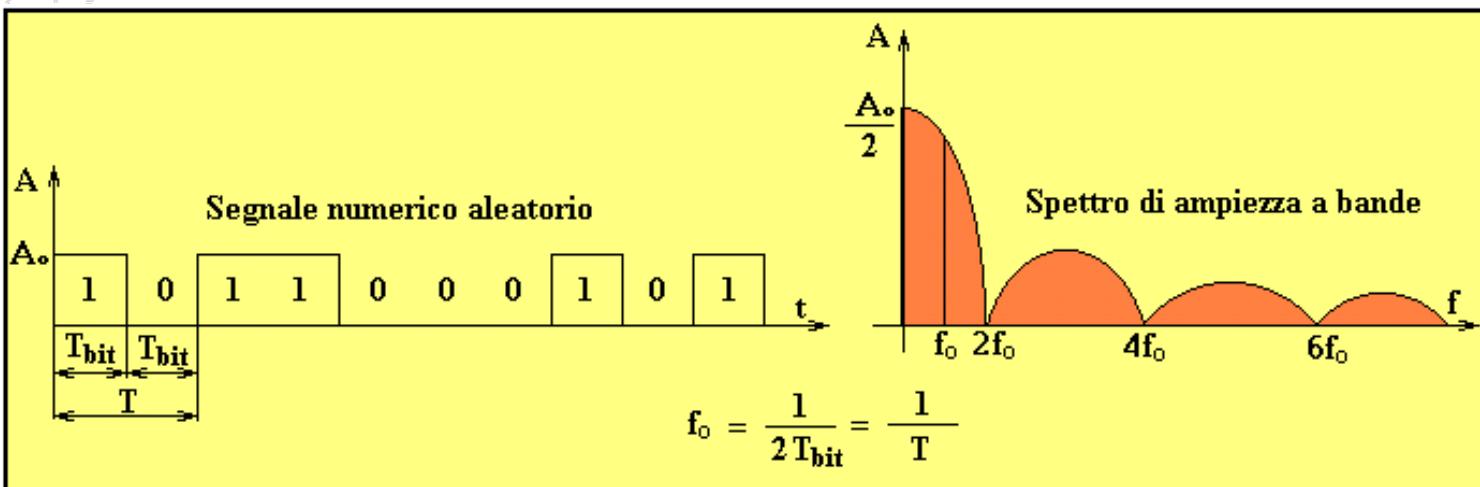
In questo, la frequenza f_0 è uguale a:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot T_{bit}}$$

- I quadrati delle ampiezze sono proporzionali all'energia trasmessa alla frequenza corrispondente.
- Nel mezzo trasmittivo parte dell'energia si perde. Se tutte le componenti fossero attenuate in modo uniforme il segnale risulterebbe ridotto in ampiezza ma avrebbe la stessa forma.
- Ciò non avviene e il segnale viene distorto

Lo spettro di un segnale

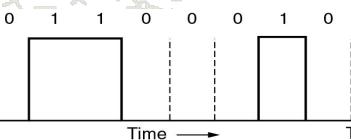
Lo studio dello sviluppo in serie e dell'integrale di **FOURIER**, però, ci dice che lo spettro di un segnale **ALEATORIO**, costituito da impulsi discreti rettangolari, comprende la componente continua e larghezza di banda teoricamente infinita



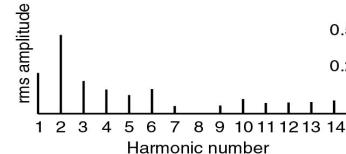
Un segnale numerico aleatorio si sviluppa secondo uno spettro a bande

Serie di Fourier

Le componenti di Fourier del segnale o armoniche vengono attenuate in maniera differente dal mezzo trasmittivo:

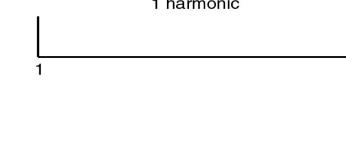


(a)



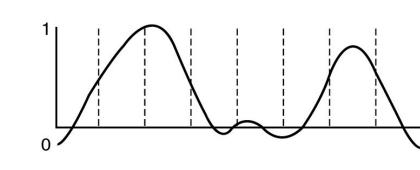
1 harmonic

(b)

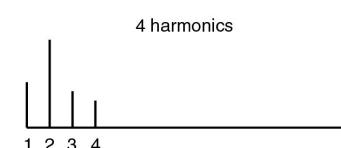


2 harmonics

(c)



(d)

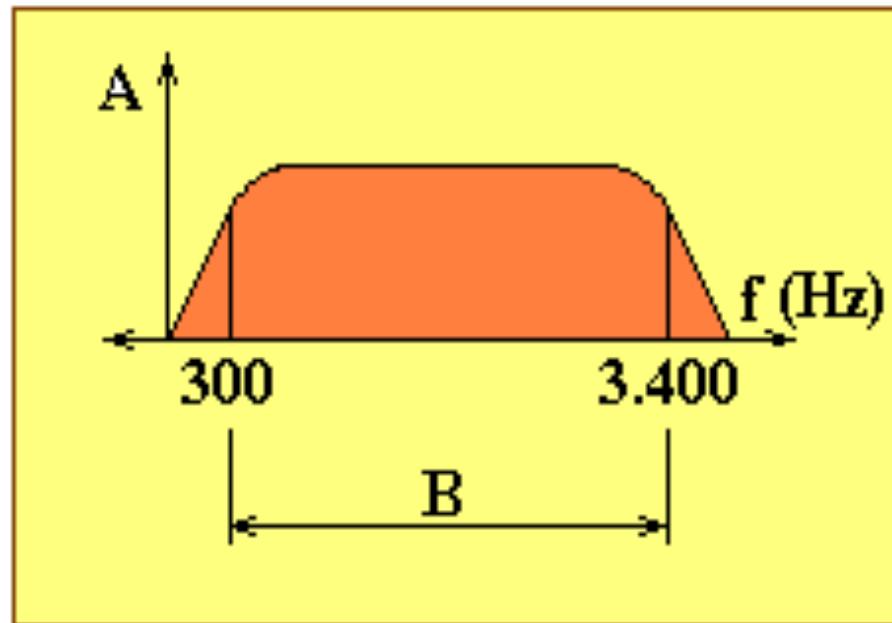


8 harmonics

(e)

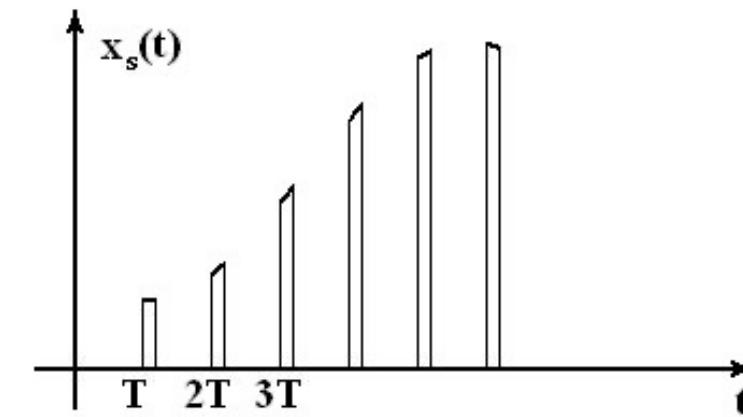
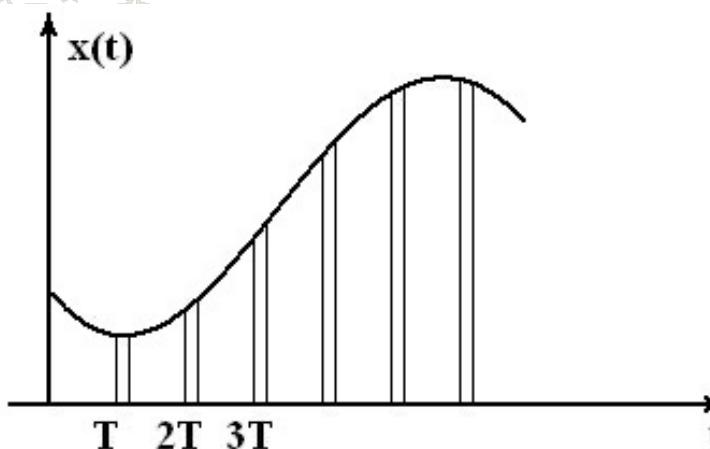
Larghezza di banda di un canale

- I canali di telecomunicazioni usati per trasmettere dati sono basati su mezzi trasmittivi quali: il rame, la fibra ottica, l'etere
- Ogni canale trasmittivo di norma consente il passaggio solo di alcune componenti in frequenza del segnale ed escludendone altre.
- E' definita pertanto larghezza di banda **B** l'insieme delle frequenze che un canale di telecomunicazioni fa passare.



Il campionamento

- Il problema da affrontare e': con **quale frequenza** si deve campionare il segnale per poterlo **ricostruire** a partire dal segnale campionato?



Teorema del campionamento

- Nel 1924 H. Nyquist dimostrò che un segnale a larghezza di banda B può essere ricostruito perfettamente campionando lo stesso al doppio della larghezza di banda, quindi a partire da $2B$ campioni del segnale stesso.
- IL teorema del campionamento (o teorema di Nyquist) afferma che:

dato un segnale $x(t)$ a banda limitata B , si puo' ricostruire completamente il segnale a partire da un campionamento del segnale se la frequenza di campionamento e' $F \geq 2B$

- In generale la frequenza di campionamento dovrà essere almeno leggermente superiore a $2B$, per disporre di un intervallo utile (banda di guardia) al fine di prevenire che effetti di non idealità dei filtri taglino parti utili del segnale

Capacità del mezzo

Con l'ausilio di questa relazione riuscì a stabilire che considerando di usare un numero V di livelli trasmissivi equiprobabili, dato che la quantità di informazione associata è esprimibile come $Q = \log_2 V$, allora la massima quantità di informazione trasmessa in un canale non rumoroso, dato un segnale costituito da V livelli, è di $2BQ$ cioè:

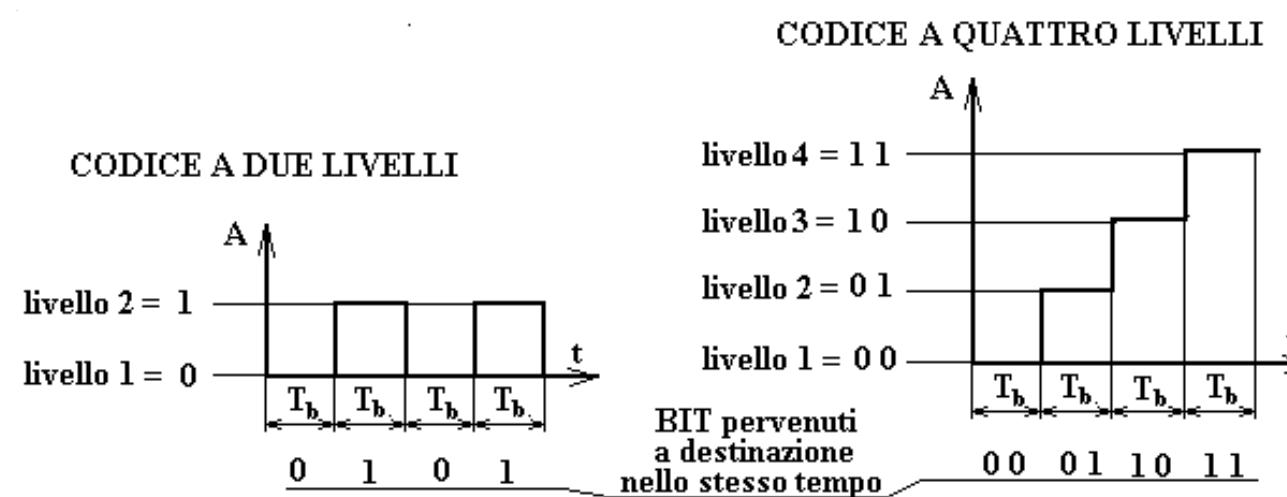
$$I[\text{bit/s}] = 2B \log_2 V$$

Il teorema del campionamento e' sostanzialmente la stessa cosa della legge sulla massima capacita' di un canale privo di rumore:

- se il livello del segnale segnale trasmesso rappresenta una sequenza di simboli, la massima capacita' di trasferimento la otteniamo quando ogni campione identifica un simbolo
- ne segue che al massimo siamo in grado di identificare $2B$ simboli

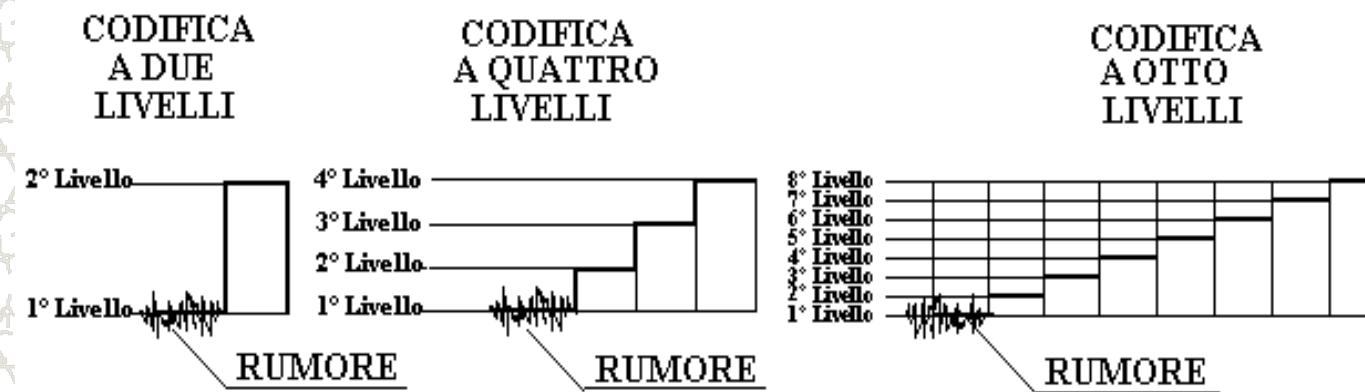
Capacità del mezzo (continua)

Usando un codice in cui si trasmettono quattro livelli diversi di tensione invece di due, per ogni livello in arrivo l'informazione sarà di due bit e non di uno solo e poiché il tempo di arrivo di un livello di tensione è sempre lo stesso, perché determinato dallo stesso criterio di **NYQUIST**, otterremo che, mentre la velocità di modulazione rimane la stessa, la velocità di trasmissione invece raddoppia.



Capacità del mezzo (continua)

Aumentando il numero dei livelli di tensione, è possibile aumentare la quantità di informazione che va a destinazione nello stesso tempo. Ma aumentare il numero dei livelli, a parità di tensione massima, comporta che il singolo livello diventa sempre più piccolo, finché in ricezione non sia più distinguibile dal rumore, sempre presente, come indicato nel disegno seguente in cui si fa un esempio di codifica a 2, 4 e 8 livelli.



Esiste comunque un limite massimo all'aumento dei livelli definito, analiticamente da una formula determinata da **C. SHANNON**

Il Rumore

- Il rumore è una forma di energia indesiderata che si somma al segnale utile degradandone il contenuto informativo, ed impedendo così di rilevare, in ricezione, tutto l'insieme delle informazioni trasmesse.
- Esistono vari tipi di rumore che interessano il campo dell'Elettronica e delle Telecomunicazioni e che si schematizzano come segue:
 - **Rumore bianco** - *Forma di rumore il cui spettro comprende energia a tutte le frequenze dello spettro elettromagnetico ed equamente distribuita.*
 - **Rumore di intermodulazione** - *Rumore prodotto dalla non linearità dei dispositivi elettronici e che consiste nella presenza, nel segnale in uscita dal dispositivo, di armoniche indesiderate non presenti nel segnale in ingresso.*
 - **Rumore di modo comune** o **di modo normale** - *Rumore presente in ingresso ad uno strumento di misura insieme al segnale da misurare e non separabile da questo.*
 - **Rumore di quantizzazione** - *Perdita di informazione che ha luogo durante la trasformazione di un segnale analogico in digitale, ad esempio nel P.C.M.*
 - **Rumore termico** - *Rumore dovuto all'agitazione termica degli elettroni presenti in una resistenza. È funzione della temperatura ma è anche un rumore bianco.*

Capacità del mezzo (continua)

Nel 1948 C. Shannon estese il lavoro di Nyquist a canali soggetti a rumore casuale (termico).

Se indichiamo con S la potenza del segnale e con N la potenza del rumore, la massima informazione trasmessa è:

$$C[\text{bit/s}] = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

In questa formula, **C** è detta **CAPACITÀ DI CANALE**, si misura in **BIT AL SECONDO**, ed indica la massima velocità teorica di trasmissione dei bit oltre la quale in ricezione essi vengono confusi con il rumore; quindi, in un canale telefonico banda di circa 3 KHz, il rapporto S/N è di circa 30 dB (cioè $10 \log_{10} 1000 = 30$ dB), allora la quantità massima di bit trasmessi è di circa 33.000 bps.

Commenti alla legge di Shannon

- Secondo la relazione vista, sembrerebbe possibile aumentare il **tasso** di trasferimento dati aumentando il **livello** del segnale
- Questo e' vero, ma come gia' osservato l'aumento del livello del segnale comporta l'aumento di effetti come la non linearita' che vanno ad **accrescere** il tasso di errore in ricezione
- Quindi effettivamente la limitazione di banda costituisce un **limite** alla velocita' di trasferimento dei bit

Trasmissione dei segnali

- La trasmissione dei segnali e' detta **analogica** se il segnale viene trasmesso **senza curarsi del suo significato**
 - in questo caso la trasmissione si limita a **recapitare il segnale**, eventualmente **amplificandolo in intensita'** quando necessario
- la trasmissione digitale tiene conto del **contenuto** dei dati se si deve intervenire per **amplificare il segnale**
 - il segnale non viene semplicemente amplificato, ma viene **interpretato**, si estrae il contenuto informativo e si **rigenera il segnale** tramite apparati detti ripetitori
 - questo puo' essere fatto **a prescindere dal tipo di segnale** (numerico o analogico), che a sua volta **puo' rappresentare** dati analogici o numerici
- vantaggi della trasmissione digitale:
 - **immunita'** maggiore alla alterazione dei dati verso lunghe distanze
 - **omogeneizzazione** della trasmissione per **diverse tipologie** di dato
 - **sicurezza** e riservatezza
- svantaggi della trasmissione digitale
 - costi superiori
 - maggiore complessita' dell'elettronica
 - richiede rinnovo di infrastrutture gia' esistenti

Trasmissione in banda base e modulata

- Una volta generato il segnale da trasmettere, questo puo' essere **immesso direttamente sul canale**; in questo caso si parla di **trasmissione in banda base**: il segnale che trasporta le informazioni ed il segnale sulla linea **sono identici**
- Vi sono diverse circostanze che rendono **opportuno** trasmettere il segnale in modo che occupi una **banda differente** di frequenze; questo tipo di trasmissione si realizza tramite un processo di **modulazione**

Codifica dei dati numerici

- La rappresentazione di dati numerici con segnali numerici e' normalmente fatta tramite **sequenze di impulsi discreti** di tensione di una certa durata temporale.
- Il dato binario e' **codificato** in modo da far corrispondere al **valore di un bit** un determinato **livello del segnale**
- Il ricevitore deve sapere **quando inizia e finisce il bit**, leggere il **valore del segnale al momento giusto**, determinare il **valore del bit** in base alla codifica utilizzata
- La migliore valutazione si ottiene **campionando** il segnale al tempo corrispondente a **meta' bit**

Caratteristiche delle codifiche

- Sono possibili diverse scelte di codifica, con caratteristiche differenti che possono migliorare le prestazioni della trasmissione
- Le caratteristiche determinanti sono:
 - spettro del segnale:
 - componenti ad **alta frequenza** richiedono una **banda maggiore**
 - l'assenza di **componente continua** e' preferibile
 - spettro concentrato nel **centro della banda**

Caratteristiche delle codifiche

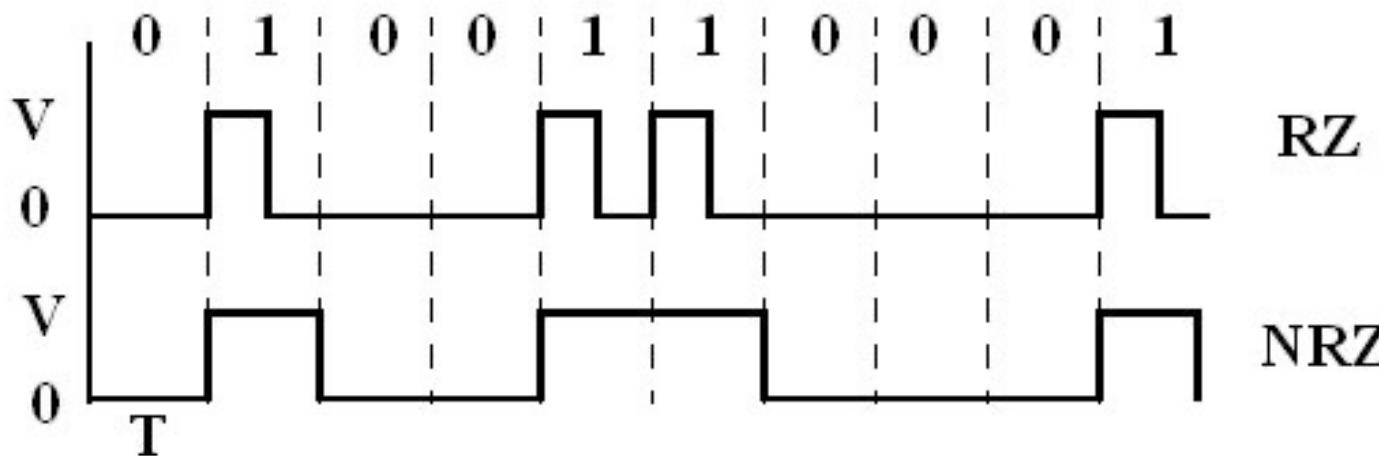


Altre caratteristiche determinanti sono:

- **sincronizzazione temporale**: il ricevitore deve essere sincronizzato con il trasmettitore per identificare i bit; alcune codifiche facilitano questa funzione
- **rilevazione di errore**: funzione caratteristica dei livelli superiori, ma puo' essere utile anche a livello fisico
- solidita' del segnale rispetto ad **interferenza** o **rumore**
- costo e complessita' di realizzazione

Codifica unipolare RZ ed NRZ

- La codifica unipolare RZ (Return to Zero) prevede la trasmissione di un segnale di lunghezza T per ogni bit. Il segnale è nullo in corrispondenza del bit 0, mentre è un impulso di tensione di durata $T/2$ per il bit 1
- La codifica unipolare NRZ (Non Return to Zero) differisce dalla RZ perché il livello di tensione per il bit 1 rimane alto per tutta la durata del bit



Caratteristiche della codifica NRZ



La codifica NRZ ha i pregi:

- facile da progettare e realizzare
- utilizzo **efficiente** della larghezza di banda (la potenza e' concentrata tra 0 ed $R/2$, dove R e' la capacita' trasmisiva in bit/s (transmission rate))



Difetti:

- esiste una **componente continua**
- lunghe **sequenze** di bit di uguale valore producono un segnale **continuo senza transizioni**: il ricevitore puo' perdere la sincronia

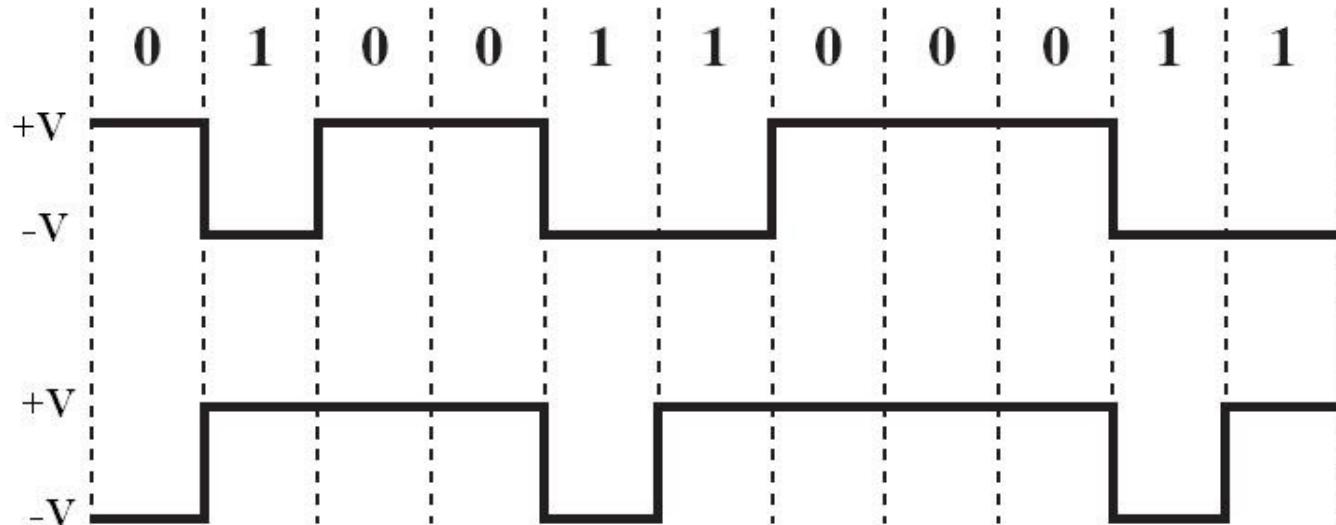
Codifica NRZ-L ed NRZI

- Per migliorare le caratteristiche si fa utilizzo di una codifica (NRZ-L: Non Return to Zero Level) che prevede un segnale a **+V** per il bit 1, ed a **-V** per il bit 0

- questo **riduce** l'impatto della componente continua, ma **non la annulla**

- Altra tecnica: codifica **differenziale** (NRZI: NRZ Invert on ones): il segnale cambia in occasione di un bit 1

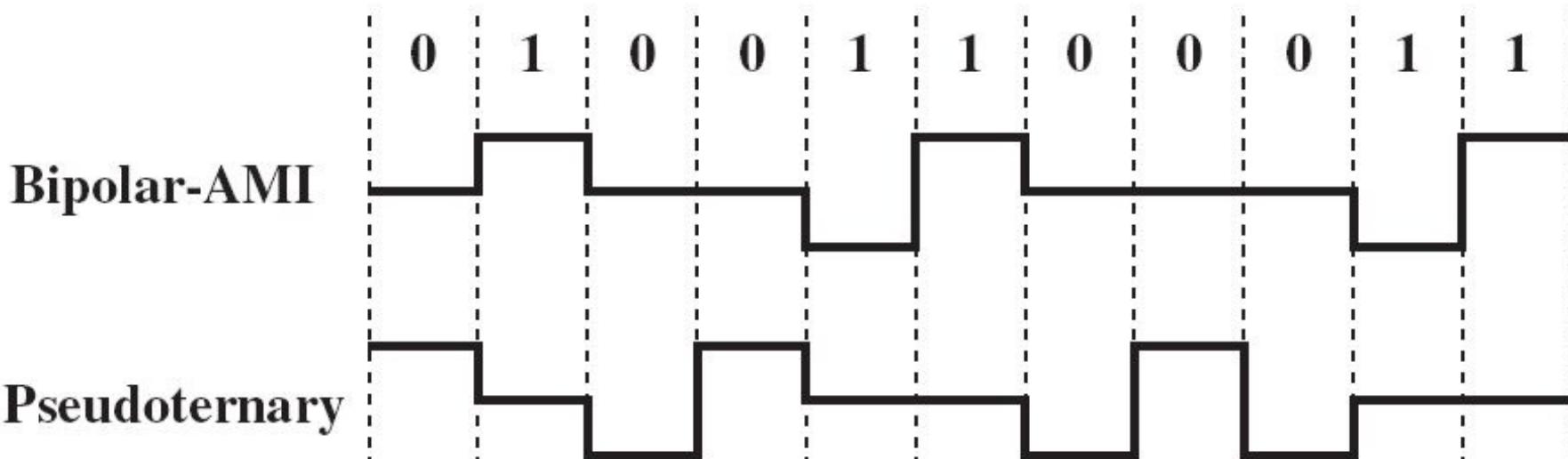
NRZ-L



NRZI

Codifica multilivello binario

- Le codifiche a multilivello binario utilizzano **tre livelli**: lo zero indica il bit 0, mentre il bit 1 e' identificato con segnali a **+V** e **-V** alternati (**AMI** bipolare: Alternate Mark Inversion)
- La codifica pseudoternaria e' la stessa, con 1 e 0 invertiti



Caratteristiche della codifica AMI

La codifica AMI ha i seguenti vantaggi rispetto alla NRZ:

- risolve il problema della **sequenza di bit 1**, che presentano sempre una transizione utilizzabile in ricezione per sincronizzare (ma **resta** il problema per **sequenze di 0**)
- La componente continua e' di fatto azzerata
- utilizza a parita' di transmission rate una larghezza di banda **inferiore**
- errori **isolati** possono essere evidenziati come **violazione** del codice

Vi sono anche svantaggi:

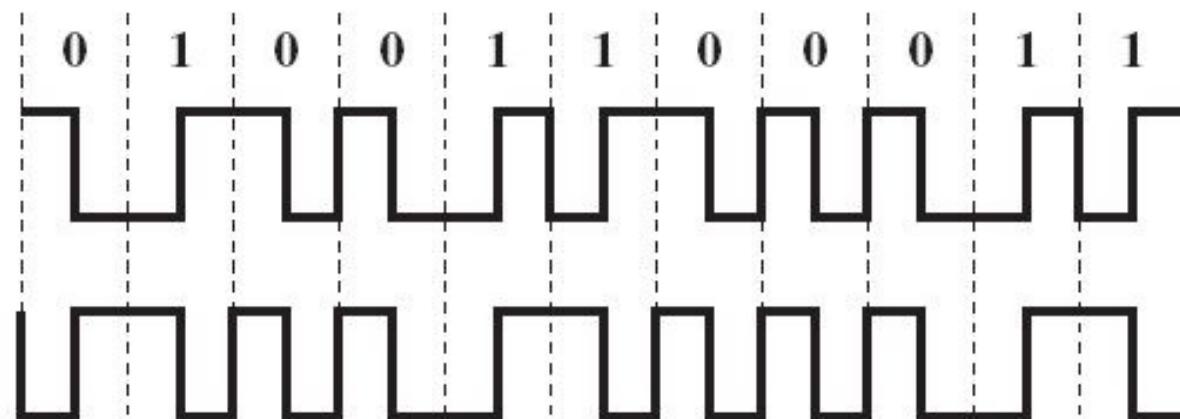
- utilizza 3 livelli, quindi ogni simbolo potrebbe trasportare **piu'** informazione ($\log_2(3) = 1.58$)
- a parita' di bit rate richiede circa **3 dB in piu'** rispetto alla NRZ

Utilizzata in diversi casi su linee **punto-punto** (ISDN)

Codifica Manchester

- La codifica Manchester utilizza due livelli di tensione; il bit 1 e' rappresentato da un segnale -V per mezzo periodo, +V per il seguente mezzo periodo; il bit 0 e' rappresentato in modo opposto (+V per il primo mezzo periodo, -V per il restante mezzo periodo)
- La codifica Manchester differenziale utilizza lo stesso tipo di rappresentazione, ma rappresenta il bit 1 come variazione rispetto alla codifica del bit precedente

Manchester



Differential
Manchester

Caratteristiche della codifica Manchester



Vantaggi:

- sincronizzazione: ogni bit ha una transizione in mezzo, che puo' essere utilizzata per la sincronizzazione dal ricevitore
- totale assenza di componente continua
- rivelazione di errore (in assenza della transizione prevista)



Svantaggi:

- richiede un segnale a frequenza doppia rispetto al bit rate: 1 bit richiede 2 baud, quindi richiede una banda doppia



L'utilizzo piu' diffuso della codifica Manchester e' negli standard **802.3** (ethernet) e **802.5** (token ring) sia su **coassiale** che su **doppino**

Codifica B8ZS

💡 Una modifica della AMI per risolvere il problema della sequenza di zeri e' la **B8ZS** (Bipolar with 8 Zeros Substitution):

– ogni sequenza di 8 zeri viene codificata come

- **000+0+** se l'ultimo impulso e' stato positivo
- **000-+0-** se l'ultimo impulso e' stato negativo

– in questo modo scompaiono **lunghe sequenze di zeri**, e la sequenza e' identificata da **due violazioni** del codice AMI

