



POLITECNICO
MILANO 1863

Fondamenti di TELECOMUNICAZIONI

Prof. Marco Mezzavilla



POLITECNICO
MILANO 1863

Lezione 7 - Livello Fisico III

INDICE

7. LIVELLO FISICO III

1. **Banda del segnale**
2. **Campionamento**
3. **Quantizzazione**
4. **Modulazione**
5. **Capacità di canale**
6. **Attenuazione**
7. **Mezzi trasmissivi**
8. **Rete in fibra ottica**

Parte I

Parte II

Parte III (oggi)

ATTENUAZIONE

01

Logaritmo e Decibel

□ Dato un numero x , si definisce $\log_{10}x$ quel numero y per cui $10^y=x$.

- $\log_{10}0.001 = -3$, poiché $10^{-3}=0.001$
- $\log_{10}0.01 = -2$, poiché $10^{-2}=0.01$
- $\log_{10}0.1 = -1$, poiché $10^{-1}=0.1$
- $\log_{10}1 = 0$, poiché $10^0=1$
- $\log_{10}10 = 1$, poiché $10^1=10$
- $\log_{10}100 = 2$, poiché $10^2=100$
- $\log_{10}1000 = 3$, poiché $10^3=1000$

□ Proprietà del logaritmo:

- $\log_{10}(xy) = \log_{10}x + \log_{10}y$
- $\log_{10}(x/y) = \log_{10}x - \log_{10}y$

□ Il **decibel** (indicato sinteticamente con **dB**) viene utilizzato ampiamente nel mondo delle telecomunicazioni per indicare un **VALORE RELATIVO** di tensione, corrente, oppure potenza:

- $dB = 20\log_{10}(V_2/V_1)$
- $dB = 20\log_{10}(I_2/I_1)$
- $dB = 10\log_{10}(P_2/P_1)$

$$\xrightarrow{P = V \cdot I} \xrightarrow{\text{legge di Ohm}} \boxed{V = I \cdot R} \xrightarrow{} \boxed{P = V^2 / R = I^2 \cdot R}$$

Attenuazione

- Se il segnale di ingresso ha un potenza P_{IN} e il segnale di uscita ha una potenza P_{OUT} si definisce ATTENUAZIONE (o GUADAGNO) del collegamento A il rapporto:

$$A = P_{OUT} / P_{IN}$$



- dB:** $A_{dB} = 10 \log_{10} (P_{OUT} / P_{IN})$

-10 dB significa $P_{OUT} = P_{IN}/10$
-3 dB significa $P_{OUT} = P_{IN}/2$
-40 dB significa $P_{OUT} = 10^{-4} P_{IN}$

- dBm:** $P_{dBm} = 10 \log_{10} (P/1mW)$

potenza relativa a 1 mW

-10 dBm significa $P = 0,1 \text{ mW}$
3 dBm significa $P = 2 \text{ mW}$
40 dBm significa $P = 10 \text{ W}$

$$A_{dB} = P_{OUT} - P_{IN} \quad (\text{con } P_{OUT} \text{ e } P_{IN} \text{ in dBm})$$

Rapporto di Potenza	dB	Rapporto di potenza	dB
10^0	0		
10^1	10	10^{-1}	-10
10^2	20	10^{-2}	-20
10^3	30	10^{-3}	-30
10^4	40	10^{-4}	-40
10^5	50	10^{-5}	-50
10^6	60	10^{-6}	-60

dBm	Watt	dBm	MilliWatt
66	4000	30	1000
63	2000	27	500
60	1000	23	200
57	500	20	100
50	100	17	50
47	50	13	20
43	20	10	10
40	10	7	5
37	5	6	4
33	2	3	2
30	1	0	1
		-3	0,5
		-6	0,25

Attenuazione (dB)

- Attenuazione in dB: $A(\text{dB}) = 10 \log_{10}(P_{\text{OUT}} / P_{\text{IN}}) = P_{\text{OUT}} (\text{dBW}) - P_{\text{IN}} (\text{dBW})$



- Esempio:

- $P_{\text{IN}}=1000 \text{ W}, P_{\text{OUT}}=1 \text{ W} \rightarrow$ si ha una perdita o attenuazione **$A = -30 \text{ dB}$**
- $P_{\text{IN}}=1 \text{ W}, P_{\text{OUT}}=2 \text{ W} \rightarrow$ si ha un guadagno **$A = 3 \text{ dB}$**
- $P_{\text{IN}}=1 \text{ W}, P_{\text{OUT}}=0.5 \text{ W} \rightarrow$ si ha una perdita o attenuazione **$A = -3 \text{ dB}$**

- Esercizio:

- Dati

- $P_{\text{IN}}=1 \text{ W} \rightarrow P_{\text{IN,dBW}} = 10 \log_{10} 1 = 0 \text{ dBW}$
 - $A = -27 \text{ dB}$

- Trova P_{OUT}

- $$P_{\text{OUT}} = P_{\text{IN,dBW}} + A = -27 \text{ dBW} = 2 \text{ mW}$$

Attenuazione del mezzo trasmittivo

- L'attenuazione per km del mezzo trasmittivo α può espressa in unità logaritmiche (in dB/km)

$$P_{OUT} = P_{IN} e^{-\alpha L}$$

$$10 \log_{10}(P_{OUT}/P_{IN}) = -\alpha_{dB} L$$



- dove

e: Il numero di Eulero, una costante matematica pari a circa 2.718, che compare naturalmente nelle formule di decadimento esponenziale

$$\alpha_{dB} = (10 \log_{10} e) \alpha = 4.343 \alpha$$

- Decadimento esponenziale della potenza del segnale:

- Se α è **piccolo**, l'attenuazione è bassa, e il segnale può viaggiare per lunghe distanze con poche perdite.
- Se α è **grande**, l'attenuazione è alta, e la potenza del segnale diminuisce rapidamente con la distanza.

