

Il concetto chiave della rete cellulare è il riuso delle stesse frequenze a una distanza tale che il rapporto tra segnale utile e rumore di interferenza sia tollerabile.

Altra tipologia che utilizza il mezzo radio:

Reti senza fili in aerea locale (wireless LAN)

Mette in comunicazione apparati che sono vicini tra di loro. La caratteristica dominante di questo tipo di reti è stata la semplicità.

Si propongono di fornire connettività a breve raggio eliminando per quanto possibile l'uso di cavi e consentendo una certa flessibilità nel movimento (ma non piena, non è pensata per oggetti che si muovono ad alta velocità).

La dislocazione degli access point è lasciata in mano agli utenti, questa enorme libertà che facilita l'utilizzo della tecnologia deve fare i conti con sistemi che devono essere elastici e flessibili (avremo meno però sull'efficienza).

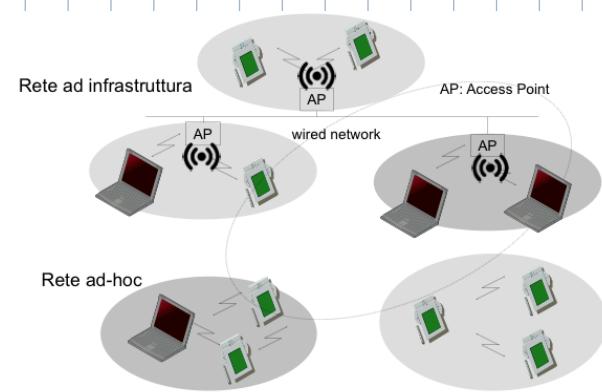
Si dividono in due categorie:

- **rete ad infrastruttura**: caratterizzata da un access point con cui i terminali comunicano (non comunicano direttamente tra di loro).

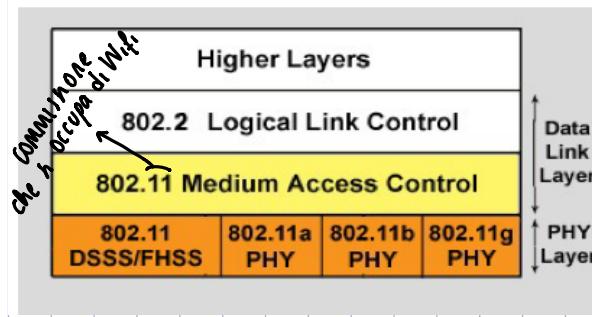
L'access point può essere poi collegato al resto della rete. La percepiamo come una porta di accesso verso internet, ma non ha bisogno di essere collegato ad internet.

Con le wireless LAN vengono coinvolti solo il livello fisico e il livello di collegamento.

- **rete ad hoc**: i terminali comunicano tra di loro, possono agire da terminodi. Ogni terminali può emettere o ricevere pacchetti ma può anche essere un mezzo di transizione, si prestano a fare da tramite. Un esempio importante di rete ad hoc è quella formata dai veicoli.



Cosa specifica lo standard di questi reti? Solo i protocolli di collegamento e di livello fisico.



Questi standard sono fatti :

Le reti in area locale hanno il problema che il canale è condiviso e quindi bisogna cooperare tra loro i terminali, allora c'è una funzione che si chiama medium access control.

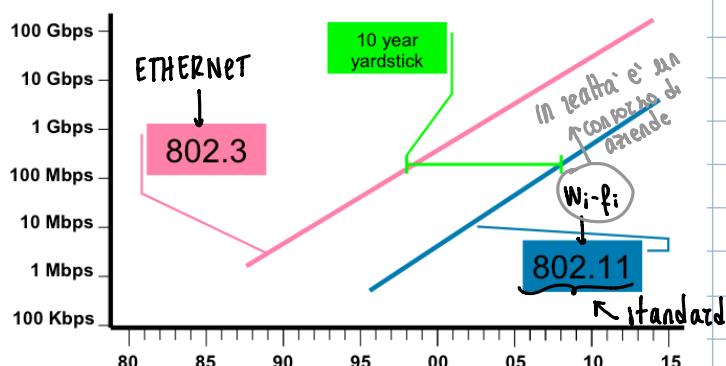
Si è pensato di dividere il data link layer in due sottolivelli (sublayer) : 1) logical link control e

riguarda la gestione affidabile di un collegamento punto punto, 2) medium access control che si occupa della gestione di controllo dell'accesso al mezzo (perché ci sono più trasmettitori su un singolo canale), materialmente corrisponde all'hardware del software. Poi c'è il livello fisico.

