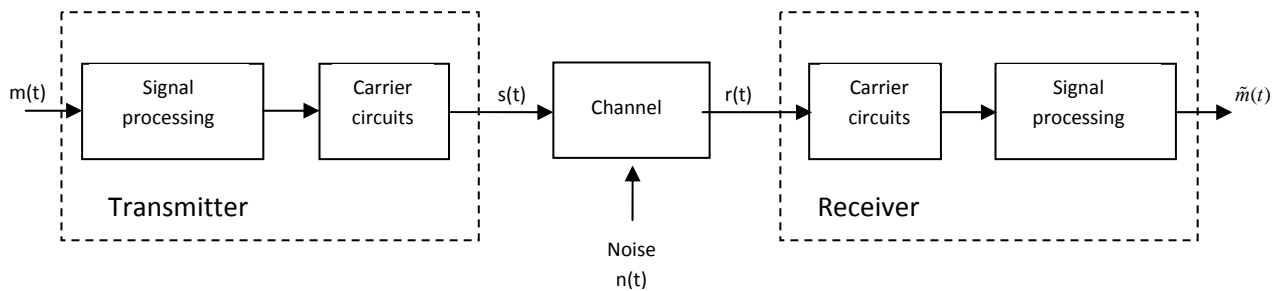


SISTEMI DI COMUNICAZIONE

I sistemi di comunicazione possono essere descritti dal seguente diagramma a blocchi:



Lo scopo di un sistema di comunicazione è trasmettere messaggi di informazione dalla sorgente, indicati con $m(t)$, al ricevitore. Il messaggio recapitato al ricevitore è invece indicato con $\tilde{m}(t)$. Il messaggio di informazione può essere in forma analogica o digitale, dipende dal particolare sistema e può rappresentare audio, video o qualche altro tipo di informazione. Lo spettro di $m(t)$ e di $\tilde{m}(t)$ sono concentrati intorno allo 0 e perciò detti segnali in *banda base*.

Il blocco di **signal processing** al trasmettitore processa il segnale per effettuare una trasmissione più efficiente. Per esempio, in un sistema digitale può essere un microcomputer o in un sistema analogico può essere un semplice filtro.

Il blocco di **carrier circuits** lato trasmettitore converte il segnale in banda base elaborato in una banda di frequenza che è appropriata per essere trasmesso sul mezzo o canale trasmissivo. Se il canale propaga segnali in banda base il blocco di carrier circuits non è necessario e il segnale $s(t)$ sarà l'output del circuito di elaborazione del trasmettitore. Il blocco carrier circuits è necessario quando il canale può solo propagare frequenze poste in una banda intorno a f_c dove $f_c \gg 0$. In questo caso $s(t)$ è detto essere un segnale banda passante dal momento che è progettato per avere frequenze nell'intorno di f_c . Il mapping dell'informazione di input in banda base $m(t)$ nel segnale banda passante $s(t)$ è chiamata modulazione. Esso ha la seguente forma: $s(t) = R(t) \cos[\omega_c t + \vartheta(t)]$ dove $\omega_c = 2\pi f_c$. Se $R(t) = 1$ e $\vartheta(t) = 0$, $s(t)$ sarebbe una pura sinusoide di frequenza $f = f_c$.

Il **canale** può essere classificato in 2 categorie: hardwire e softwire. Alcuni esempi di canale hardwire sono il doppino telefonico, i cavi coassiali, le fibre ottiche etc. Esempi, invece, di softwire sono l'aria, il vuoto, l'acqua. In generale, il canale attenua il segnale ed inoltre il livello di rumore del canale con il rumore introdotto da un ricevitore non ideale causano il deterioramento del segnale ricevuto $\tilde{m}(t)$. Il rumore del canale può nascere da disturbi di natura elettrica o può essere introdotto dall'uomo, come le linee di trasmissioni ad alta tensione, i sistemi di iniezione delle macchine etc. Inoltre, il canale può contenere sistemi di

amplificazione attivi come i ripetitori dei sistemi telefonici o i transponder satellitari dei sistemi di comunicazione spaziali. Questi dispositivi, di sicuro, sono necessari per tenere il livello del segnale sopra il livello di rumore. In più il canale può introdurre cammini multipli tra la sorgente ed il ricevitore che hanno differenti tempi di ritardo e caratteristiche di attenuazione e, nel caso peggiore, queste caratteristiche possono variare nel tempo. Queste variazioni producono fading del segnale all'uscita del canale.

Il ricevitore prende il segnale corrotto all'uscita del canale e lo converte in un segnale in banda base che può essere gestito dall'elaboratore in banda base del ricevitore. L'elaboratore in banda base ha il compito di ripulire il segnale e consegnare una stima del segnale di partenza al sistema di comunicazione ricevente.

L'obiettivo dell'ingegneria è quello di progettare sistemi di comunicazione tali per cui l'informazione trasmessa al ricevitore possa essere la più fedele possibile con quella di partenza dalla sorgente. Nei sistemi digitali la misura del deterioramento dell'informazione è spesso indicata come Bit Error Rate (BER). Nei sistemi analogici la misura delle performance del sistema è rappresentata dal rapporto segnale rumore (S/N) al ricevitore.

Nei sistemi di comunicazione che usano l'atmosfera come canale trasmissivo, l'interferenza e le condizioni di propagazione dipendono fortemente dalle frequenze di trasmissione. Tali frequenze sono regolamentate da appositi organismi internazionali che ne stabiliscono l'uso.

Le caratteristiche di propagazione delle onde elettromagnetiche usate nei canali software sono fortemente dipendenti dalle frequenze. La velocità delle onde dipende dai cambiamenti della temperatura dell'aria, dalla densità dell'aria, dai livelli di ionizzazione dell'aria.

