



## Mezzi Trasmissivi

### TELECOMUNICAZIONI

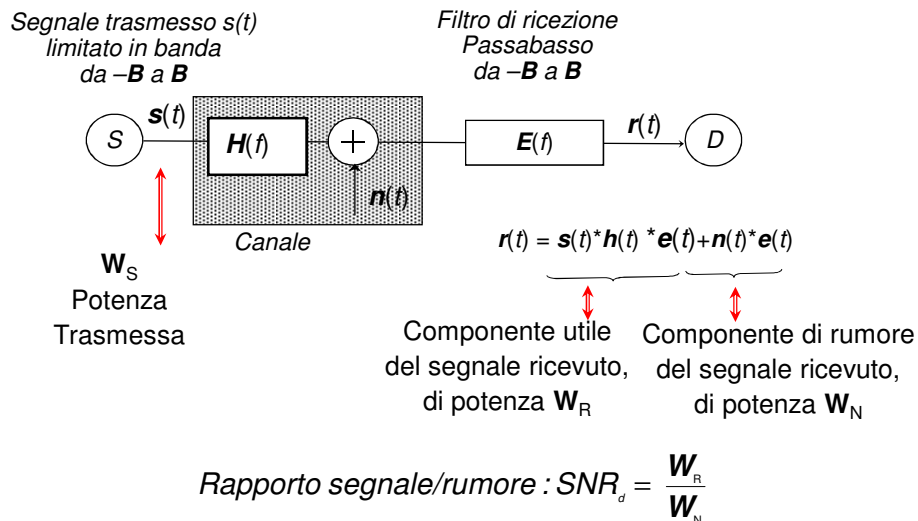
---

## Disturbi e distorsioni in un collegamento

- ✓ Il segnale ricevuto  $r(t)$  può differire dal segnale trasmesso  $s(t)$  a causa di
    - ✓ Distorsione di natura lineare
      - ✓ Ritardo nel tempo
      - ✓ Attenuazione di potenza
      - ✓ Alterazioni della forma d'onda del segnale (filtraggio di canale)
    - ✓ Distorsione di natura non lineare
    - ✓ Somma di disturbi di natura casuale (rumore)
    - ✓ Somma di altri segnali indesiderati
-

## Modello simbolico di un collegamento

3



Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

## Misure Logaritmiche Di Potenza

4

- ✓  $W_{\text{watt}}$  Potenza assorbita: misurata in Watt
- ✓  $W_{\text{mW}}$  Potenza assorbita: misurata in milliWatt
- Misura logaritmica delle potenze:**
- ✓ dB riferito al Watt:  $W_{\text{dBW}} = 10 \log_{10}(W_{\text{watt}} / 1 \text{ watt})$
- ✓ dBm riferito al milliWatt:  $W_{\text{dBm}} = 10 \log_{10}(W_{\text{mW}} / 1 \text{ mwatt})$

Potenza in mW:	1	10	100	1000
Potenza in dBm:	0	10	20	30

- ✓ Misura logaritmica di rapporto di potenze (numero puro):

$$R = W_1 / W_2$$

$$R_{\text{dB}} = 10 \log_{10} R$$

Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

## Attenuazione di un collegamento (1/2)

5

- ✓ Segnale in ingresso sinusoidale alla frequenza  $f_0$ :

$$s(t) = A \cos(2 \pi f_0 t)$$

con potenza  $W_S = A^2/2$ .