💡 Utilizzata nel Nord America

Codifica HDB3

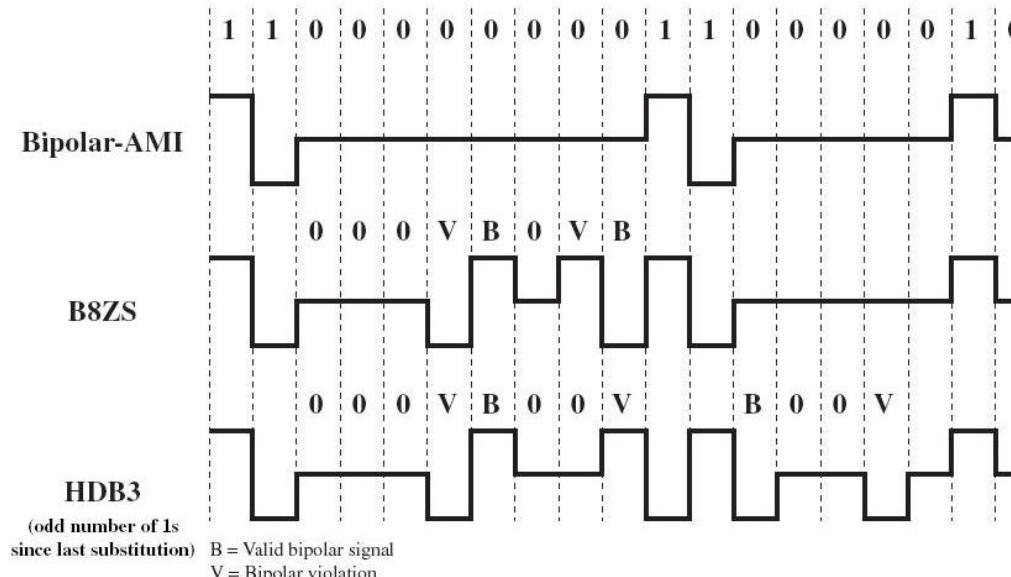
• Stessa logica per la HDB3 (High Density Bipolar 3 zeros):

- ogni sequenza di 4 zeri viene codificata come
 - se la polarita' dell'ultimo impulso e' stata negativa:
 - 000- se c'e' stato numero dispari di 1 dall'ultima sostituzione
 - +00+ se c'e' stato un numero pari di 1 dall'ultima sostituzione
 - se la polarita' dell'ultimo impulso e' stata positiva:
 - 000+ per un numero dispari di 1 dall'ultima sostituzione
 - -00- per un numero pari di 1 dall'ultima sostituzione
- anche in questo caso scompaiono lunghe sequenze di zeri, e la sequenza e' identificata da violazioni opportune del codice AMI

• Utilizzata in Europa e Giappone

Caratteristiche di B8ZS ed HDB3

- Le due codifiche hanno sempre componente continua nulla (le violazioni sono alternate)
- Hanno un efficiente utilizzo della banda, con la potenza concentrata a metà' della banda
- come con AMI, e' possibile riconoscere gli errori singoli
- Generalmente utilizzate nella trasmissione dati ad elevata distanza



Spettro delle codifiche numeriche in banda base

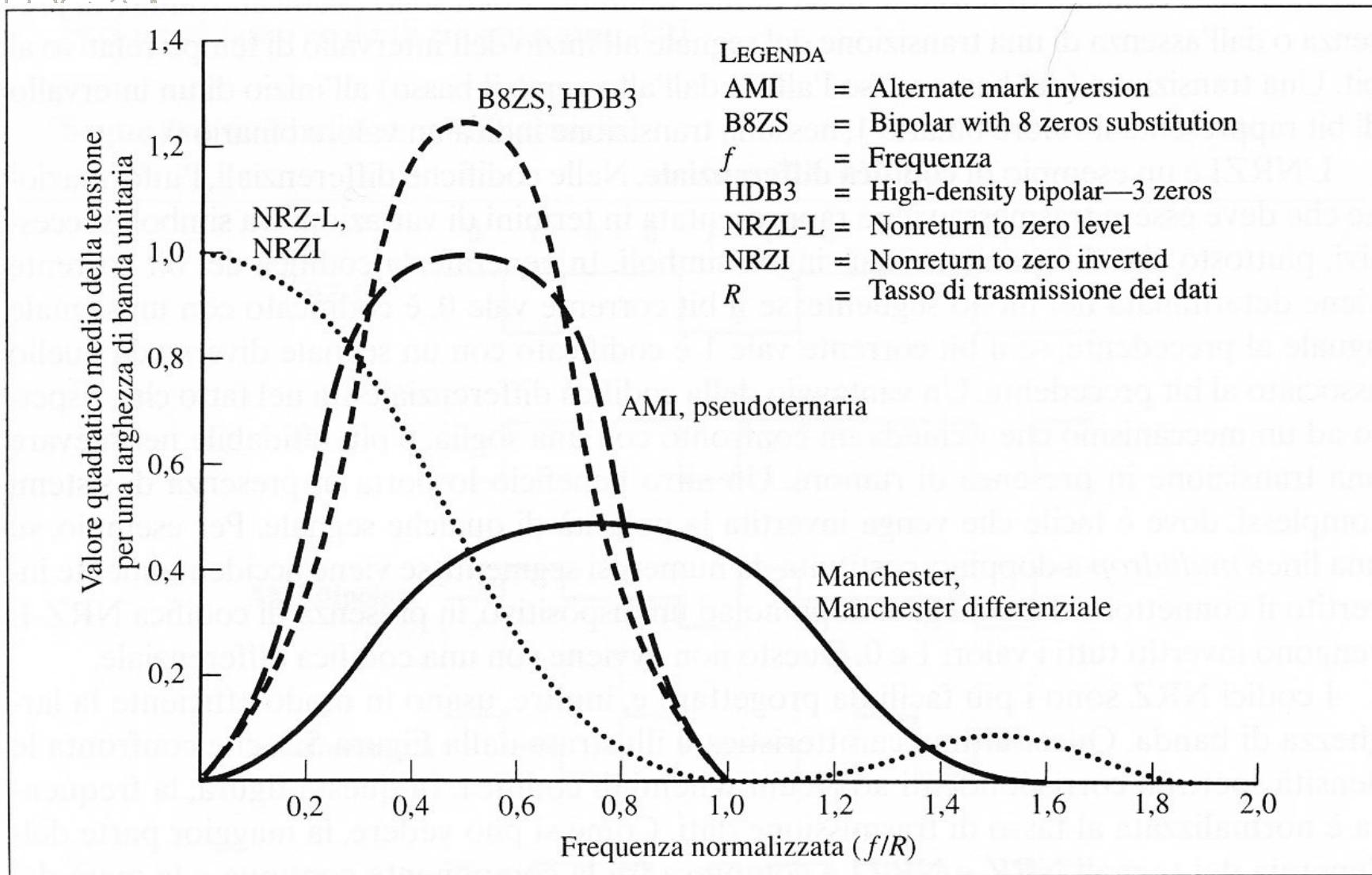


Figura 5.3 Densità spettrali dei vari schemi di codifica di un segnale

Modulazione

- La modulazione e' un processo con il quale il **segnale da trasmettere** (segnale **modulante**) viene utilizzato per **modificare nel tempo** le caratteristiche di un **segnale ausiliario sinusoidale (portante)**
- Questa operazione ha la caratteristica di generare un segnale che ha una **occupazione di banda dell'ordine di grandezza** di quella del **segnale modulante**, centrata pero' intorno **alla frequenza** del segnale portante
- Utilizzando una portante ad **alta frequenza** si puo' quindi **spostare** la banda necessaria alla trasmissione delle informazioni in un intervallo **piu' opportuno** per la trasmissione stessa

Vantaggi della modulazione

- 💡 Spesso per la trasmissione sono preferibili determinati intervalli di frequenza
 - ad esempio, la trasmissione via **ponte radio** (a vista) richiede una antenna; la dimensione della antenna deve essere dello stesso ordine di grandezza della **lunghezza d'onda**; per trasmissioni a 1 KHz $\lambda = 300 \text{ Km}$, per trasmissioni a 1 GHz $\lambda = 30 \text{ cm}$
 - per trasmettere i segnali radio si puo' sfruttare la **riflessione multipla dalla ionosfera**, che riflette bene frequenze di 5-30 MHz
- 💡 Un altro vantaggio e' legato alla possibilita' di trasmettere **piu' comunicazioni differenti** e contemporanee sullo **stesso mezzo**, trasferendo le bande relative alle diverse comunicazioni in **zone differenti** della banda utile per la trasmissione (multiplexing a divisione di frequenza)

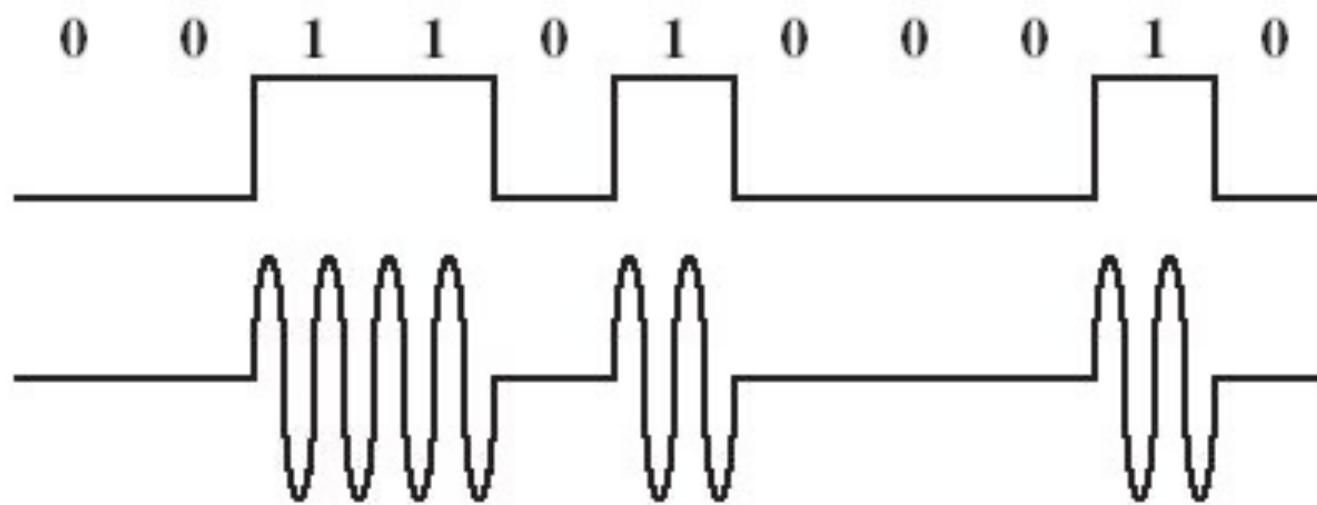
Tecniche di modulazione

Il segnale modulante viene utilizzato per modulare le caratteristiche della portante:

- ampiezza: il segnale viene utilizzato per **modificare** il valore della **ampiezza** della portante (modulazione di ampiezza)
- frequenza: il segnale modulante modifica istante per istante la **frequenza** della portante (modulazione di frequenza)
- fase: il segnale modulante cambia la **fase** della portante (modulazione di fase)

Tecniche di modulazione: ASK

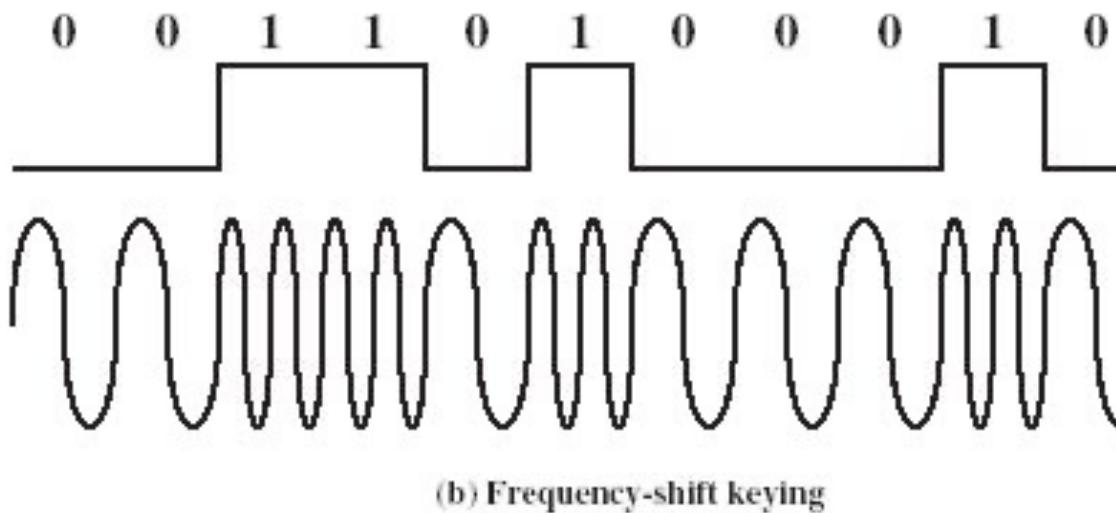
Partendo da un segnale numerico (ad esempio un segnale NRZ) si puo' modulare **in ampiezza** una portante sinusoidale moltiplicando la sua ampiezza per il segnale numerico (**ASK**: Amplitude Shift Keying)



(a) Amplitude-shift keying

Tecniche di modulazione: FSK

Il segnale numerico puo' essere utilizzato per modulare **in frequenza** una portante sinusoidale, modificando la sua frequenza **in funzione** del segnale modulante (**FSK**: Frequency Shift Keying), cioe' facendo corrispondere due frequenze ai due valori del bit

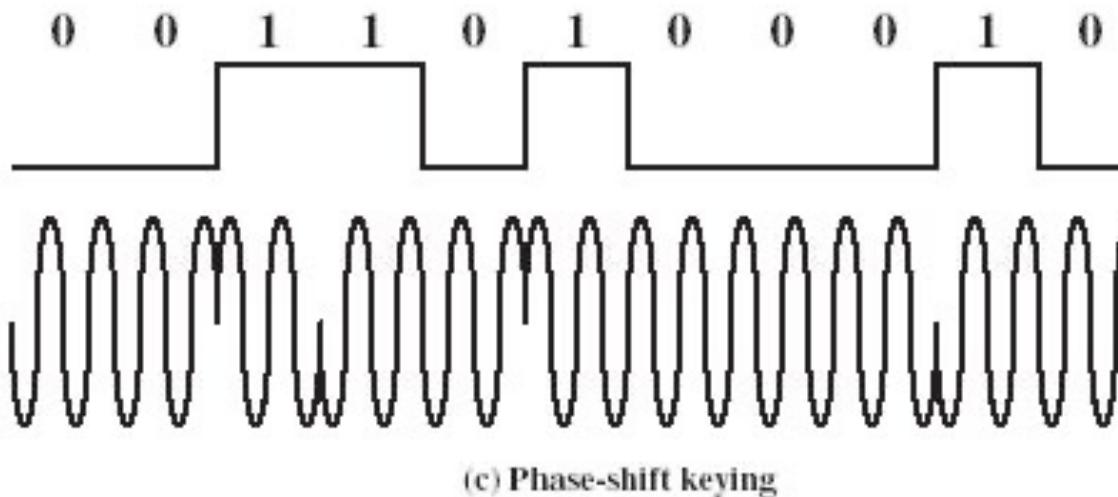


livello 1 \Rightarrow frequenza f_z
livello 0 \Rightarrow frequenza f_a

Requisito importante nella FSK è la continuità di fase negli istanti di transizione da una frequenza all'altra.

Tecniche di modulazione: PSK

- Il segnale numerico puo' modulare **in fase** una portante sinusoidale associano un certo valore di fase ad un certo valore di bit (**PSK**: Phase Shift Keying). Nell'esempio in figura al bit 1 si associa un **cambio** di fase, al bit 0 nessun cambio di fase
- La variazione sistematica e' realizzata sulla fase del segnale

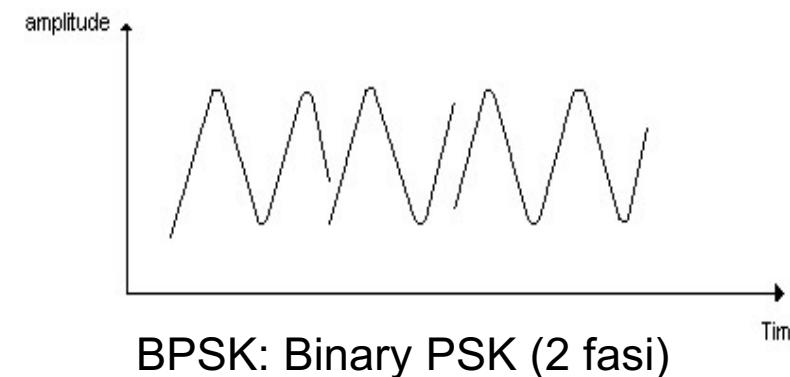


BPSK

Nella modulazione PSK bifase (BPSK), si ha una sola portante e quindi i due valori numerici uno e zero sono fatti corrispondere a due fasi diverse della stessa frequenza: 0° e 180° . Precisamente:

livello 1 \Rightarrow fase φ_z

livello 0 \Rightarrow fase φ_a



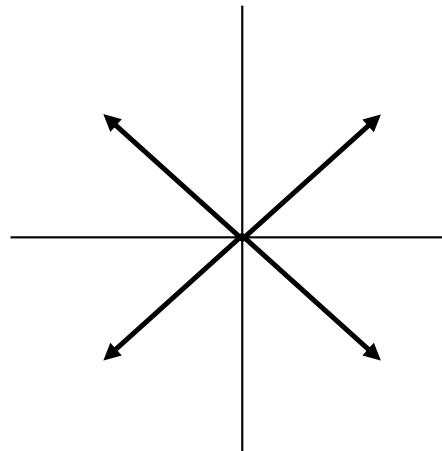
- Si ottiene una migliore **efficienza del canale** modulando in modo che ogni simbolo trasporti piu' bit
- La modulazione polifase si realizza effettuando una codifica preliminare dei bit provenienti dal terminale, raggruppandoli in parole di n bit e facendo corrispondere a ciascuna delle 2^n parole possibili una determinata fase della frequenza portante.

QPSK

QPSK: Quadrature PSK (4 fasi)

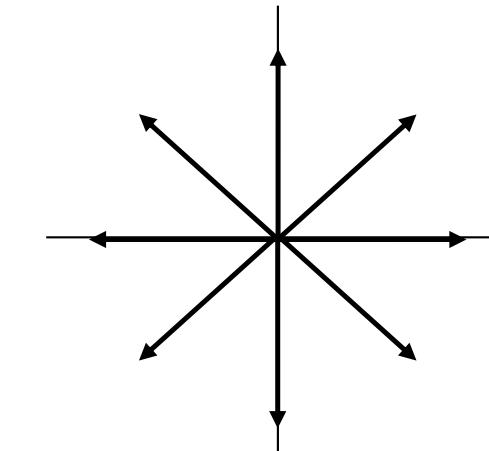
2 bit = 2400 bit/s

00	45
10	135
11	225
01	315



3 bit = 4800 bit/s

001	0
000	45
010	90
011	135
111	180
110	225
100	270
101	315

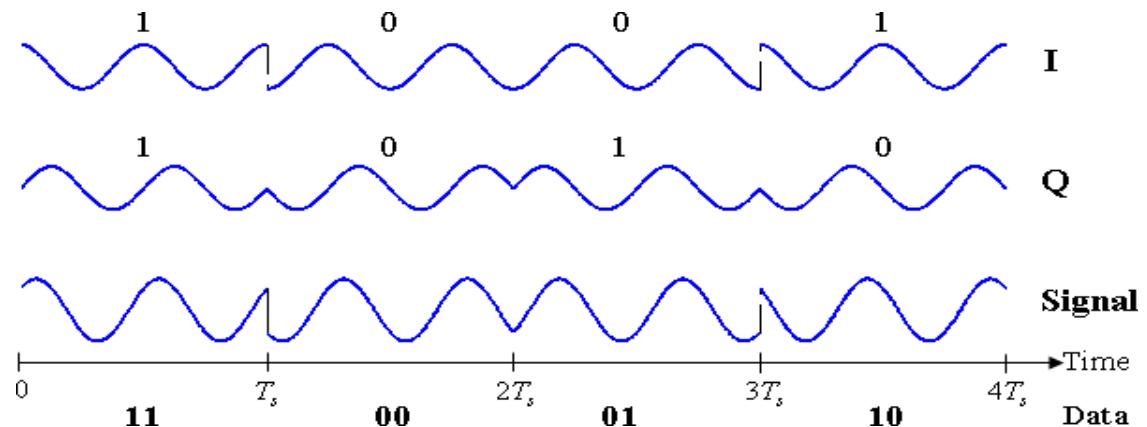
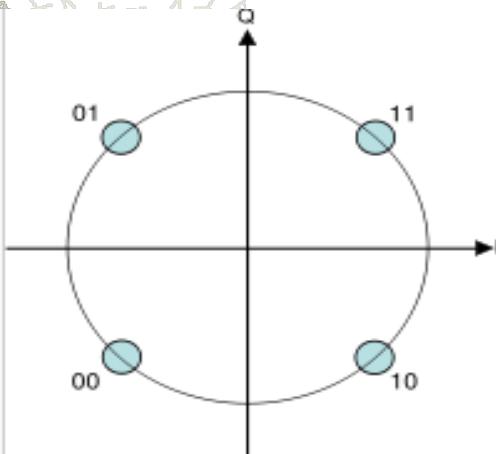


Nella modulazione **QPSK** (Quadrature PSK) si utilizzano **quattro angoli di fase** per trasmettere due bit per simbolo; ad esempio:

Non si può aumentare indefinitamente il numero di bit per campione perché entrano in gioco fattori di distorsione o rotazione del segnale, detto anche *phase jitter*.

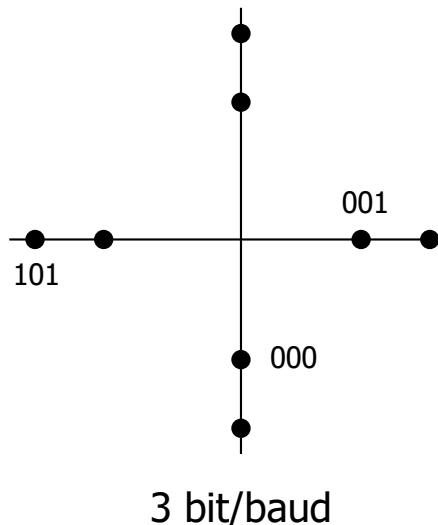
Differential-QPSK

Invece di associare ad ogni coppia di bit una coppia di valori di fase assoluti (es. 11 corrisponde a $[+45^\circ, +45^\circ]$) si modula la fase in funzione delle variazioni dei bit '00', '01', '11', '10' con 0° , 90° , 180° , -90° (es. da 00 a 01 si varia la fase di 90°)

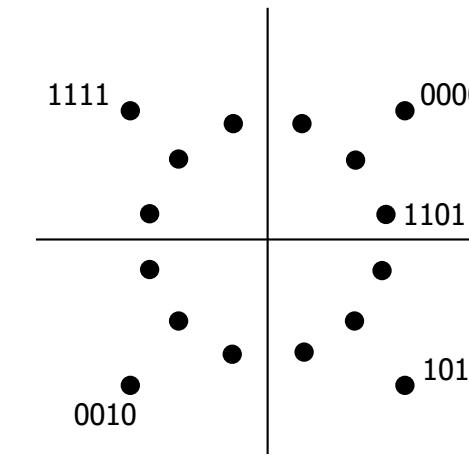


Quadrature Amplitude Modulation

Per aumentare la velocità di trasmissione, mantenendo costante la velocità di modulazione, invece di trasmettere solo due valori angolari, 0° e 180° , si trasmette un maggior numero di angoli diversi fra loro, e per consentire una più facile demodulazione in ricezione, si fa variare anche l'ampiezza del segnale modulato dando luogo così alla modulazione QAM. Le più moderne modulazioni numeriche, quelle quindi che determinano grandi velocità di trasmissione, sono quindi modulazioni di fase e di ampiezza. Quindi la codifica dei bit non viene solo affidata alla variazione di fase, ma anche a quella di ampiezza.

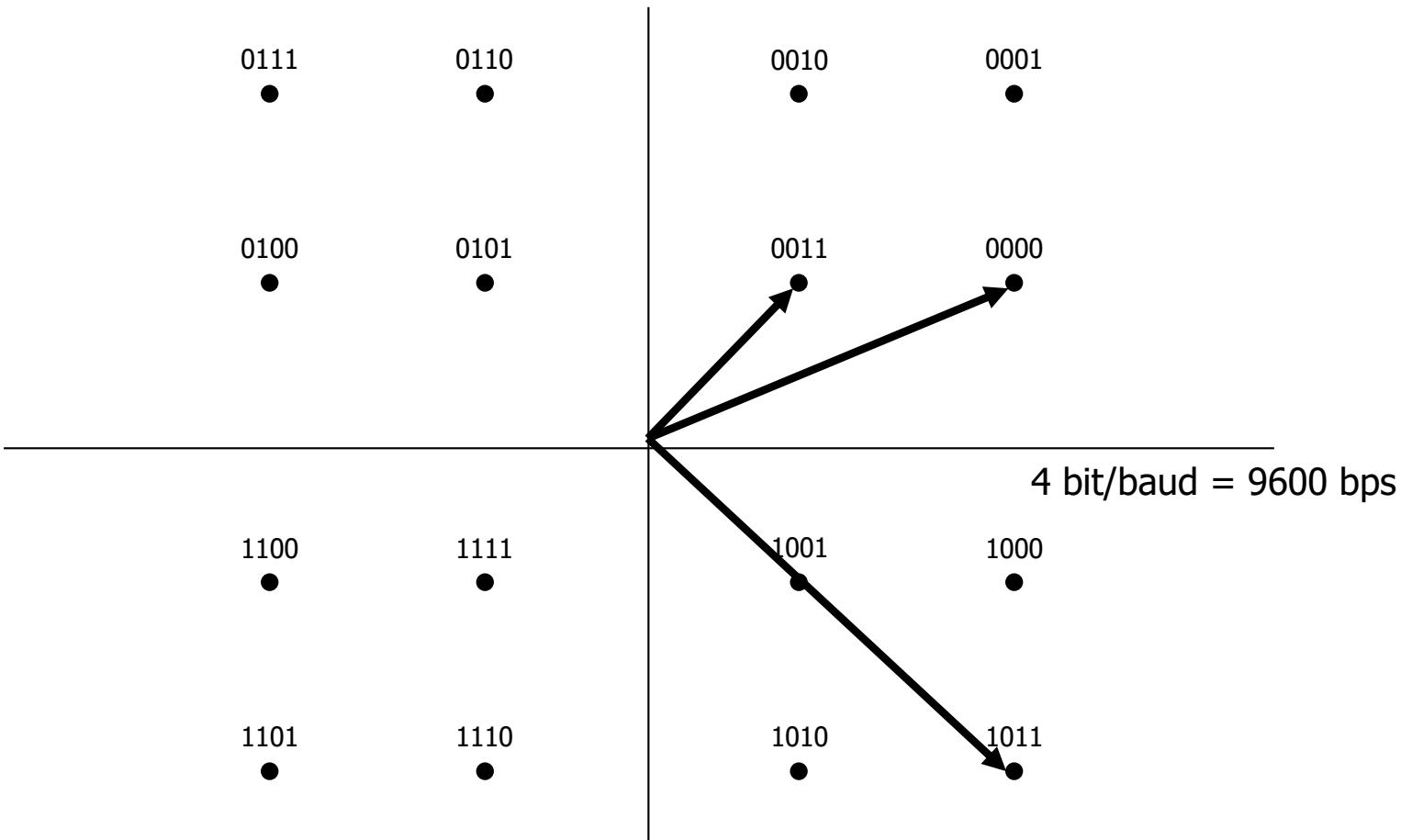


3 bit/baud



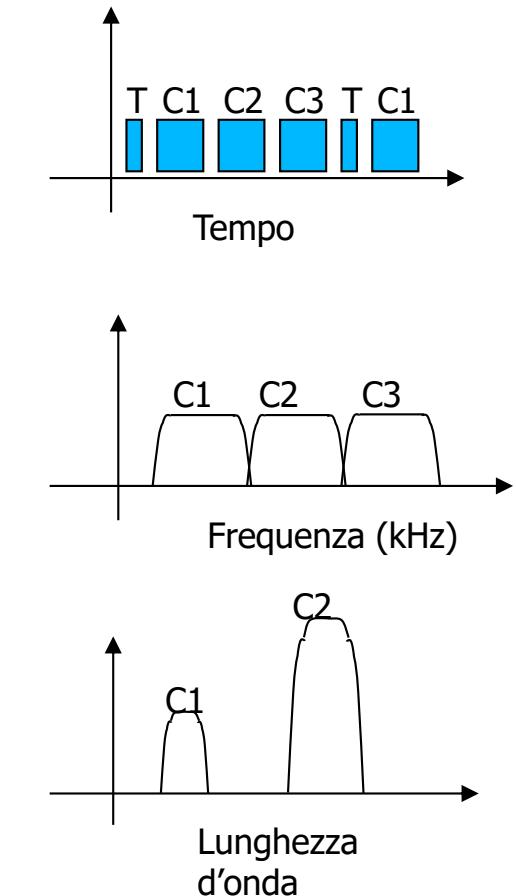
4 bit/baud

Esempio di costellazione QAM



Tecniche di Multiplazione

- A *divisione di tempo (TDM)*
 - modalità deterministica (banda dedicata e ritardo fisso)
 - modalità statistica (banda e delay variabili e migliore sfruttamento del mezzo)
- A *divisione di spazio (SDM)*
 - Dati inviati su media fisicamente separati
- A *divisione di frequenza (FDM e WDM)*
 - Usa differenti frequenze o lunghezze d'onda per differenziare i dati trasmessi
- Per *codifica (CDM)*
 - La differenziazione dei dati trasportati è ottenuta utilizzando diversi tipi di codifica

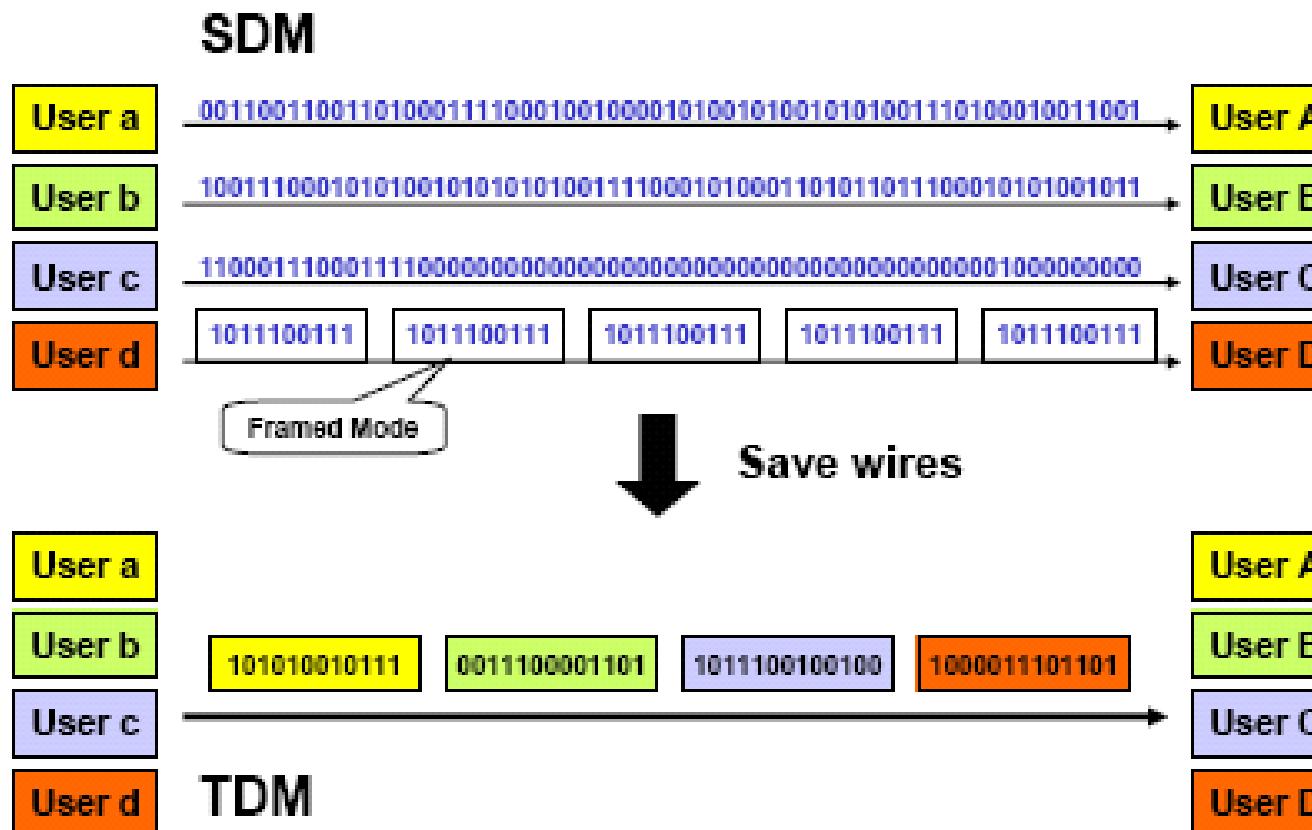


SDM vs TDM

SDM: Una connessione fisica per trasmissione

TDM: La stessa connessione utilizzata per 4 trasmissioni distinti

- Richiede tramatura dei flussi e uso di Multiplexer e demultiplexer
 - Meno efficiente ma ottimizza l'uso dei mezzi trasmissivi



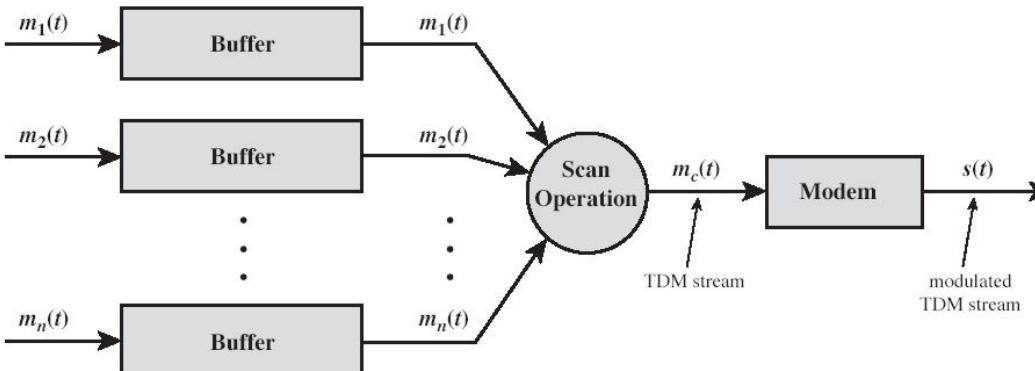
TDM (Time Division Multiplexing)