RAPPRESENTAZIONE DELL'INVILUPPO COMPLESSO

Ogni forma d'onda banda passante può essere rappresentata da:

$$v(t) = \operatorname{Re}\{g(t) * e^{j\omega_c t}\}$$

$\operatorname{Re}\{\cdot\}$ rappresenta la parte reale di $\{\cdot\}$, $g(t)$ è chiamato inviluppo complesso di $v(t)$ e f_c è la frequenza portante associata dove $\omega_c = 2\pi f_c$. Inoltre, esistono altri 2 modi equivalenti di rappresentazione:

$$v(t) = R(t) \cos[\omega_c t + \vartheta(t)]$$

e

$$v(t) = x(t) \cos \omega_c t - y(t) \sin \omega_c t$$

dove

$$g(t) = x(t) + jy(t) = |g(t)| e^{j\angle g(t)} \equiv R(t) e^{j\vartheta(t)}$$

$$x(t) = \operatorname{Re}\{g(t)\} \equiv R(t) \cos \vartheta(t)$$

$$y(t) = \operatorname{Im}\{g(t)\} \equiv R(t) \sin \vartheta(t)$$

$$R(t) \triangleq |g(t)| \equiv \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}$$

$$\vartheta(t) \triangleq \angle g(t) \equiv \tan^{-1} \left(\frac{y(t)}{x(t)} \right)$$

ASPETTI DI PROPAGAZIONE

I parametri caratteristici di un'onda elettromagnetica sono la **frequenza** (misurata in Hz e rappresentativa del numero di oscillazioni al secondo), la **lunghezza d'onda** (misurata in metri e corrispondente alla distanza tra due massimi o minimi consecutivi dell'oscillazione) e la **velocità di propagazione** (misurata in m/s). Nello spazio vuoto, tutte le onde viaggiano alla stessa velocità a prescindere dalla frequenza: tale velocità è la velocità della luce e vale approssimativamente $3 \cdot 10^8$ m/s (cioè 300000 km al secondo). Nei fili di rame o nelle fibre ottiche, invece, la velocità rallenta fino a circa 2/3 di questo valore e diventa anche parzialmente dipendente dalla frequenza: nella maggior parte dei casi, i calcoli per questi mezzi vengono fatti ipotizzando una velocità di propagazione dei segnali (o dei bit, nel caso della trasmissione digitale) di $2 \cdot 10^8$ m/s, costante con la frequenza. La velocità della luce è il limite di velocità estremo: nessun oggetto o segnale si può muovere più velocemente. La velocità della luce è anche la costante di proporzionalità tra frequenza e lunghezza d'onda di un'onda elettromagnetica nel vuoto:

$$\lambda * f = c$$

Questa è la relazione che consente di associare una lunghezza d'onda ad una data frequenza e viceversa. Si tratta ovviamente di una relazione di proporzionalità inversa: al crescere di f diminuisce e viceversa.

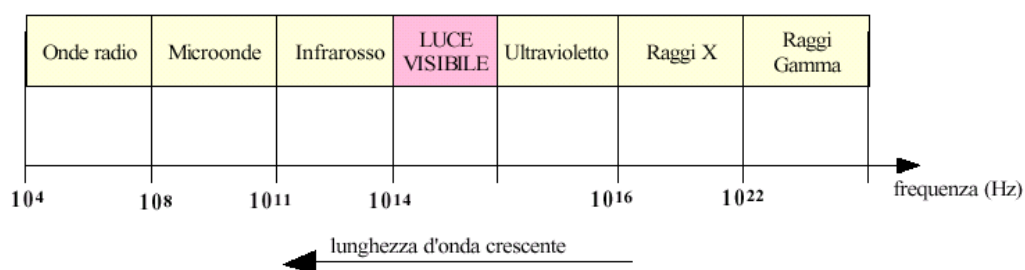
In generale, si parla di sistemi di radiocomunicazione per indicare quei sistemi di trasmissione di informazioni a distanza basati sull'impiego, come segnali portanti, di onde elettromagnetiche comprese entro un intervallo di frequenze opportune. Queste onde viaggiano da un radiotrasmettitore (o stazione trasmittente o sorgente o brevemente TX) ad un radoricevitore (RX). Le informazioni (che possono essere conversazioni nella radiotelefonia oppure segnali in codice telegrafico nella radiotelegrafia o ancora parole e musica nella radiodiffusione o immagini e suoni nella televisione) sono prima convertite da un trasduttore (microfono, codificatore telegrafico, telecamera, ecc.) in segnali elettrici (correnti e tensioni) di ampiezza variabile nel tempo; in seguito, tali segnali vanno ad agire, mediante il processo di modulazione (di ampiezza, di fase o di frequenza), su un'onda, detta portante, generata da un opportuno circuito elettrico oscillante presente nel radiotrasmettitore (oscillatore locale). Il segnale così ottenuto (detto segnale modulato), dopo una necessaria amplificazione, viene inviato all'antenna trasmittente, la quale lo irradia nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche. I ricevitori, più o meno distanti, captano le onde elettromagnetiche mediante un'antenna ricevente e, dopo un indispensabile processo di amplificazione e demodulazione, ricavano in uscita l'informazione emessa in trasmissione.

Lo spettro elettromagnetico, cioè l'insieme di tutte le frequenze a partire da 0 Hz fino teoricamente all'infinito, viene convenzionalmente suddiviso in bande. Ogni banda ha un proprio nome ed è generalmente caratterizzata da particolari caratteristiche di propagazione delle corrispondenti onde elettromagnetiche. La prima classificazione, introdotta dall'ITU (International Telecommunication Union), prevedeva che le bande fossero semplicemente indicate con una sigla corrispondente alla lunghezza d'onda: ad esempio, le onde a bassissima frequenza erano indicate con la sigla VLF, che sta appunto per Very Low Frequency.