- ✓ All'uscita di un canale LP con funzione di trasferimento  $H(f)$  ottengo:

$$|H(f_0)| A \cos(2 \pi f_0 t + \arg[H(f_0)])$$

con potenza  $W_R = |H(f_0)|^2 A^2/2$

- ✓ La potenza è ridotta di un fattore  $W_S / W_R = 1/|H(f_0)|^2$
- ✓ Si definisce quindi attenuazione del collegamento  $A(f_0)$  alla frequenza  $f_0$  il valore

$$A(f_0) = 1/|H(f_0)|^2$$

## Attenuazione di un collegamento (2/2)

6

- ✓ Misura logaritmica dell' attenuazione del collegamento  $A(f_0)$  (Decibel):

$$A_{dB}(f_0) = 10 \log_{10} A(f_0)$$

- ✓ La potenza ricevuta è legata a quella trasmessa da:

$$W_{R \text{ dBm}}(f_0) = W_{S \text{ dBm}}(f_0) - A_{dB}(f_0) \quad (\text{potenze misurate in milliwatt})$$

- ✓ ovvero

$$W_{R \text{ dBW}}(f_0) = W_{S \text{ dBW}}(f) - A_{dB}(f_0) \quad (\text{potenze misurate in watt})$$

- ✓ con

$$A_{dB}(f_0) = 10 \log_{10}(1/|H(f_0)|^2) = 20 \log_{10}(1/|H(f_0)|)$$

## Rumore in un collegamento

7

- ✓ Rumore, di natura termica, ha potenza  $W_N$  (Watt) proporzionale alla larghezza di banda  $B$  (Hz) del filtro di ricezione, ossia

$$W_N = FKT_o B \quad (\text{watt})$$

dove  $F$  è il fattore di rumore del ricevitore ( $F \geq 1$ ),  $K$  è la costante di Boltzmann ( $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J / } ^\circ \text{ Kelvin}$ ),  $T_o$  è la temperatura di lavoro del ricevitore ( $T_o = 290^\circ \text{ Kelvin}$ ).

- ✓ Il rapporto segnale-a-rumore a valle del filtro di ricezione è quindi:

$$SNR = \frac{W_R}{FKT_o B} \quad SNR_{dB} = W_{RdBm} - F_{dB} + 174 - 10 \log_{10} B_{Hz}$$

$$KT_o = -174 \text{ dBm/Hz}$$

## Sensibilità di un ricevitore e Margine di sistema

8

- ✓ *Sensibilità di un ricevitore*: minima potenza ricevuta che consente di realizzare la desiderata qualità del collegamento (rapporto segnale/rumore o probabilità di errore). Si misura normalmente in dBm ( $S_{dBm}$ ).

✓ Ad esempio, la sensibilità di un Ricevitore GSM è -105 dBm

- ✓ *Guadagno di sistema*: la massima attenuazione sopportabile nel collegamento

$$A_{dB} \leq G_{SdB} = W_{sdBm} - S_{dBm}$$

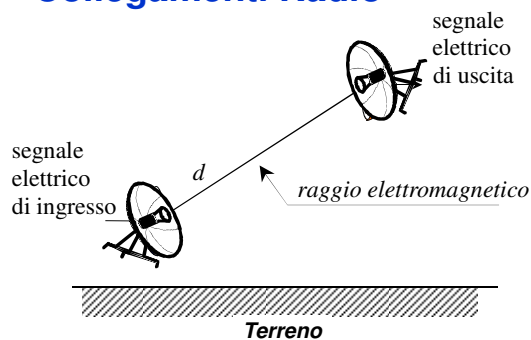
- ✓ *Margine di sistema*: massima attenuazione supplementare sopportabile, es. precipitazioni piovose in un collegamento radio.

$$M_S = G_{SdB} - A_{dB}$$

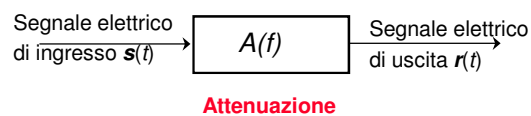
## Collegamenti Radio

9

### Collegamento fisico



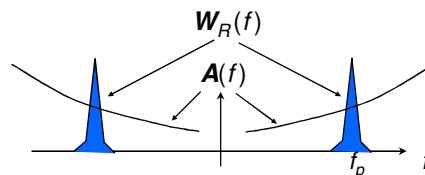
### Circuito equivalente



## Relazioni tra le potenze

10

- ✓ Osservazione: la banda  $2W$  occupata dal segnale modulato intorno alla frequenza portante  $f_p$  e' piccola rispetto alle variazioni di  $A(f)$ . Quindi  $A(f)$  può ritenersi (circa) costante nella banda del segnale modulato.