Esempi



- ❑ INPUT e OUTPUT hanno gli stessi livelli di potenza
 - ❑ Se $P_{IN}=0 \text{ dBm}$ allora $P_{OUT}=0 \text{ dBm}$
 - ❑ Se $P_{IN}=3 \text{ dBm}$ allora $P_{OUT}=3 \text{ dBm}$

Esempi



- ❑ Il segnale in OUTPUT ha una potenza 10 volte più grande rispetto al segnale in INPUT
 - ❑ Se $P_{IN}=0 \text{ dBm}$ (1 mW) allora $P_{OUT}=10 \text{ dBm}$ (10 mW)
 - ❑ Se $P_{IN}=3 \text{ dBm}$ (2 mW) allora $P_{OUT}=13 \text{ dBm}$ (20 mW)

Power budget

- ❑ **POWER BUDGET:** differenza (in dB) tra potenza media del trasmettitore e la potenza al ricevitore necessaria per ottenere le prestazioni volute.
- ❑ E' la "dotazione" di potenza del sistema che si può "spendere" per supportare tutte le attenuazioni:
 - ❑ perdite di linea αL
 - ❑ altre perdite A_{extra} (es. connettori, giunzioni, ecc.)
 - ❑ un margine di sistema M per gli 'imprevisti'

$$P_{TX} - P_{RX} = \alpha L + A_{extra} + M$$

- ❑ Perdite o attenuazione di linea = α (in dB/km) x lunghezza di tratta (in km)
- ❑ **ATTENZIONE AL SEGNO:** Se sono perdite in dB, si SOTTRAGGONO alla POTENZA DI PARTENZA in dBm

MEZZI TRASMISSIVI

02

Classificazione dei mezzi trasmittivi

- In base al fenomeno fisico utilizzato per trasportare i bit, i mezzi trasmittivi che costituiscono il canale di comunicazione possono essere classificati come:
 - **Mezzi elettrici**: sono i mezzi trasmittivi classici (cavi di rame) che si basano sulla proprietà di certi metalli di condurre energia elettrica. Ad ogni bit è associato un particolare valore di tensione o corrente, oppure determinate variazioni di tali grandezze
 - **Onde radio (wireless)**: il segnale è associato ad un'onda elettromagnetica che si propaga nello spazio che ha la proprietà di riprodurre a distanza una corrente elettrica in un dispositivo ricevente (antenna)
 - **Mezzi ottici (fibre ottiche)**: basati sulla propagazione guidata della luce