<i>Denominazione</i>	<i>Sigla</i>	<i>Frequenza</i>	<i>Lunghezza d'onda</i>
<i>Frequenze estremamente basse (Extremely low frequency)</i>	ELF	0 - 3 KHz	105 - 100 Km
<i>Frequenze molto basse (very low frequency)</i>	VLF	3- 30 KHz	100 - 10 Km
<i>Basse frequenze, onde lunghe (low frequency)</i>	LF	30- 300 KHz	10 - 1 Km
<i>Frequenze medie, onde medie (medium frequency)</i>	MF	300KHz-3MHz	1 Km - 100 m
<i>Alte frequenze, onde corte (high frequency)</i>	HF	3 - 30 MHz	100 - 10 m
<i>Frequenze molto alte, onde metriche (very high frequency)</i>	VHF	30 - 300 MHz	10 - 1 m
<i>Onde decimetriche (ultra high frequency)</i>	UHF	300MHz-3GHz	1 m - 10 cm
<i>Onde centimetriche (super high frequency)</i>	SHF	3 - 30 GHz	10 - 1 cm
<i>Onde millimetriche (extremely high frequency)</i>	EHF	30 - 300 GHz	1 cm - 1 mm

Un'altra classificazione di rilievo è la cosiddetta radiotecnica, che assegna le seguenti nuove denominazioni:

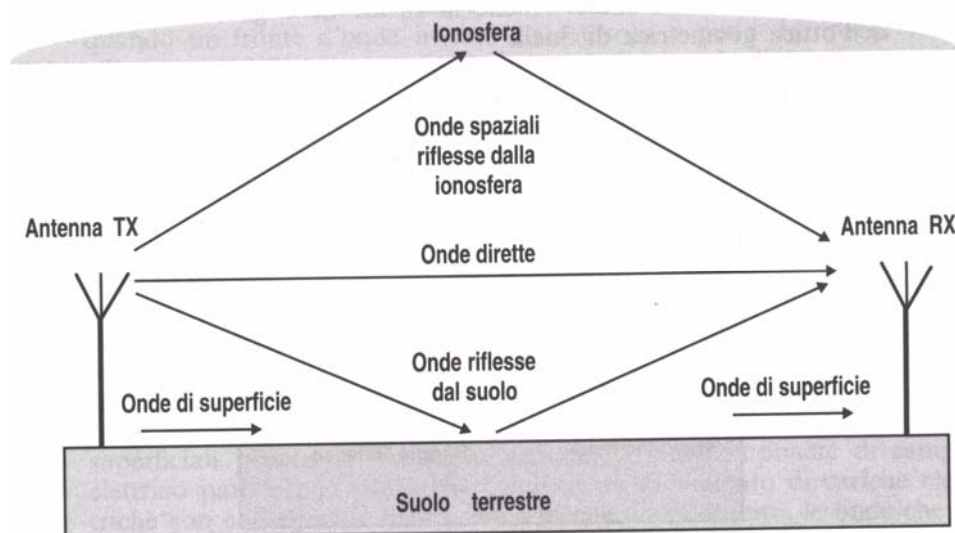
Frequenza	Denominazione	Lunghezza d'onda
<150 kHz	O. lunghissime	> 2 km
150÷300 kHz	O. lunghe	2÷1 km
300÷500 kHz	O. mediolunghe	1000÷600 m
500÷1500 kHz	O. medie	600÷200 m
1.5÷3 MHz	O. mediocorte	200÷100 m
3÷15 MHz	O. corte	100÷20 m
15÷30 14 Hz	O. cortissime	20÷10 m
30÷300 MHz	O. ultracorte	10÷1 m
> 300 MHz	Microonde	< 1m



Le porzioni radio, microonde, infrarossi e luce visibile dello spettro possono essere tutte usate per trasmettere informazioni: bisogna modulare opportunamente l'ampiezza, la frequenza o la fase di una singola onda portante sinusoidale tramite i segnali che si intende trasmettere. La luce ultravioletta, i raggi X ed i raggi gamma sarebbero ancora migliori grazie alle frequenze così elevate, ma sono onde difficili da produrre e modulare, non si propagano bene attraverso gli edifici e sono pericolose per gli esseri viventi. Possiamo dire in modo sintetico quanto segue:

- le onde radio a bassa frequenza (qualche decina di kHz) passano attraverso gli edifici, percorrono lunghe distanze e vengono quasi completamente riflesse dalla ionosfera verso il basso, per cui vengono sostanzialmente forzate a propagarsi "lungo" il suolo (In pratica, a queste frequenze il suolo e la ionosfera si comportano come conduttori, sia pure con conducibilità abbastanza inferiore a quella dei metalli tradizionali, e formano così una specie di guida d'onda all'interno della quale le onde vengono appunto "guidate").
- a frequenze più elevate (dalle microonde in su), le onde sono estremamente direzionali (il che è un bene per i collegamenti punto-punto tra un trasmettitore ed un ricevitore posti in visibilità radio uno dell'altro), ma vengono fermate dagli ostacoli (edifici, colline ma anche più semplicemente gocce di pioggia!);
- in tutti i casi, le onde sono soggette a interferenze elettromagnetiche con motori ed altre sorgenti elettriche;
- la trasmissione di onde radio, almeno alle basse frequenze, è inerentemente di tipo broadcast, nel senso che non vengono privilegiati specifici utenti, ma i segnali sono intercettabili da chiunque abbia gli apparati riceventi appositi (Naturalmente, una cosa è intercettare un segnale tramite una antenna e altra cosa è poter usare questo segnale: ad esempio, chiunque dispone di una parabola puntata su un satellite può ricevere i segnali da esso trasmessi, ma potrà visualizzare qualcosa sul proprio televisore solo se può decodificare i segnali ricevuti, il che può avvenire avendo a disposizione un decoder e una smart card che consenta di farlo funzionare).