Standard di Wi-Fi :

- Linea di sviluppo degli emendamenti che puntano ad aumentare la capacità:
 - IEEE 802.11b (ISM - 1999) ~ 11 Mbps
 - IEEE 802.11a (5 GHz - 1999)
 - IEEE 802.11g (ISM - 2003) ~ 54 Mbps
 - IEEE 802.11n (2009) ~ 600 Mbps
 - IEEE 802.11ac (2014) ~ 7 Gbps **in IEEE 802.11-2012**
 - IEEE 802.11ax (2019) ~ 9.6 Gbps
 - IEEE 802.11be (exp. 2024) ~ 46 Gbps

Hanno aumentato la capacità: aumentando la banda, usando costellazioni più ricche, utilizzando codifiche più efficienti e ricevitori di qualità migliori, antenne multiple (MIMO).



Mantenendo un gap con la rete cablata (da preferire), il Wi-Fi è migliorato esponenzialmente.

Tuttavia la cablata è più costosa perché prevede un'installazione più complessa (con cavi).

Mezzi cablati

Principalmente due : rame e fibra ottica.

Il rame viene utilizzato come doppino, una coppia di portanti di conduttori elettrici arrotolati ad elica (twisted pair). Il segnale (la corrente) portato dal rame che è un conduttore viene rivelato facendo la differenza di tensione tra i due fili così che qualunque disturbo elettromagnetico esterno si annulla con la differenza.

Altro modo in cui viene utilizzato il rame è il cavo coassiale.

Questi due modi hanno diverse differenze di banda:



il doppino $h(t) \leftrightarrow H(f)$ funzione di trasferimento

$|H(f)| \rightarrow 0$ quando $f \rightarrow \infty$

$$A = \frac{P_{tx}}{P_{rx}} \geq 1 \quad A^{dB} = 10 \log_{10} A = \frac{d \cdot d}{\frac{dB}{km}} \quad \text{distanza km}$$

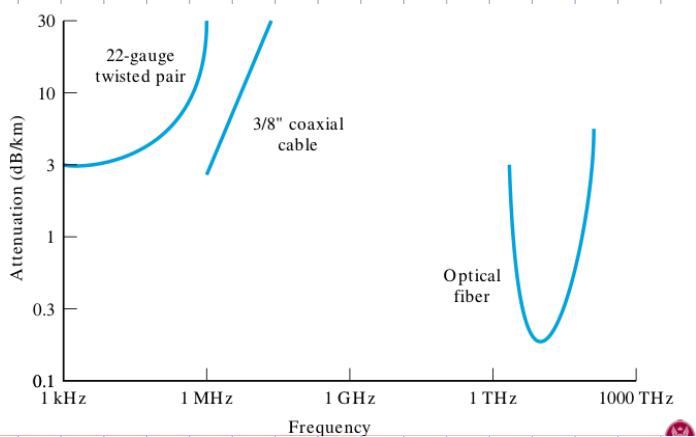
$d \rightarrow$ mi dice di quanto si attenua il segnale attraverso il mezzo cablato.

Il doppino ha un'attenuazione che cresce con la frequenza, ha una banda piccola rispetto al cavo coassiale. L'attenuazione è bassa solo a basse frequenze.

Il cavo coassiale ha una banda molto più ampia, quindi è in grado di trasmettere segnali a frequenza molto più alta ma può avere comunque un'attenuazione molto pesante (di solito si mette un amplificatore vicino).

La fibra ottica è completamente diversa, non è un conduttore ma è un dielettrico. Ha attenuazioni che variano con la frequenza ma sono di solito molto basse e hanno una velocità di propagazione più vantaggiosa. Infatti la fibra ottica conviene in tutti i senti : poca attenuazione e tanta banda.

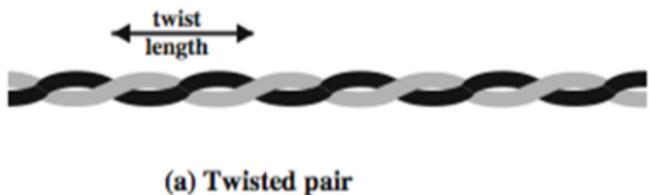
	Frequency Range	Typical Attenuation	Typical Delay	Repeater Spacing
Twisted pair (with loading)	0 to 3.5 kHz	0.2 dB/km @ 1 kHz	50 µs/km	2 km
Twisted pairs (multi-pair cables)	0 to 1 MHz	0.7 dB/km @ 1 kHz	5 µs/km	2 km
Coaxial cable	0 to 500 MHz	7 dB/km @ 10 MHz	4 µs/km	1 to 9 km
Optical fiber	186 to 370 THz	0.2 to 0.5 dB/km	5 µs/km	40 km



È un diagramma che mostra l'andamento dell'attenuazione in funzione della frequenza.