Modalità di propagazione dell'informazione

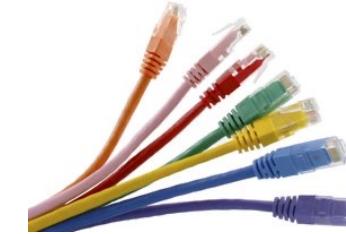
□ PROPAGAZIONE GUIDATA



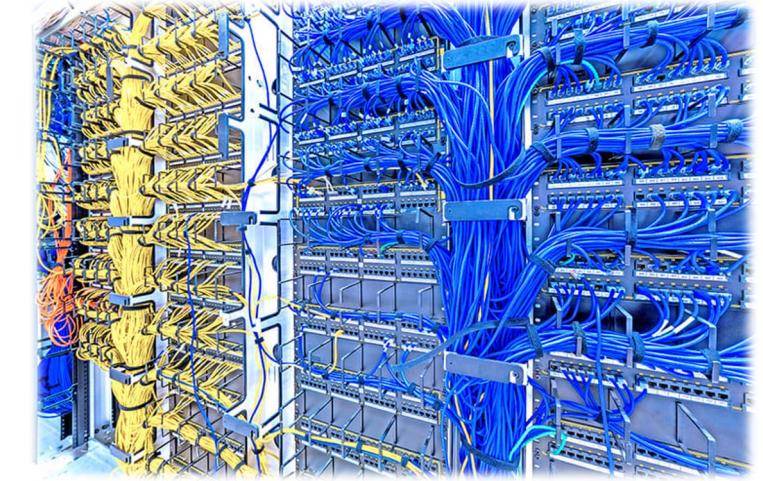
Fibra ottica



Cavi coassiali



Cavi Ethernet



□ PROPAGAZIONE LIBERA



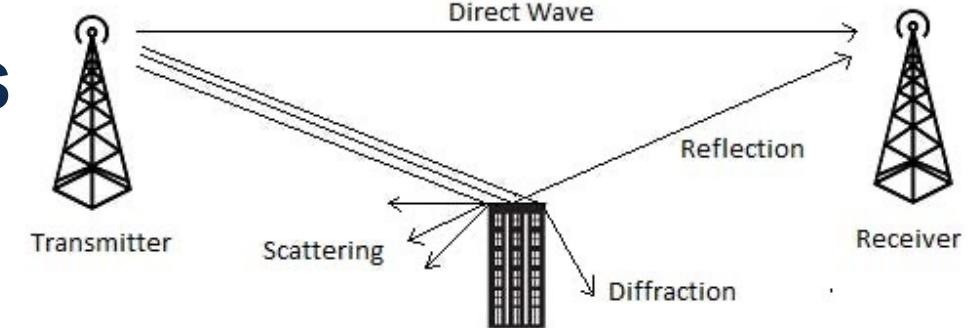
Antenne radio



Trasmissione wireless

- ❑ Come abbiamo visto fino ad ora, il nostro segnale post-modulazione è un segnale **elettrico** analogico, continuo, che oscilla ad una frequenza specifica (la portante).
- ❑ Il segnale modulato viene inviato all'**antenna** come corrente elettrica alternata (AC) che oscilla alla stessa frequenza della portante modulata.
- ❑ L'antenna è tipicamente costituita da un **conduttore metallico** (come rame o alluminio) che permette alla corrente di fluire facilmente.
- ❑ In accordo con le leggi dell'**elettromagnetismo**, l'alternarsi della corrente (dovuta alla frequenza del segnale portante) crea un campo elettromagnetico variabile che si propaga nello spazio sotto forma di **onda elettromagnetica**.
- ❑ Le onde elettromagnetiche si propagano nello spazio alla **velocità della luce**, trasportando l'informazione codificata (modulata) sulla portante.
- ❑ Queste onde presentano diverse **modalità di propagazione** (prossima slide).

Modalità di propagazione wireless

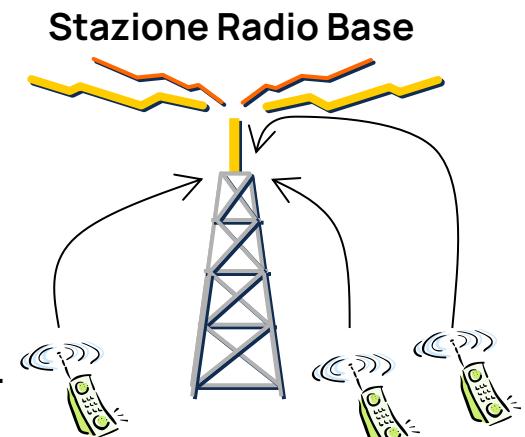


Modalità di propagazione	Descrizione
Propagazione diretta (Line-of-Sight)	Le onde viaggiano in linea retta.
Riflessione	Le onde rimbalzano con lo stesso angolo di incidenza su ostacoli come edifici o montagne.
Diffrazione	Le onde si piegano attorno agli ostacoli, soprattutto quando l'ostacolo ha una dimensione simile (o inferiore) rispetto alla lunghezza d'onda del segnale (soprattutto λ elevate).
Scattering (diffusione)	Le onde si disperdono in molte direzioni quando incontrano particelle o oggetti con dimensioni paragonabili o inferiori rispetto alla lunghezza d'onda del segnale (soprattutto λ ridotte).
Onde di superficie ($f < 3$ MHz)	Le onde seguono la curvatura della Terra.
Onde ionosferiche ($3 < f < 30$ MHz)	Le onde vengono riflesse dalla ionosfera, uno strato dell'atmosfera terrestre che si trova a un'altitudine compresa tra circa 60 km e 1.000 km (riflessione ionosferica o propagazione skywave).

Trasmissione wireless

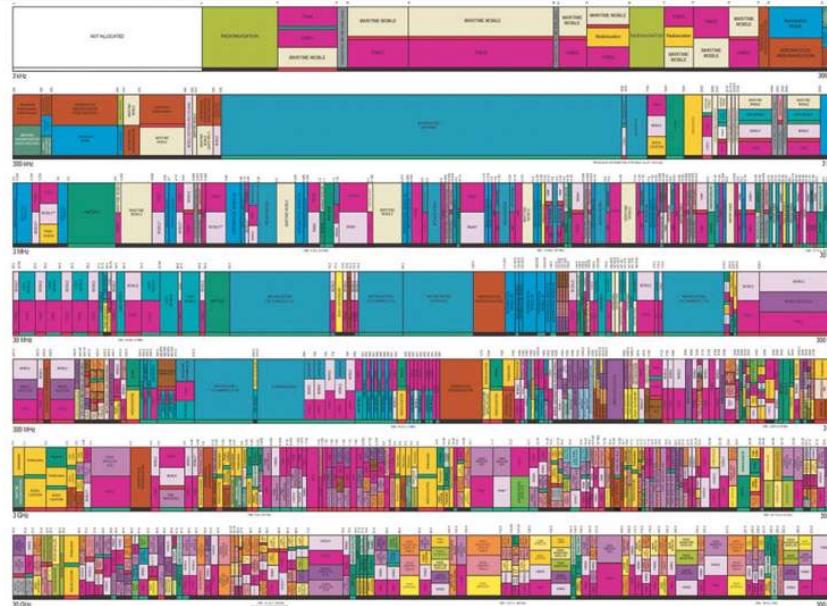
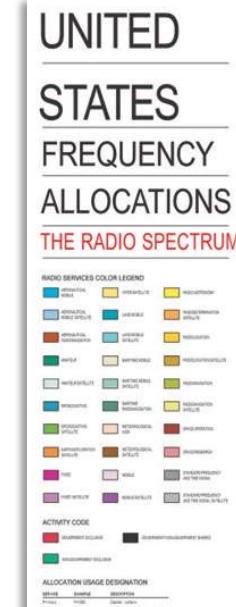
DENOMINAZIONE	SIGLA	FREQUENZA	LUNGHEZZA D'ONDA	USO
FREQUENZE ESTREMAMENTE BASSE	ELF	0 - 3kHz	> 100Km	
FREQUENZE BASSISSIME	VLF	3 - 30kHz	100 - 10Km	Bande marittime
RADIOFREQUENZE	FREQUENZE BASSE (ONDE LUNGHE)	LF	30 - 300kHz	
	MEDIE FREQUENZE (ONDE MEDIE)	MF	300kHz - 3MHz	
	ALTE FREQUENZE	HF	3 - 30MHz	
	FREQUENZE ALTISSIME (ONDE METRICHE)	VHF	30 - 300MHz	
MICROONDE	ONDE DECIMETRICHE	UHF	300MHz - 3GHz	TV
	ONDE CENTIMETRICHE	SHF	3 - 30GHz	
	ONDE MILLIMETRICHE	EHF	30 - 300GHz	Satelliti

- La velocità di trasmissione è funzione dell'ampiezza della banda passante utilizzata.
- Si sfrutta trasmissione a banda traslata con modulazione di ampiezza e/o di fase.