- Il multiplexing a divisione di tempo è utilizzato quando si dispone di un **canale digitale** capace di un **elevato tasso** di trasmissione dati in cui poter trasmettere **contemporaneamente** un insieme di comunicazioni a tasso **inferiore**
- Si **mischiano** i dati delle diverse comunicazioni, **inframezzando i bit** delle diverse trasmissioni
- Di fatto si **divide** la disponibilità del canale in **periodi temporali**, e si dedicano **a turno** i diversi periodi a diversi flussi trasmittivi

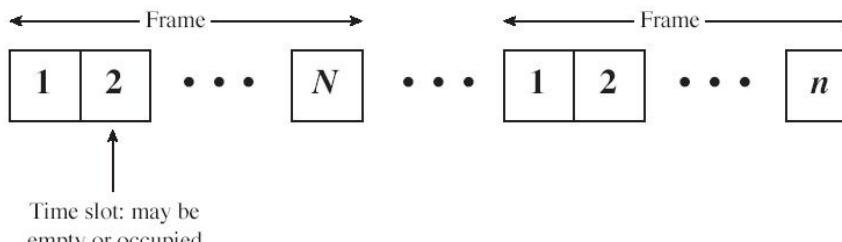
Slot e frame

- Ogni intervallo temporale si chiama **slot** e può contenere **uno o più bit** relativi ad un flusso indipendente
- Il flusso dei dati è organizzato in trame (**frame**)
- Una trama è l'insieme di tutti gli **slot temporali** utilizzati ad una specifica frequenza
- Anche in questo caso il flusso relativo ad un singolo timeslot è detto **canale**

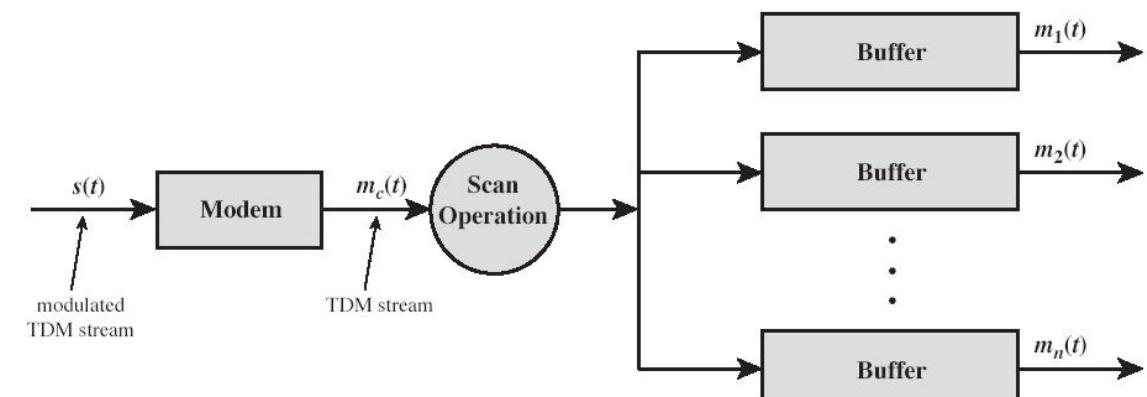
Schema del TDM



(a) Transmitter



(b) TDM Frames



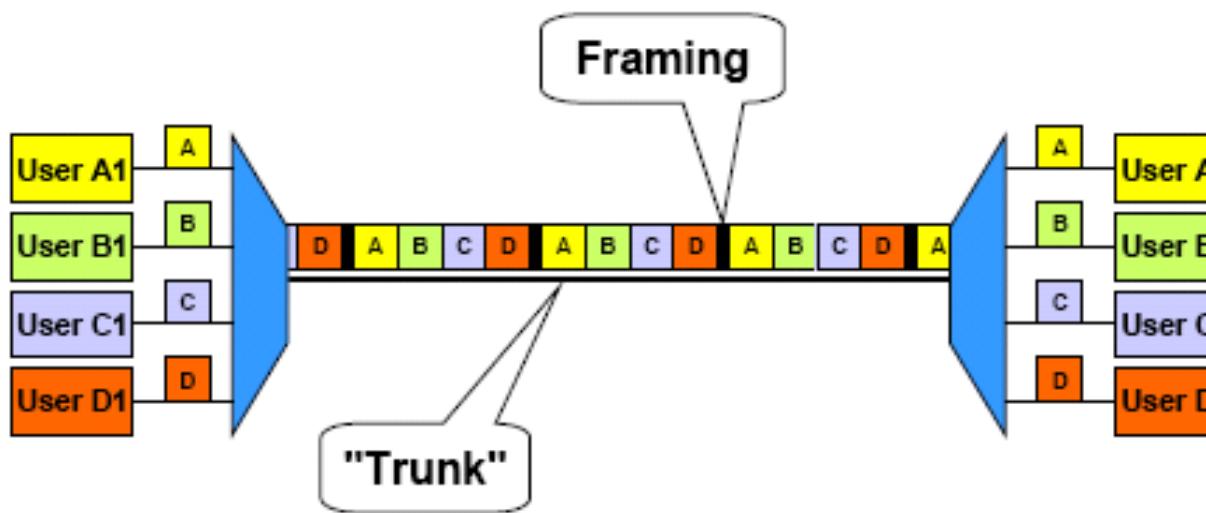
(c) Receiver

TDM deterministico e statistico

- Esistono essenzialmente due metodi di multiplazione
 - Deterministico: ogni canale di comunicazione è identificato dalla sua posizione in termini di slot temporali all'interno della trama. Questa correlazione fissa fra il canale di comunicazione e il relativo timeslot è il principale svantaggio del TDM deterministico: se il canale non è usato comunque occupa il timeslot inviando un pattern idle
 - Statistico: non esiste correlazione fra canale di comunicazione e relativo timeslot. La capacità del mezzo è distribuita statisticamente fra gli utenti che ne concorrono all'uso. E' necessario uno schema separato di tramatura e indirizzamento per garantire le associazioni dinamiche: se un canale non è usato gli altri canali possono disporre della sua capacità trasmissiva.

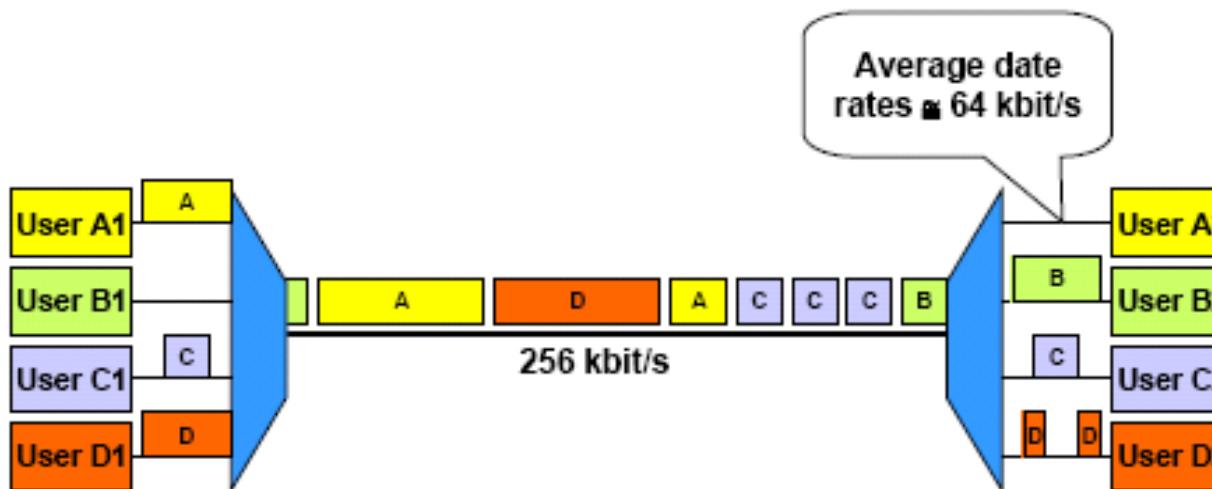
TDM deterministico

- Le trame hanno la stessa taglia - Ordinamento garantito
 - Non sono necessari schemi di indirizzamento né di bufferizzazione
 - Inerentemente connection oriented e protocol transparent
 - Cattiva utilizzazione del mezzo trasmissivo

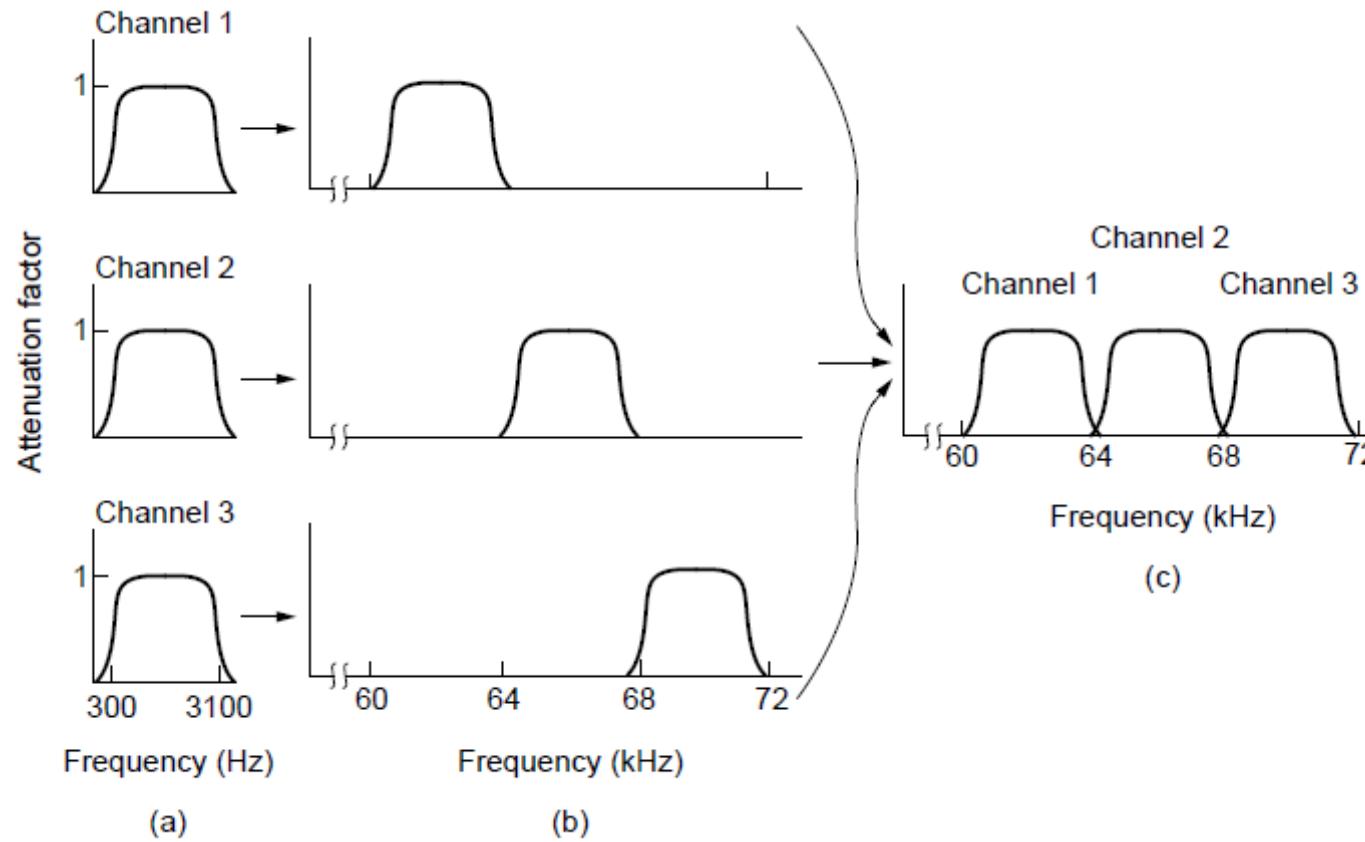


TDM statistico – Multiplazione Statistica

- Trame di taglia differente
- Necessita di uno schema di indirizzamento e di bufferizzazione
- Dipendente dal protocollo
- Ottimo utilizzo del mezzo trmissivo



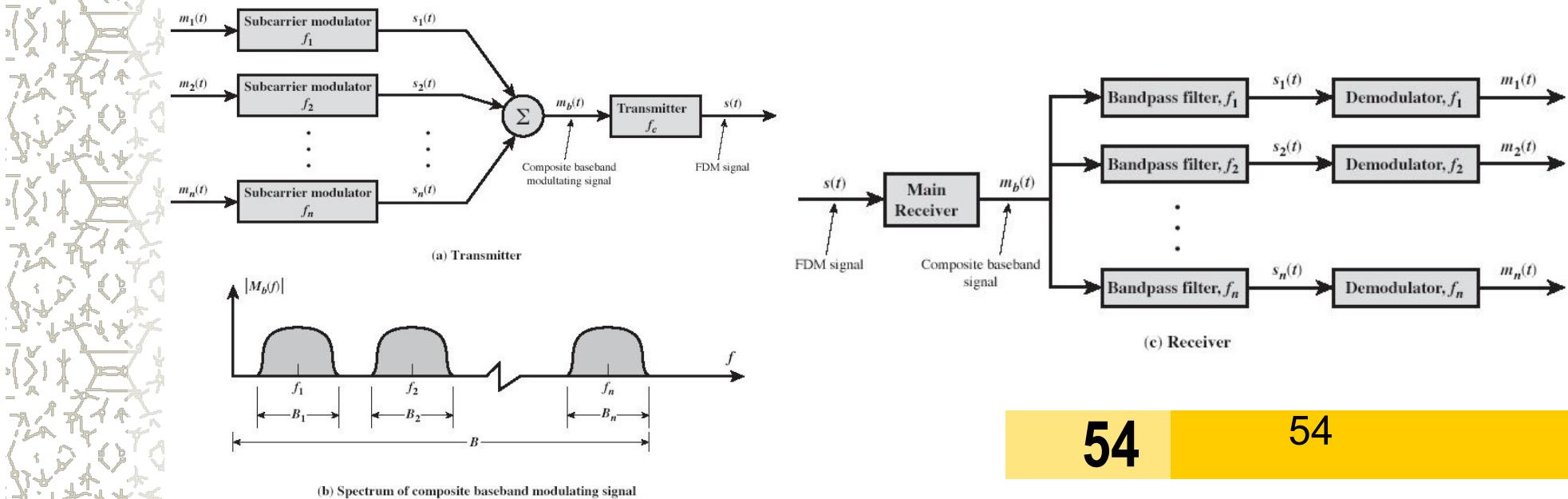
Frequency Division Multiplexing



- Usa la trasmissione in banda passante, dividendo lo spettro in bande di frequenza separate, una per canale
- Nessuna coppia di canali può condividere la stessa porzione di spettro

Frequency Division Multiplexing

- L'effetto della **modulazione** su un segnale sinusoidale a frequenza f si traduce nella generazione di un segnale il cui spettro ha la **stessa** forma dello spettro del segnale modulante ma **traslato** attorno alla frequenza f della portante
- In presenza di una serie di segnali ciascuno con banda **B**, e di un mezzo che ha una capacità di banda limitata dai valori f_1 e f_2 ($f_2-f_1 \gg B$), possiamo utilizzare ciascun segnale per modulare segnali sinusoidali alle frequenze f_1+B , f_1+2B , f_1+3B , etc.
- I segnali modulati occuperanno **porzioni distinte** entro la banda trasmisiva del mezzo, e potranno essere trasmessi **contemporaneamente** senza interferire.
- In ricezione, opportune operazioni di demodulazione e filtraggio permetteranno di **separare** i diversi traffici.



Multi-Carrier Modulation

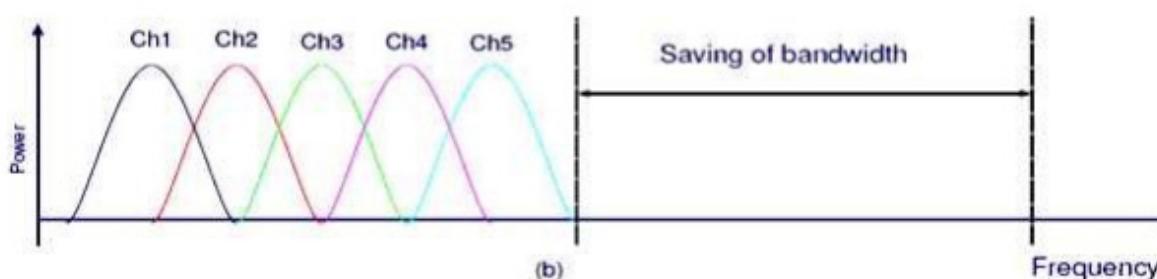
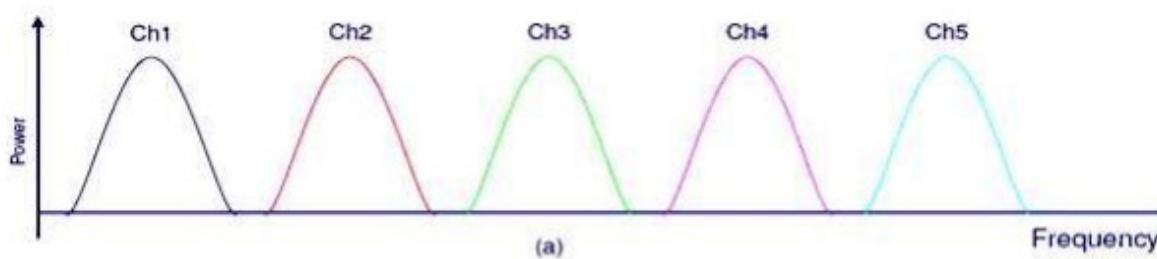
- Nella trasmissione parallela di dati, la banda di frequenza disponibile è generalmente suddivisa in molti canali
- Allo scopo di eliminare l'interferenza intercanale, gli spettri dei sottocanali non devono sovrapporsi: questo però non consente un utilizzo efficiente della banda disponibile
- La sovrapposizione spettrale può essere permessa a patto di sfruttare relazioni di ortogonalità tra i canali
- Nella modulazione multi-portante (MCM) il flusso di dati è diviso in più sottoflussi (substream), ognuno dei quali ha un bit rate molto più basso e ogni substream è usato per modulare una diversa portante (carrier).
- Utilizzando portanti ortogonali (OFDM) non si ha l'interferenza intercanale.

Ortogonal Frequency Division Multiplexing

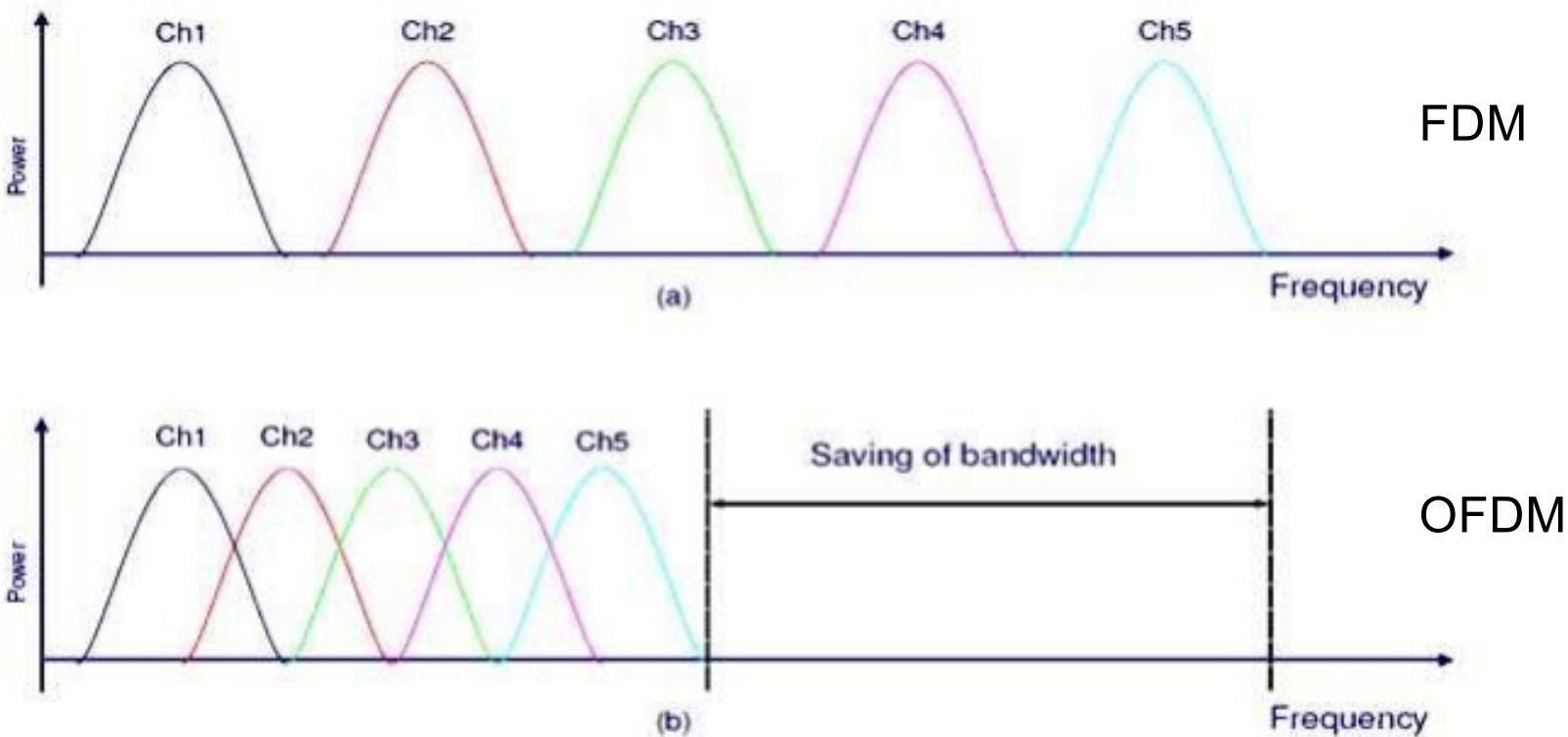
- Nelle tecniche di modulazione multiportante:

la trasmissione delle informazioni non avviene più attraverso un unico flusso supportato da una sola portante, bensì suddividendo il flusso dati ad elevata rate in appositi sottoflussi tutti paralleli tra loro (in numero pari a M), detti anche sottocanali, ciascuno dei quali con una propria specifica sottoportante.

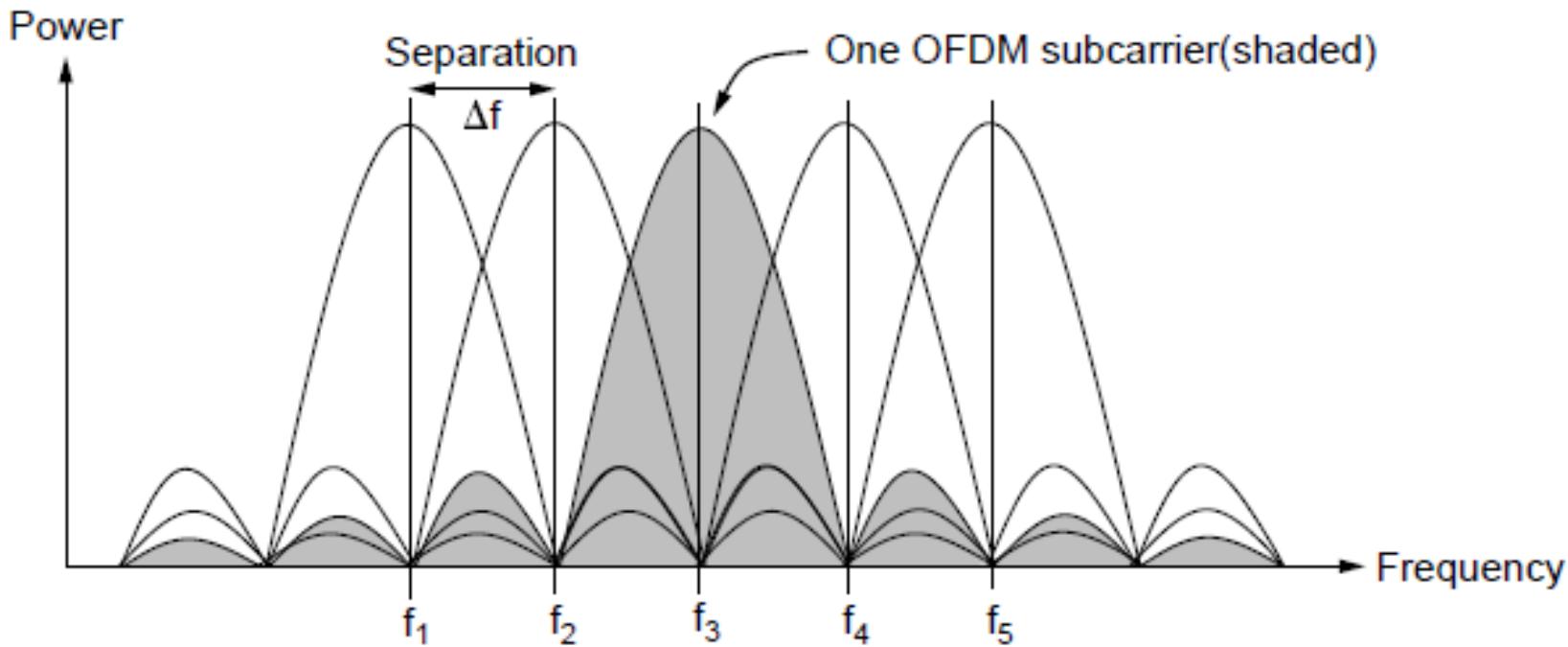
- La velocità di trasmissione dei dati di un singolo sottocanale risulta inferiore, rispetto al caso monoportante, e la banda necessaria è minore rispetto alla banda di coerenza del canale.



Orthogonal Frequency Division Multiplexing



Ortogonal Frequency Division Multiplexing



- modulazione a multi-portante, che utilizza un numero elevato di sottoportanti tra loro ortogonali.
- Ciascuna portante è modulata con una modulazione di tipo convenzionale (ad esempio una QAM) con un basso symbol rate.
- Gli algoritmi OFDM sono generati usando la trasformata di Fourier veloce.

Ortogonal Frequency Division Multiplexing

- E' possibile trasmettere su più canali in parallelo usando sottoportanti ortogonali caratterizzate da un rate inferiore
- Si sovrappongono multiple frequenze nello stesso range
- Il Massimo di una sottoportante ha luogo a una frequenza dove tutte le altre sottoportanti assumono un valore nullo

Aampiezza

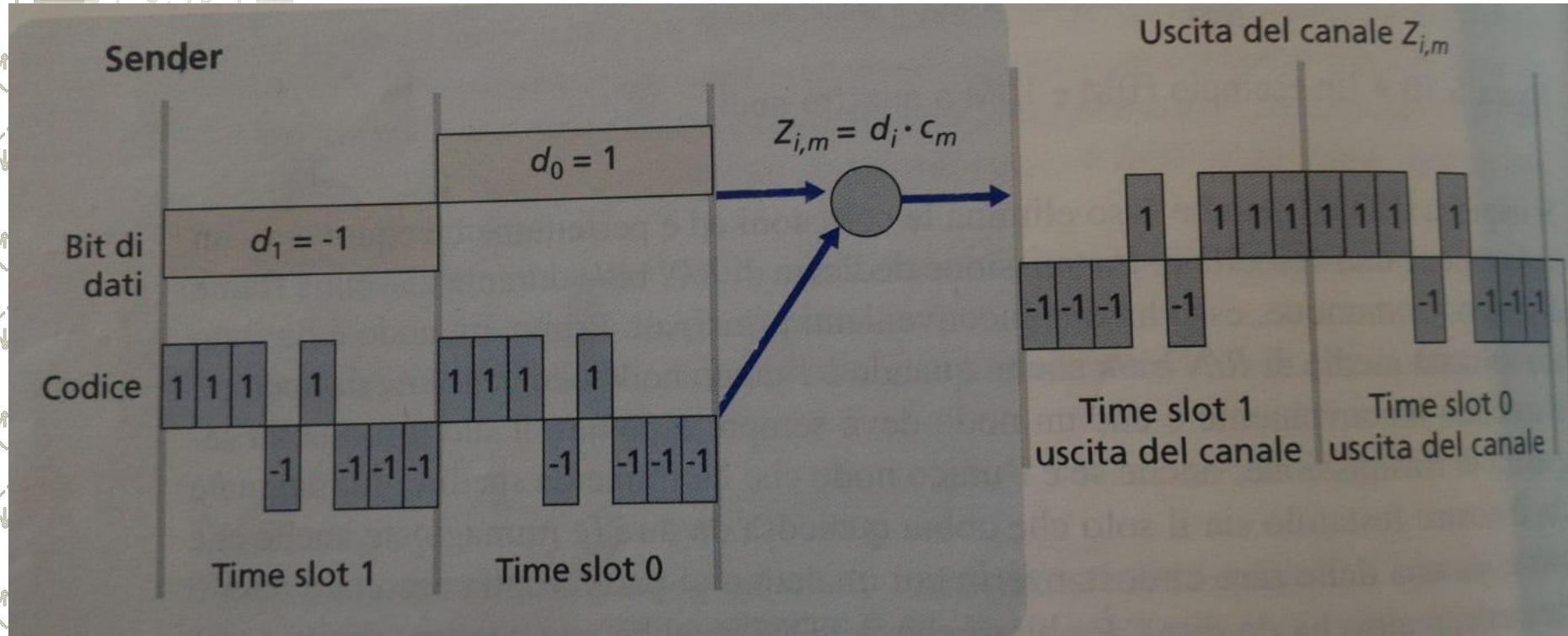
sottoportante: $\frac{\sin(x)}{x}$

f

Code Division Multiplexing (1)

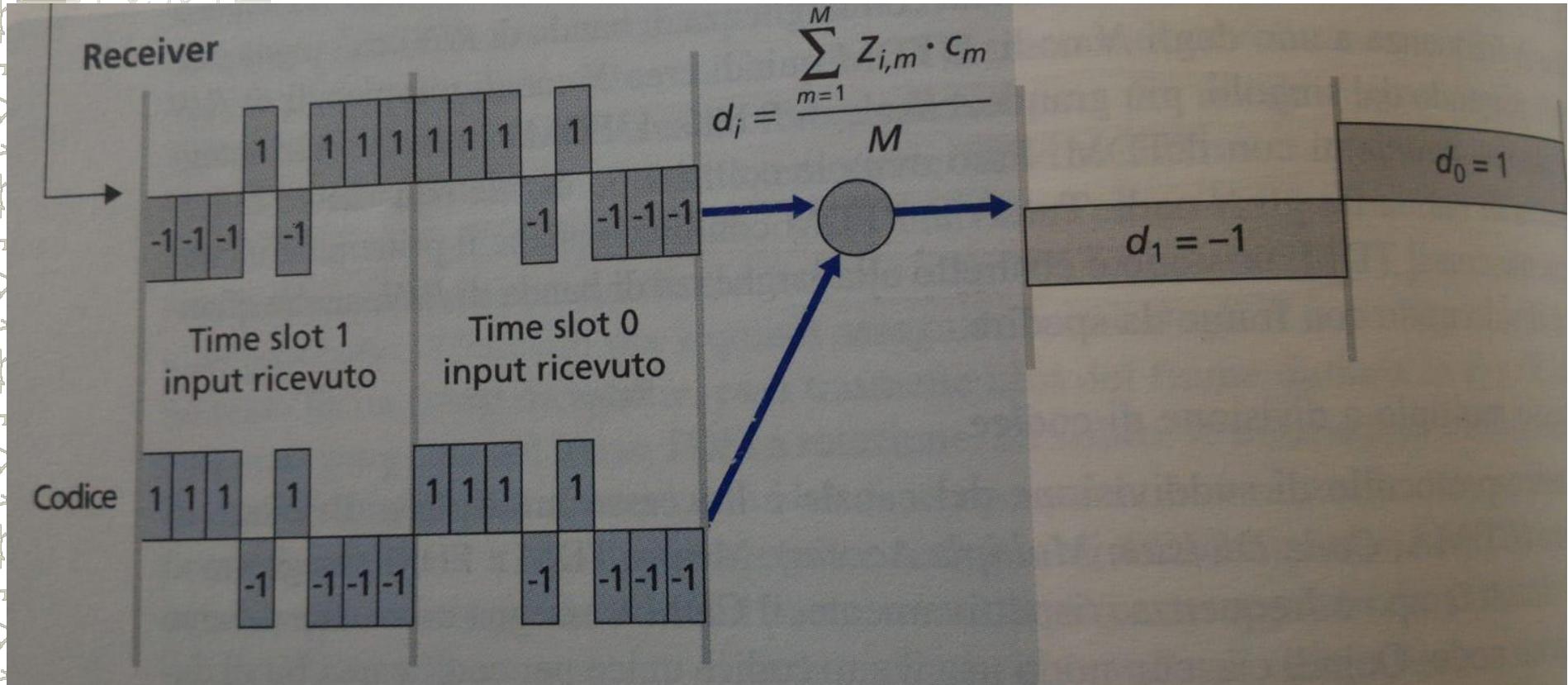
- La moltiplicazione è realizzata moltiplicando in trasmissione l'informazione binaria generata da una sorgente per un'opportuna parola di codice detta chip
- La sequenza $s(t)$ in uscita dal moltiplicatore sarà successivamente modulata e infine trasmessa sul canale
- In ricezione il segnale ricevuto $r(t)$ dal ricevitore sarà costituito dalla somma vettoriale (comprendente modulo e fase) di tutti i segnali trasmessi dalle singole sorgenti di informazione, con in più un eventuale termine dovuto al rumore termico.