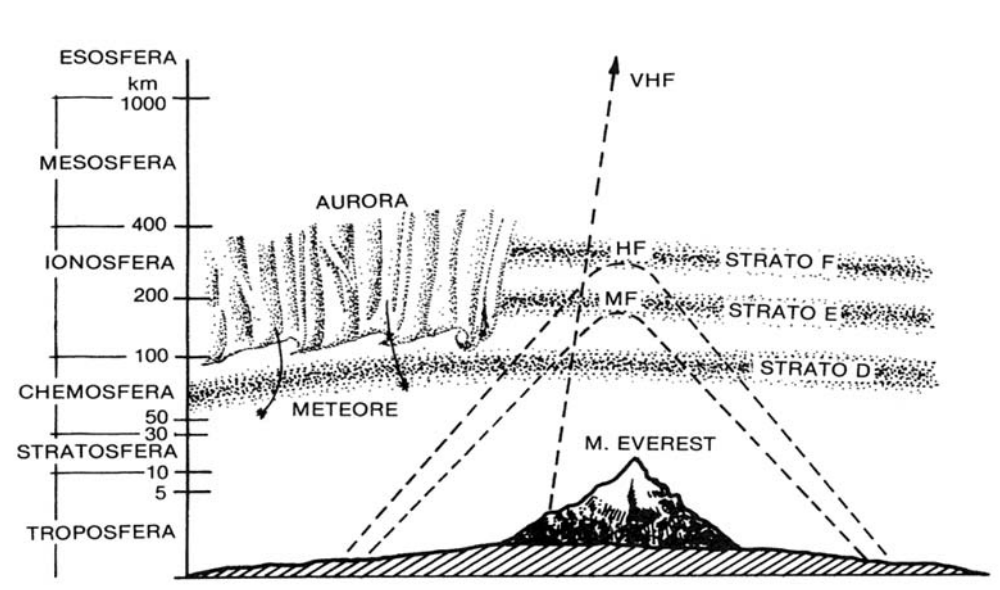
I fenomeni di propagazione delle onde elettromagnetiche dipendono, essenzialmente, dalla costituzione dell'atmosfera che circonda la terra e dalla frequenza dell'onda. In generale le onde elettromagnetiche irradiate nello spazio da un'antenna trasmittente possono giungere all'antenna ricevente seguendo diversi percorsi, come mostrato di seguito.



Rappresentazione schematica della propagazione delle onde elettromagnetiche.

Le onde elettromagnetiche, nei confronti della direzione di propagazione, si classificano in onde spaziali e onde terrestri. Le onde spaziali sono dovute al fenomeno della riflessione dell'onda da parte della ionosfera e sono alla base delle trasmissioni a grande distanza. Le

onde terrestri sono quelle che si propagano nelle vicinanze della terra. Esse si classificano in onde dirette, onde riflesse e onde di superficie. Le onde dirette e riflesse, a causa della curvatura della terra, hanno importanza solo quando l'antenna ricevente è nel campo visivo di quella trasmittente; cioè le antenne sono in linea in modo da potersi vedere. Esse trovano applicazione nel campo delle onde ultracorte e microonde. Le onde di superficie sono dovute a fenomeni di diffrazione del suolo. La conducibilità del suolo vincola le onde a seguire la curvatura della terra. Tali onde hanno importanza nel campo delle comunicazioni a breve distanza con onde medie e onde lunghe. Le onde elettromagnetiche irradiate dall'antenna trasmittente nel propagarsi nell'atmosfera sono soggette a numerosi fenomeni. I principali sono: RIFLESSIONE, RIFRAZIONE, DIFFRAZIONE, DIFFUSIONE, ASSORBIMENTO.

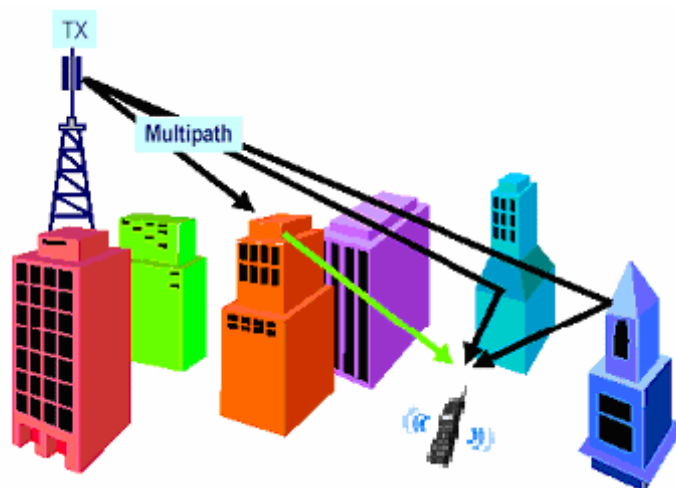


DESCRIZIONE STATISTICA DEI CANALI RADIOMOBILI

Il modello statistico consente spesso di fare previsioni teoriche sulle prestazioni del ricevitore; inoltre, esso suggerisce strategie per limitare le degradazioni dovute alle distorsioni subite dal segnale. Come si vedrà, a seconda della velocità di trasmissione e dei parametri fisici del mezzo trasmissivo, la funzione di trasferimento del canale può mantenersi sostanzialmente costante sulla banda del segnale o, al contrario, può variare apprezzabilmente. Nel primo caso si parla di canale *piatto* nel secondo di canale *selettivo*. Il segnale trasmesso è soggetto ad attenuazioni e, in molti casi, a vere e proprie distorsioni spettrali. Ciò provoca non pochi problemi di rivelabilità delle informazioni trasmesse per cui si rendono necessari dei modelli con cui poter considerare queste degradazioni.

CANALI MULTIPLI

Alle frequenze tipiche dei sistemi di nuova generazione è possibile applicare un modello di propagazione a raggi che risulta valido quando le dimensioni degli oggetti degli ambienti circostanti sono sensibilmente maggiori della lunghezza d'onda della portante. In queste circostanze, il segnale complessivamente ricevuto è la somma di più componenti provenienti da vari percorsi opportunamente attenuate e ritardate rispetto al segnale trasmesso (vedi figura). Queste differenze tra le diverse componenti sono originate dalle diverse caratteristiche dei cammini percorsi da ciascuno dei raggi in cui l'onda elettromagnetica è scomposta. La modellizzazione per sistemi soggetti a propagazione multipath presenta difficoltà superiori rispetto a quelle poste da sistemi in cui l'unica sorgente di disturbo è il rumore termico.