Attenuazione per propagazione wireless

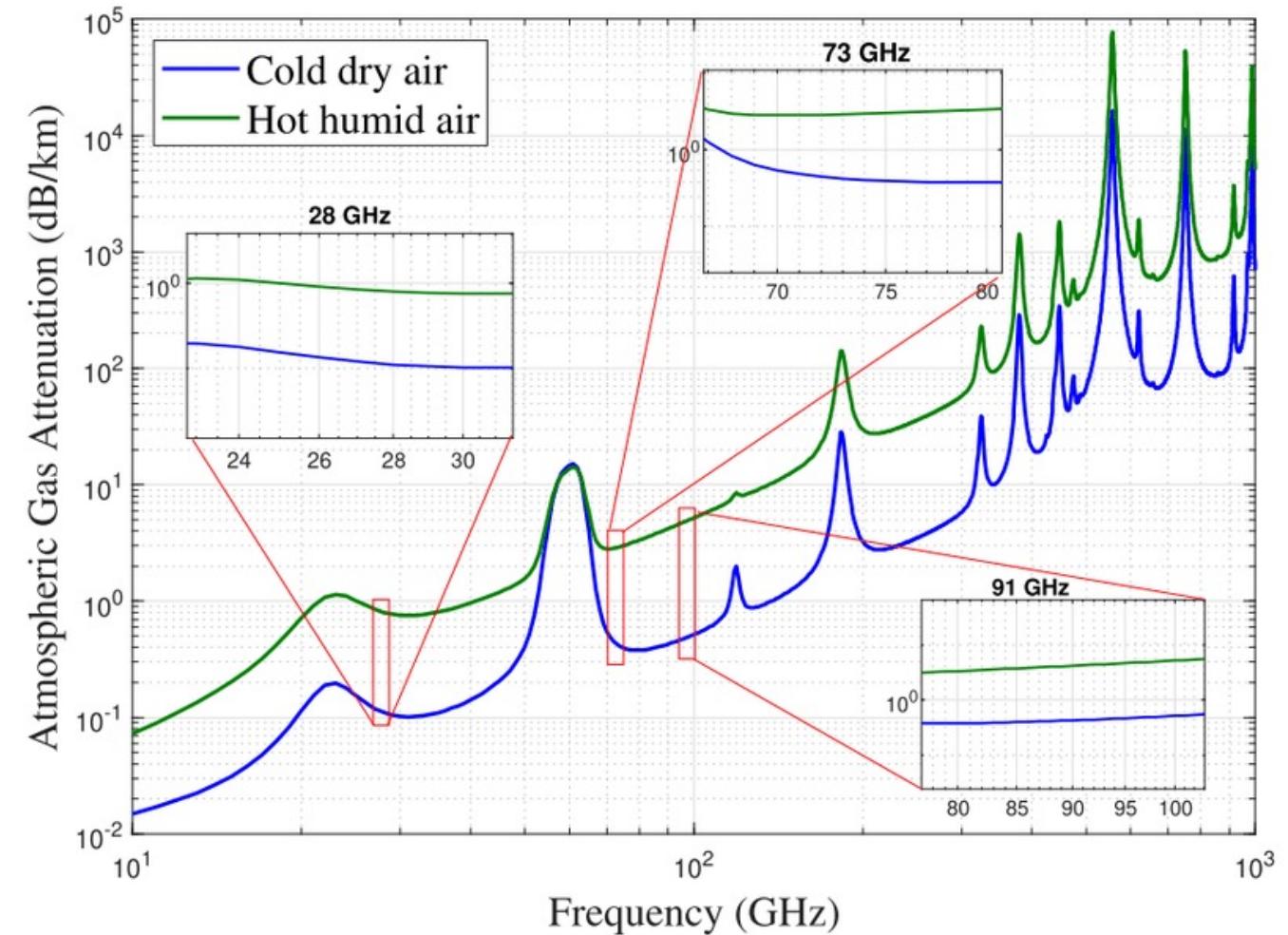
- L'attenuazione in spazio libero aumenta con la **frequenza portante** e la **distanza percorsa**.
 - La potenza ricevuta P_{RX} è inversamente proporzionale alla frequenza e alla distanza
 - Legge di **Friis**: $P_{RX} = P_{TX}G_{TX}G_{RX}(\lambda/(4\pi d))^2$, $\lambda = c/f$
- L'altra grande sfida e' la limitatezza della banda
- Esempio satellite geostazionario:
 - $f_{portante} = 6,126 \text{ GHz}$
 - distanza = 35.800 km
 - $A = -198,6 \text{ dB}$