- ✓ Relazione tra le potenze:  $W_R(f) = W_S(f) / A(f)$

$$W_R = W_S / A(f_p) \Rightarrow W_{RdBm} = W_{SdBm} - A(f_p)_{dB}$$

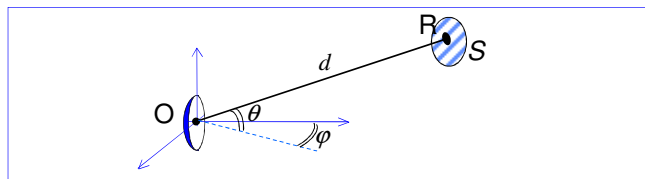
$$f_p \equiv \text{frequenza portante} \quad \lambda \equiv c / f_p = \text{lunghezza d'onda}$$

$$c \equiv 3 \cdot 10^8 \text{ m/s (velocità della luce)}$$

## Guadagno d'antenna (1/3)

11

- ✓ Supponiamo che un'antenna trasmittente sia posta in O. Sia R un punto di coordinate polari  $(d, \theta, \varphi)$  a distanza  $d$  (m) dall'antenna. La sfera su cui giace R ha superficie  $4\pi d^2$ .
- ✓ Sia  $P_{TOT}$  (Watt) la potenza totale irradiata dall'antenna.
- ✓ Sia  $P_R = P_R(d, \theta, \varphi)$ , la quota parte della potenza irradiata dall'antenna che transita attraverso una superficie di area  $S$  ( $m^2$ ) centrata intorno ad R.



Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

## Guadagno d'antenna (2/3)

12

- ✓ Def: Un'antenna si dice isotropa se irradia la stessa quantità di potenza in tutte le direzioni  $(\theta, \varphi)$  dello spazio con

$$-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$$

- ✓ Quindi, se l'antenna trasmittente è isotropa abbiamo che

$$P_R(d, \theta, \varphi) = P_R(d) = S P_{TOT} / (4\pi d^2) \text{ (Watt)}$$

per **ogni** valore di  $\theta$ , e di  $\varphi$  essendo

- ✓  $P_{TOT}$  (Watt) la potenza totale irradiata dall'antenna.
- ✓  $P_R(d, \theta, \varphi)$ , la quota parte della potenza irradiata dall'antenna che transita attraverso una superficie di area  $S$  ( $m^2$ ) centrata intorno ad un punto a distanza  $d$ , visto sotto le direzioni  $\theta, \varphi$ .

Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

## Guadagno d'antenna (3/3)

13

- ✓ Si dice **Guadagno d'antenna**  $G(\theta, \varphi)$  la funzione

$$G(\theta, \varphi) \equiv P_R(d, \theta, \varphi) / [P_{TOT} / (4\pi d^2) S] \quad (\text{Watt})$$

$$-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$$

che descrive il modo in cui un'antenna trasmittente irradia la potenza nelle varie direzioni  $(\theta, \varphi)$  dello spazio.

- ✓ Il Guadagno d'antenna è una funzione non negativa
- ✓ Un'antenna isotropa presenta un guadagno costante in tutte le direzioni  $\rightarrow G(\theta, \varphi) = 1, \forall \theta, \varphi$ ;
- ✓ Un'antenna si dice **direttiva** nella direzione  $\theta_0, \varphi_0$  se presenta un guadagno molto elevato in tale direzione

$$\rightarrow G(\theta_0, \varphi_0) \gg 1 \text{ e } G(\theta, \varphi) \ll 1 \text{ altrove}$$