L'attenuazione della fibra ottica ha un'ottimo, ha un minimo che si colloca ad una frequenza specifica. È il mezzo che si utilizza se vogliamo trasmettere a lungo segnale.

Doppino



l'attenuazione.

(Se invece si piega una fibra ottica aumenta l'attenuazione, se si piega molto si spezza).

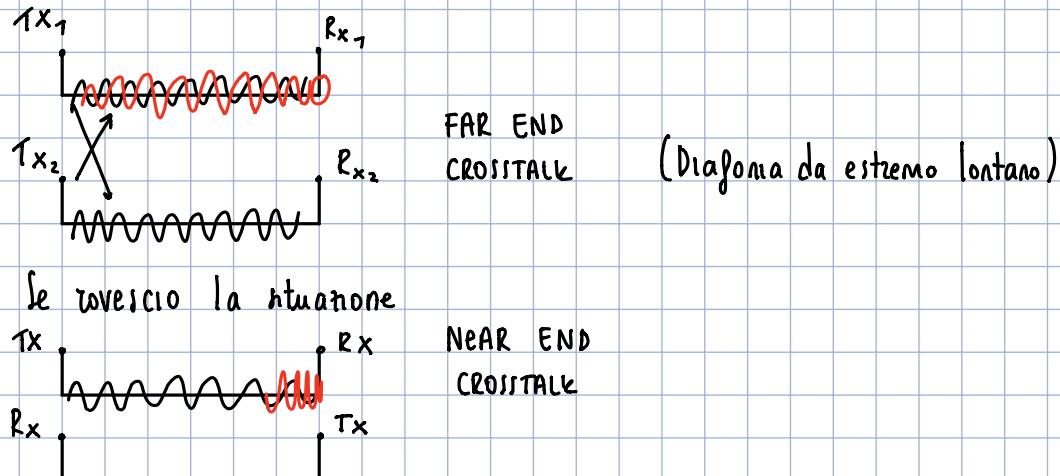
I doppini si distinguono in varie qualità, per aumentare quest'ultima è importante la schermatura, ossia quella che riduce le interferenze esterne.

- **Doppino non schermato** : classico filo telefonico, più economico, più semplice da installare, soffre le interferenze elettromagnetiche esterne (interferenza di diafonia, abbassa la qualità del segnale)
- **Doppino schermato** : maglia metallico o altro investimento che riduce le interferenze (più è spesso il "guscio" più bassa è l'attenuazione), più costoso, difficile da gestire (spessore e peso).

Sono due fili di rame, è spesso utilizzato perché è più economico.

Viene spesso utilizzato perché banalmente può essere piegato e modellato, non vengono alterate le sue proprietà, non aumenta

Accoppiamento tra doppino introduce interferenza :



Il secondo caso è più deleterio perché l'interferenza non è attenuata (come nel primo caso).

Esiste l'attenuazione, che è il principale ostacolo che si può coprire con un portante guidato, che aumenta con la frequenza e con la distanza.

Tenendo presente che la capacità di un collegamento è:

(canale AWGN)

$$C = W_c \log_2 (1 + SNR)$$

$$SNR = \frac{P_{rx}}{P_{noise}} = \frac{P_{tx}/A}{P_{noise}}$$

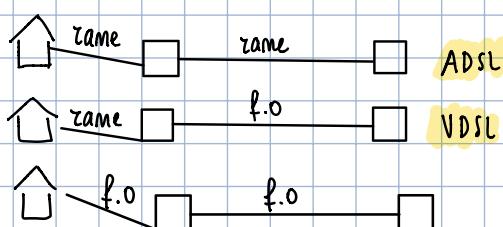
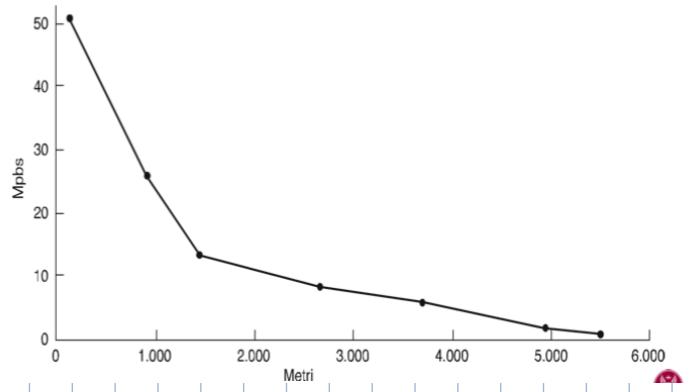
Quindi la capacità dipende anche dall'attenuazione, aumentando la banda di troppo aumenta anche l'attenuazione (per un doppino non si va oltre 1-1.2 MHz/s).