Code Division Multiplexing (2)



Trasmissione

Code Division Multiplexing (3)



Ricezione

Code Division Multiplexing (4)

- Se i chip delle sorgenti sono ortogonali tra loro, l'estrazione dell'informazione associata a ciascuna sorgente potrà essere fatta in maniera complementare alla trasmissione moltiplicando il segnale ricevuto con il particolare codice associato alla sorgente che si vuole estrarre e integrando successivamente il segnale ottenuto in un intervallo di tempo pari alla durata del bit di informazione.
- Ciò permette di ottenere un segnale che è dato dalla somma di un segnale di ampiezza dominante, (o utile, associato alla sorgente da estrarre), e di un segnale di ampiezza minore, costituito da una combinazione fra rumore termico e quelli associati alle altre sorgenti.

Code Division Multiplexing (5)

Il codificatore CDM è costituito principalmente da due parti:

- la prima che divide la sequenza di bit in M repliche (ad esempio, se la sequenza era $+1 +1 -1$, ora sarà M volte $+1$, M volte $+1$ ecc..),
- la seconda parte che moltiplica ogni replica generata per un termine $d[m]$, chiamato CODICE DI CANALIZZAZIONE di lunghezza M .

Ogni bit del codice di canalizzazione (ad es + o - 1) viene moltiplicato con le repliche della sequenza iniziale in modo da generare un codice in base alla sequenza di partenza. In ricezione, quindi, il segnale potrà essere decodificato soltanto da chi avrà il codice di canalizzazione esatto.

$$A = (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$$

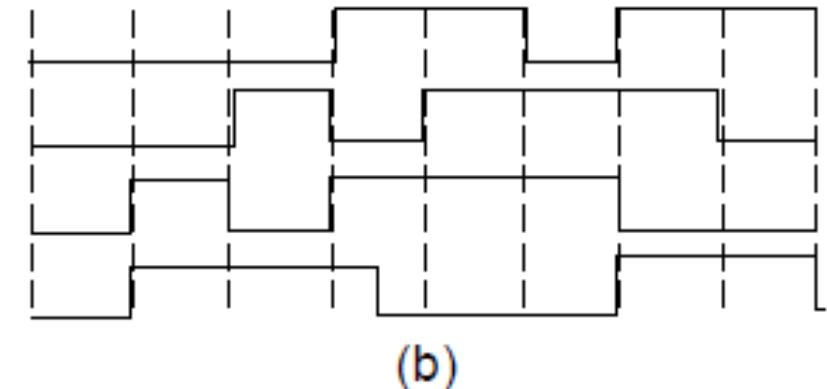
$$B = (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$$

$$C = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$$

$$D = (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)$$

(a)

Chip sequences for four stations



Signals sequences representation

Code Division Multiplexing (6)

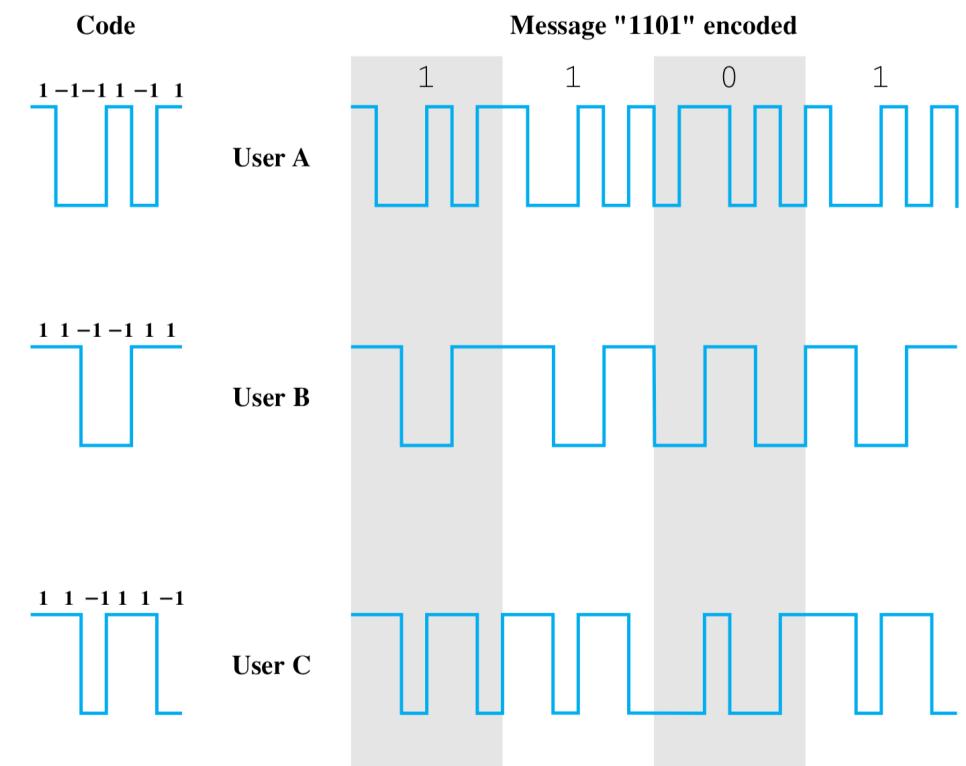
- D = bit rate del segnale da trasmettere
- Rappresentiamo ogni bit in k *chips*
 - I Chips sono pattern fissi specificati dall'utente
- Chipping data rate del nuovo canale = kD
- Se $k=6$ e rappresentiamo i chipping codes come sequenze di 1 e -1
 - Per un bit '1' bit, A invia il pattern codificato
 - $\langle c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6 \rangle$
 - Per un bit '0' bit, A invia il suo complemento
 - $\langle -c_1, -c_2, -c_3, -c_4, -c_5, -c_6 \rangle$
- Il ricevitore conosce il codice dell'inviatore e può decodificare con:

$$S_u(d) = (d_1 \times c_1 + d_2 \times c_2 + d_3 \times c_3 + d_4 \times c_4 + d_5 \times c_5 + d_6 \times c_6) / k$$

- $\langle d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6 \rangle$ = chip pattern ricevuto
- $\langle c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6 \rangle$ = codice di chipping dell'inviatore

Code Division Multiplexing (7)

- Chipping code User A = $\langle 1, -1, -1, 1, -1, 1 \rangle$
 - Per inviare
 - un bit 1 = $\langle 1, -1, -1, 1, -1, 1 \rangle$
 - un bit 0 = $\langle -1, 1, 1, -1, 1, -1 \rangle$ (complemento)
- Chipping code User B = $\langle 1, 1, -1, -1, 1, 1 \rangle$
 - Per inviare
 - un bit 1 = $\langle 1, 1, -1, -1, 1, 1 \rangle$
- Chipping code User C = $\langle 1, 1, -1, 1, 1, -1 \rangle$
 - Per inviare
 - un bit 1 = $\langle 1, 1, -1, 1, 1, -1 \rangle$



Code Division Multiplexing (8)

- Se A invia un bit 1 allora d vale $\langle 1, -1, -1, 1, -1, 1 \rangle$ e il calcolo precedente $S_u(d)$ con $u=A$ (usando il chipping code di A) diventa:

$$(1 * 1 + (-1) * (-1) + (-1) * (-1) + 1 * 1 + (-1) * (-1) + 1 * 1) / 6 = 6/6 = 1$$

- Se A invia un bit 0 che corrisponde a $d = \langle -1, 1, 1, -1, 1, -1 \rangle$, otteniamo, sempre utilizzando il chipping code di A:

$$((-1) * 1 + 1 * (-1) + 1 * (-1) + (-1) * 1 + 1 * (-1) + (-1) * 1) / 6 = -6/6 = -1$$

- Nota che $-1 \leq S_u(d) \leq 1$
- I soli valori di d che risultano nei valori estremi 1 e -1 sono ricducibili al codice usato per A.
 - se SA produce +1, abbiamo ricevuto un bit 1 da A
 - se SA produce -1, abbiamo ricevuto un bit 0 da A
 - Altrimenti qualche altro canale sta inviando informazioni oppure c'è un errore.

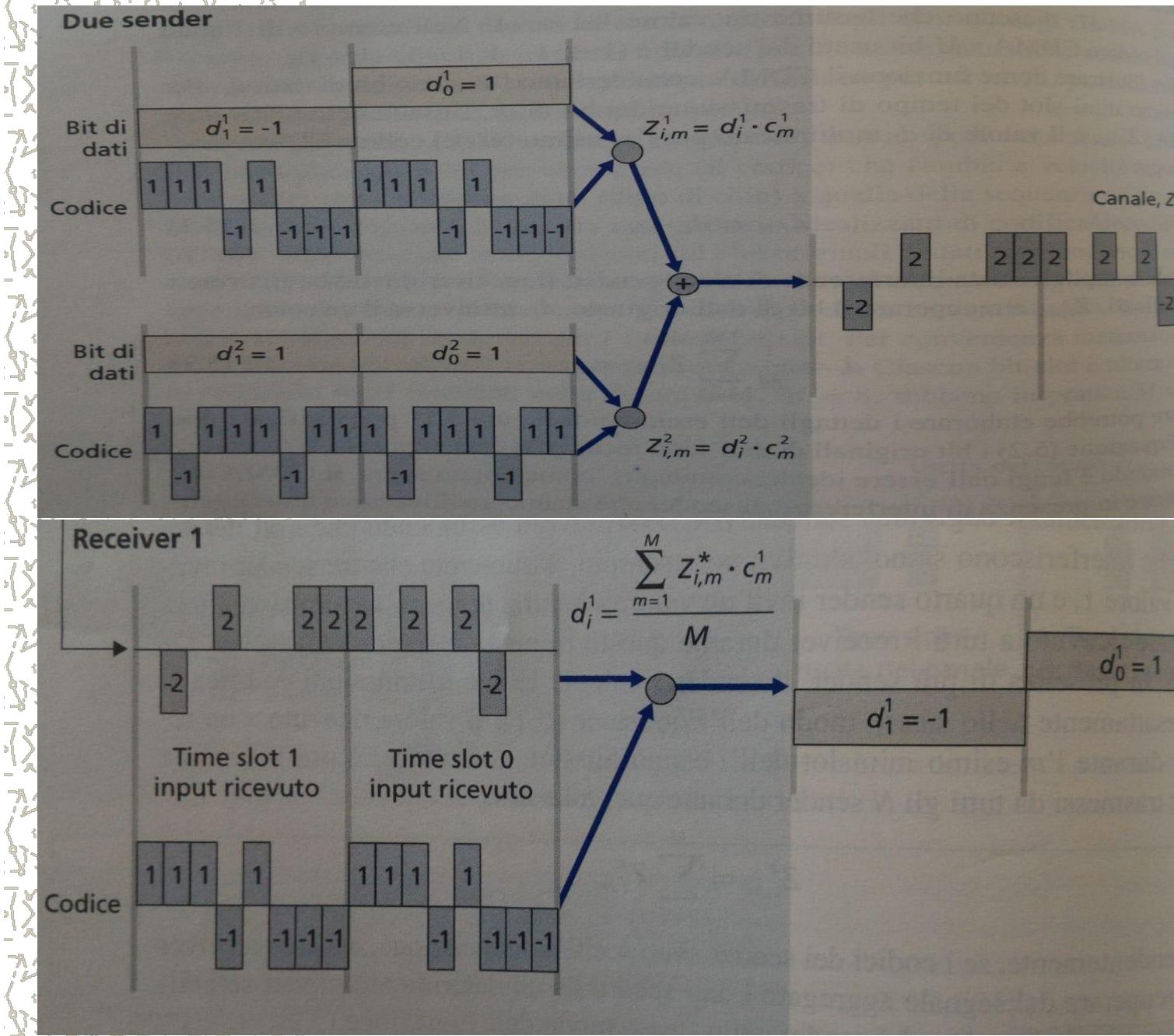
- Se B invia un bit 1 allora $d = \langle 1, 1, -1, -1, 1, 1 \rangle$. Usando il chipping code di A si ottiene:

$$(1 * 1 + 1 * (-1) + (-1) * (-1) + (-1) * 1 + 1 * (-1) + 1 * 1) / 6 = 0$$

- Il segnale inviato da B non viene percepito da A.
- Se B invia un bit 0, analogamente avremo un valore 0 se usiamo il codice di A
- I codici di A e B sono **ortogonali**, quindi hanno la seguente proprietà:

$$S_A(d_B) = S_B(d_A) = 0$$

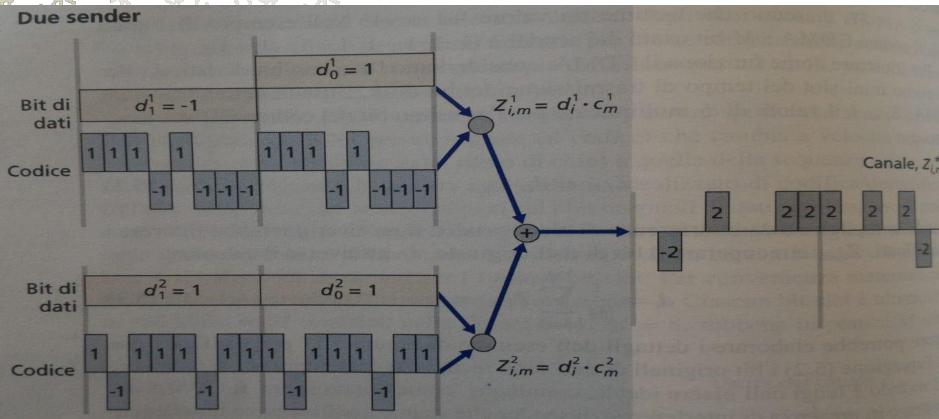
Code Division Multiplexing (9)



Due sender

Ricezione del
sender 1

Code Division Multiplexing (10)

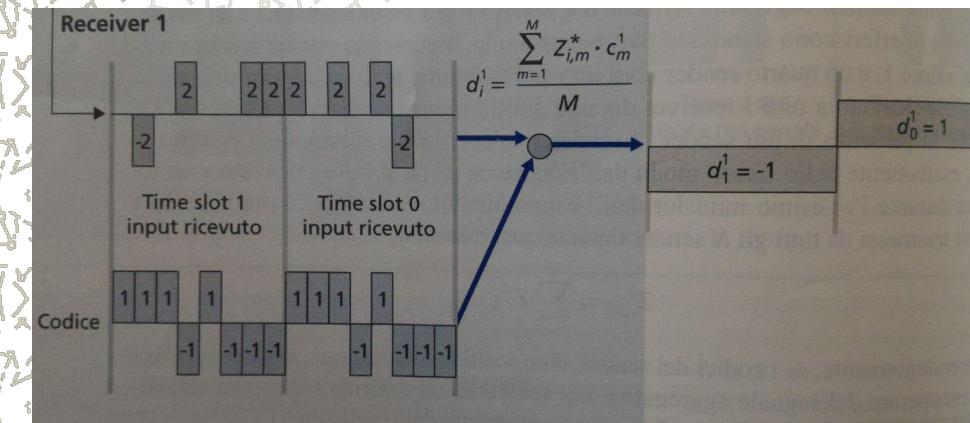


Sender 1; $d = -1 \rightarrow$	-1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1
Chip 1;	\rightarrow 1 1 1 -1 1 -1 -1 -1
Z1	\rightarrow -1 -1 -1 1 -1 1 1 1 1

Sender 2; $d = 1 \rightarrow$	1 1 1 1 1 1 1 1 1
Chip 2;	\rightarrow 1 -1 1 1 1 -1 1 1
Z2	\rightarrow 1 -1 1 1 1 -1 1 1 1

Z1; $d = -1 \rightarrow$	-1 -1 -1 1 -1 1 1 1 1
Z2; $d = 1 \rightarrow$	1 -1 1 1 1 -1 1 1 1
Tot.: \rightarrow	0 -2 0 2 0 0 2 2 2

Ricez.;	\rightarrow 0 -2 0 2 0 0 2 2
Chip 1;	\rightarrow 1 1 1 -1 1 -1 -1 -1
$d:$	\rightarrow 0 -2 0 -2 0 0 -2 -2
Bit ricevuto	$\rightarrow -8/8 = -1$



Mezzi trasmissivi

Linee

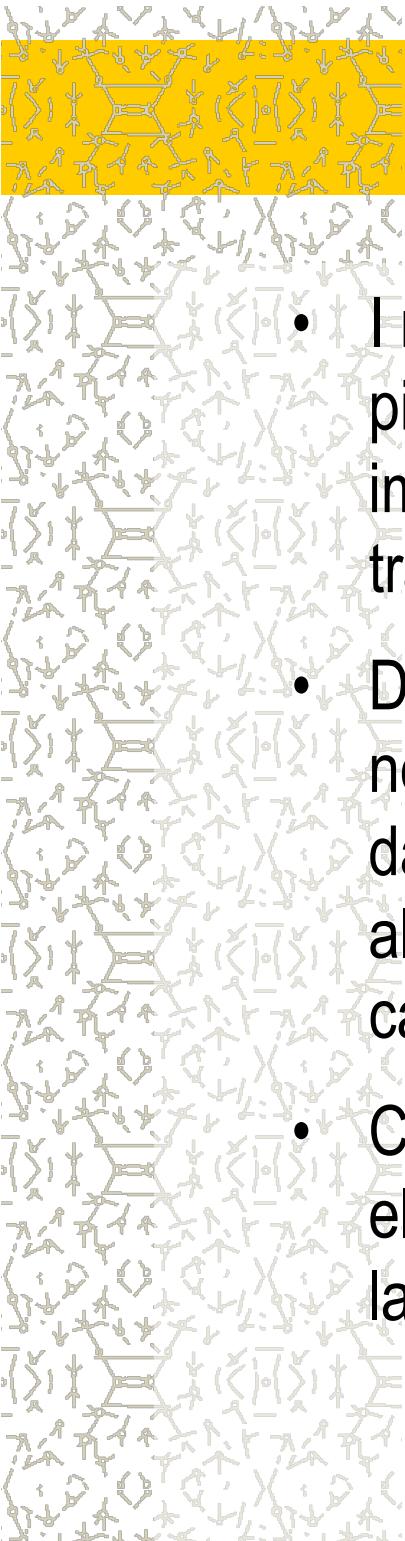
- Rame
- Doppini
- Cavi coassiali
- Fibre ottiche

Wireless

- Suoni
- Luce
- Raggi infrarossi
- Radiofrequenza
- Microonde

I mezzi trmissivi

- E' possibile classificare i mezzi fisici di trasmissione dei segnali in due categorie
 - Mezzi guidati: elettrici, ottici
 - Mezzi non guidati: onde radio, laser via etere
- Ogni mezzo è tipicamente caratterizzato da:
 - Larghezza di banda
 - Delay
 - Costo
 - Facilità di installazione e manutenzione



I mezzi trasmittivi elettrici

- I mezzi trasmittivi elettrici rappresentano ancora oggi il mezzo più diffuso, e nell'ambito delle reti locali assumono fondamentale importanza soprattutto per la realizzazione di infrastrutture per la trasmissione di segnali all'interno degli edifici.
- Dovendo trasportare il segnale in forma di energia elettrica, è necessario che le caratteristiche elettriche del mezzo siano tali da rendere massima la trasmissione dell'energia da un estremo all'altro e minima la dissipazione in altre forme (ad esempio calore, irradiazione elettromagnetica).
- Con l'attuale tecnologia è possibile realizzare mezzi trasmittivi elettrici di caratteristiche sufficientemente elevate da permettere la trasmissione dei dati a velocità superiori a 1000 Mb/s.

Compromessi di realizzazione

- Un mezzo trasmissivo elettrico ***ideale***, che trasporti tutta l'energia del segnale trasmesso senza attenuazione né distorsione, **non esiste**.
- Un mezzo trasmissivo elettrico ***ottimale*** è caratterizzato da bassa resistenza, bassa capacità e bassa induttanza, cioè è un mezzo poco dispersivo e poco dissipativo.
- In tale mezzo **quasi tutta la potenza** inviata sul canale dal trasmettitore **arriva al ricevitore** ed il segnale non viene distorto.



Interferenza e schermatura

- È in continua crescita l'attenzione al problema dei disturbi elettromagnetici (EMI), dei quali le reti locali sono al contempo vittime e sorgenti.
- Con la presenza di schermi e con una corretta messa a terra si possono ridurre drasticamente la sensibilità e l'emissione di disturbi elettromagnetici, e possono migliorare anche notevolmente le caratteristiche elettriche di un cavo.

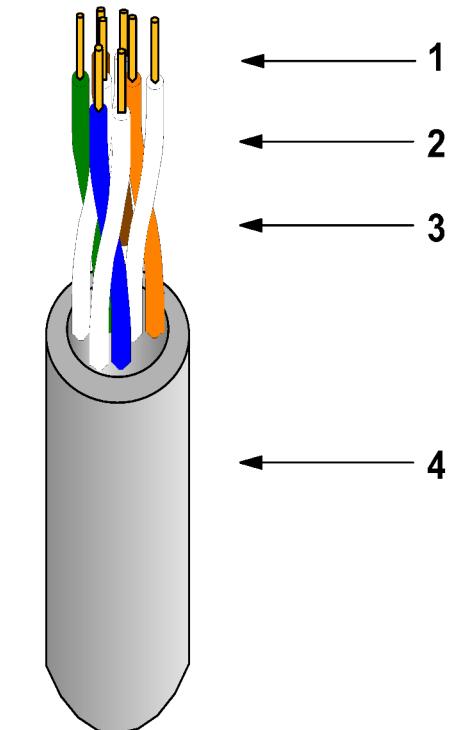
La schermatura

Ne esistono numerosi tipi, i più utilizzati nelle LAN sono:

- "foglio" (*foil*): si tratta normalmente di un foglio di alluminio molto sottile (da 0.05 mm a 0.2 mm) che avvolge il cavo immediatamente sotto alla guaina di protezione esterna.
 - Poiché l'alluminio presenta elevata resistenza elettrica rispetto al rame, e, a spessori così ridotti, una notevole fragilità, lungo il foglio scorre un filo di rame nudo, detto *drain*, che garantisce continuità elettrica anche in caso di eventuali crepe; tale filo è utilizzato per il collegamento di terra;
- "calza" (*braid*): si tratta di una treccia di fili di rame che avvolgono il cavo in due direzioni opposte.
 - Presenta una conducibilità molto migliore del foglio di alluminio, ma la copertura non è completa, in quanto in corrispondenza degli intrecci rimangono inevitabilmente dei fori nello schermo.
- I migliori risultati si ottengono dalla combinazione di più schermi diversi

Il doppino

- Il doppino è il mezzo trasmittivo classico della telefonia e consiste in due fili di rame ricoperti da una guaina isolante e ritorti (o "binati" o "twisted") detti comunemente "coppia" (*pair*, in inglese, da cui *twisted pair* o *TP*).
- Il tipo di doppino più usato attualmente ha un diametro di 24 AWG e un'impedenza di 100 ohm.
- L'AWG (American Wire Gauge) è una scala a regressione geometrica usata per la sezione dei conduttori con 39 valori compresi nell'intervallo da 0 gauge (0.460 pollici di diametro) a 36 gauge (0.005 pollici di diametro);



(a)



(b)

Diafonia

- La diafonia e' un fenomeno di **accoppiamento elettrico** tra mezzi trasmissivi vicini **non isolati** adeguatamente
- Il segnale trasmesso su un cavo genera per **induttanza** un segnale corrispondente nel cavo vicino, che si **sovrappone** al segnale trasmesso in quest'ultimo
- Si puo' verificare anche nella trasmissione con mezzi **non guidati**, quando un segnale emesso da una **antenna** si **disperde** durante la propagazione nell'aria; la parte dispersa puo' guingere in prossimita' di **un'altra antenna**

Il doppino

- La binatura serve a ridurre i disturbi elettromagnetici
- Normalmente si utilizzano cavi con più coppie (4, 25, 50 e oltre) ed è allora necessario adottare **passi di binatura differenziati** da coppia a coppia per ridurre la diafonia tra le coppie.
- Infatti, se i passi di binatura fossero uguali, ogni conduttore di una coppia si troverebbe sistematicamente affiancato, ad ogni spira, con uno dei due conduttori dell'altra coppia, e quindi verrebbe a cadere l'ipotesi di perfetta simmetria della trasmissione bilanciata.
- I campi elettromagnetici generati dalle due coppie interferirebbero reciprocamente con un considerevole peggioramento della diafonia.

Il doppino

- I doppini sono nati come mezzo trasmissivo a banda molto ridotta (la banda fonica usata nella telefonia è inferiore a 4 KHz), ma negli ultimi anni hanno raggiunto prestazioni una volta raggiungibili soltanto con i cavi coassiali.
- I miglioramenti sono stati ottenuti realizzando nuovi materiali isolanti, curando la geometria delle coppie (anche tramite l'adozione di particolari guaine esterne), mettendo a punto sofisticati algoritmi di differenziazione dei passi di binatura e aumentando la sezione dei conduttori.
- Attualmente i doppini possono competere nelle medie velocità (**10 - 100 Mb/s**) e sulle brevi distanze (**inferiori a 100 m**) con le fibre ottiche.

Il doppino

Le caratteristiche che hanno tuttavia inciso maggiormente sulla diffusione del doppino sono:

- la compatibilità con la telefonia e
- la facilità di posa in opera

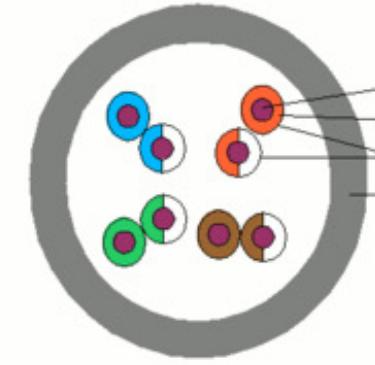
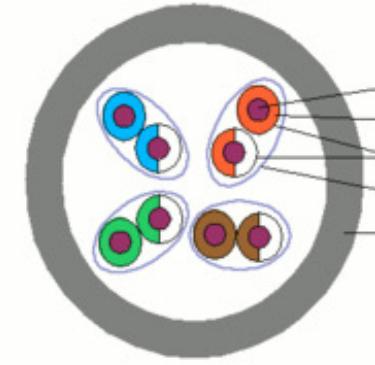
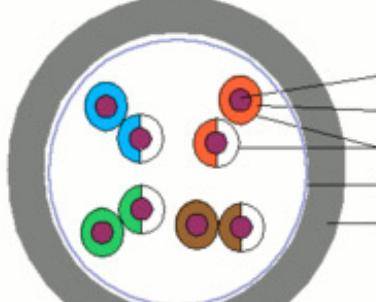
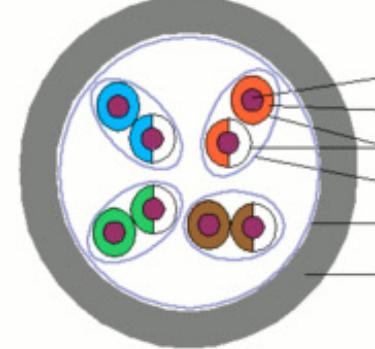
(la connettorizzazione a perforazione di isolante è semplice, veloce ed economica, anche se alle alte velocità rappresenta un elemento critico, in quanto è il punto in cui le coppie devono essere per forza sbinate).

Il doppino

Esistono varie versioni di doppino:

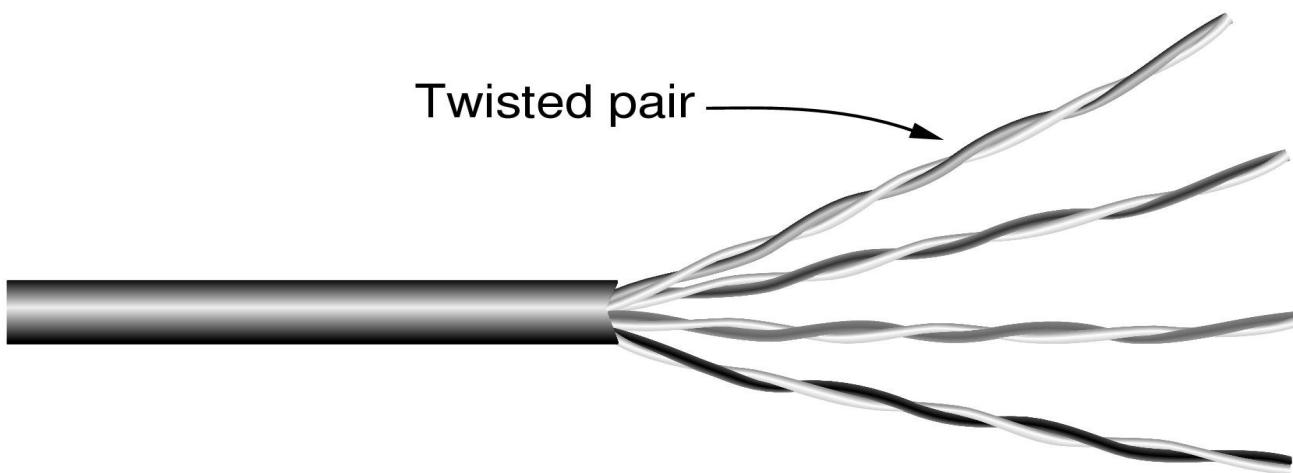
- STP (*Shielded Twisted Pair*), versione con uno schermo per ogni coppia più uno schermo globale;
- Screened, FTP (*Foiled Twisted Pair*) o S-UTP (figura 3.22), versione con un unico schermo (normalmente in foglio di alluminio) per tutto il cavo;
- UTP (*Unshielded Twisted Pair*) (figura 3.23) versione non schermata.

Il doppino

	Unshielded	Shielded
Unscreened	UTP  <ul style="list-style-type: none">ConduttoreIsolanteCoppiaGuaina	STP  <ul style="list-style-type: none">ConduttoreIsolanteCoppieSchermaturaGuaina
Screened	S/UTP - FTP - S/FTP  <ul style="list-style-type: none">ConduttoreIsolanteCoppieSchermaturaGuaina	S/STP  <ul style="list-style-type: none">ConduttoreIsolanteCoppiaSchermaturaSchermatura cavoGuaina

Classificazione dei doppini

- I parametri elettrici di qualsiasi cavo variano con la frequenza.
- Occorre chiedersi, per una data applicazione, a quale frequenza sia opportuno operare per decidere se un cavo sia adeguato all'applicazione stessa.
- È stata creata una classificazione che prevede sette categorie, in base alle applicazioni per le quali i cavi sono idonei.
- La categoria 1 è quella dei cavi peggiori, la 7 quella dei migliori.
- Ogni categoria è idonea a fornire tutti i servizi offerti da quelle inferiori.

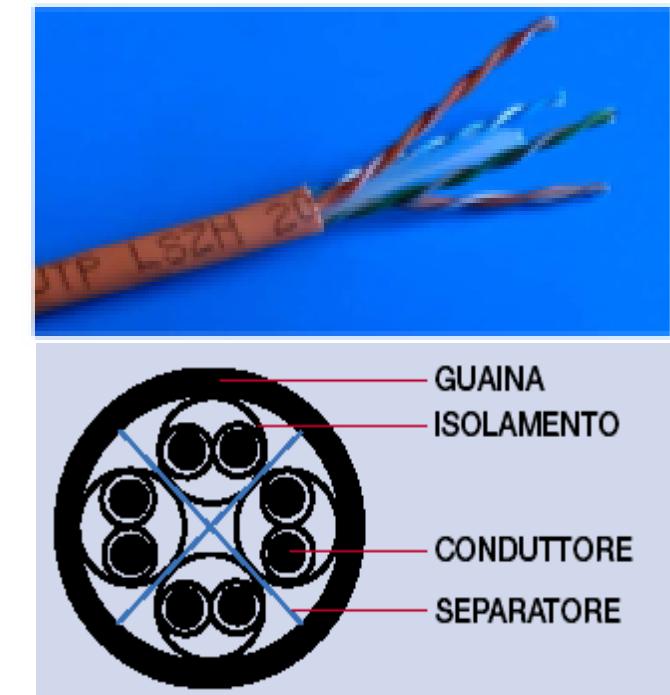


Classificazione dei doppini

- La **categoria 1** (*Telecommunication*) comprende i cavi adatti unicamente a telefonia analogica.
- La **categoria 2** (*Low Speed Data*) comprende i cavi per telefonia analogica e digitale (ISDN) e trasmissione dati a bassa velocità (per esempio linee seriali).
- La **categoria 3** (*High Speed Data*) è la prima categoria di cavi adatti a realizzare reti locali fino a 10 Mb/s, in particolare per soddisfare gli standard 10BaseT di 802.3 e Token-Ring a 4Mb/s.
- La **categoria 4** (*Low Loss, High Performance Data*) comprende i cavi per LAN Token-Ring fino a 16 Mb/s.
- La **categoria 5** (*Low Loss, Extended Frequency, High Performance Data*) comprende cavi per applicazioni fino a 100 Mb/s, su distanze di 100 metri.
- La **categoria 6** (*Low Loss, High Frequency, High Performance Data*) comprende i migliori cavi disponibili, per applicazioni fino a 1000 Mb/s, su distanze di 100 metri.
- La **categoria 7** (ISO/IEC 11801 Class F), nome informale. Lo standard specifica 4 STP all'interno di un unico cavo, per velocità fino a 10Mb/s

Classificazione dei doppini

- I cavi di categoria 6 rappresentano oggi lo stato dell'arte nel campo del cablaggio delle LAN.
- Tutti gli standard di rete a velocità di 100 Mb/s maggiori con trasmissione su due coppie prevedono l'uso di cavi di categoria 5 o superiore.
- Oggi sono diffusi cablaggi secondo la categoria 6, ed è stata standardizzata anche la categoria 7 per applicazioni ad altissime velocità.