CANALE TEMPO-INVARIANTE

Sia $x(t)$ l'involuppo complesso del segnale trasmesso. Il segnale ricevuto $y(t)$ avrà allora involuppo complesso pari a:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{N_r} a_i x(t - \tau_i)$$

con $a_i = \rho_i e^{j\theta_i}$

dove N_r è il numero di raggi ricevuto, a_i è una variabile aleatoria complessa e ρ_i, τ_i e θ_i sono rispettivamente l'ampiezza, il ritardo di propagazione ed il ritardo di fase dell'i-esimo raggio.

Fin quando il canale è lineare, esso può essere descritto dalla risposta all'impulso $h(\tau)$. Allora, in termini di risposta impulsiva la relazione ingresso-uscita risulta:

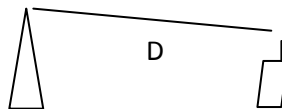
$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau$$

che confrontata con l'equazione precedente mostra che per un canale multipath statico:

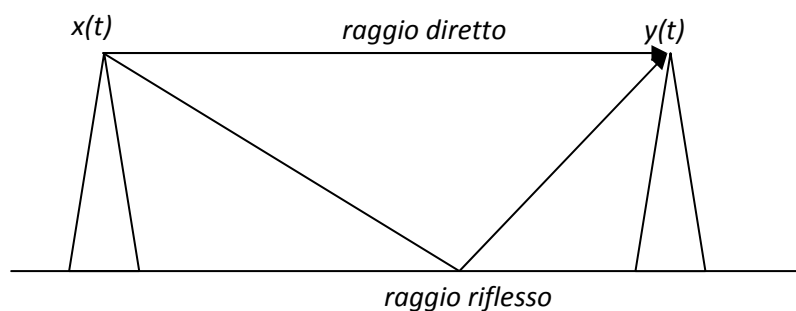
$$h(\tau) = \sum_i a_i \delta(\tau - \tau_i)$$

In tal modo è possibile valutare l'impatto della propagazione per cammini multipli sulla ricezione del segnale.

$$\tau = \frac{D}{c} \text{ dove } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$



Consideriamo adesso il canale a 2 raggi.



$$y(t) = x(t) + \rho e^{j\theta} x(t - \tau)$$

Come si può notare $y(t)$ è la somma di un raggio diretto di ampiezza unitaria e con uno sfasamento e ritardo nulli e di un raggio riflesso con ampiezza, sfasamento e ritardo fissati, riferiti al primo raggio. Nel dominio della frequenza la relazione precedente diventa:

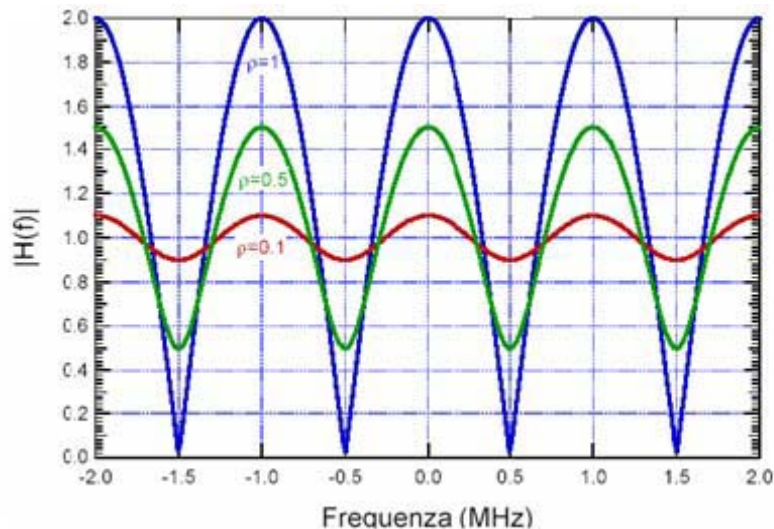
$$Y(f) = X(f)(1 + \rho e^{j\theta} e^{-j2\pi f\tau})$$

La risposta in frequenza del canale è pari a:

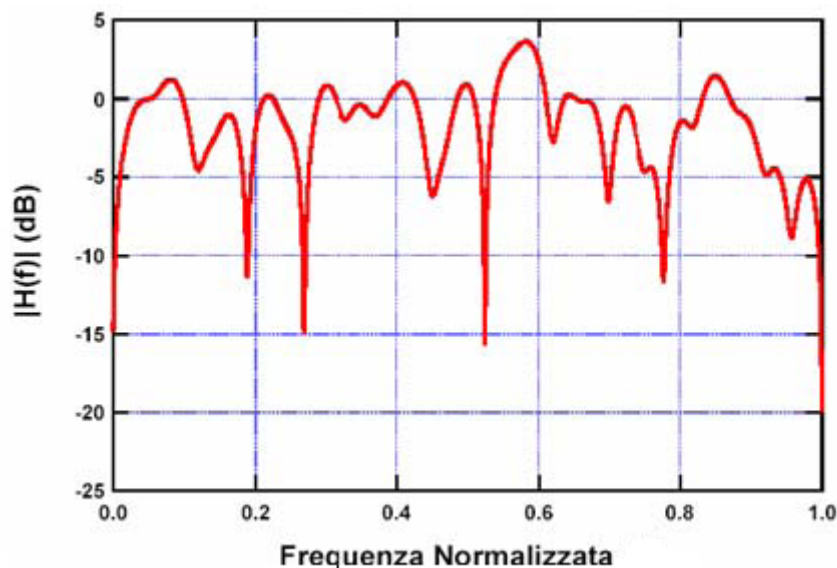
$$H(f) = 1 + \rho e^{j\theta} e^{-j2\pi f\tau}$$

La risposta in ampiezza del canale è:

$$|H(f)| = \sqrt{1 + \rho^2 + 2\rho \cos\left(2\pi\left(f - \frac{\theta}{2\pi\tau}\right)\tau\right)}$$



Risposta in ampiezza di un canale a 2 raggi.