Il grafico mostra per un tipico doppino la relazione ottima tra bit rate sostenibile al variare della distanza. La banda ottenibile è molto alta a brevi distanze e mano mano va diminuendo.

Adesso per andare a grandi velocità le ADSL mettono il zame per un breve tratto e poi fibra ottica. (VDSL)

dall'adattatore alla centrale

Aampiezza di banda e distanza per UTP di categoria 3 usati da DSL.



Come si utilizza i kHz di banda?

canale in banda-passante



I disturbi di questo canale sono molti quindi si è pensato di dividerli in sottobande ognuno da circa 4 kHz, una volta suddiviso così diventa ognuno un canale AWGN con una sua attenuazione.

$$k \quad A_k \quad SNR_k = \frac{P_k / A_k}{P_{\text{noise}}} = \beta_k P_k$$

$$W_k = \frac{W_c}{N} \quad \forall k$$

β_k e' piccolo vuol dire che c'e' molta attenuazione e disturbo

β_k e' legato alla qualità del canale.

$$C_k = W_k \log_2 (1 + SNR_k) = \frac{W_c}{N} \log_2 (1 + \beta_k P_k) \leftarrow \text{capacità del singolo canale}$$

$$C = \sum_{k=1}^N C_k = \sum_{k=1}^N \frac{W_c}{N} \log_2 (1 + \beta_k P_k)$$

La somma di tutte queste potenze deve rimanere nel budget. ($\sum P_k \leq P_{\text{TOT}}$)
Come distribuisco il budget tra i canali?

Questo problema si risolve:

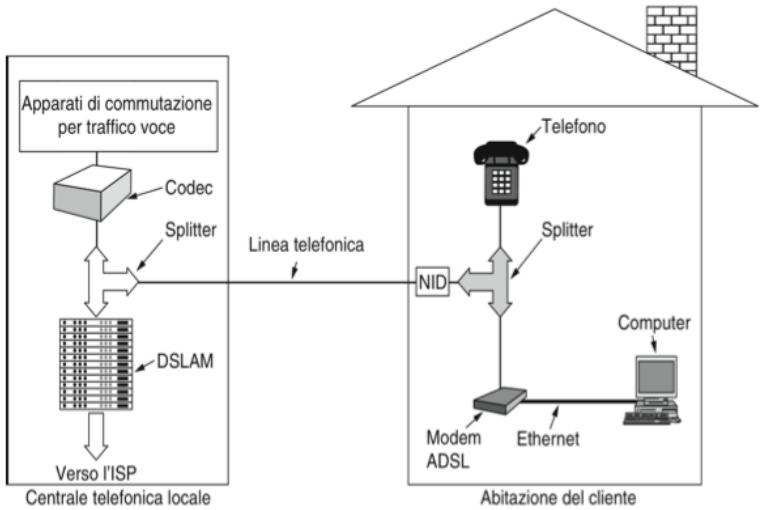
$$\begin{aligned} \max_{P_k} C &= \max_{P_k} \frac{W_c}{P_k} \cdot \sum_{k=1}^N \log (1 + \beta_k P_k) \\ \text{s.t. } &\sum_{k=1}^N P_k \leq P_{\text{TOT}}, \quad P_k \geq 0 \end{aligned} \quad \xrightarrow{\text{problema convesso}}$$

$$P_k^* = \max \left\{ 0, \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\beta_k} \right\}$$

$$\sum_{k=1}^N P_k^* = P_{\text{TOT}}$$

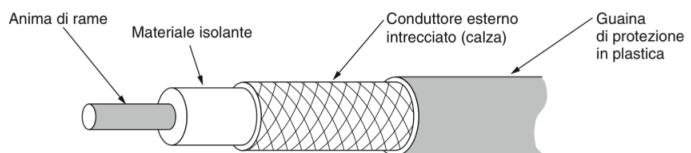
ALLOCAZIONE OTTIMA: si concentra la potenza sui canali migliori ($\beta_k \gg$)

Una configurazione ADSL tipica



Cavo coassiale

È un conduttore in rame. Si tratta di un cavo in rame che è coassiale ad una calza di rame e in mezzo c'è un dielettrico.



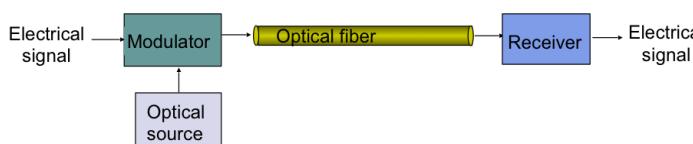
Il campo si propaga con ampia lunghezza di banda, attenuazioni elevate. Inoltre dallo studio delle equazioni di Maxwell c'è un rapporto ottimo tra le grandezze delle componenti del cavo coassiale.