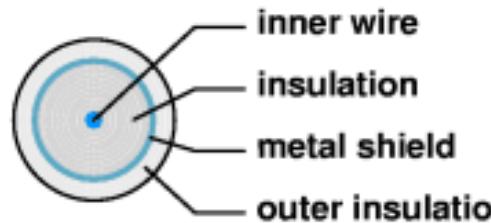
Il cavo coassiale

- Il cavo coassiale ha avuto per lungo tempo notevole diffusione nelle reti locali; per esempio è stato utilizzato in due diverse versioni dello standard 802.3 (Ethernet) e per il collegamento di terminali IBM.
- Ora è caduto in disuso nelle LAN, eliminato dallo standard ISO/IEC 11801 per i cablaggi strutturati e sostituito dalle fibre ottiche nella fascia ad alte prestazioni e dai doppini in quella a medie prestazioni, mentre continua ad essere utilizzato nelle reti geografiche (micro-coassiale).

Il cavo coassiale

[continua]

- **Cavo coassiale a banda base:** Consiste in un filo di rame rigido circondato da una garza metallica che funge da schermo:



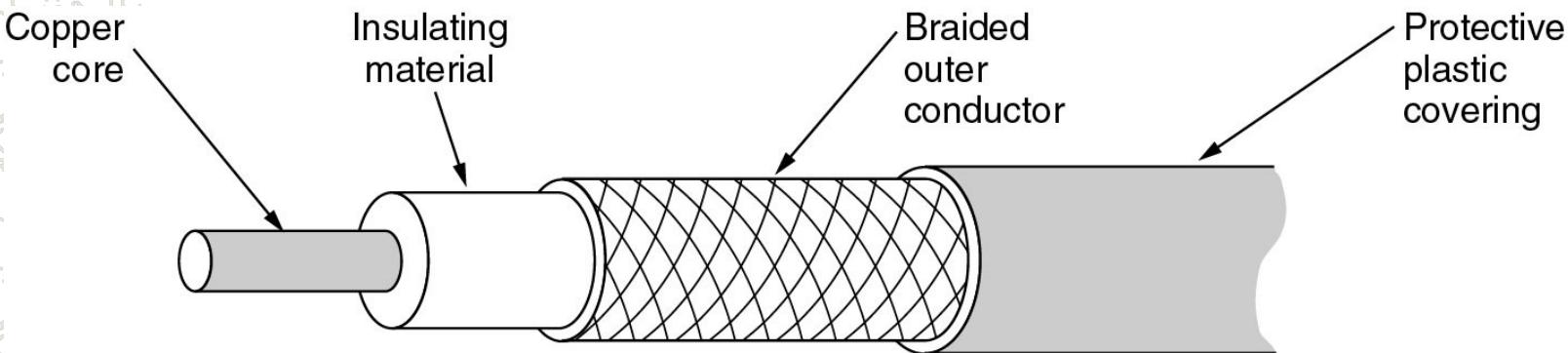
L'impedenza tipica dei cavi coassiali (**coax**) è di 50Ω .

La larghezza di banda dipende dalla lunghezza del cavo: per lunghezze di 1 km sono possibili velocità che variano da 1 a 2 Gbps. Si possono avere anche cavi più lunghi, ma occorre ridurre la velocità di trasmissione e frammezzare ai tratti di cavo degli amplificatori di segnale.

Il cavo coassiale

[continua]

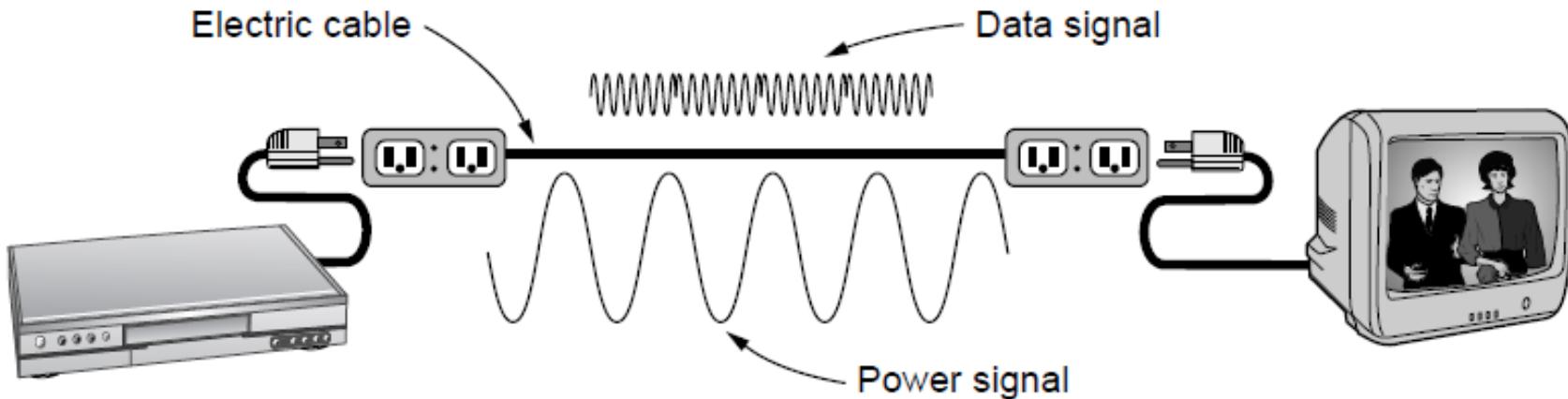
- **Cavo coassiale a larga banda:** Consiste in un cavo identico a quello in banda base, ma con un sistema di trasmissione diverso.
Su coassiale in banda larga, la trasmissione avviene in analogico, cioè in maniera del tutto simile alla trasmissione televisiva.



La larghezza di banda in questo caso è di 300 Mhz, con lunghezze anche di 100 km.

I sistemi a banda larga suddividono il canale totale in canali da 6 Mhz, che possono essere utilizzati per la trasmissione di emittenti TV, audio ad alta qualità (1,4 Mbps) o un flusso digitale a 3 Mbps.

Trasmissione Power Line



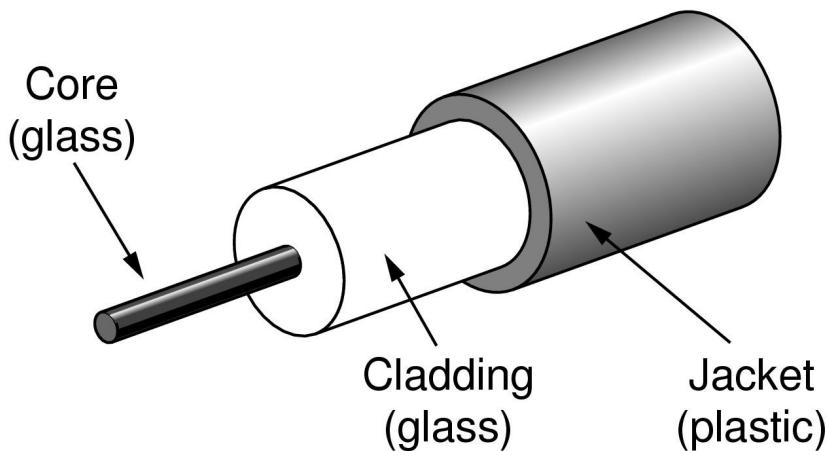
- La trasmissione power line (o a onde convogliate) è una tecnologia per la trasmissione dati che utilizza la rete di alimentazione elettrica come mezzo trasmittivo.
- Si realizza sovrapponendo al trasporto di corrente elettrica, continua o alternata a bassa frequenza (50 Hz in Europa e gran parte dell'Asia e dell'Africa, 60 Hz in altre regioni del mondo), un segnale a frequenza più elevata che è modulato dall'informazione da trasmettere.
- La separazione dei due tipi di correnti si effettua grazie al filtraggio e separazione degli intervalli di frequenze utilizzate.

Fibre ottiche

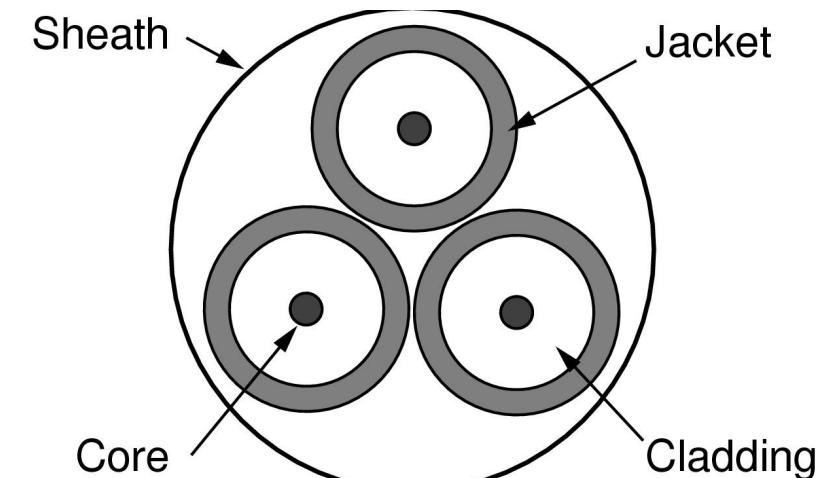
Consistono in un cavo composto da un anima trasparente di silicio avvolto in un rivestimento di vetro con indice di rifrazione diverso.

Tutta la parte in vetro è ricoperta da una guaina di plastica nera.

Le fibre sono normalmente raggruppate insieme intorno ad un filo di metallo che facilita la posa del cavo.



(a)



(b)



Fibre ottiche

- Caratteristiche principali:
 - + banda (alcune decine di THz)
 - + immunità ai disturbi
 - + leggerezza e flessibilità
 - + meno pericolosa dei mezzi metallici
 - + meno costosa dei mezzi metallici
 - + sicurezza e protezione da intrusioni
 - difficoltà di connettorizzazione e interfacciamento
 - dispersioni
 - effetti non lineari

Fibre Ottiche

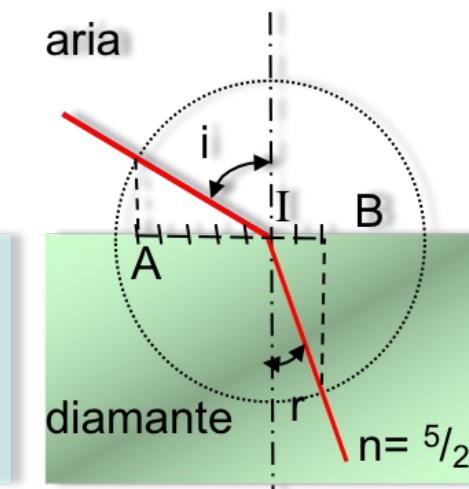
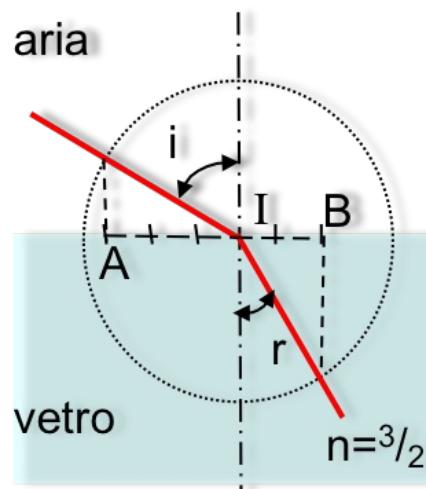
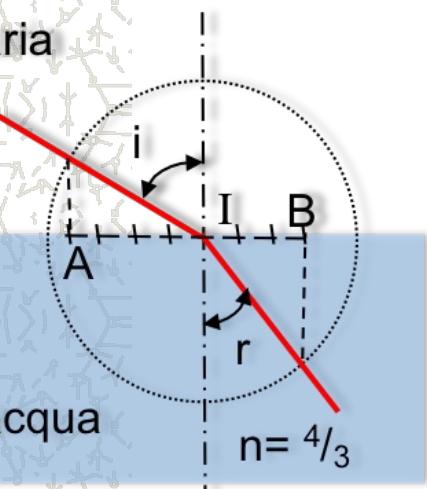
[continua]

- Dalla soluzione delle equazioni di Maxwell si ricava che l'energia si propaga nella fibra in un numero discreto di configurazioni.
- Queste configurazioni sono chiamate modi e ogni singolo modo ha sue caratteristiche di propagazione.
- La larghezza di banda in questo caso è di oltre 30.000 GHz.
- L'attuale limite di trasmissione è dovuto semplicemente al fatto che un sistema a fibra ottica necessita di due conversioni: la prima da elettrico a luce, e la seconda luce ad elettrico.

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla^2 \phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \\ \nabla^2 A_x - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} = -\mu \rho v_x \\ \nabla^2 A_y - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} = -\mu \rho v_y \\ \nabla^2 A_z - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial t^2} = -\mu \rho v_z \end{array} \right.$$

Rifrazione

Si definisce rifrazione “il fenomeno per cui un raggio luminoso (non perpendicolare alla superficie di contatto) passando da un mezzo trasparente ad un altro, anch’esso trasparente, cambia direzione nel punto in cui attraversa la superficie di separazione dei due mezzi”.



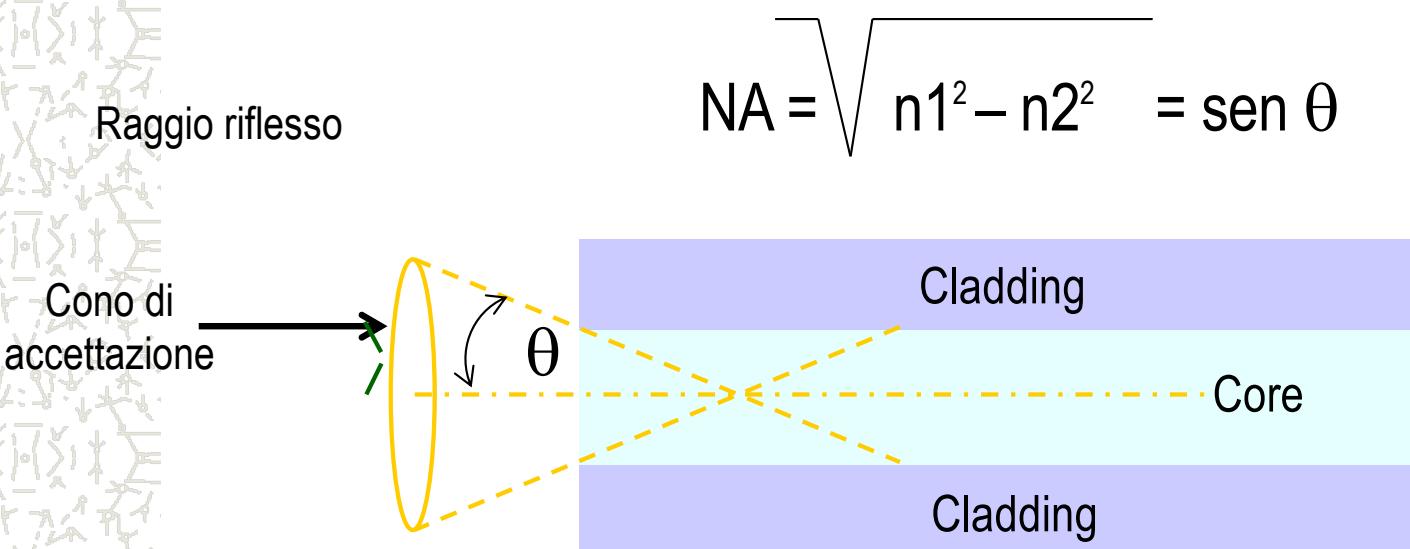
Indice di rifrazione del secondo mezzo (attraversato dal raggio luminoso) rispetto al primo; il rapporto è costante al variare dell’angolo “*i*” del raggio incidente.

$$n = \frac{IA}{IB} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

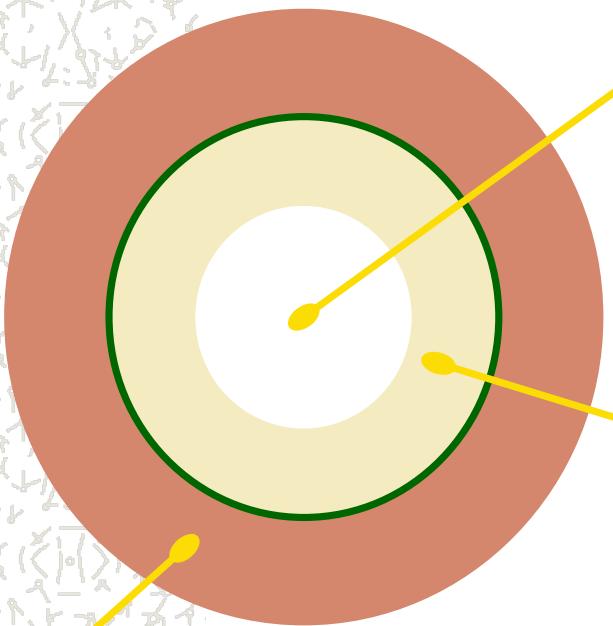
Gli angoli dei raggi incidenti e rifratti sono misurati rispetto alla perpendicolare della superficie di contatto dei due mezzi

Apertura numerica

- L'apertura numerica indica la “quantità di luce che è possibile lanciare all'interno della fibra senza che questa venga riflessa”
- E' quindi caratterizzata da un angolo limite che varia in funzione degli indici di rifrazione del core e del cladding



Struttura della fibra



Rivestimento primario

- Rivestimento plastico applicato direttamente sulle fibre
- Protegge le fibre
- Diametri fino a 250 µm

Core

- La luce viaggia attraverso il core
- Le dimensioni del core vanno da 8 a 100 µm

Cladding

- Elemento in vetro come il core
- Fornisce un diverso indice di rifrazione rispetto al core
- Diametri da 125 - 140 µm

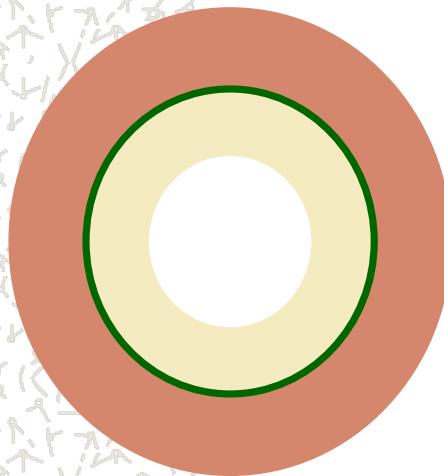
Tipi di fibra

La trasmissione all'interno dell'anima di vetro può avvenire con modalità diverse:

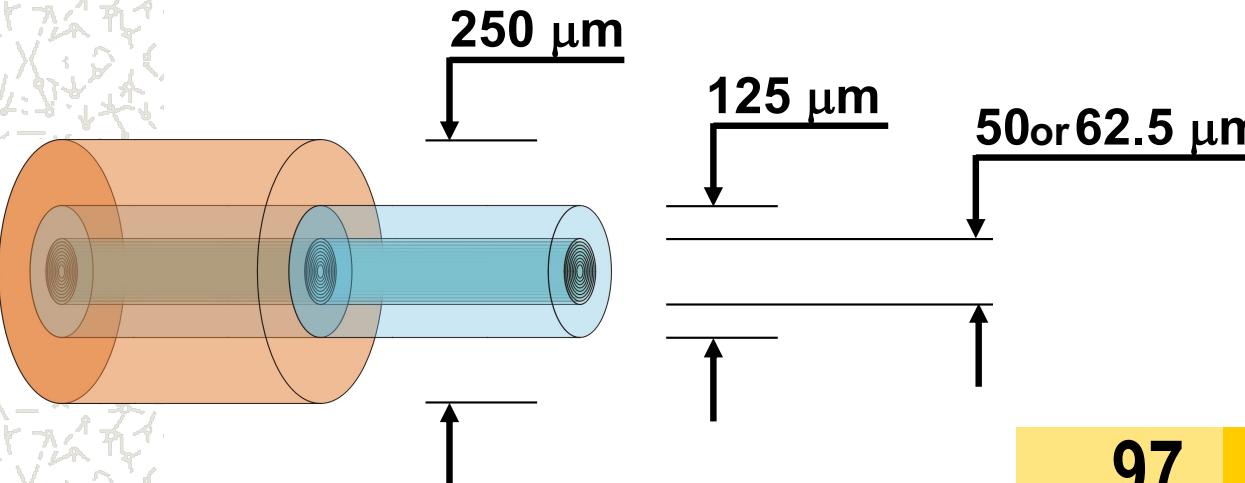
Fibra multimodale: È una fibra il cui nucleo è abbastanza ampio da permettere diversi angoli di rimbalzo della luce trasmessa

Fibra monomodale: È una fibra il cui nucleo permette il passaggio di poche lunghezze d'onda. Questo fa comportare la fibra come una semplice guida d'onda

Geometria delle fibre



Fibra MULTIMODE



💡 Disponibile in diverse dimensioni

- 50/125micron
- 62.5/125micron

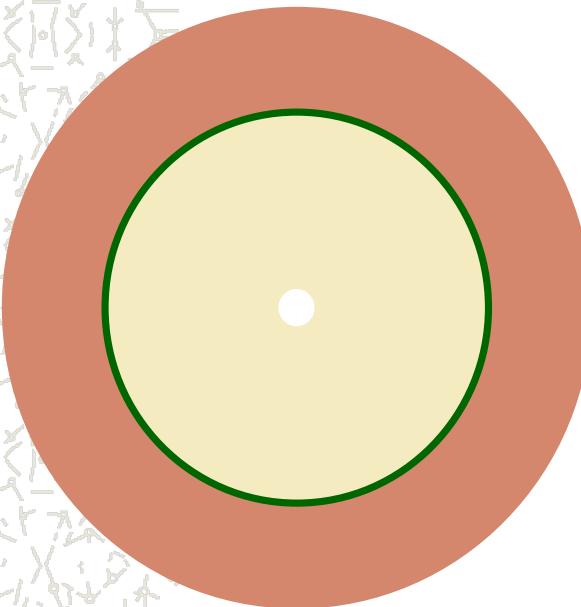
💡 Distanze fino a 2000 m

💡 Uso relativamente poco costoso con trasmettitori
LED & VCSEL

💡 Finestre di operazione (1^a e 2^a)

- 850 nm
- 1300 nm

Geometria delle fibre



Fibra SINGLE MODE

- Dimensioni del core 8.1 - 10 mm
- La fibra si comporta come una guida d'onda ammettendo una sola modalità di propagazione
- La banda passante è elevatissima (centinaia di GHz*Km)
- Dimensione del cladding 125mm
- Distanze fisiche fino a 60 km, ma limitata in applicazioni locali a 3 Km
- Uso di trasmettitori laser
- Finestre di operazione (2^a e 3^a finestra)
 - 1310 nm
 - 1550 nm



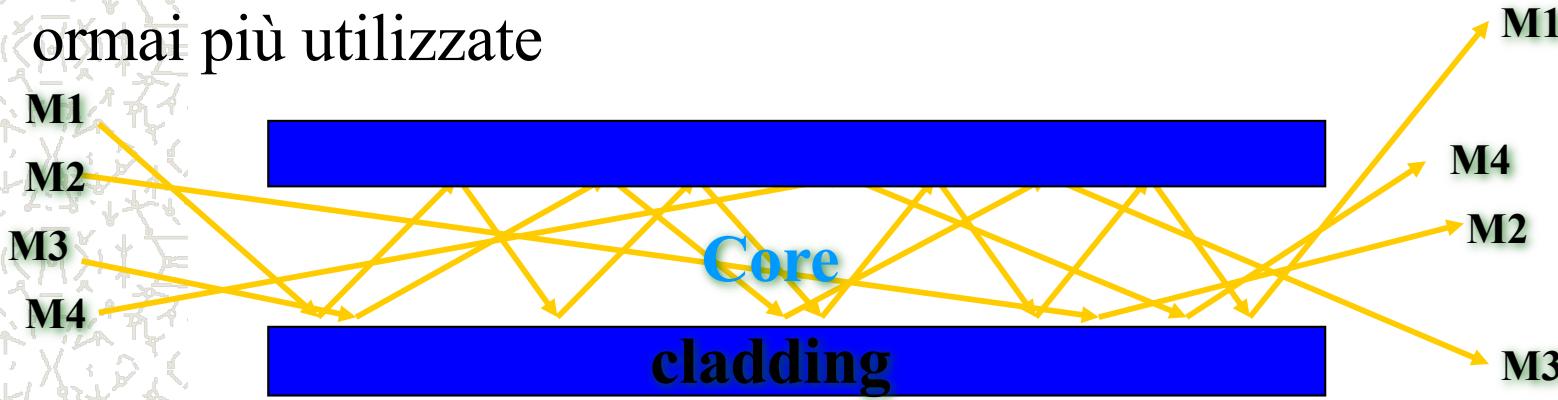
Modi di propagazione

- All'interno di una fibra ottica la luce ha più modi di propagazione, ciò genera la dispersione modale che ne limita la banda; esistono diversi modi di “propagare” la luce all'interno della fibra
- Fibre ottiche multimodali: propagazione con diversi modi e percorsi
 - Fibre ottiche multimodali step-index
 - Fibre ottiche multimodali graded-index
- Fibre ottiche monomodali: propagazione in un unico modo

Modi di propagazione

Fibre multimodali step-index

- La variazione dell'indice di rifrazione tra core e cladding è brusca e causa molta dispersione modale, per questo motivo non vengono ormai più utilizzate

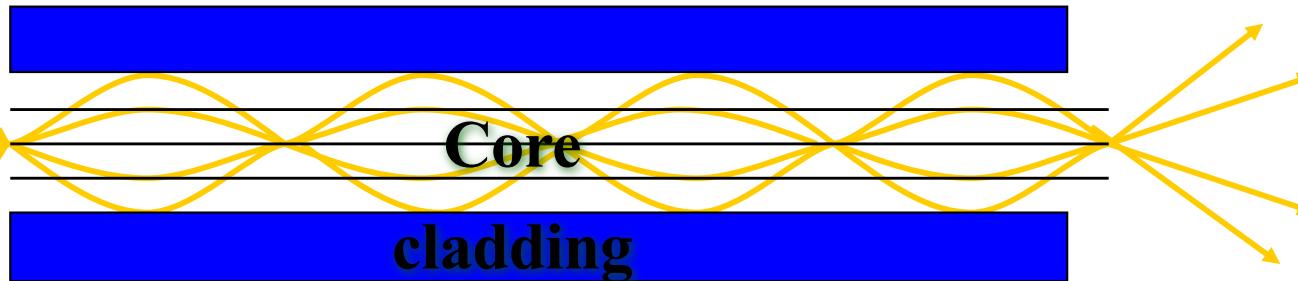


Dispersione modale: fenomeno dovuto al fatto che il raggio luminoso non viaggia all'interno della fibra secondo un cammino prefissato, ma secondo un numero finito di modi (derivanti dalla legge di Snell). Vi saranno modi attraverso i quali il raggio arriva più velocemente a destinazione, altri che invece lo fanno arrivare più tardi.

Modi di propagazione

Fibre multimodali graded-index

- La variazione continua degli indici di rifrazione rallenta i raggi più centrali, per questo hanno una banda passante molto superiore alle step-index possono lavorare in 1^a e 2^a finestra (850 e 1300 nm)



Modi di propagazione

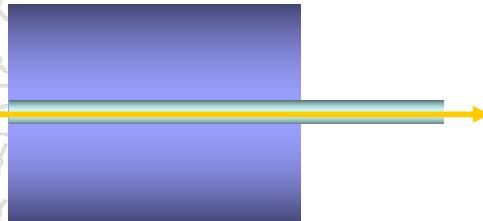
Fibre monomodali

- La fibra si comporta come una guida d'onda quindi con una sola modalità di propagazione
 - Non si ha dispersione modale
 - La banda passante è elevatissima
 - Possono lavorare in 2^a e 3^a finestra

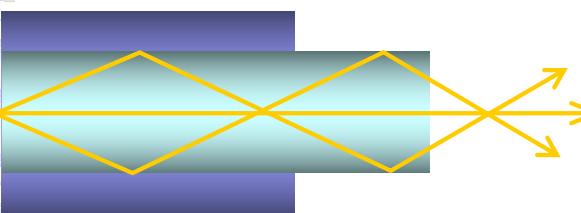


Modi di propagazione

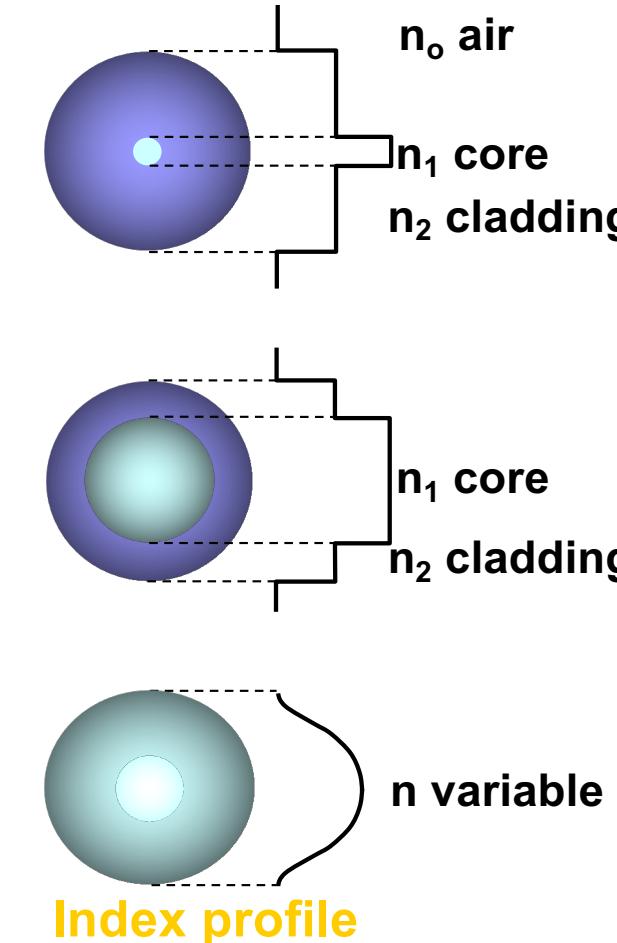
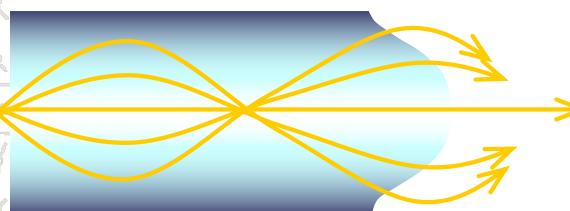
Singlemode step-index fibre