- $f=900 \text{ MHz}$
 - $d=100 \text{ m}$ $L_s=71,5 \text{ dB}$
 - $d=1 \text{ Km}$ $L_s=91,5 \text{ dB}$
 - $d=10 \text{ Km}$ $L_s=111,5 \text{ dB}$
 - $d=100 \text{ Km}$ $L_s=131,5 \text{ dB}$
- $f=20 \text{ GHz}$
 - $d=100 \text{ m}$ $L_s=98,5 \text{ dB}$
 - $d=1 \text{ Km}$ $L_s=118,5 \text{ dB}$
 - $d=10 \text{ Km}$ $L_s=138,5 \text{ dB}$
 - $d=100 \text{ Km}$ $L_s=158,5 \text{ dB}$
- $d=10 \text{ Km}$
 - $f=100 \text{ MHz}$ $L_s=92,4 \text{ dB}$
 - $f=1 \text{ GHz}$ $L_s=112,4 \text{ dB}$
 - $f=10 \text{ GHz}$ $L_s=132,4 \text{ dB}$

Attenuazione dovuta ai gas atmosferici

- L'attenuazione dovuta ai gas atmosferici è un fenomeno che si verifica quando le onde elettromagnetiche attraversano l'atmosfera terrestre e interagiscono con i gas presenti nell'aria, come **l'ossigeno** e il **vapore acqueo**.
- Questi gas **assorbono** una parte dell'energia delle onde elettromagnetiche, causando una **perdita di potenza** del segnale, specialmente a frequenze elevate.



Doppino

- Consiste in una **coppia di conduttori in rame** (ricoperti da una guaina isolante) intrecciati l'uno con l'altro in forma elicoidale.
- Ciò **minimizza le interferenze** fra coppie adiacenti (2 fili paralleli costituirebbero infatti un'antenna; se intrecciati no).
- È stato usato in particolare per le connessioni terminali del **sistema telefonico** (da casa alla centrale più vicina).
- La banda passante dipende dalla lunghezza:
 - Man mano che il segnale viaggia su un cavo più lungo, le componenti ad alta frequenza del segnale vengono attenuate di più rispetto a quelle a bassa frequenza (*scattering, radiazione, perdite dielettriche, skin effect*).
 - Di conseguenza, la **capacità del cavo** di trasportare segnali ad alta frequenza (quindi una maggiore banda passante) **diminuisce con la lunghezza**.
- Normalmente si utilizzano **cavi con più coppie**, in versione schermata o non schermata.

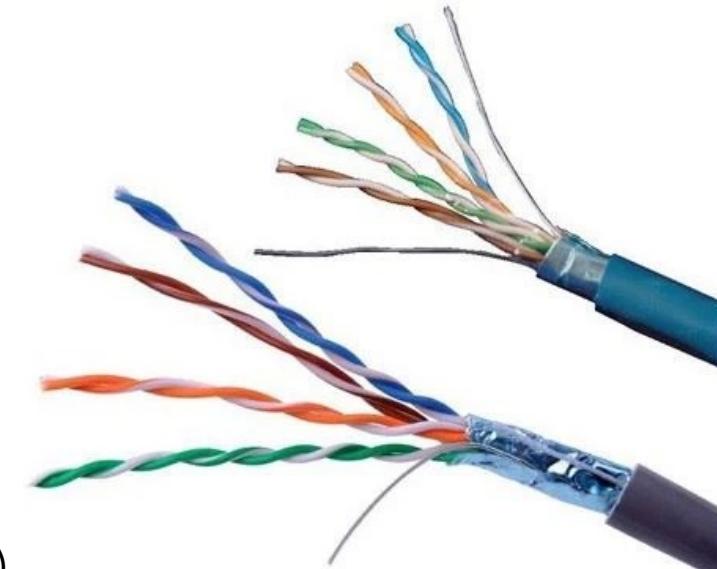


Doppino

- I doppini sono divisi in categorie in funzione della velocità di trasmissione che possono supportare.
- Categoria 3:**
 - 4 coppie contenute in una guaina di plastica. Comune nei cablaggi telefonici interni agli edifici (4 telefoni per stanza)
- Categoria 5:**
 - Simile alla 3, ma con un avvolgimento più fitto e con isolamento in teflon. Migliore qualità del segnale sulle lunghe distanze, adatto a collegamenti in ambito LAN (per esempio reti Ethernet fino a 100 Mb/s)
- Tipico spinotto in plastica RJ45 usato come connettore in tutto le reti che funzionano su doppino. Contiene 8 fili.

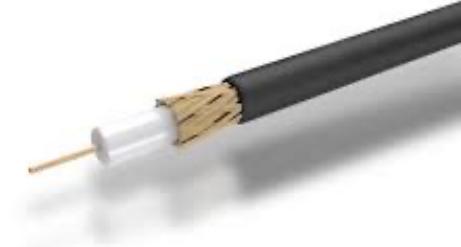
Attenuazione tipica:

Cat 5 → 20 dB/100m



Cavo coassiale

- ❑ Offre un **migliore isolamento** rispetto al doppino e quindi consente velocità di trasmissione maggiore su distanze superiori.
- ❑ E' costituito da un conduttore centrale in rame circondato da uno strato isolante all'esterno del quale vi è una calza metallica.
- ❑ Usato in passato per **sistemi telefonici su tratte lunghe** (ora sostituito dalla fibra).
Usato per la **TV via cavo**.