Risposta in ampiezza di un canale a 20 raggi.

La risposta in ampiezza, visualizzata nella precedente figura, risulta molto più frastagliata rispetto al caso di canale a due raggi, mettendo ancora più in evidenza la difficoltà di propagazione che si può incontrare su un canale radio.

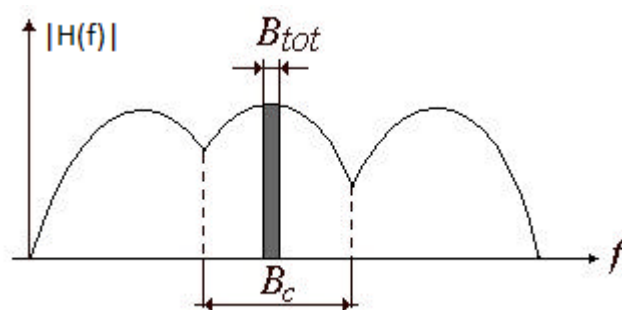
Le distorsioni introdotte dipendono dal tipo di segnale trasmesso. Se il segnale è caratterizzato da una banda relativamente stretta 'vede' una piccolissima porzione della

risposta in ampiezza del canale ovvero si trova di fronte ad un canale piatto: tutte le sue componenti subiscono un'uguale attenuazione o amplificazione a seconda che i segnali incidenti sull'antenna ricevente si sommino distruttivamente o costruttivamente. Se invece il segnale trasmesso è a larga banda, esso subisce notevoli distorsioni da parte del canale per effetto dei cammini multipli: in questo caso ci troviamo di fronte a fading selettivo in frequenza.

Come si può osservare, se il segnale trasmesso $x(t)$ ha *larghezza di banda* (B_{TOT}) confrontabile con $\frac{1}{\tau}$, esso subisce notevoli distorsioni da parte del canale per effetto dei cammini multipli. In particolare, le componenti del segnale sono attenuate in modo diverso a seconda della frequenza: in questo caso si dice che il canale ha un comportamento *selettivo in frequenza*.

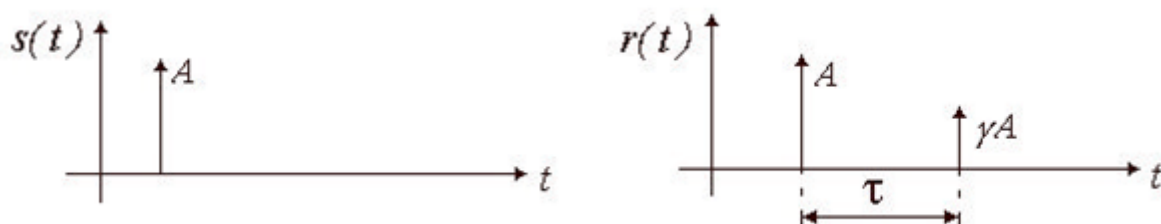
La selettività in frequenza del canale trasmissivo si traduce in una distorsione lineare del segnale trasmesso, che a sua volta genera interferenza intersimbolica (ISI) al ricevitore. Questa deve essere opportunamente compensata per evitare una severa degradazione delle prestazioni del sistema.

Si indica con $B_C = \frac{1}{\tau}$ la **Banda di Coerenza del Canale** con il seguente significato: se la banda utile del segnale è molto minore di B_C allora non c'è distorsione perché il canale non manifesta un apprezzabile effetto filtrante (si parla di canale piatto).



$$B_C \gg B_{TOT}$$

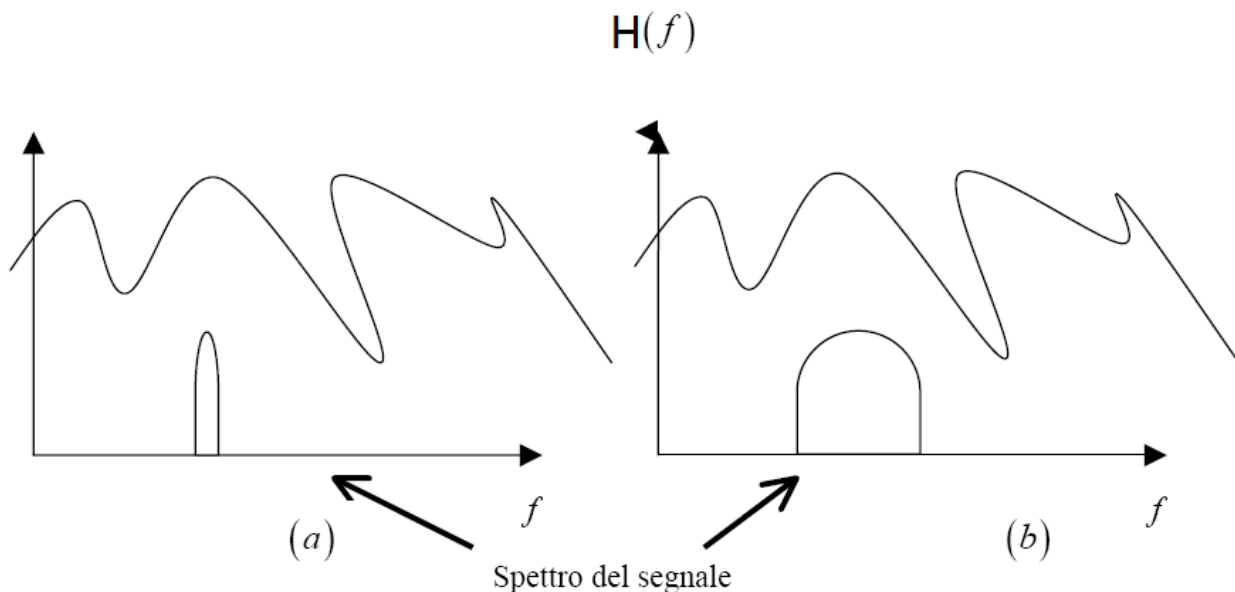
Il termine τ è detto *time spread* (dispersione temporale) e nel semplice modello a 2 raggi corrisponde al ritardo di propagazione fra segnale diretto e segnale riflesso (vedi figura sotto).