Multimode step-index fibre



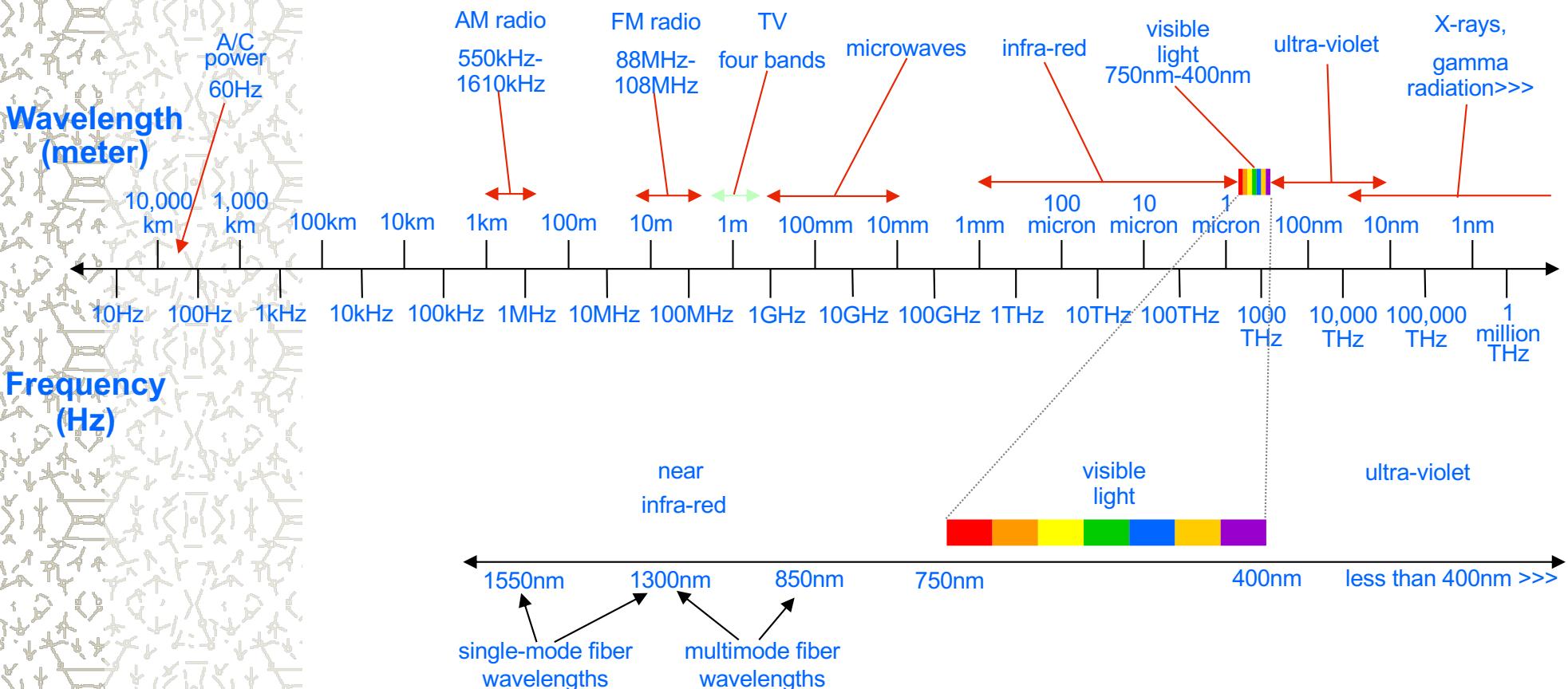
Multimode graded-index fibre



Lunghezze d' onda

Lo spettro elettromagnetico

- Mezzo per definire la luce
- Misurata in nanometri
- 1 nanometer = 10^{-9} m

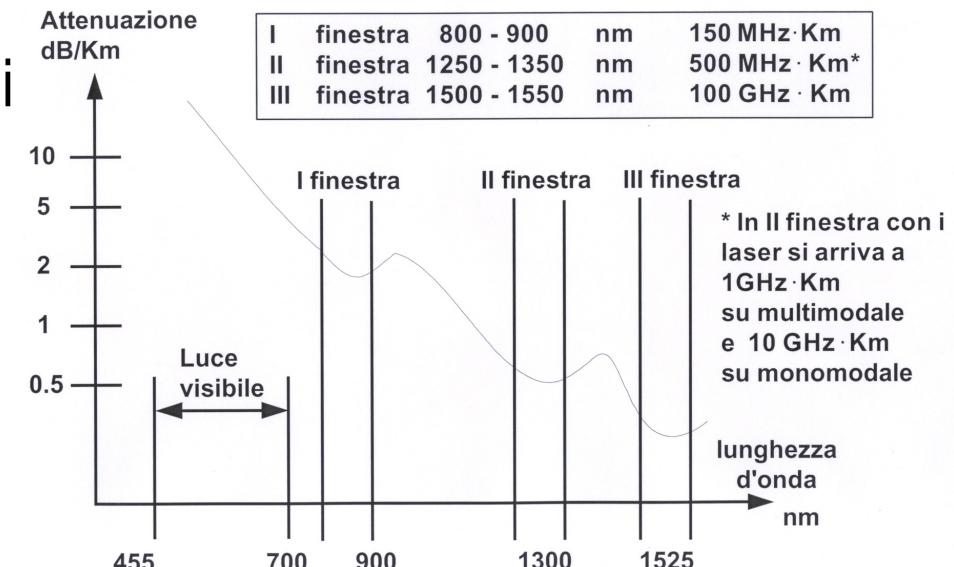


Wavelengths used for optical fiber transmission

Finestra operativa

Window	Operation
800 - 900 nm	850 nm
1250 - 1350 nm	1300 / 1310 nm
1500 - 1600 nm	1550 nm

E' il range di lunghezze d' onda i cui la fibra funziona meglio
Centrata intorno alla lunghezza d' onda di funzionamento tipica



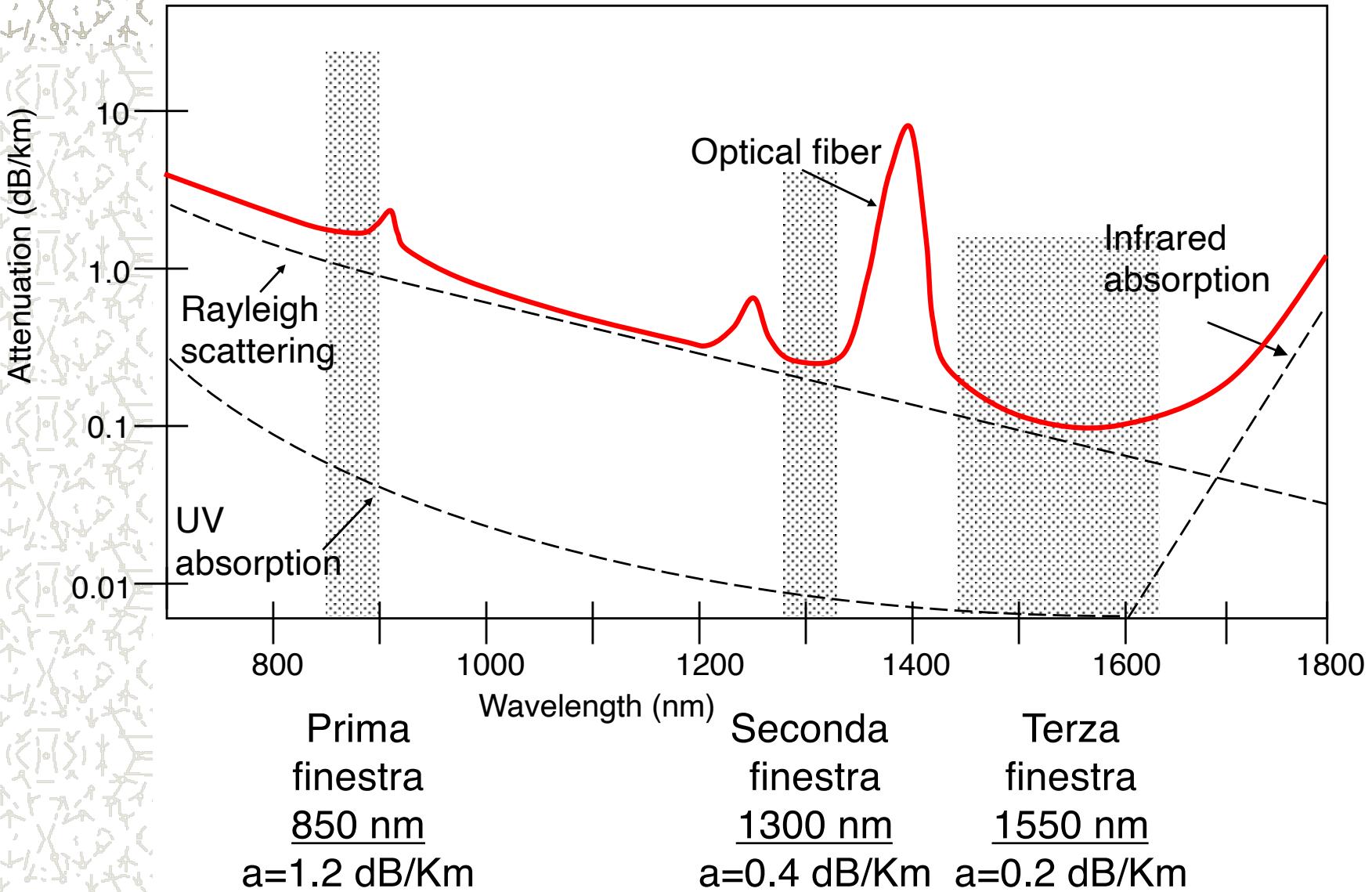
Attenuazione

Parte dell'energia luminosa che si propaga lungo la fibra viene assorbita dal materiale o si diffonde in esso, costituendo quindi una perdita ai fini del segnale trasmesso.

Il rapporto tra la potenza ottica trasmessa e quella ricevuta, dopo aver percorso una lunghezza di fibra di riferimento, definisce l'attenuazione della fibra stessa, in funzione della lunghezza d'onda e del tipo di fibra

Minore è l'attenuazione maggiore la distanza utile per la trasmissione

Attenuazione delle fibre

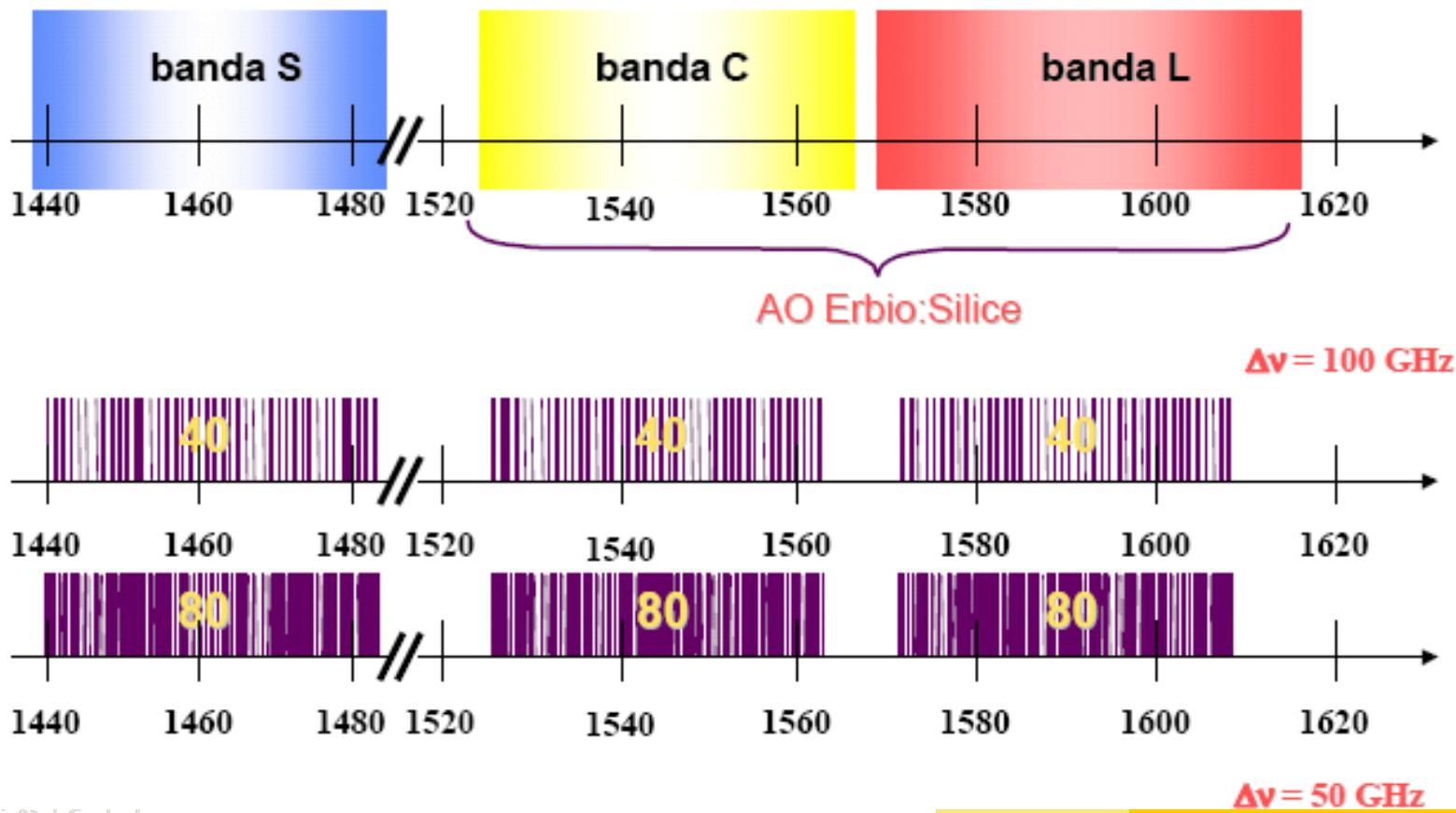


Bande trmissive

Le fibre ottiche sono utilizzate per scopi di telecomunicazioni per distanze superiori a qualche chilometro e velocità di trasmissione superiori ai 100 Mbit/s nelle bande attorno a:

- 1300 nm (II finestra)
- 1550 nm (III finestra, minimo assoluto dell'attenuazione)

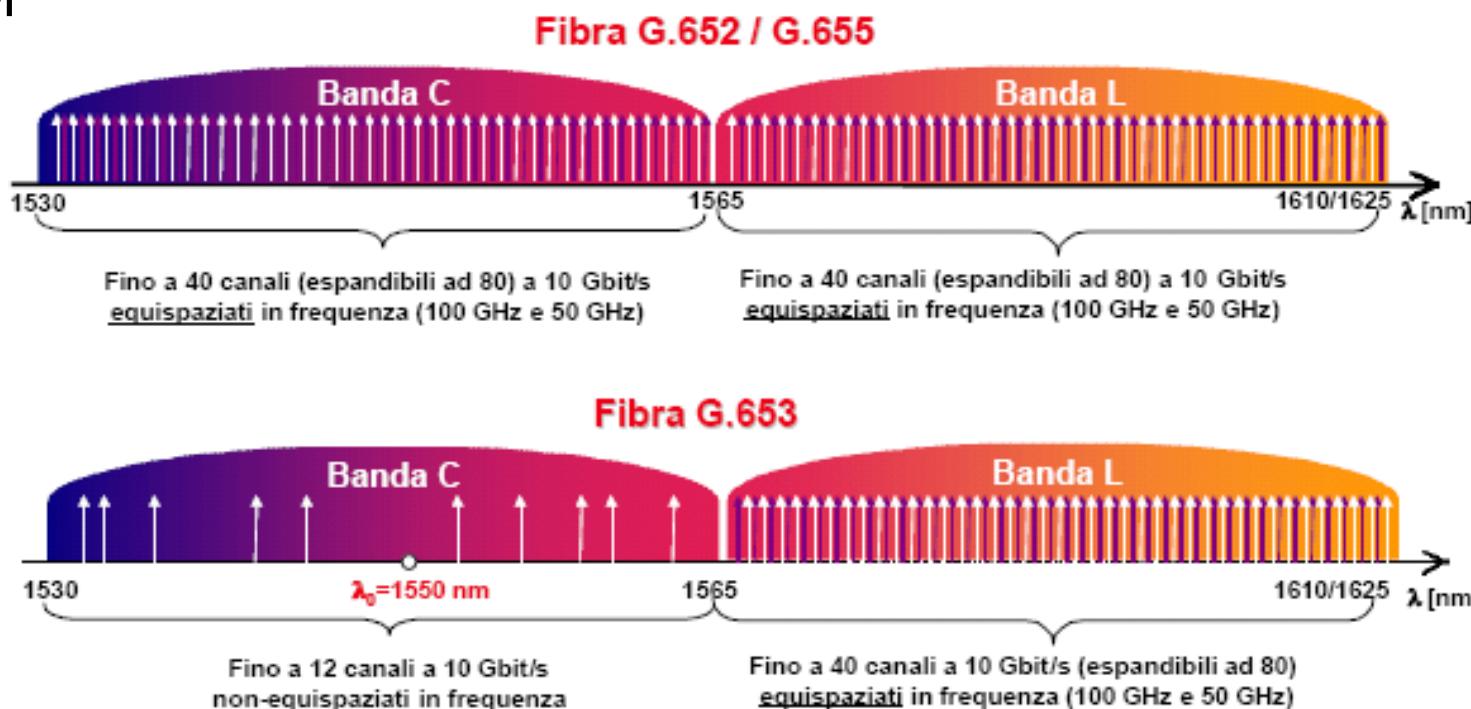
La banda trmissiva nelle due finestre è circa 25000 GHz



Tipi di fibre

Le fibre più utilizzate sono

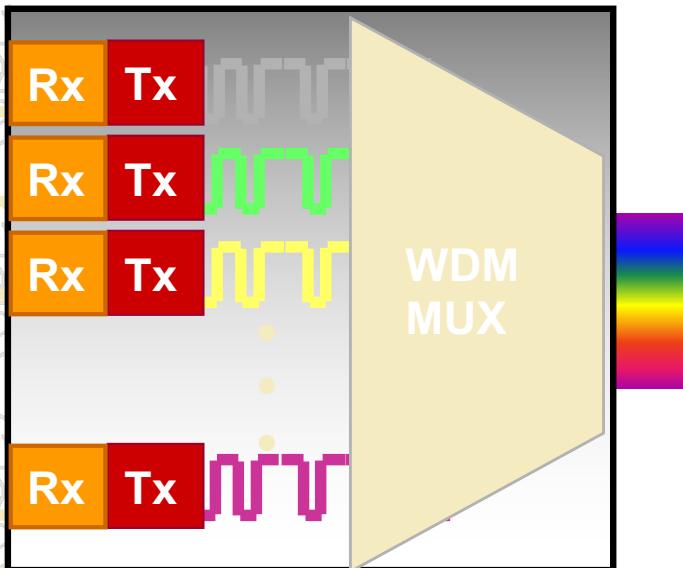
- Fibra standard ITU-T **G.652** (ottimizzata per l'uso in II finestra)
- Fibra standard ITU-T **G.653** (Dispersion Shifted, ottimizzata per l'uso in III finestra)
- Fibra a dispersione non nulla ITU-T **G.655** (ottimizzata per DWDM in III finestra)
- Nel caso di fibra G.652, i sistemi WDM Nx2.5-Gbit/s sono limitati dalla dispersione cromatica e di polarizzazione
- Nel caso di fibra G.653, i sistemi WDM Nx2.5-Gbit/s sono limitati dal FWM



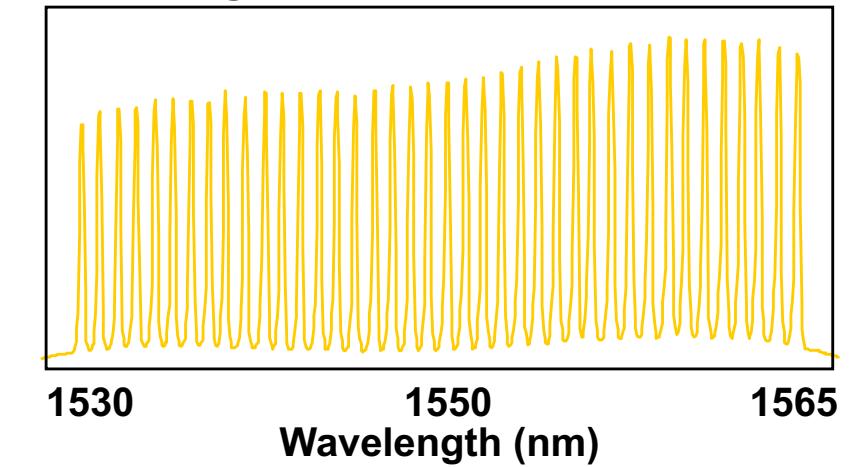
Wavelength Division Multiplexing

- Consente di veicolare più lunghezze d'onda λ (oggi fino a 320) all'interno del medesimo portante fisico, ciascuna con capacità trasmittiva fino a 40 Gbps (OC768), dipendentemente dalla qualità della fibra e degli apparati di trasmissione

I segnali sono multiplexati nel dominio delle lunghezze d'onda



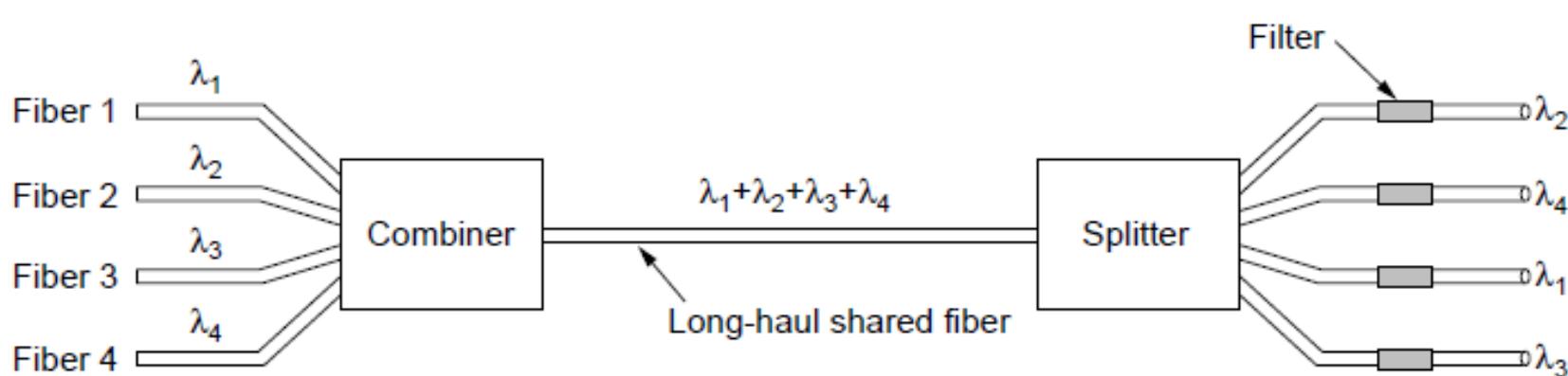
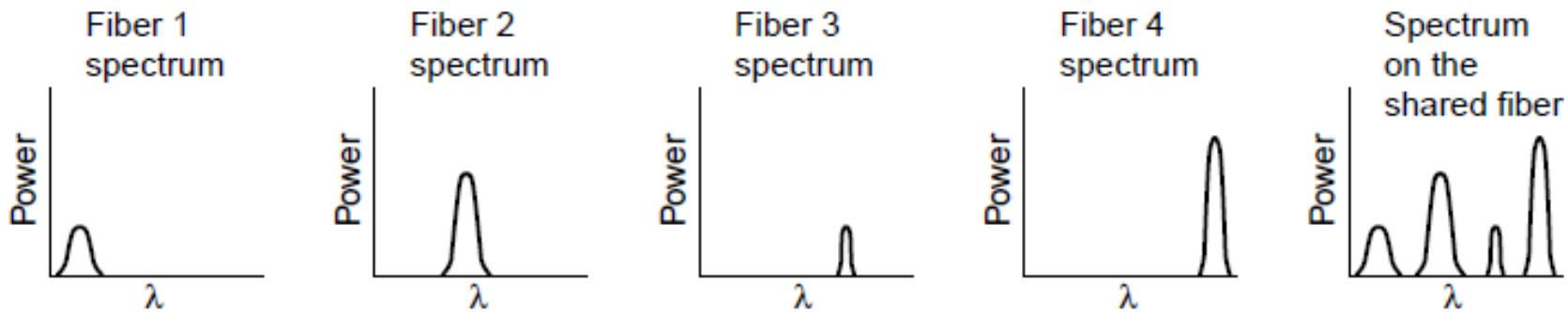
Segnale ottico composito



Multiplazione WDM

- Le tecniche WDM sono più naturali nel dominio fotonico.
- La divisione della banda disponibile in canali è comunque necessaria in quanto il canale ottico, anche se attraversa solo punti di commutazione operanti nel dominio fotonico, è attestato nel dominio elettronico.
- Nel caso di puro WDM, è possibile offrire agli utenti canali trasparenti end-to-end, chiamati *lightpath*. Se le distanze coperte sono grandi, può essere necessario **Rigenerare** i segnali, operazione cui è sovente associata una **Risincronizzazione** e una **Risagomatura** (si parla di **3R**) nel caso di segnali numerici.
- Possiamo avere lightpath *trasparenti* (tutto ottici) o *opachi* (che ammettono 3R, 2R, o 1R, in ottica o in elettronica).

Wavelength Division Multiplexing



Wavelength division multiplexing

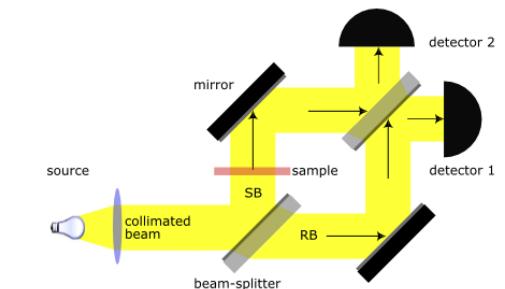
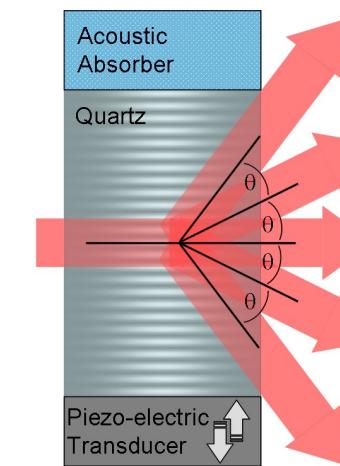
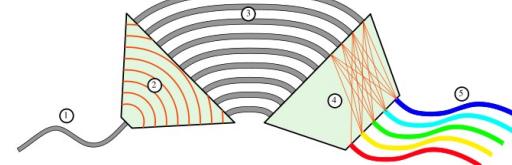
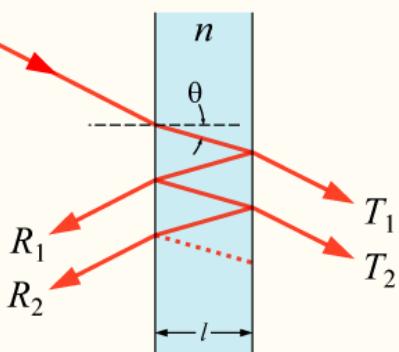
W
a
B
e
n
t
i
n
a
B
r
i
z
i
l
r
U
O
I
o
d
e
L

La multiplazione/demultiplazione delle lunghezze d'onda

I multiplatori/demultiplatori ottici sono componenti passivi in grado di multiplare/demultiplare i segnali colorati caratterizzati da diverse lunghezze d'onda

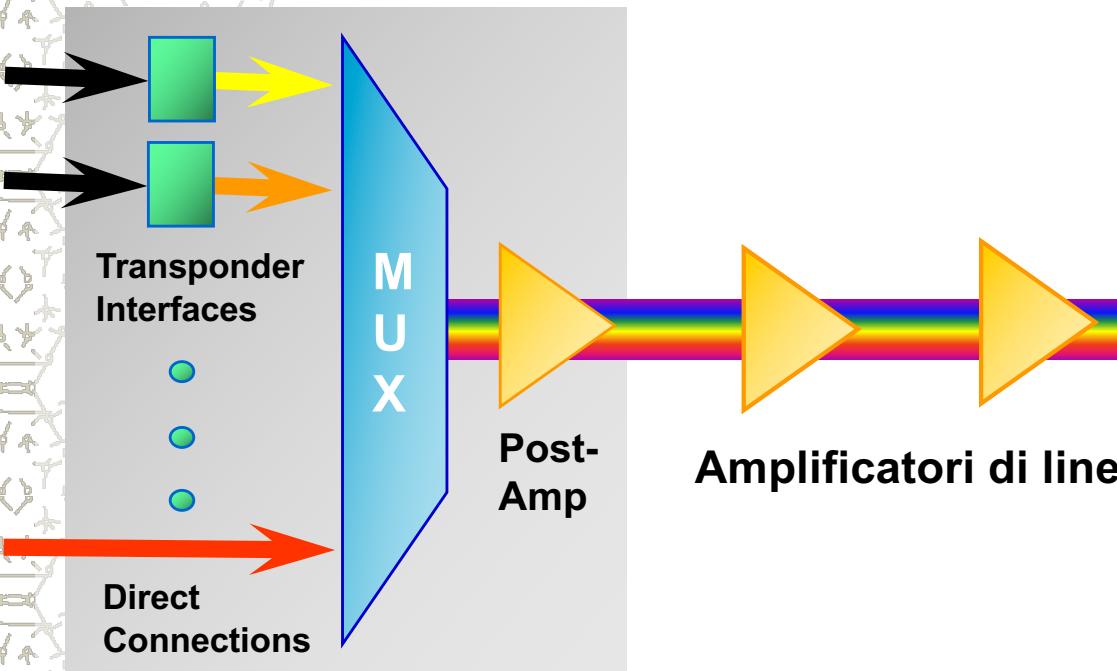
Possono essere realizzati con le seguenti modalità

- ▶ Filtri di Fabry Perot
- ▶ Reticoli: di Bragg, in fibra, in schiere di fibra ottica (AWG)
- ▶ Filtri acusto-ottici
- ▶ Interferometri Mach-Zehnder

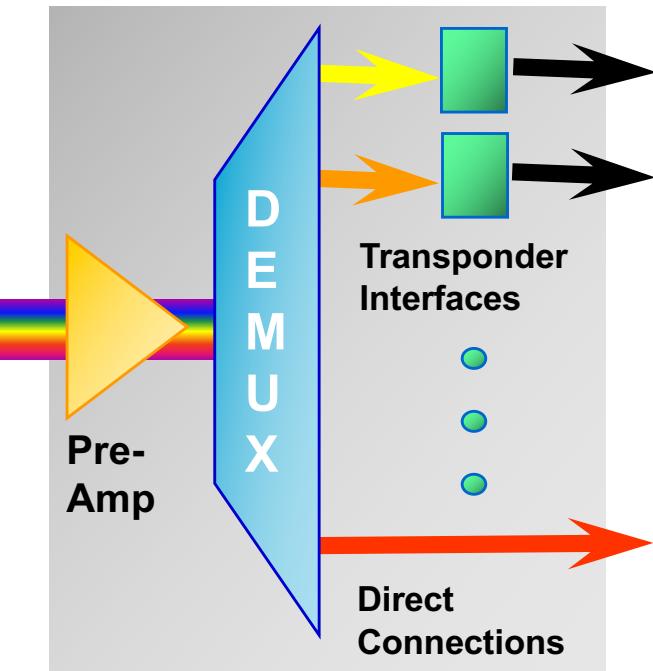


Le componenti dell'architettura WDM

Terminazione A



Terminazione B



Componenti di base

- Amplificatori ottici
- Multiplexers ottici
- Sorgenti ottiche stabili

WDM - separazione fra bande

BLUE BAND: regione 1529-1536nm

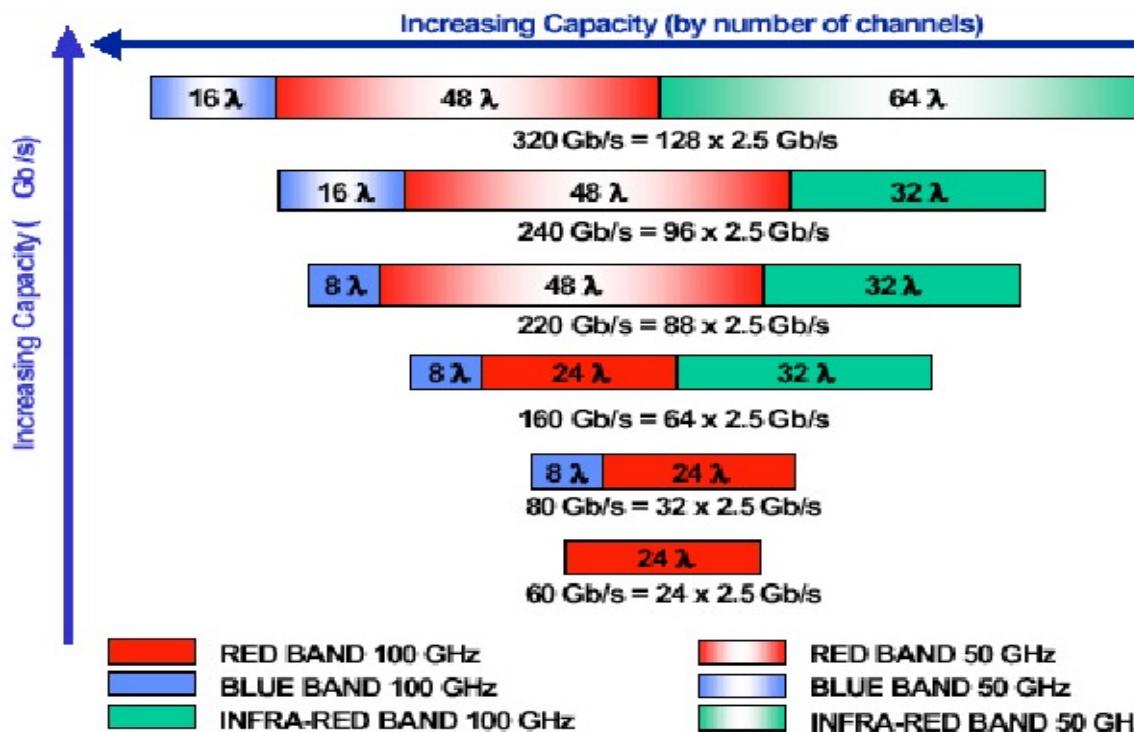
- (8 canali 100Ghz spaced/16 canali 50Ghz spaced multiplexabili)

RED BAND: regione 1542-1561nm

- (24 canali 100Ghz spaced/48 canali 50Ghz spaced multiplexabili)