Ci si trasmettono segnali analogici o connettori da terminale ad antenna (come nei sistemi navali), si mandano anche segnali digitali.

In Italia non è stato utilizzato, all'estero per fare reti di distribuzione di tv via cavo (diffusa in Nord America). Si realizza una rete simile a quella telefonica, che parte da una centrale agli utenti solo che invece del doppino c'è un cavo coassiale (proprio perché ha una banda più grande).

La distanza tra centrale di distribuzione del video e utenti non poteva essere però molto elevata.

Fibra ottica

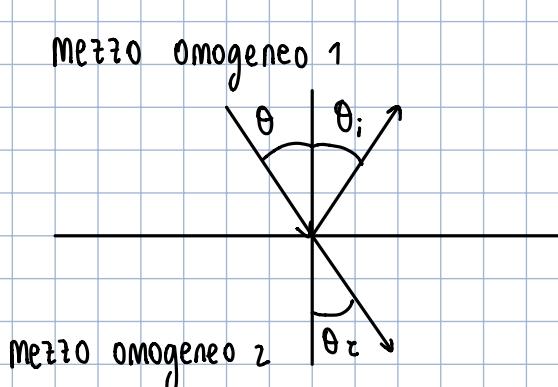


Anche qui il sistema di comunicazione è fatto da trasmettitore, ricevitore, mezzo di comunicazione che in questo caso è la fibra ottica.

Diversamente dai portanti in rame, nella fibra ottica si tratta di dielettrici, la base è silice. Il fenomeno di propagazione si studia con le equazioni di Maxwell.

Un'immagine semplificata è la propagazione per raggi. Immaginiamo che il campo elettromagnetico si propaghi per raggi, ci sono due fenomeni: rifrazione e riflessione.

Questi due fenomeni avvengono quando un campo elettromagnetico raggiunge la superficie di discontinuità tra due mezzi omogenei.



$$V = \frac{c}{n}$$

$$\text{Se } O_2 \text{ (silice)} \quad n \approx 1.3$$

$$\text{Snell} \quad \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\sin \theta_r = \sin \theta; \frac{n_1}{n_2} > 1$$

al limite si arriva alla riflessione totale

→ $\theta_i \approx \frac{\pi}{2}, n_1 > n_2$

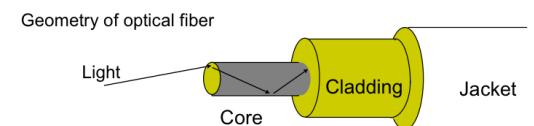
se questo rapporto è > 1 allora
l'angolo rifratto è ancora
più grande

La fibra ottica ha al suo interno due dielettrici diversi con due indici di rifrazione diversi: il nucleo(core, mezzo uno) ha un indice poco più grande del mantello (cladding, mezzo due) che ha un indice un pochino più basso.

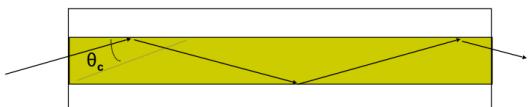
Il campo elettromagnetico viene iniettato nel core con un angolo di incidenza piuttosto radente, se lo è molto e $n_1 > n_2$ avviene riflessione totale, va avanti e fa un altro angolo di incidenza e avviene di nuovo la riflessione totale e così via. Il raggio si propaga rimbalzando e rimanendo confinato dentro al nucleo.

Quindi si osserva che il campo elettromagnetico si propaga senza attenuazione e questa propagazione avviene in diversi modi, ci sono diverse propagazioni di campo che si possono osservare. Il campo assume diversi modi in base alla geometria, ossia in base al raggio del nucleo. Se il raggio del nucleo è sufficientemente piccolo allora si può vedere che esiste un unico modo in cui si propaga: campo monomodale.

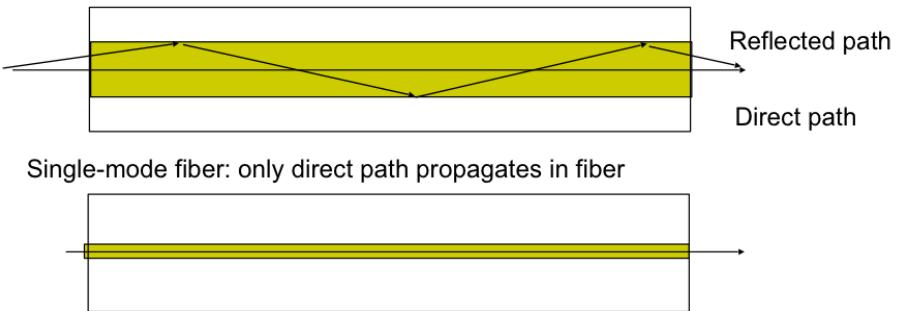
Si distinguono le fibre ottiche: multimodali (nucleo con raggio grande), monomodale (raggio piccolo).