Si definisce *banda di coerenza* B_c del canale il massimo intervallo di frequenza in cui $|H(f)|$ non varia 'apprezzabilmente' e per quanto detto si può esprimerla con $B_c = \frac{1}{\tau}$.

Perciò per una data velocità di segnalazione $\frac{1}{T_s}$, possiamo dividere i canali multipath in 2 classi:

- quelli non selettivi, in cui $B_c > \frac{1}{\tau}$ e nei quali tutte le componenti del segnale subiscono pressoché la medesima attenuazione (vedi figura sotto);
- quelli selettivi, in cui $B_c < \frac{1}{\tau}$ e nei quali le componenti sono attenuate in modo diverso a seconda della frequenza (vedi figura sotto).



CANALE TEMPO-VARIANTE

Il modello finora considerato è relativo ad un canale tempo-invariante, in cui i parametri che lo caratterizzano sono indipendenti dal tempo. Questa ipotesi è molto riduttiva; infatti nei sistemi radio-mobili il canale non è tempo-invariante, ma tempo-variante, perché il moto relativo tra trasmettitore e ricevitore si traduce in cambiamenti delle caratteristiche del mezzo di propagazione. Il risultato è che il ricevitore osserva variazioni nell'ampiezza e nella fase del segnale ricevuto. L'involuppo complesso del segnale ricevuto $y(t)$ sarà espresso in questa forma:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{N_r} a_i(t) x(t - \tau_i(t))$$

$$a_i(t) = \rho_i(t) e^{j\vartheta_i(t)}$$

dove i parametri $\{\rho_i\}$, $\{\vartheta_i\}$ e $\{\tau_i\}$ sono variabili aleatorie.

Fino ad ora non si è tenuto conto del fatto che il ricevitore possa essere mobile; il maggiore effetto dovuto alla mobilità del ricevitore rispetto alla sorgente del segnale è dato dall'*effetto Doppler*, per il quale se assumiamo di trasmettere la sinusoide pura:

$$s(t) = A e^{j2\pi f_0 t}$$

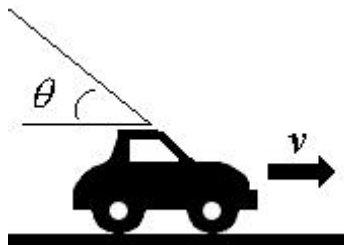
si riceve:

$$r(t) = A e^{j2\pi(f_0 - f_d)t}$$

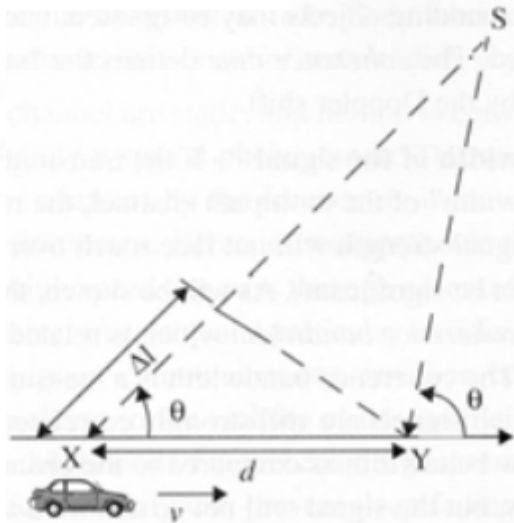
dove f_d è la traslazione in frequenza dovuta al movimento del ricevitore data da:

$$f_d = f_0 \frac{v}{c} \cos \vartheta$$

dove v è la velocità con cui si muove il mezzo, c è la velocità della luce e ϑ l'angolo con cui incide il segnale al ricevitore, e si ha $f_d > 0$ se il mobile si allontana dal trasmettitore.



f_d è detta FREQUENZA DI DOPPLER ed è legata alla velocità del mobile. Tale frequenza è importante perché fornisce una misura della rapidità con cui evolve il canale. Possiamo infatti affermare che per effetto dei cammini multipli e del movimento del mobile, il segnale ricevuto subisce un'attenuazione $a(t)$ che varia apprezzabilmente solo su intervalli temporali maggiori o uguali a $1/f_d$.



Consideriamo un terminale mobile che si muove alla velocità costante v , lungo un percorso di lunghezza d tra i punti X ed Y, mentre riceve un segnale dalla sorgente remota S, come illustrato in figure sopra.

La differenza di percorso attraversata dall'onda dalla sorgente S verso il terminale mobile ai punti X e Y è $\Delta l = d \cos \vartheta = v \Delta t \cos \vartheta$, dove Δt è il tempo richiesto per il terminale mobile per spostarsi da X a Y e ϑ è assunto essere lo stesso ai punti X e Y dal momento che la sorgente è assunta essere molto lontana.