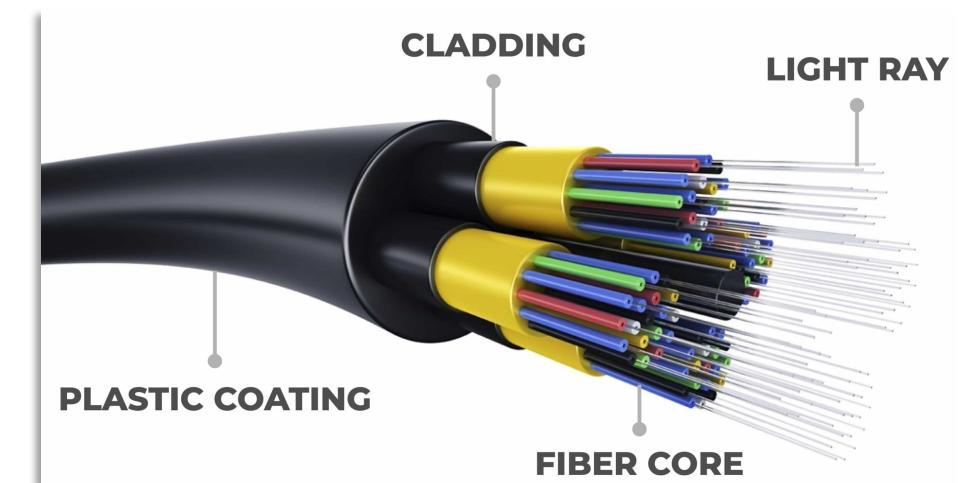
Attenuazione tipica:

versione thick → **5-8 dB/100m**

versione thin → **10-15 dB/100m**

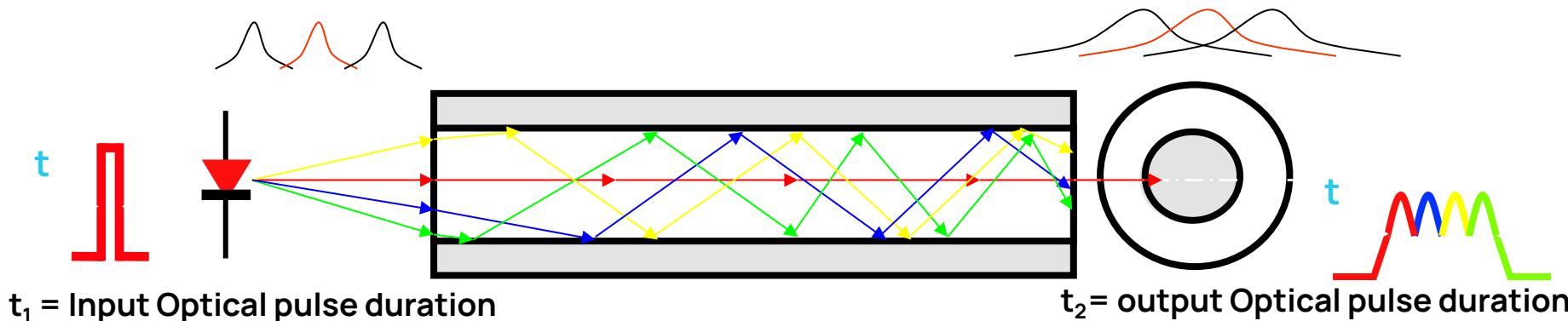
Fibra ottica

- ❑ Struttura guidante per i **segnali ottici**.
- ❑ Il salto d'indice di rifrazione n_1-n_2 tra il core (nucleo) e il cladding (mantello) determina il confinamento del fascio ottico e l'instaurazione di modi di propagazione.
- ❑ Due tipi di fibra:
 - ❑ Multimodo **MMF**: diametro di core grande (50 - 62 μm)
 - ❑ Singolo modo **SMF**: diametro di core piccolo (<10 μm)



Fibra ottica multimodo

- Fibre ottiche **multimodo**: la luce si propaga con diversi percorsi
 - distanza di trasmissione limitata dal fenomeno della **dispersione modale**
 - funzionamento nella cosiddetta 1° finestra (portante ottica a 850 nm) e in 2° finestra (a 1300 nm)
 - utilizzo per reti locali Ethernet e per collegamenti nei datacenter.



sorgente di luce: LED

Max distanza di trasmissione:
 → 2 km a 100Msimboli/s
 → 1 km a 1 Gsimboli/s
 → 550m a 10 Gsimboli/s

Tempo maggiore → Banda minore
 A distanze brevi, la dispersione modale è meno pronunciata, perché i vari modi della luce non hanno il tempo di "divergere" troppo tra di loro.

Fibra ottica monomodo

- ❑ Fibre ottiche **monomodo**: la luce si propaga in un solo modo
 - ❑ un solo modo di propagazione. Non si ha limite dovuto a dispersione modale.
 - ❑ **banda passante è elevatissima (decine di THz)**
 - ❑ funzionamento nella cosiddetta 2° finestra (portante ottica a 1300 nm) e in 3° finestra (a 1500 nm)
 - ❑ utilizzo per reti a lunga distanza e a grandi capacità: oggi oltre 100 Gb/s per canale su migliaia di km.