Total Internal Reflection in optical fiber



Multimode fiber: multiple rays follow different paths



Avere un unico modo di propagazione è più efficace.

Le fibre multimodali sono più economiche ma hanno più dispersione.

Le fibre monomodali sono più difficili da realizzare, da installare, più costose ma non hanno dispersione.

Come si fa a differenziare il nucleo dal mantello? Lo si fa costruttivamente diffondendo delle molecole di materiale drogante dentro la silice, degli ioni che drogano la silice e ne alterano le caratteristiche fisiche in particolare l'indice di rifrazione in modo tale che quello del nucleo sia maggiore di quello del mantello.

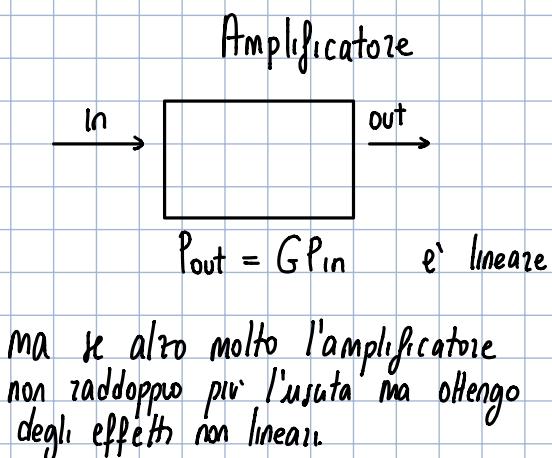
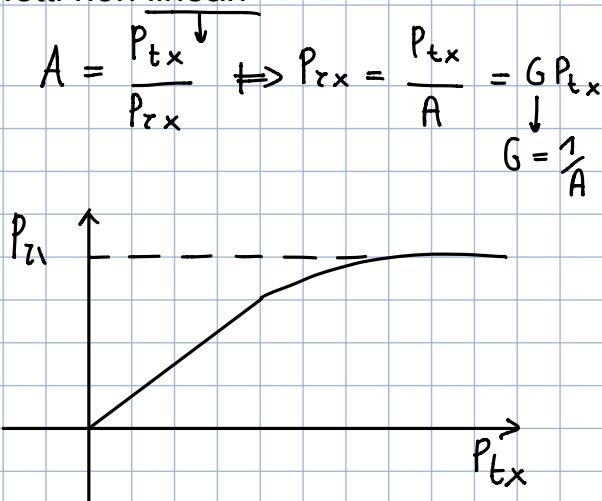
Le caratteristiche della fibra ottica:

Vantaggi

- in certi intervalli di frequenza si riesce ad ottenere attenuazioni molto basse.
- Per i portanti in rame se ce ne sono due vicini c'è disturbo, le fibre ottiche sono completamente immuni dai segnali elettromagnetici esterni.
- Ha una banda molto ampia.
- Sicurezza
- Non si corrode (il metallo invece si corrode)
- L'ingombro fisico è molto molto più piccolo
- Amplificatori in fibra ottica

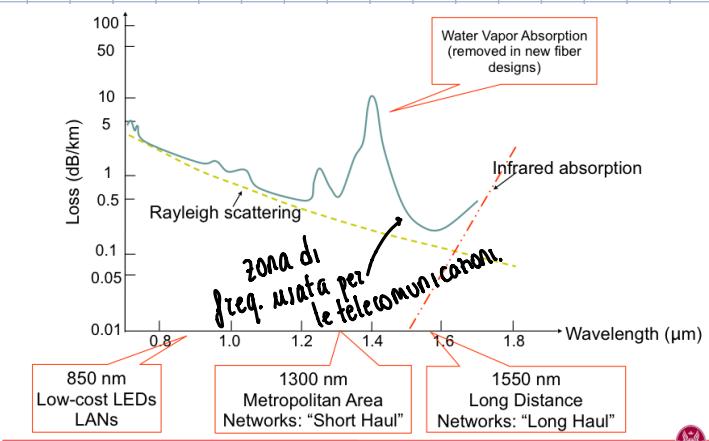
Svantaggi

- introducono nel ricevitore dei disturbi che il rame non introduce:
 - shot noise (rumore dei segnali ottici)
 - polarizzazione (introduce dispersione, distorce il segnale)
 - effetti non lineari



- problemi meccanici, la fibra ottica non si può curvare bene. Inoltre curvare la fibra ottica introduce attenuazione.
- risente delle vibrazioni meccaniche.