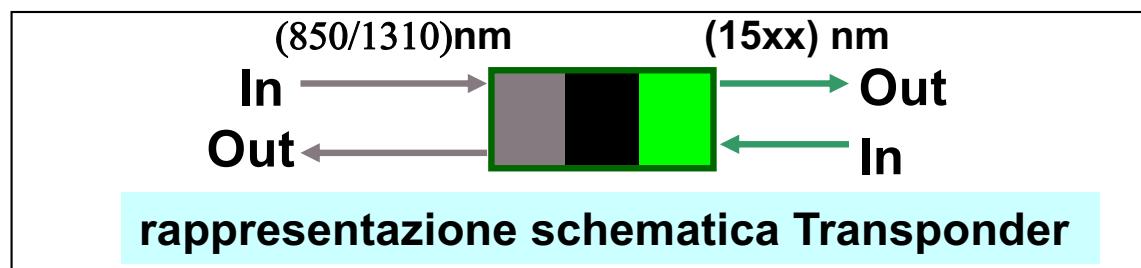
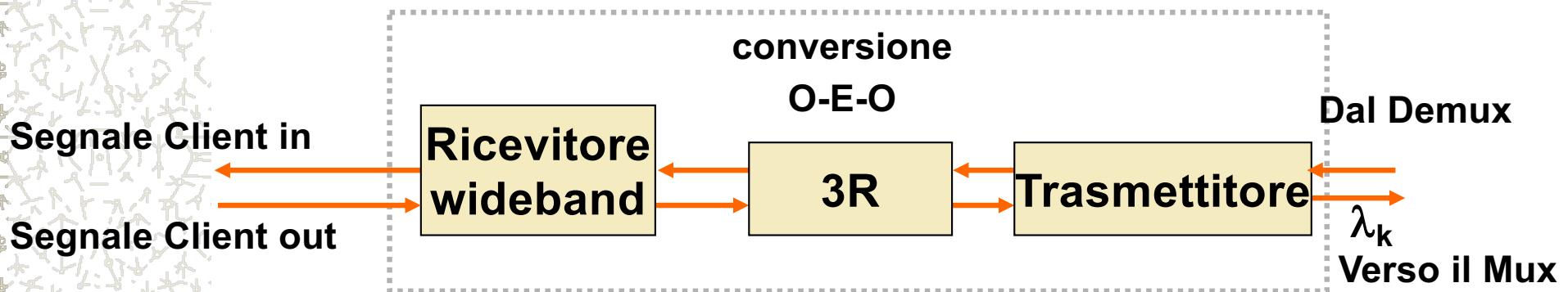
INFRARED BAND: regione 1575-1602nm

- (32 canali 100Ghz spaced/64 canali 50Ghz spaced multiplexabili)



Il Transponder

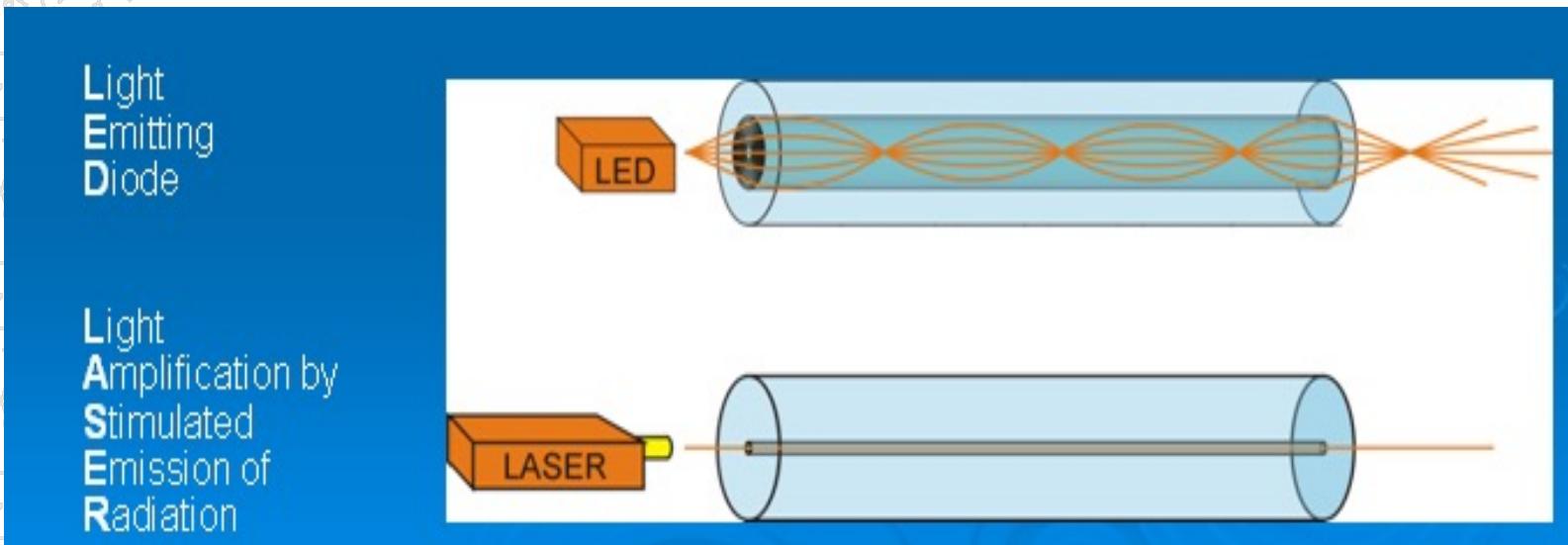
Effettua una traslazione del segnale ottico utente convertendolo in una frequenza compatibile con la griglia di funzionamento del sistema DWDM



I transponder disponibili commercialmente sono “fully tunable”, ovvero i laser possono essere sintonizzati via software su qualsiasi delle 80 lunghezza d'onda disponibili nella griglia di funzionamento.

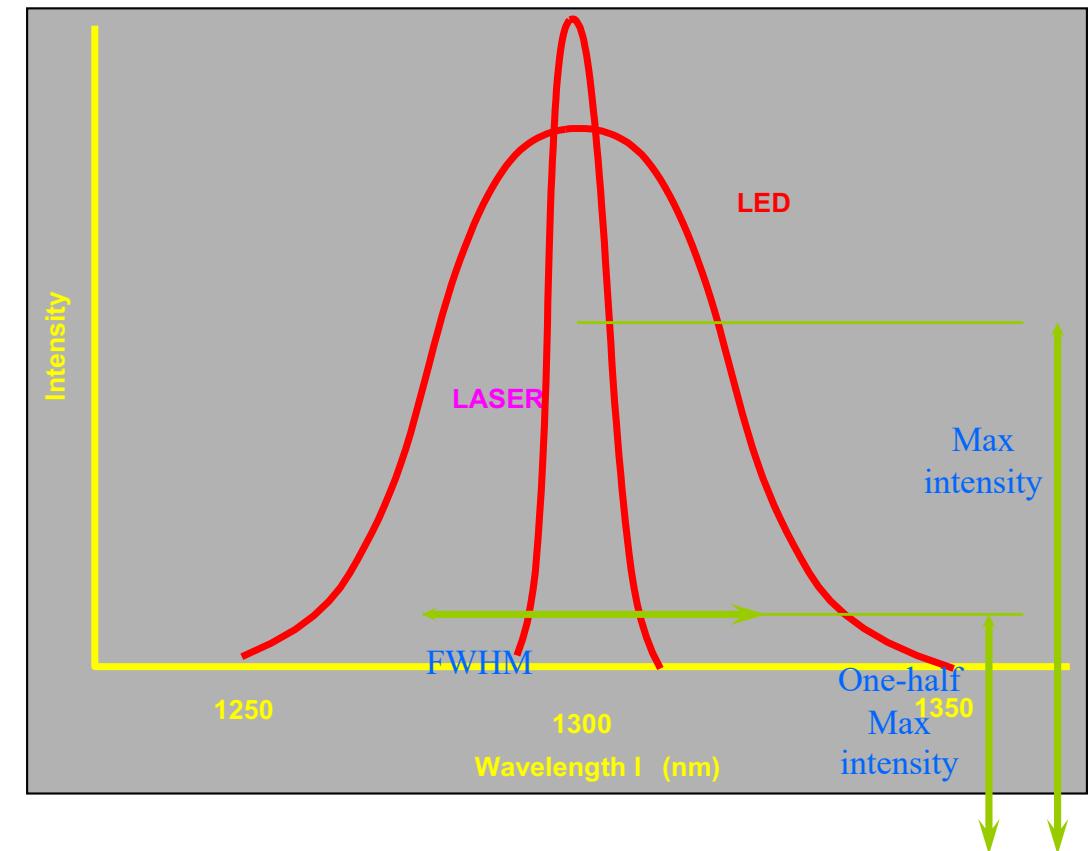
Trasmissione sulla fibra

- La trasmissione attraverso la fibra ottica può essere effettuata con due diverse modalità
 - Con LED Light Emission Diode sulle fibre Multimodali
 - Con Laser (classe 2) sulle fibre Monomodali
 - Con i VCSEL, (vertical cavity - surface emitting lasers) laser a semiconduttore che, hanno un sistema ottico non particolarmente complesso che permette l'emissione del fascio laser perpendicolarmente alle superfici di crescita dei semiconduttori, con ridotta difficoltà costruttiva, dimensioni inferiori necessità di potenze di alimentazione inferiori.
- Le due diverse modalità di trasmissione hanno costi molto diversi e possono essere utilizzate per applicazioni specifiche anche a seconda della finestra di utilizzo



LED e LASER

- La potenza totale emessa da un trasmettitore è distribuita su un range di lunghezze d'onda diffuse intorno al centro d'onda. Questo range è la larghezza di spettro, misurato in nanometri.
- La larghezza di spettro varia da stretta (alcuni nanometri) a larga (da decine a centinaia di nanometri) dipendente dal tipo di sorgente utilizzata (Laser o LED). Larghe ampiezze di spettro portano a incrementare la dispersione .



Differenze fra LED, VCSEL e LASER

Una differenza importante nell'impiego di LED, VCSEL e LASER risiede anche nella maniera in cui queste sorgenti lanciano impulsi di luce nelle fibre.

Un LED realizza una condizione di lancio detta “**Overfilled Launch**” (illumina completamente il nucleo di una fibra multimodale, con molti modi copre l'intero diametro di una MMF).

I VCSEL sono più focalizzati dei LED nell'immettere potenza ottica nella fibra. Il diametro del fascio luminoso del LASER impiegato per gli apparati 1000BaseLX è ancor più ridotto.

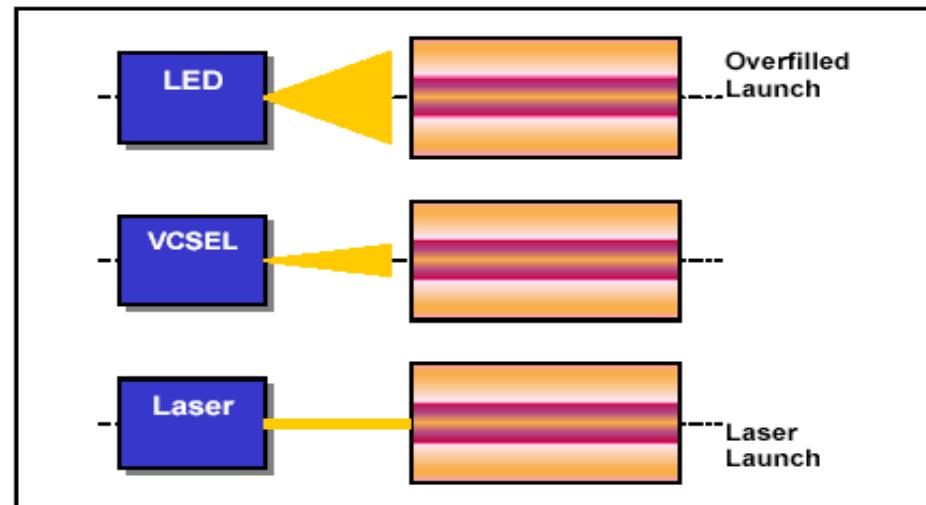
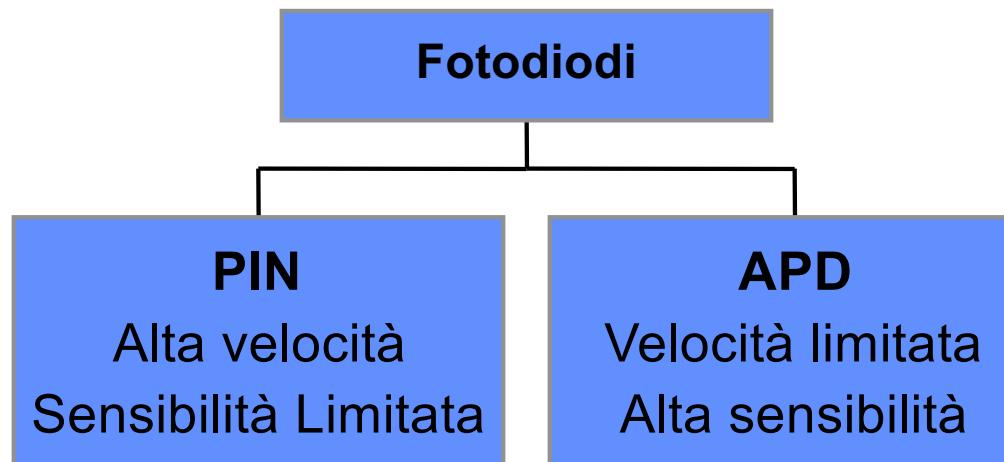


Figura 1: Differenti tipologie di lancio

I ricevitori

- Trasformano segnale luminoso in segnale elettrico
- Sono dei fotodiodi con funzionamento opposto rispetto ai LED
- Sono dispositivi che hanno una finestra di ricezione ampia (lo stesso fotorilevatore è in grado di convertire segnali luminosi a diverse lunghezze d'onda)
- Esistono diverse categorie
 - Positive-Intrinsic-Negative (PIN) diode, corrente proporzionale alla potenza luminosa
 - Avalanche PhotoDiode (APD), extra-guadagno di corrente ma più rumore



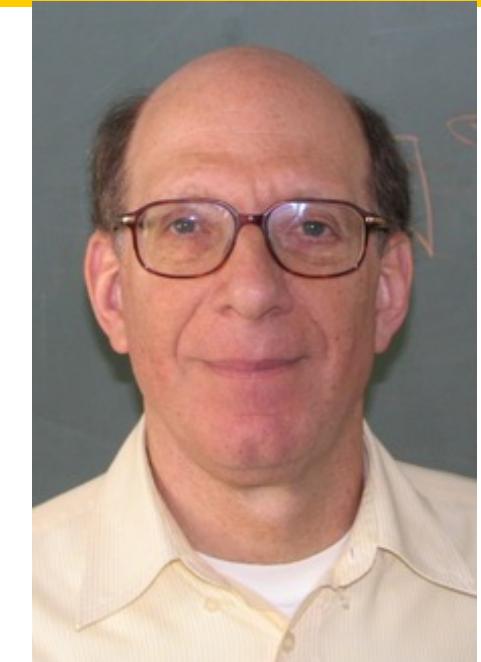
Il paradosso di Tanenbaum

- “Never underestimate the bandwidth of a station wagon full of tapes hurtling down the highway”.

Andrew S. Tanenbaum *Computer Networks*, 4th ed., p. 91

Consideriamo una singola fibra ottica:

- Allo stato dell'arte è possibile trasportare **320 λ** in una singola banda dello spettro (e.g. C-Band)
- Ogni λ può trasportare una capacità di **100 Gbit/s**
- La capacità totale è: $320 * 100 * 10^9 / 8 = 4000 \text{ GByte/sec}$



Consideriamo ora un camioncino tipico da 10 tonnellate di carico:

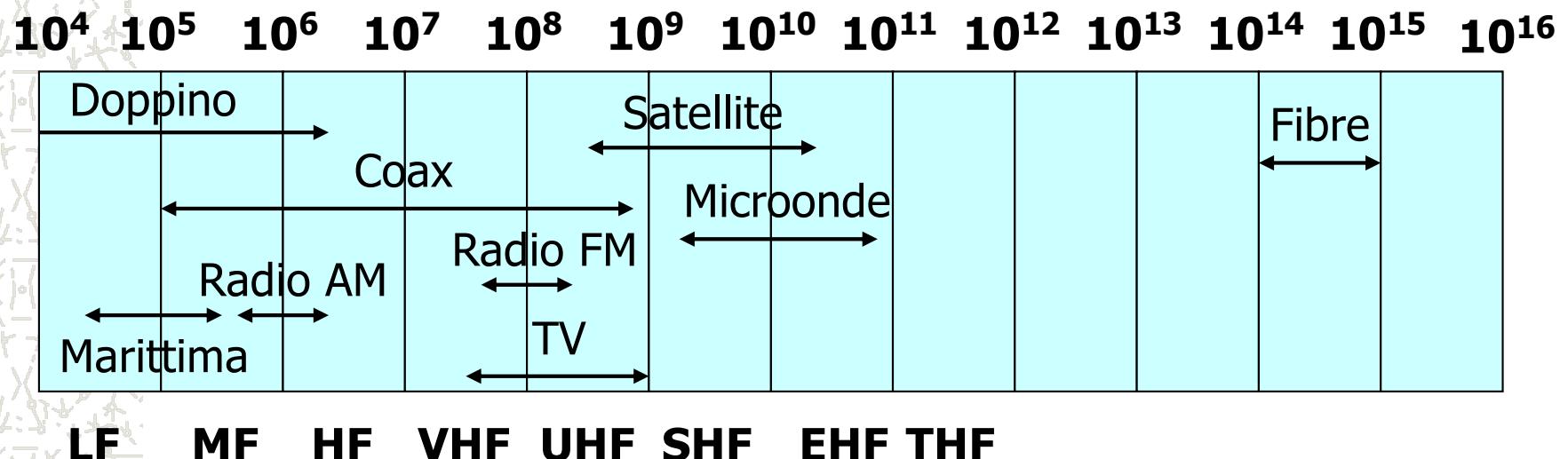
- Un singolo nastro che può immagazzinare **80 Gbyte**, pesa circa **100 g (0.1 Kg)**
- Il camioncino può trasportare $(10000 / 0.1) * 80 \text{ Gbyte} = 8 \text{ Pbyte}$
- **camiom / fibra = 8 PByte / 4000 GByte/sec = 2000 s ≈ 0.55 h**
- La fibra **vince** per distanze più lunghe di quelle reggiungibili in 0.55 ore, cioè circa **50 km** (senza considerare il tempo necessario per gestire 100000 tapes)

Trasmissione Wireless

- Lo Spettro Elettromagnetico
- Trasmissione Radio
- Trasmissione Microwave
- Trasmissione Infrarossi e Onde millimetriche
- Trasmissione Lightwave

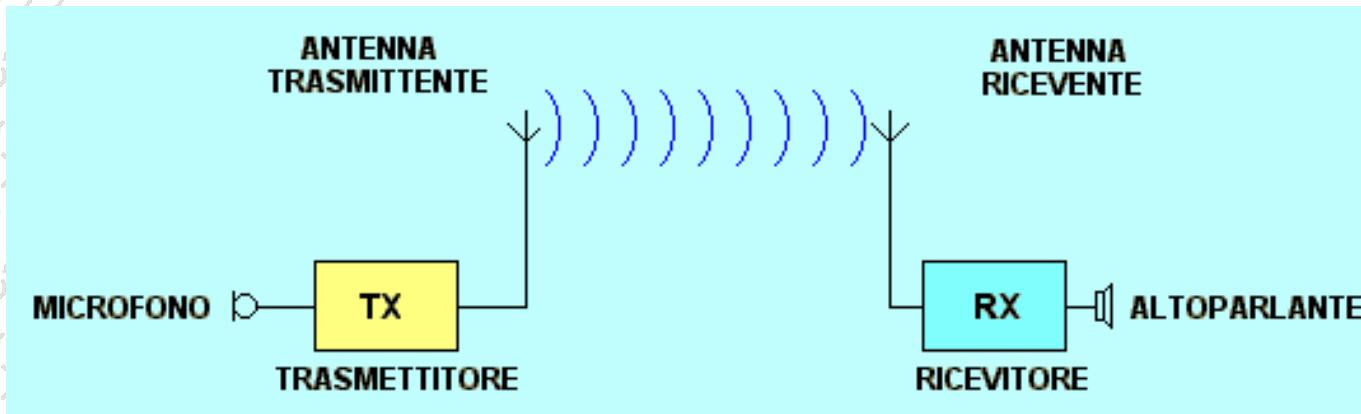
Mezzi di trasmissione Wireless

L'aria: L'aria è un buon mezzo di trasmissione, in particolare le onde radio sono facili da generare, possono viaggiare per lunghe distanze e penetrano facilmente negli edifici. Inoltre sono omnidirezionali, quindi il trasmettitore e il ricevitore non devono essere allineati.

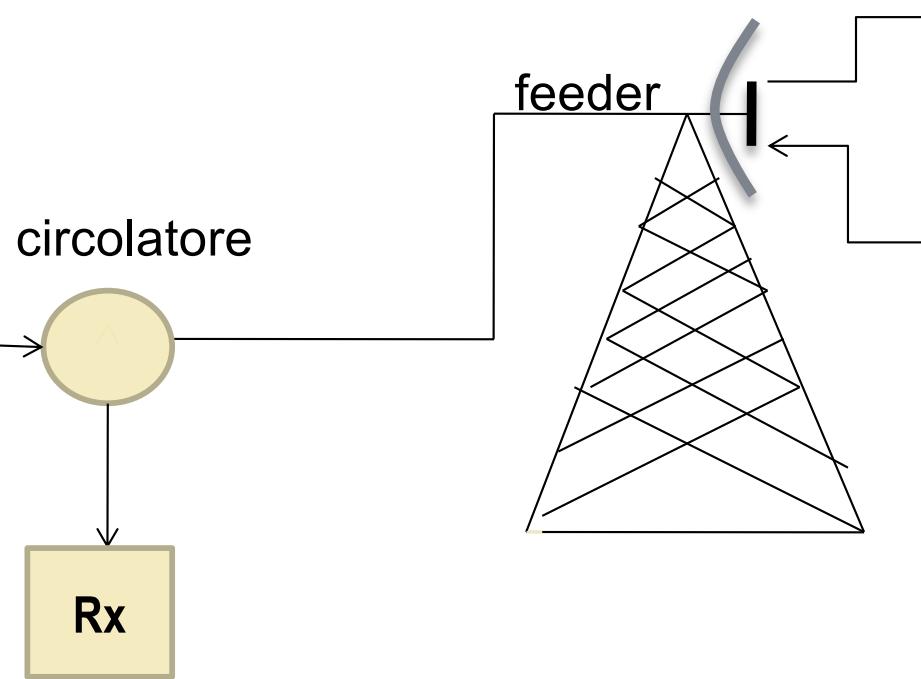


Schema sistema tlc via etere

- Ogni trasmissione radio via etere, utilizza due stazioni (trasmittente e ricevente) separate dall'etere come schematicamente indicato in figura.



Sistema di antenna



- **Elemento irradiante o ricevente:** è l'antenna vera e propria che realizza la trasduzione
- **Feeder di antenna:** è il mezzo trasmissivo utilizzato per collegare il trasmettitore o il ricevitore con l'antenna
- **Dispositivi di diramazione o circolatore:** è utilizzato quando si vuole impiegare l'antenna sia per trasmettere che per ricevere; consente di separare la trasmissione dalla ricezione

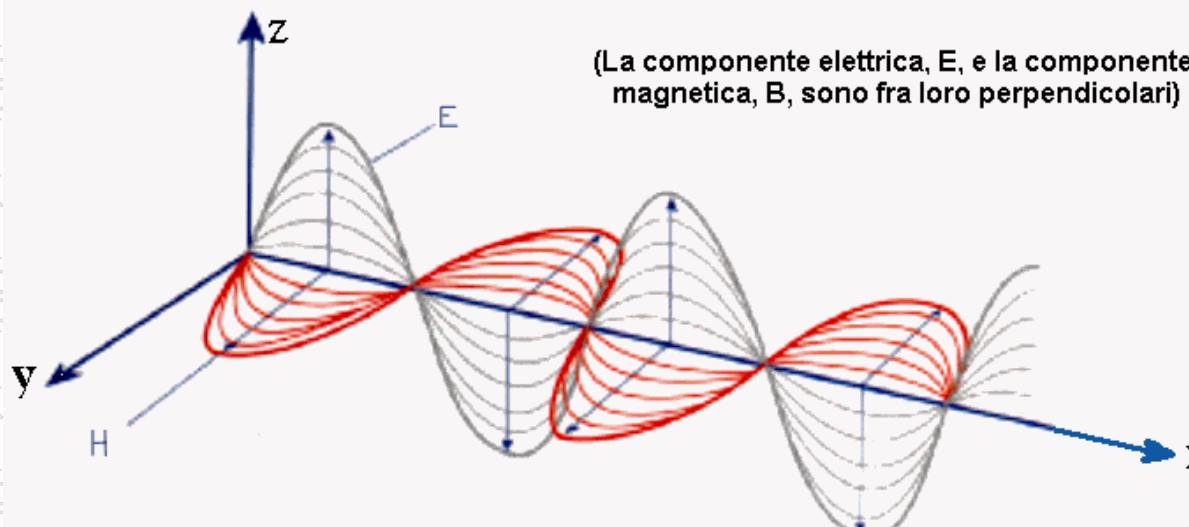
Le onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche, ipotizzate teoricamente da James Clerk Maxwell nel 1864, sperimentate in laboratorio da Hertz e utilizzate nella Radio da Marconi nel 1895, sono costituite da oscillazioni, del campo elettrico e del campo magnetico, che si propagano nel vuoto alla velocità di circa:

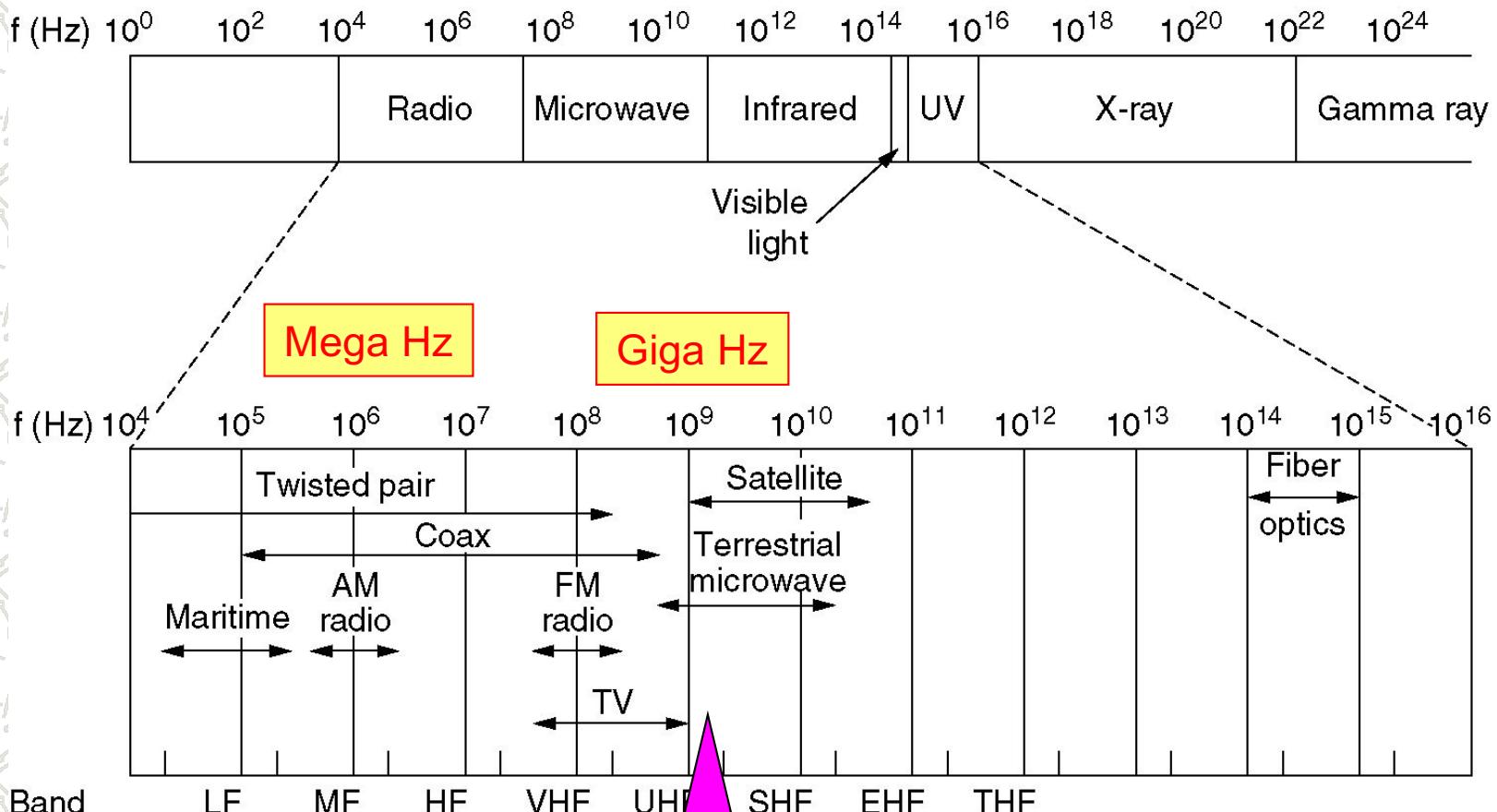
$$c = 300.000 \text{ Km/sec}$$

secondo il disegno seguente

Rappresentazione schematica di un campo elettromagnetico che si propaga lungo la direzione "x"



Lo Spettro Elettromagnetico



2.4 GHz

127

Lo Spettro Elettromagnetico

- A frequenze f basse si possono veicolare pochi bit/Hz, ma a frequenze più alte si può arrivare fino a 40 bit/Hz

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

- Differenziando rispetto alla lunghezza d'onda lambda, si ha

$$\frac{df}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2} \quad \Delta f = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda^2}$$

- Per la fibra in seconda finestra

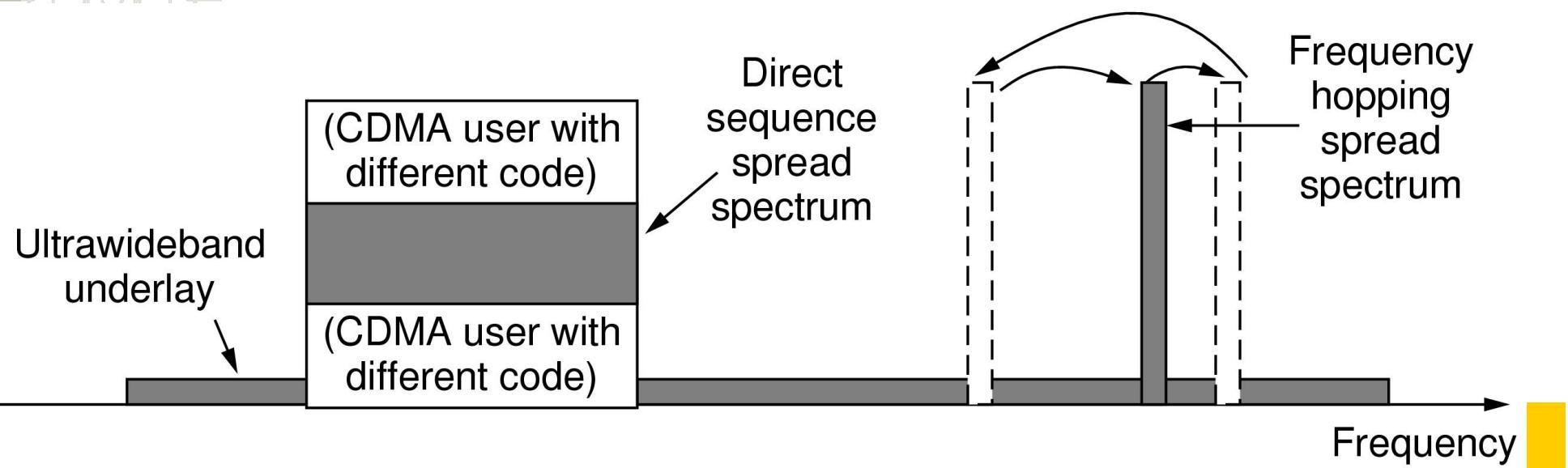
$$\lambda = 1,3 \cdot 10^{-6} \quad \Delta\lambda = 1,7 \cdot 10^{-7} \quad \diamond f \cong 30 \text{ THz}$$

Assegnazione frequenze

- Le frequenze sono una risorsa
 - Enti nazionali / internazionali provvedono ad assegnare le frequenze
 - ITU
 - FCC
 - In Italia è competenza del ministero PP TT
 - La polizia postale è preposta al controllo del rispetto delle bande assegnate

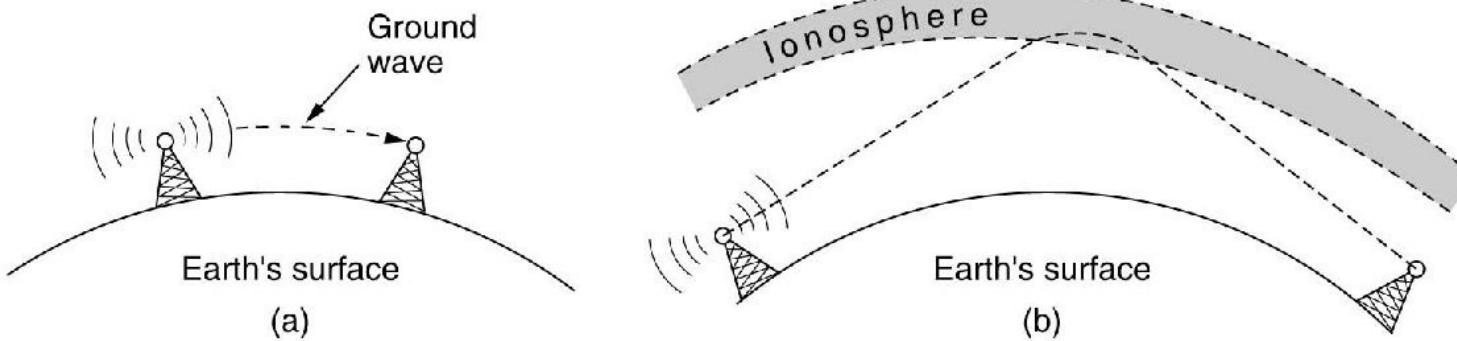
Tipologie di trasmissione radio

- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
 - tecnologia di trasmissione a "frequenza diretta" a banda larga, nella quale ogni bit viene trasmesso come una sequenza ridondante di valori (chip).
 - Indicato per la trasmissione e la ricezione di segnali deboli. Consente l'interoperabilità delle reti wireless attuali
- Spettro diffuso (*Spread Spectrum*)
 - Il trasmettitore opera continuo "salti" di frequenza (*frequency hopping*)
 - Origine militare, difficile da individuare e disturbare



Radiodiffusione

- La radiodiffusione viene utilizzata generalmente per la trasmissione **analogica** di segnali radio-televisivi in modalita' **broadcast**
- Utilizza due tecniche trasmissive differenti in funzione della regione di frequenze:
 - nella regione **fino al MHz** (VLF, LF ed MF) il segnale si propaga **seguendo la curvatura terrestre** ed attraversa bene gli **ostacoli**: una stazione trasmittente può essere ricevuta fino a **1000 Km** di distanza; oltre l'attenuazione (proporzionale all'inverso del quadrato della distanza) diviene eccessiva
 - nella regione **dal MHz al GHz** (HF, VHF e UHF) il segnale viene **assorbito dalla superficie della terra**, ma viene **riflesso** molto bene dalla **ionosfera**; i segnali vengono quindi inviati verso il cielo raggiungono la stazione ricevente dopo la riflessione



Trasmissione via ponte radio

- La banda di frequenza delle **microonde** (1-40 GHz) ha la caratteristiche di poter utilizzare antenne paraboliche di dimensioni maneggevoli (fino a **qualche metro** di diametro) per poter **collimare** e **dare direzione** all'emissione
- Si puo' quindi realizzare una comunicazione **punto-punto** tra sorgente e destinazione con **allineamento ottico** delle antenne: la trasmissione e' rettilinea, ed e' indispensabile la **visibilita'** tra le antenne delle stazioni comunicanti
- Questa tecnica di trasmissione va in competizione con le linee in **coassiale** e via **fibra ottica**
 - per le **lunghe distanze**, quando l'alternativa con mezzo guidato risulta troppo **costosa o impossibile** per motivi morfologici
 - per le **brevi distanze** (ad esempio per connettere due palazzi vicini di una stessa compagnia) come **alternativa** alla stesura di una fibra qualora si dovesse attraversare suolo pubblico o di altra propriet'a, per evitare le complicazioni connesse alle autorizzazioni
- Utilizzando **diverse stazioni ripetitrici** si riescono a coprire distanze elevate (svariate centinaia di Km); una singola tratta puo' coprire in condizioni favorevoli fino a qualche centinaia di Km

Ponti radio (cont.)