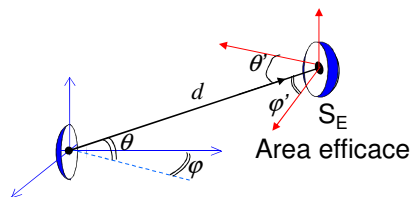
- ✓ Il guadagno d'antenna è espresso in unità logaritmiche (dB)

## Attenuazione di spazio libero (1/2)

14

$$W_R = \frac{W_S}{4\pi \cdot d^2} G_T(\theta, \varphi) S_E$$

$$S_E = \frac{G_R(\theta', \varphi')}{4\pi \cdot f^2 / c^2}$$



$G_T(\theta, \varphi)$  = guadagno dell'antenna trasmittente

$G_R(\theta', \varphi')$  = guadagno dell'antenna ricevente

$$A(f_p) \equiv \frac{W_S}{W_R} = \frac{(4\pi)^2}{c^2} \frac{d^2 \cdot f_p^2}{G_T(\theta, \varphi) \cdot G_R(\theta', \varphi')}$$

## Attenuazione di spazio libero (2/2)

15

- ✓ Misura logaritmica dell'attenuazione introdotta dal collegamento:

$$A(f)_{dB} = 32,4 + 20 \log_{10} d_{Km} + 20 \log_{10} f_{MHz} - G_{TdB} - G_{RdB}$$

← Attenuazione dello spazio libero →

- ✓ L'attenuazione introdotta dal collegamento dipende da
  - ✓ la distanza fra le antenne
  - ✓ la frequenza portante utilizzata
  - ✓ il guadagno dell'antenna trasmittente (attitudine dell'antenna trasmittente ad amplificare il segnale trasmesso nella direzione del collegamento)
  - ✓ il guadagno dell'antenna ricevente (attitudine dell'antenna ricevente ad captare il segnale ricevuto nella direzione del collegamento).

Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

## Tipologie di collegamenti radio

16

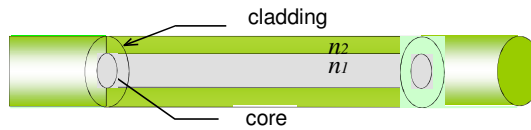
- ✓ In visibilità:
  - ✓ Distanza fra le antenne inferiore a un valore massimo dipendente dall'altezza delle antenne. Assenza di ostacoli fra le antenne.
- ✓ NON in visibilità:
  - ✓ Riflessioni sugli strati alti dell'atmosfera nella gamma HF.
  - ✓ Riflessione e diffrazione da ostacoli terrestri (palazzi, terreno, ecc.)
- ✓ Ulteriori cause di attenuazione:
  - ✓ Presenza di ostacoli, fissi o mobili (cammini multipli).
  - ✓ Presenza di pioggia. Questo effetto cresce al crescere della frequenza portante, a partire da circa 13 GHz.

Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013



## Fibra Ottica: caratteristiche fisiche (1/3)

17



- ✓ Una fibra ottica è costituita da un cilindro dielettrico (cuore, o *core*) circondato esternamente da una corona circolare (mantello, o *cladding*) costituita da un altro materiale dielettrico.
- ✓ Grandezze fisiche e parametri geometrici della fibra:
  - ✓  $a$  raggio del cuore (m)
  - ✓  $b$  raggio esterno del mantello (m)
  - ✓  $n_1 = c / v_1$  indice di rifrazione del cuore
  - ✓  $n_2 = c / v_2$  indice di rifrazione del mantello
- ✓ dove  $c=3 \times 10^8$  m/s è la velocità della luce nel vuoto,  $v_1$  la velocità della luce nel cuore,  $v_2$  la velocità della luce nel mantello.

Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

## Fibra Ottica: caratteristiche fisiche (2/3)

18

- ✓ Una fibra ottica impiegata come mezzo trasmissivo tra una sorgente ed una destinazione di un collegamento di telecomunicazioni opera sotto le seguenti condizioni:

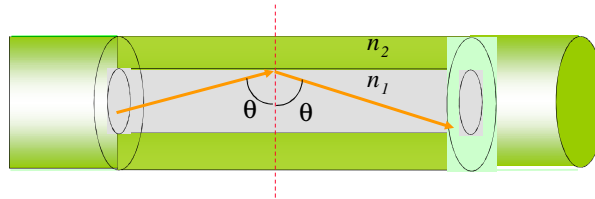
$$n_1 > n_2, b \gg a$$

- ✓ Tipicamente, si ha
  - ✓  $b \geq 10 a$
  - ✓  $n_1 \approx 1.01 n_2$
  - ✓  $a \leq 2.4 \lambda / (2 \pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2})$  (condizione di *monomodo*)
- ✓ dove  $\lambda$  (m) è la lunghezza d'onda della radiazione luminosa che viaggia nella fibra.

Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

### Fibra Ottica: caratteristiche fisiche (3/3)

19



- ✓ Sia  $\theta$  l'angolo di incidenza del raggio luminoso rispetto alla normale alla superficie di separazione cuore/mantello. Se è verificata la condizione di riflessione totale

$$\theta > \arcsin(n_2 / n_1)$$

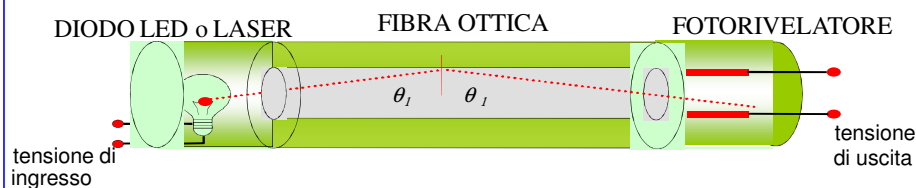
- ✓ allora il raggio luminoso incidente alla superficie di separazione cuore/mantello è **totalmente riflesso** all'interno del cuore e il raggio luminoso **si propaga lungo l'asse della fibra**, subendo, eventualmente, riflessioni multiple.

Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

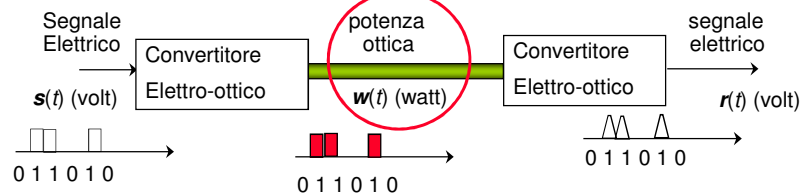
### Collegamenti in Fibra Ottica

20

#### Circuito fisico



#### Circuito equivalente

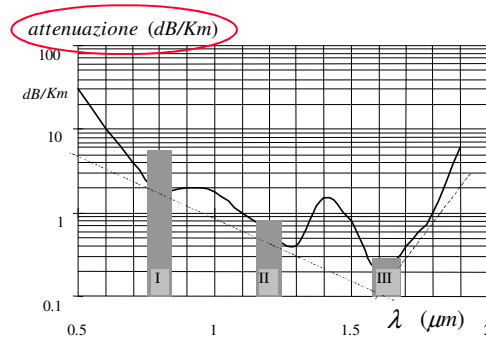


Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

## Fibra Ottica: caratteristiche fisiche (1/3)

21

- ✓ La luce emessa ha uno spettro di emissione molto stretto, centrato intorno ad una lunghezza d'onda compresa tra 0,8 e 1,8 micron.
- ✓ L'attenuazione in dB/km presenta un minimo in corrispondenza di alcuni intervalli di lunghezze d'onda (finestre).