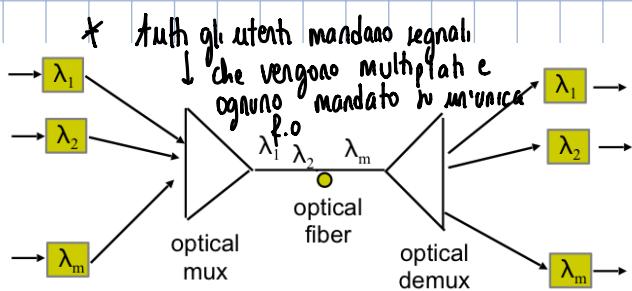
Attenuazione in fibra ottica



Sono lunghezze d'onda che si riferiscono alla silice, per motivi storici si fa riferimento ad esse invece che alla frequenza ma comunque c'è una relazione ($\lambda f = v = c/n$)

L'attenuazione in fibra ottica è a conca, ha dei picchi e delle valli. La valle più importante è la terza finestra che sta intorno a 1.45 micrometri.

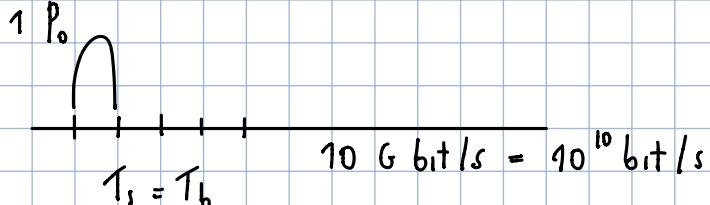
Come è fatto un sistema in fibra?



È a banda traslata: banda standard di fibra ottica
 $\sim 1\text{ THz} = 4000\text{ GHz}$

$f_o - \frac{W_c}{2}$ | $f_o + \frac{W_c}{2}$
 $\sim 190\text{ THz}$ |
 f_o

$00k = 0n - OFF$ keying



$$P_{tx} = \begin{cases} P_0 & 1 \\ 0 & 0 \end{cases}$$

$$T_s = T_b = 10^{-10}\text{ s} = 0,1\text{ ns}$$

Un segnale di 10 Gbit/s di quanta banda ha bisogno?

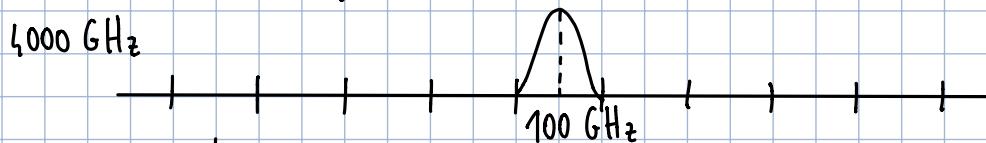
$$R_b = 10\text{ Gbit/s}$$

$$M \sim 1\text{ bit/s/Hz}$$

$$W_c \sim \frac{R_b}{M} = \frac{10^{10}\text{ bit/s}}{1\text{ bit/s/Hz}} = 10^{10}\text{ Hz} = 10\text{ GHz}$$

essendo 4000 GHz
occupa veramente poca
banda

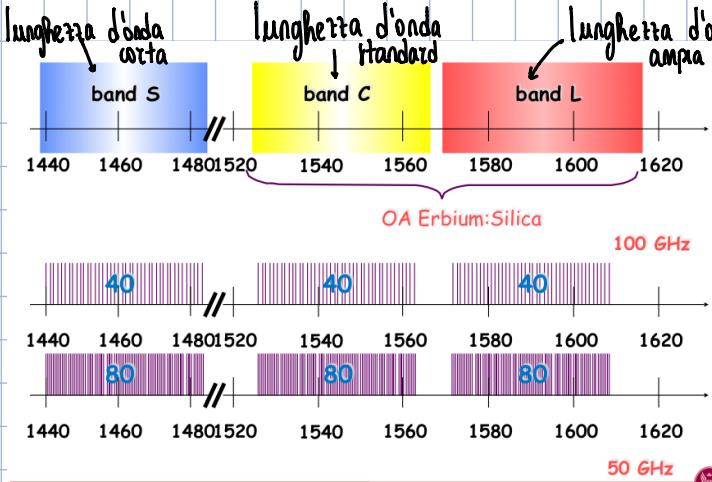
Non si può fare un'unico grande segnale da 4000 GHz, quindi si divide in canali



Su ogni canale definisco una portante e ognuna di esse può essere modulata con un diverso segnale.

Questo significa che in f.o. possono viaggiare simultaneamente tanti segnali indipendenti.