sorgente di luce: LASER

Attenuazione nelle fibre in vetro

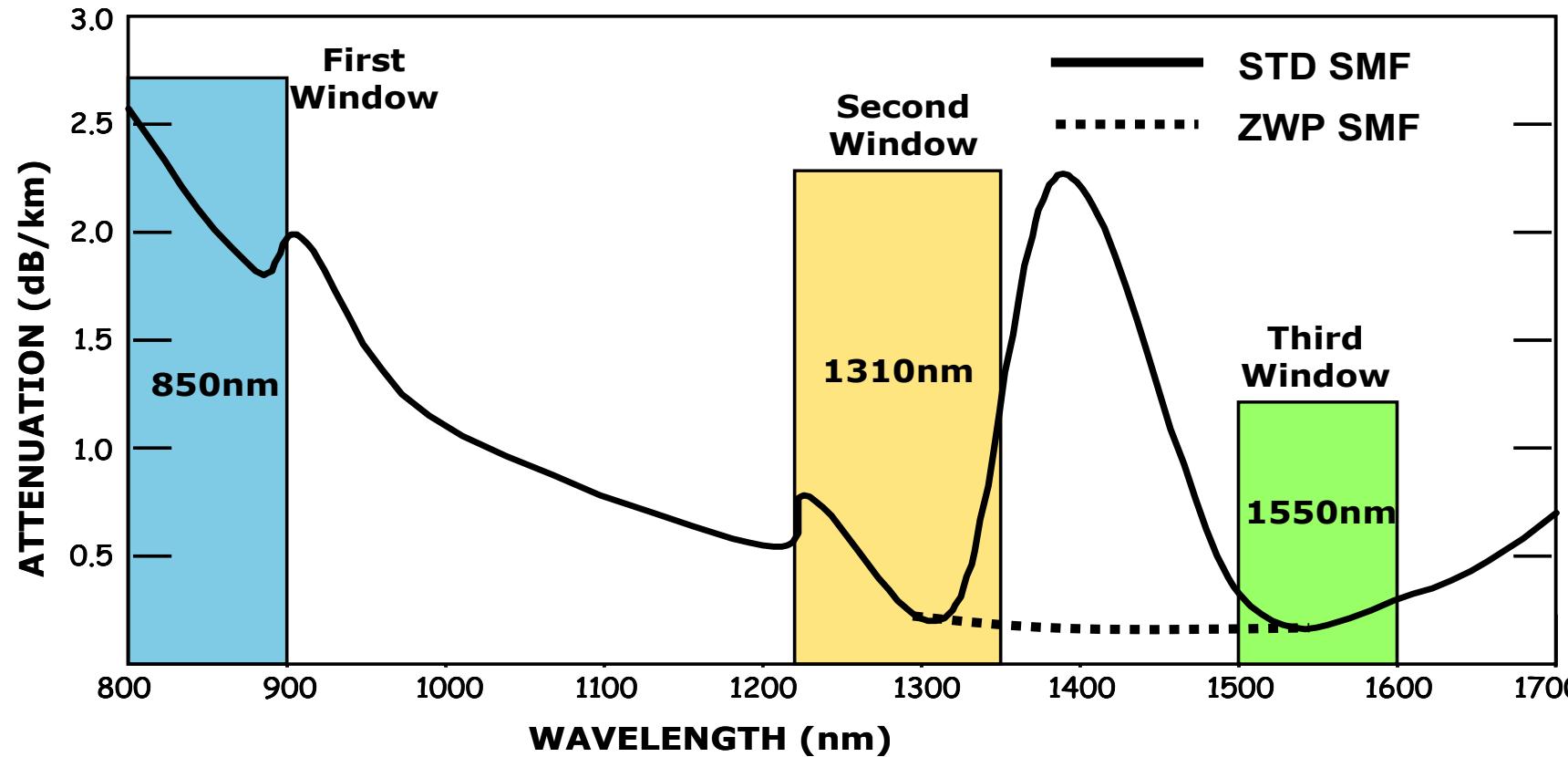
Attenuazione tipica:

1° finestra 850 nm → 2 dB/km

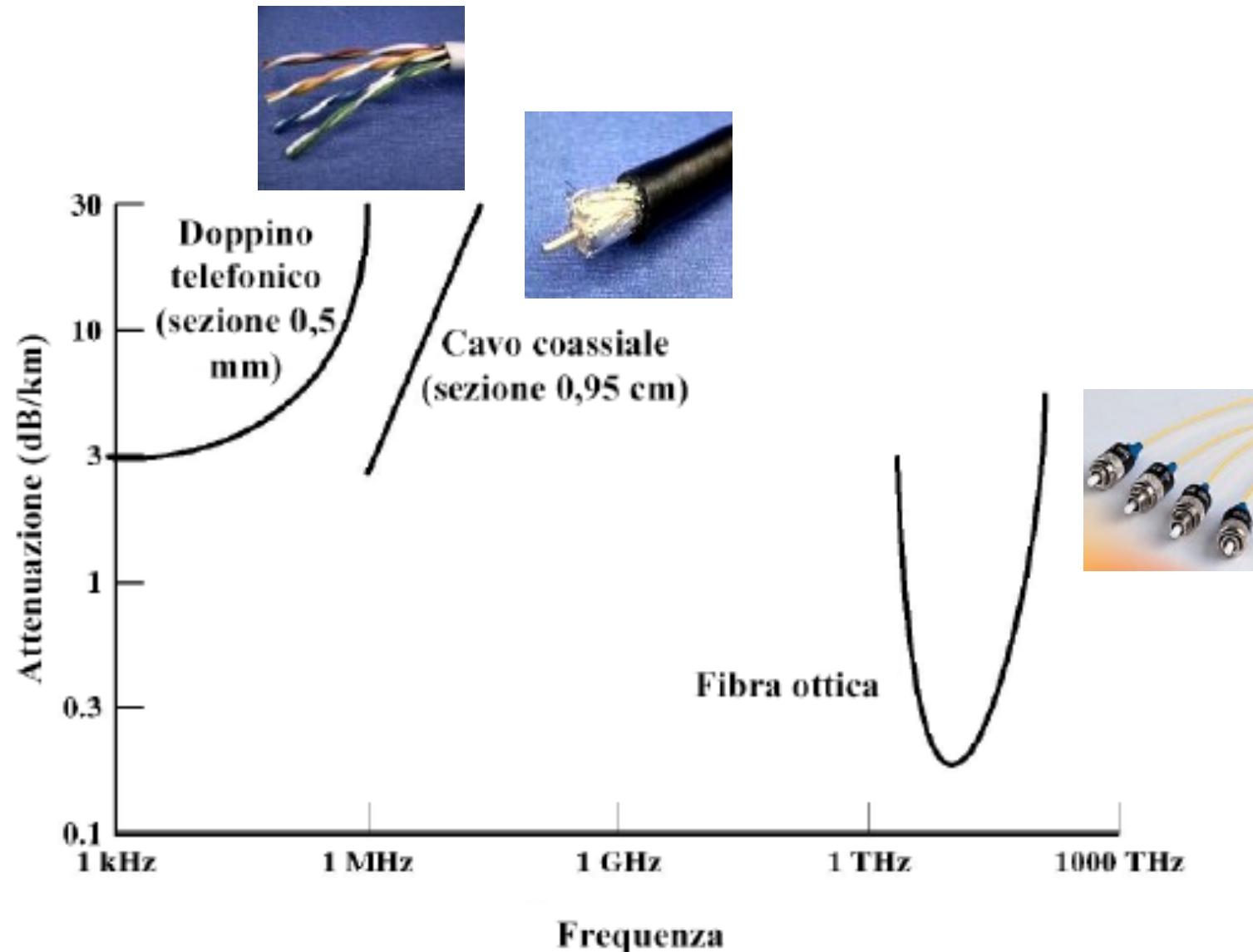
2° finestra 1310 nm → 0.4 dB/km

3° finestra 1550 nm → 0.2 dB/km

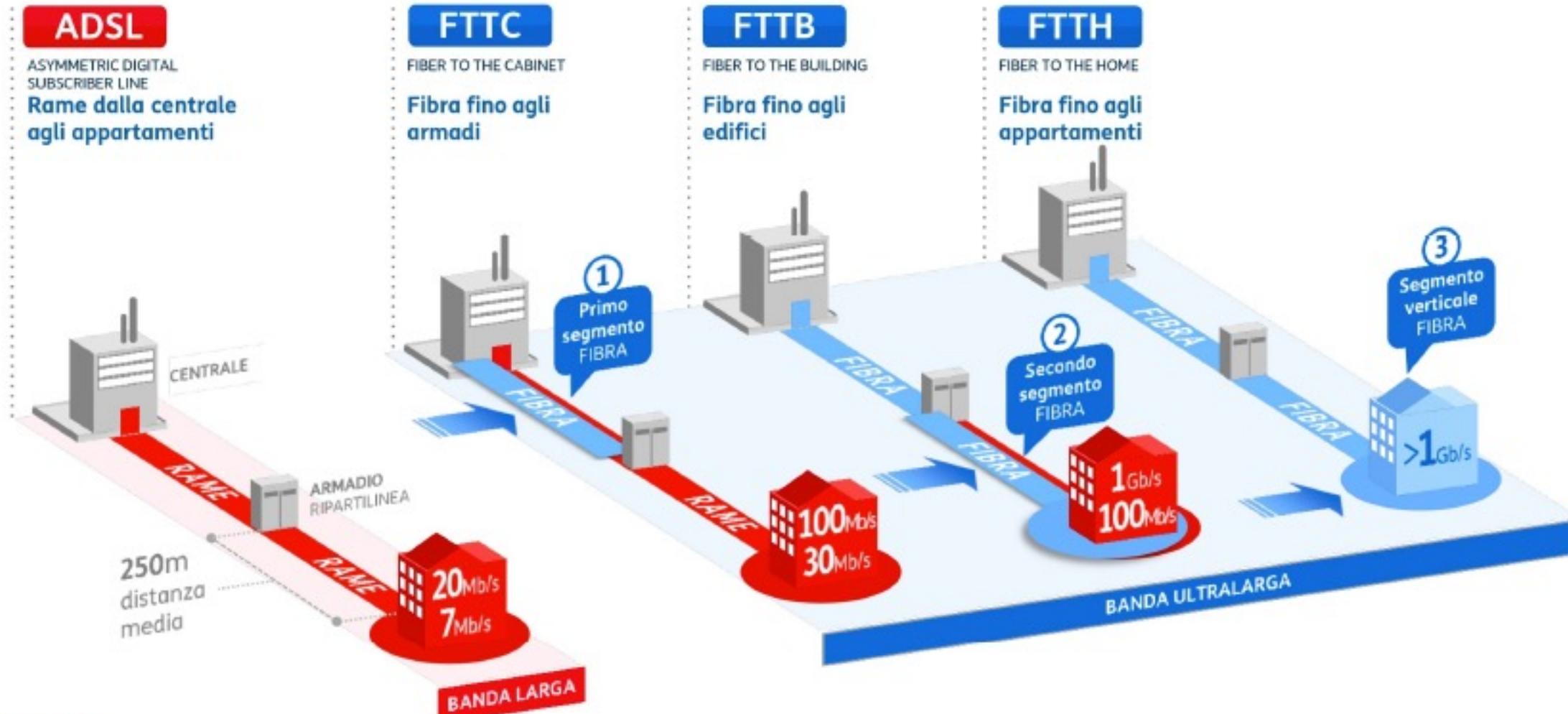
I principale meccanismo che causa attenuazione nella fibra è il cosiddetto **Rayleigh scattering**, che si verifica quando la luce interagisce con imperfezioni microscopiche o fluttuazioni di densità nel vetro. La luce viene diffusa in direzioni casuali, causando la perdita di potenza.



Mezzi trasmittivi guidanti a confronto



Banda ultra larga a casa dell'utente



Fondamenti di TELECOMUNICAZIONI

Prof. Marco Mezzavilla
marco.mezzavilla@polimi.it