Il cambiamento di fase nel segnale ricevuto dovuto alla differenza nella lunghezza dei percorsi è perciò:

$$\begin{aligned} \Delta \phi &= 2\pi f t_2 - 2\pi f t_1 = 2\pi \frac{c}{\lambda} (t_2 - t_1) = 2\pi \frac{(c t_2 - c t_1)}{\lambda} = \\ &= 2\pi \left(\frac{d_2 - d_1}{\lambda} \right) = 2\pi \frac{\Delta l}{\lambda} = 2\pi \frac{v \Delta t}{\lambda} \cos \vartheta \end{aligned}$$

e di qui l'apparente cambio in frequenza, o Doppler Shift, è dato da f_d , dove

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cdot \cos \vartheta$$

Definiamo con $T_c = 1/f_d$ il **Tempo di Coerenza del Canale**, ovvero l'intervallo temporale in cui la risposta in cui la frequenza del canale rimane sostanzialmente invariata. Poiché il numero di segnalazioni presenti nell'intervallo $1/f_d$ è pari ad $1/f_d T_s$, con $1/T_s$ la velocità di segnalazione impiegata, è possibile classificare il fading in

- **FADING LENTO** se $\frac{1}{f_d T_s} \gg 1$

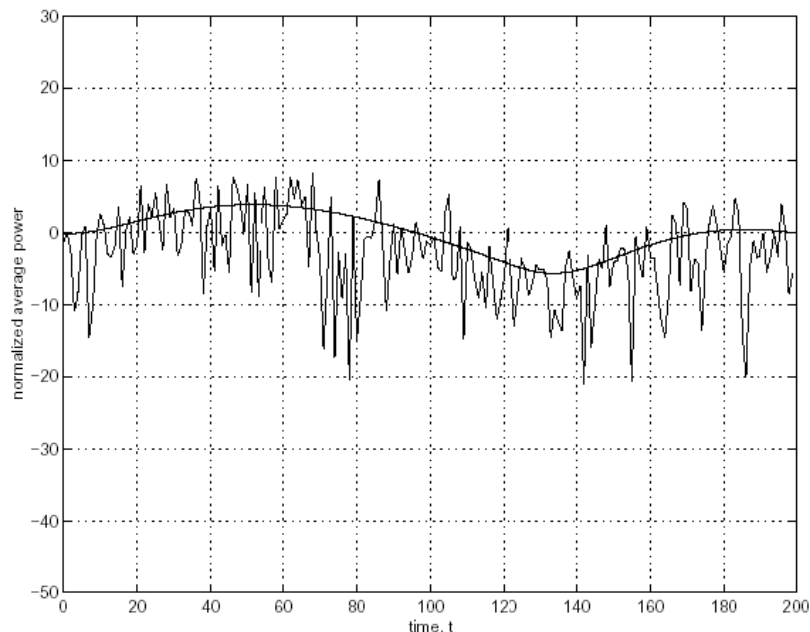
$$\frac{1}{T_s} = f_s \Rightarrow \frac{f_s}{f_d} \gg 1 \rightarrow f_s \gg f_d \quad \text{o} \quad \frac{1}{T_s} \gg \frac{1}{T_c} \rightarrow T_c \gg T_s \quad \text{Fading Lento}$$

- **FADING VELOCE** se $\frac{1}{f_d T_s} \ll 1$

La figura sotto visualizza la differenza tra fading lento e fading veloce.

In presenza di fading lento, la risposta impulsiva del canale varia molto più lentamente del segnale trasmesso e si può ritenere che $a(t)$ sia costante su un intervallo di tempo comprendente molte segnalazioni. Nel caso di fading veloce il tempo di coerenza è breve rispetto alla durata dell'impulso associato ad ogni simbolo e questo significa che la risposta impulsiva del canale cambia molto rapidamente.

Nelle attuali applicazioni le velocità di segnalazione sono così elevate da ritenere valida l'ipotesi di fading lento. Per avere un'idea delle grandezze in gioco possiamo valutare f_d in corrispondenza di una frequenza della portante pari a 900MHz ed una velocità del mobile pari a 100Km/h. il valore di f_d è all'incirca pari a 80Hz, notevolmente inferiore ad esempio rispetto alla velocità di segnalazione dello standard GSM pari a 270kbit/s.

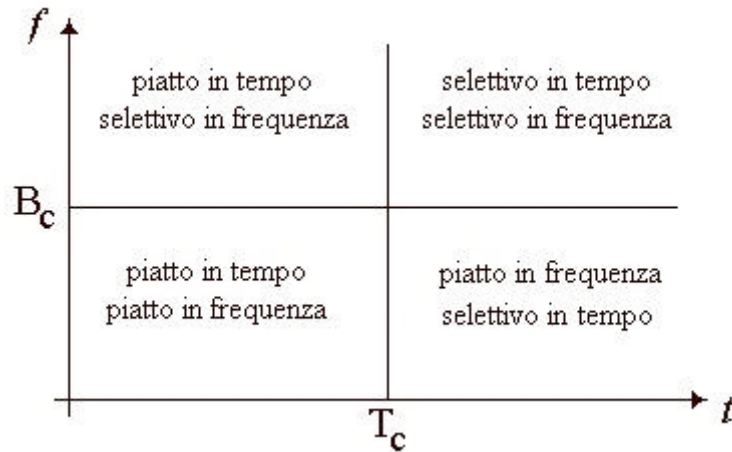


Se consideriamo quindi una generica modulazione numerica il cui simbolo abbia durata T_s e di larghezza di banda totale B_{TOT} , le condizioni da rispettare affinché la ricezione avvenga senza distorsioni sono:

$$B_{TOT} \ll B_c$$

$$T_s \ll T_c$$

Nel caso in cui non vengano rispettate tali condizioni il canale viene detto dispersivo in tempo ed in frequenza con le seguenti classificazioni:



Si è detto precedentemente che l'attenuazione introdotta dal canale può essere ritenuta costante per molti intervalli di segnalazione e si può trascurare la sua dipendenza dal tempo. Si deve però considerare il fatto che la quantità α è una variabile aleatoria. A questo punto si possono vedere quali sono i modelli più utilizzati che descrivono al meglio le variazioni statistiche dell'ambiente di propagazione nei diversi collegamenti tra trasmettitore e ricevitore.