La multiplazione è fatta a divisione di frequenza *



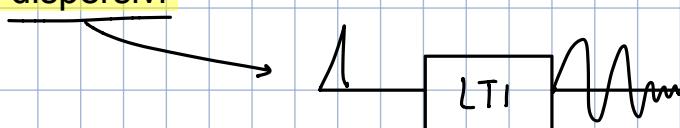
Per motivi storici viene chiamata multiplazione a divisione di lunghezza d'onda densa (DWDM), si parla di una multiplazione a divisione di frequenza nella fibra ottica.

La banda viene divisa in sottobande, canale su cui ognuno c'è un segnale differente.

Consente di sfruttare efficacemente la larghissima banca disponibile con la fibra ottica.

Cosa limita la trasmissione in fibra ottica, in particolare il bit rate e la distanza che possiamo coprire?

- la banda
- La distanza è limitata dall'attenuazione
- Effetti dispersivi



'l'impulso in ingresso ≠ in uscita'

Dispersione cromatica e dispersione di polarizzazione (specifico delle f.o.). Ambedue fanno sì che un impulso che dura una certa durata mentre si propaga si allarga, introducendo dispersione.

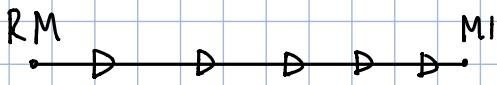
- effetti non lineari, se in ingresso mando tanto ho più effetti non lineari.



$$y(t) = y_L(t) + y_{NL}(t)$$

$y_{NL}(t) \ll y_L(t)$ ↪ *la parte non lineare è trascurabile solo in alcuni casi.*

- rumore degli amplificatori ottici



$$P_{in} = P_u + P_{noise}$$

$$SNR_{in} = \frac{P_u}{P_{noise}}$$

$$P_{out} = G P_{in}$$

$$G > 1$$

metto degli amplificatori per trasmettere i segnali a lunga distanza, ma a sua volta anche il rumore viene amplificato

SNR_{out}?

l'amplificatore ideale non altera l'SNR, quindi rimane costante.

Nel caso di un amplificatore non ideale

$$P_{in} = P_u + P_{noise}$$



Amplified Spontaneous Emission

$$SNR_{in} = \frac{P_u}{P_{noise}}$$

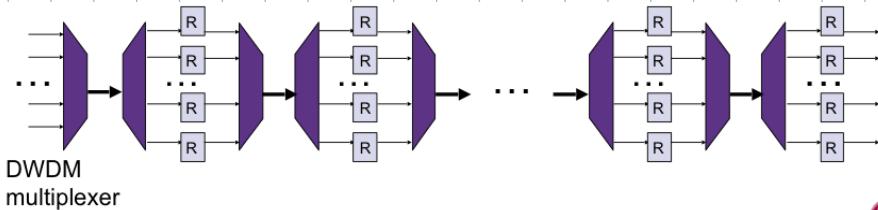
$$P_{out} = G P_{in} + P_{ASE} \quad G > 1$$

\Rightarrow l' SNRout peggiora

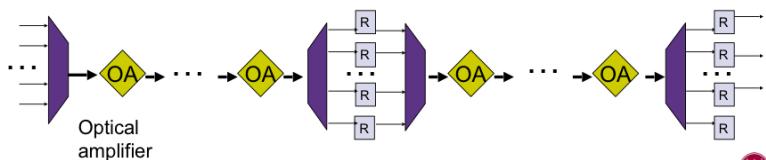
$$SNR_{out} = \frac{GP_u}{GP_{noise} + P_{ASE}} = \frac{P_u / P_{noise}}{1 + \frac{P_{ASE}}{GP_{noise}}} = \frac{SNR_{in}}{1 + \frac{P_{ASE}}{GP_{noise}}}$$

Poiché dobbiamo per forza amplificare il segnale, se non lo attenua troppo, l' SNR tende a peggiorare. Dopo un tot. di amplificazioni l' SNR scende talmente in basso che dobbiamo fare RIGENERAZIONE

DWDM e RIGENERAZIONE



Ho i segnali elettrici, li multiplico, trasmetto un segnale ottico, lo vorrei mandare a destinazione ma per farlo in mezzo devo per forza amplificare perché la distanza è troppo ampia. Ogni amplificatore fa peggiorare il rapporto segnale rumore. Prima di arrivare ad un livello troppo basso, prendo il segnale ottico, lo demultiplico, riprendo i singoli segnali elettrici e li rigenero.



Ritorno fino ai bit con i quali ricostruisco un nuovo segnale, lo multiplico e lo metto nella fibra ottica e così via fino ad arrivare in ricezione.

La rigenerazione è molto costosa, tanti

demultipliatori e rigeneratori. La cosa vantaggiosa è che posso mettere i rigeneratori dopo tanti km.