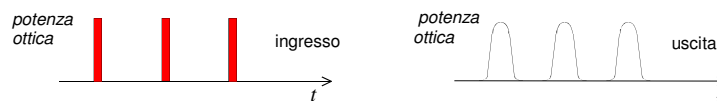


Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

## Caratteristiche di dispersione temporale in una fibra (1/2)

22

- ✓ **Dispersione temporale:** un impulso luminoso applicato all'ingresso si presenta in uscita con una durata temporale maggiore



- ✓ **Dispersione modale:** Se il cuore della fibra ha un raggio a "elevato" si propagano più onde (modi), ciascuna con diversa velocità di propagazione.
  - ✓ Per evitare questa dispersione si usano *fibre di piccolo diametro*, chiamate MONOMODO
- ✓ **Dispersione cromatica:** Il diodo generatore distribuisce l'energia luminosa su più lunghezze d'onda,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots$  propagazione. Poco sensibile in *seconda finestra*.
  - ✓ Per ridurre questa dispersione si usano *sorgenti a banda molto stretta*, quasi monocromatiche (LASER invece che LED)

Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

## Caratteristiche di dispersione temporale in una fibra (2/2)

23

- ✓ La dispersione temporale  $\Delta$  (sec.) è proporzionale alla lunghezza del collegamento in accordo a

$$\Delta = 2 \tau d_{km}$$

dove, per il caso di sola dispersione cromatica  $\tau = 0,06$  nsec/Km per i laser e  $\tau = 2,5$  nsec/Km per i led.

- ✓ La massima dispersione tollerabile è  $(2 \tau d_{km}) \cong T_{bit}$
- ✓ Quindi la Massima frequenza binaria  $f_b$  utilizzabile, per un collegamento di  $d_{km}$  è

$$f_b = \frac{1}{T_{bit}} \leq \frac{1}{2 \cdot \tau_{ns/km} \cdot d_{Km}} \quad (Gbit/sec)$$

Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

## Caratteristiche di impiego di una fibra

24

- ✓ Le fibre attualmente impiegate sono monomodo, e dunque presentano solo dispersione cromatica. Si utilizza la terza finestra.
  - ✓ minore attenuazione, dell'ordine di 0,25 dB/Km
  - ✓ maggiore dispersione cromatica, dell'ordine di  $\tau = 0,06$  nsec/Km per i laser, e di  $\tau = 2,5$  nsec/Km per i led

Frequenze binarie di trasmissione raggiungibili in una fibra monomodo, in terza finestra.

$$f_b = \frac{1}{T_{bit}} \leq \frac{1}{2 \cdot \tau_{ns/km} \cdot d_{Km}} \quad (Gbit/sec)$$

	LED	LASER
d(Km)	(Mb/s)	(Mb/s)
4	50.0	2083.3
8	25.0	1041.7
15	13.3	555.6
30	6.7	277.8
60	3.3	138.9
120	1.7	69.4
240	0.8	34.7

Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

## Esercizi

- Un collegamento a ponte radio analogico lungo 12 [km] lavora alla frequenza di 11 [GHz]. Trasmettitore e ricevitore utilizzano due antenne paraboliche uguali con guadagno  $G = 30$  (dB). Sapendo che il trasmettitore lavora con una potenza  $P_T = 10$  [W], calcolare:

- la potenza  $P_T$  in dBm e in dBW;
- la lunghezza d'onda  $\lambda$ ;
- l'attenuazione dello spazio libero;
- la potenza  $P_R$  in dBm;
- la potenza  $P_R$  del ricevitore.
- la potenza  $P_R$  del ricevitore in dB e dBm

Telecomunicazioni – Mezzi trasmissivi – Aprile 2013

## Esercizi (2)

Si dato un collegamento in fibra ottica monomodale con WT assegnata, III finestra, laser, L Km, dispersione cromatica per km  $\tau = 0.05$  ns/Km.

Dimensionare la lunghezza della fibra in modo che transiti un segnale binario di  $f_b = 100$  Mb/s.

Si richiede che la probabilità di errore sul bit non superi  $P_b = 10^{-9}$ .