- Data la dipendenza dell'attenuazione dalla distanza, per le tratte lunghe si utilizzano generalmente due bande di frequenza: **2-6 GHz** e **10-14 GHz**
- Le connessioni a breve distanza possono utilizzare le frequenze **piu' alte** (fino a 40 GHz) per le quali si hanno i vantaggi:
 - antenne **piu' piccole**
 - fascio **piu' collimato** (quindi minore necessita' di potenza)
 - minori problemi di **interferenza** per lo scarso utilizzo di trasmissioni in quella regione di frequenza

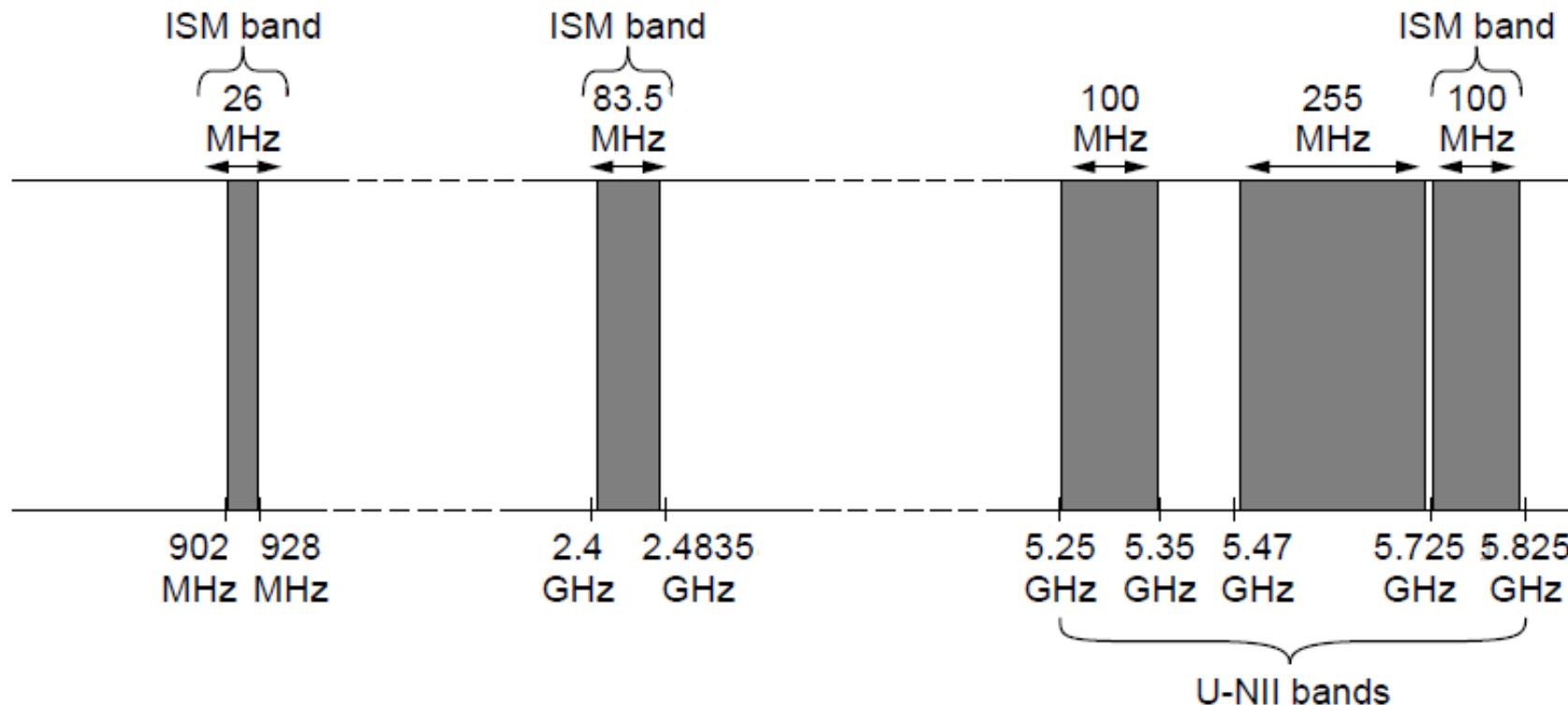
Utilizzo dei ponti radio

- Generalmente utilizzati per trasmissioni **analogiche** (fonia, televisione) o **digitali** (per reti **private** o utilizzate dalle **compagnie telefoniche** fornitrice di servizi)
- Le diverse bande di frequenza sono suddivise in **canali** di diversa larghezza (non uniformi nei diversi paesi), con canali tra i **7 MHz** (a 2 GHz) ed i **220 MHz** (a 18 GHz), e tassi trasmissivi che vanno dai **12 ai 274 Mbps** (in funzione della banda disponibile e del livello di modulazione utilizzato, solitamente **QAM-x**)

Trasmissione Radio – microonde

- Sopra i 100 Mhz ($\lambda < 3$ m) le onde tendono a propagarsi in linea retta
- Usando antenne direzionali ad alto guadagno (paraboliche) si migliora il rapporto S/N. È però necessario l'allineamento
- Curvatura della terra → Necessità di ripetitori per tratte lunghe
- Multipath da rifrazione in atmosfera (dipendente da tempo e frequenza)
- Oltre 8 GHz si ha assorbimento da parte dell'acqua
- Richiede infrastrutture più “leggere” della fibra ottica

Le bande non licenziate

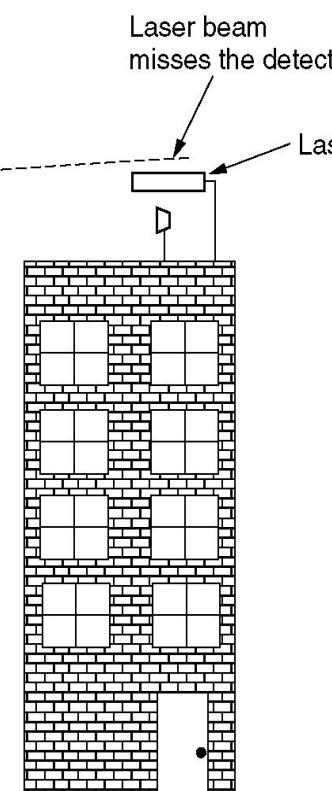
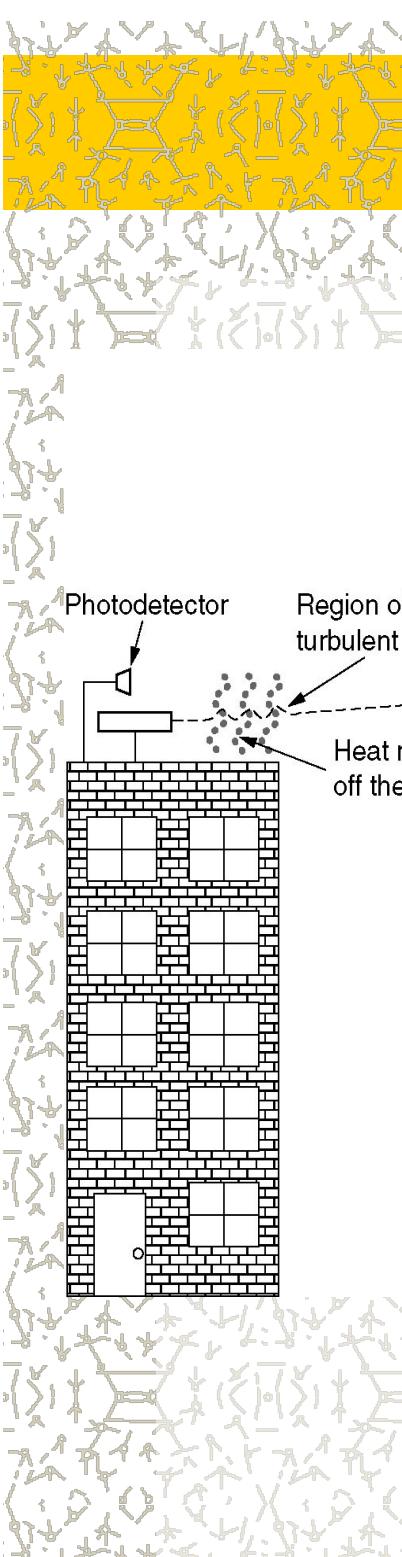


Bande ISM assegnate ad utilizzo industriale-scientifico-medico, non richiedono licenza.

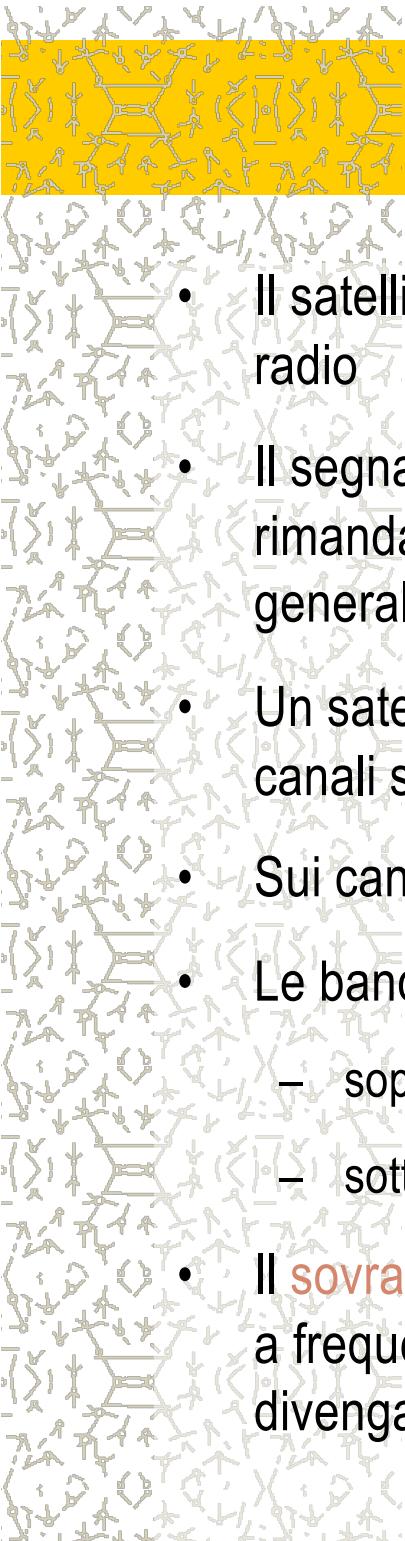
Trasmissione Radio – infrarossi

- Utili per comunicazioni a piccola distanza (telecomandi)
- Non attraversano oggetti (confinamento → non interferenza)
- Più sicure delle onde radio, non richiedono licenza
- Proposte per LAN interne con infrastruttura fissa (beacon)
- Non utilizzabili in esterno per la presenza di emissioni solari
- IRDA (115 Kbps) IRDA 2 (4 Mbps)

Lightwave Transmission



- Grande larghezza di banda,
- Non richiede licenza
- Necessita di grande precisione nel puntamento, pur utilizzando lenti per avere una leggera sfuocatura del raggio
- Attenuazione da precipitazioni atmosferiche
- Disturbi da turbolenze nell'aria dovuti a convezione



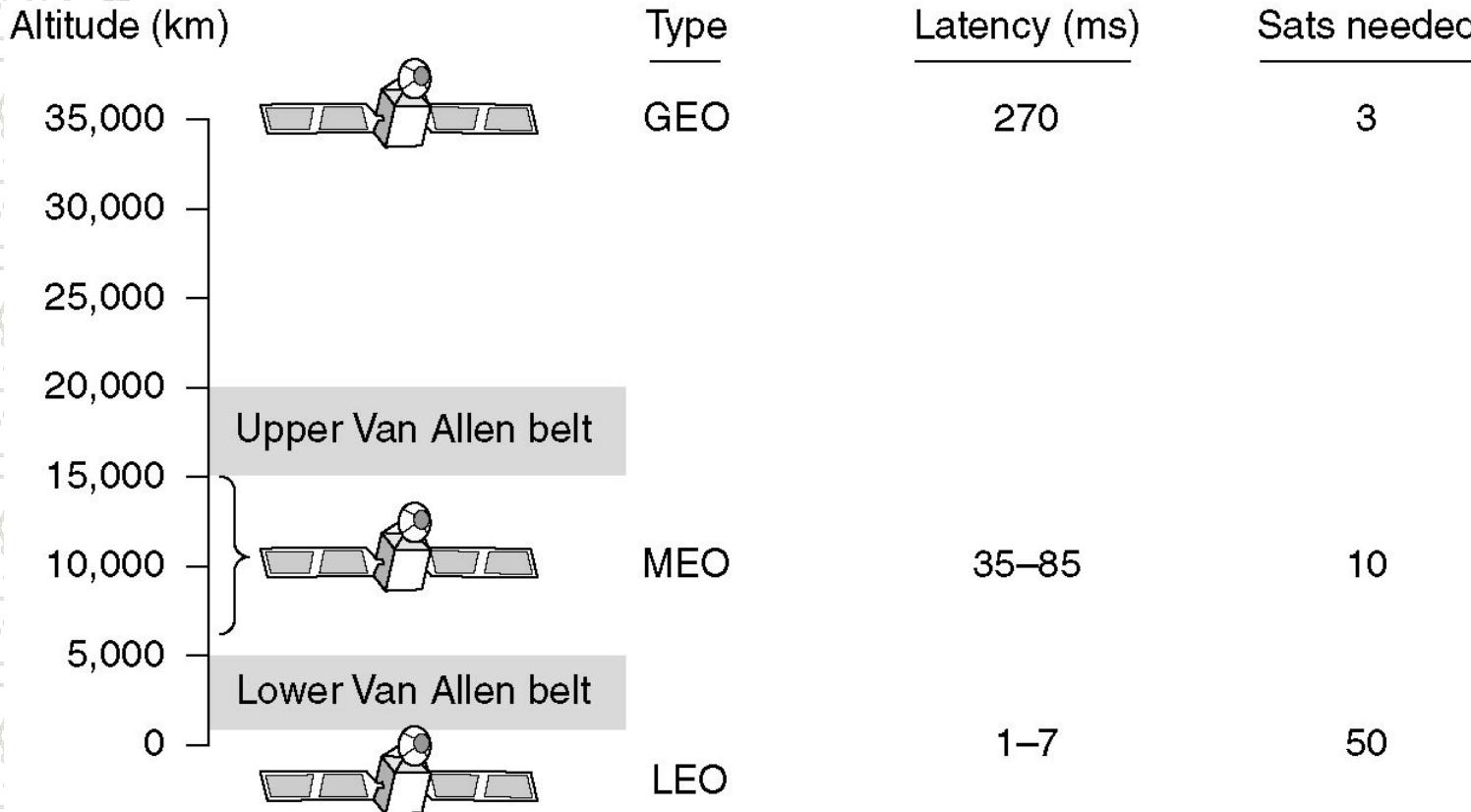
Trasmissioni satellitari

- Il satellite si comporta come una **stazione ripetitrice** del segnale di un ponte radio
- Il segnale viene inviato dalla stazione terrestre al satellite (**uplink**), che lo rimanda a terra verso la stazione o le stazioni riceventi (**downlink**), generalmente utilizzando **frequenze differenti**
- Un satellite opera su **piu' bande di frequenza**, con la tecnologia **FDM**; i singoli canali si chiamano **transponder** (canali tra **15 e 500 MHz** di banda)
- Sui canali il satellite può fare **TDM** per gestire diverse comunicazioni
- Le bande utilizzate sono quelle tra 1 e 10 GHz
 - sopra l'attenuazione atmosferica e' troppo grande
 - sotto ci sono interferenze ed assorbimento dalla ionosfera
- Il **sovraffollamento** delle frequenze spinge attualmente verso l'utilizzo di bande a frequenza superiore, nonostante che i problemi di attenuazione atmosferica divengano sempre piu' importanti

Satelliti

- GEO (Geostationary Earth Orbit): satelliti a 36000 Km di quota in orbita equatoriale, che appaiono in posizione fissa nel cielo
 - questi satelliti sono adatti alla trasmissione dati in quanto il puntamento delle antenne è fisso
 - per motivi di interferenza i satelliti vengono distanziati di due gradi, quindi si possono avere al massimo 180 satelliti
 - la trasmissione dati deve tenere conto del ritardo di propagazione del segnale, che è pari a 0.25 secondi (inefficienti i protocolli con controllo degli errori e ritrasmissione dei pacchetti)
- MEO (Medium Earth Orbit): satelliti a 18000 Km di quota, con 6 ore di periodo dell'orbita
 - inadatti per la trasmissione dati
 - esempio: i satelliti del GPS (Global Positioning System)
- LEO (Low Earth Orbit): tra 750 e 1500 Km di quota
 - molto veloci nel transito, ma vicini, quindi si ha poco ritardo e si richiede poca potenza in trasmissione
 - esempi: Iridium (per fonia, fax, dati, navigazione), Globalstar.

Satelliti per la Comunicazione



Le caratteristiche operative includono l'altitudine a partire a terra, il round-trip delay time e il numero di satelliti necessari a una copertura globale.

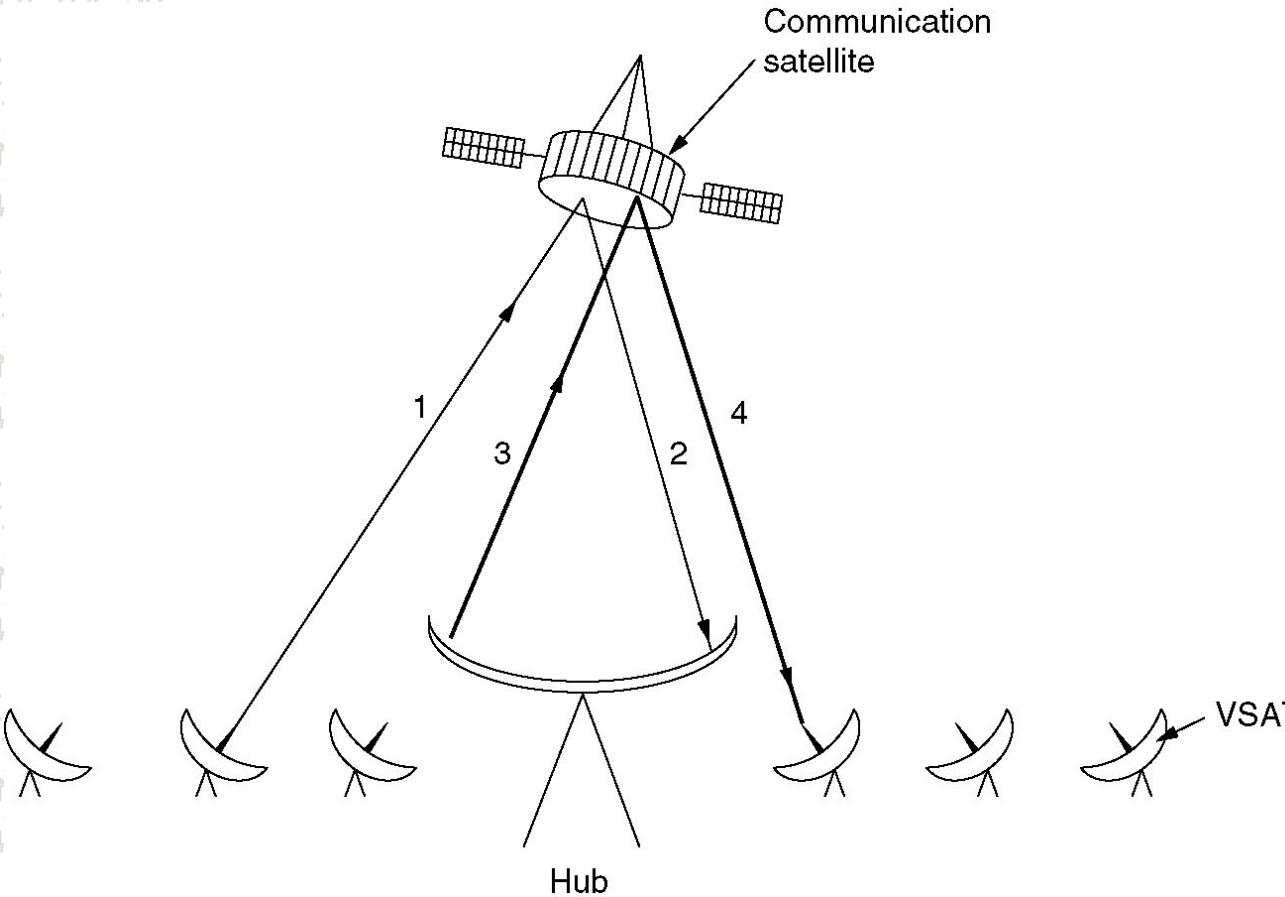
Satelliti per la Comunicazione

Le principali bande satellitari.

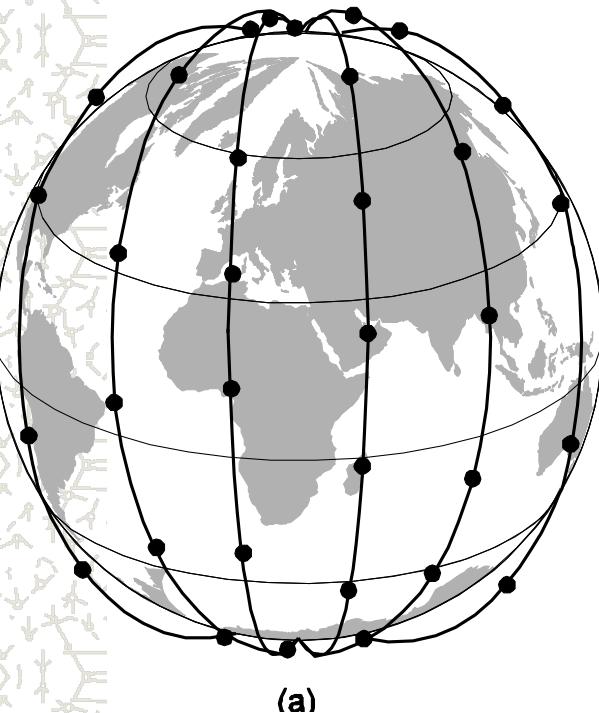
Band	Downlink	Uplink	Bandwidth	Problems
L	1.5 GHz	1.6 GHz	15 MHz	Low bandwidth; crowded
S	1.9 GHz	2.2 GHz	70 MHz	Low bandwidth; crowded
C	4.0 GHz	6.0 GHz	500 MHz	Terrestrial interference
Ku	11 GHz	14 GHz	500 MHz	Rain
Ka	20 GHz	30 GHz	3500 MHz	Rain, equipment cost

Satelliti per la Comunicazione

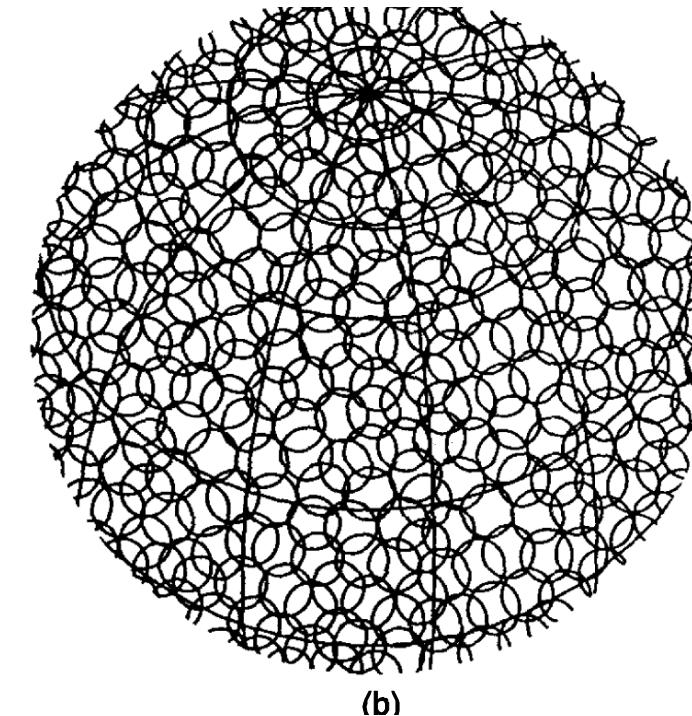
VSAT (apertura molto limitata 1m 1W) attraverso un “hub”.



Satelliti Low-Earth Orbit Iridium



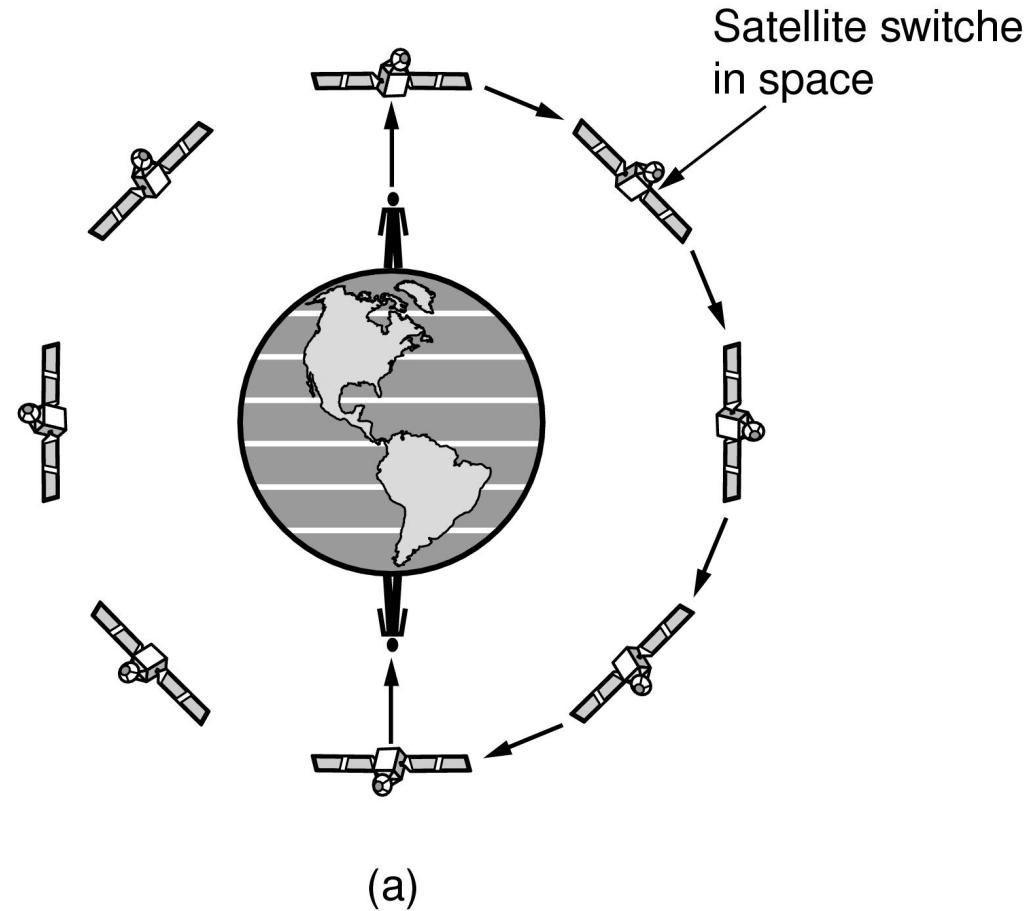
(a)



(b)

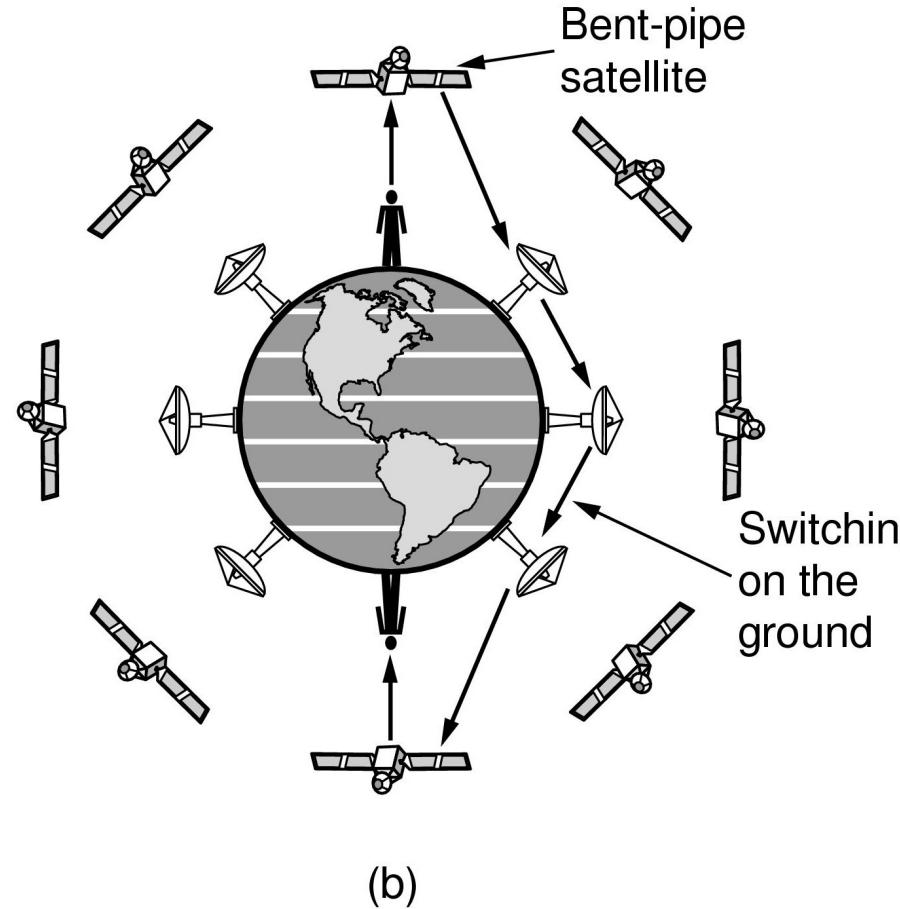
- (a) I 77 sateliti Iridium formano 6 collane intorno alla terra
- (b) Ogni satellite ha 4 vicini
- (c) 1628 celle mobili coprono la superficie terrestre

Satelliti Low-Earth



Relaying in space.

Satelliti Low-Earth



Relaying on the ground

Satellite contro Fibra

Fibra - distanza: \approx 3200 Km \rightarrow Latenza: 10ms

Satellite - distanza: \approx 71000 Km \rightarrow Latenza: 236ms

Assumendo che

Velocità fibra: \approx 97% c

Propagazione onde: \approx c (3.00×10^8 m/s)

