

1 Nozioni in pillole sui segnali e sulle trasmissioni

Le nozioni abbozzate in questo capitolo non hanno alcuna pretesa di completezza. Per una comprensione completa dei problemi e delle eleganti tecniche matematiche che sottendono sarà necessario rivolgersi ad altri testi.

1.1 Il segnale

Fisicamente un **segnale** è l'insieme dei valori assunti in ogni istante da una grandezza suscettibile di subire variazioni. Attraverso queste variazioni il segnale sarà trasmesso a distanza lungo un mezzo di trasmissione.

In matematica si intende per segnale una funzione continua "quasi dappertutto", che ammette discontinuità solo in punti "isolati", cioè separati fra di loro da intervalli nei quali la funzione è continua. In pratica il grafico di un segnale "matematico" può avere "scatti" infinitamente veloci, nei quali il segnale si porta istantaneamente ad un altro valore.

Nelle considerazioni che faremo, l'asse x del grafico di un segnale ha l'unità di misura del tempo.

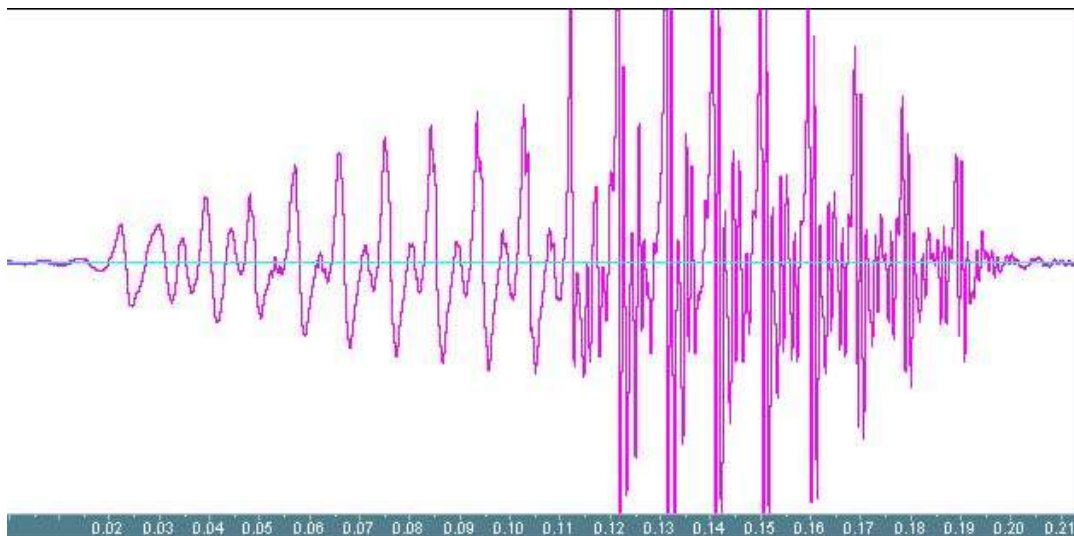


Figura 1: un segnale fisico nel dominio del tempo: la voce dell'autore mentre pronuncia la parola "mah!". La grandezza fisica rappresentata è la tensione elettrica sviluppata da un microfono

Analisi e sintesi armonica di un segnale

Joseph **Fourier** (1768 - 1830) dimostrò matematicamente nel 1820 che un segnale periodico qualsiasi, comunque fatto, può essere approssimato tanto bene quanto si vuole con una somma di sinusoidi. Ciascuna di queste sinusoidi, dette "armoniche" ha una frequenza via via maggiore e ampiezze e sfasamenti diversi per ogni segnale da approssimare.

Lo stesso segnale può essere ricostruito esattamente effettuando una somma di un numero infinito di sinusoidi (somma della serie di Fourier).

Questo risultato fece comprendere come una qualsiasi funzione, anche "a scatti", come un'onda quadra, "contenga" componenti a diversa frequenza e come la conoscenza di quanto sia importante ciascuna frequenza rispetto alle altre equivale a conoscere la funzione stessa. Ciò individua due diversi "dominii" nei quali si può studiare un segnale, il dominio dei tempi ed il dominio delle frequenze. Nel campo delle telecomunicazioni lo studio dei segnali nel dominio delle frequenze ha portato a considerevoli risultati.

L'analisi armonica corrisponde al calcolo dei coefficienti di Fourier del segnale. Esistono coefficienti di Fourier sia per l'ampiezza che per la fase. Il coefficiente di Fourier dell'ampiezza rappresenta quanto ciascuna delle sinusoidi è importante rispetto alle altre, mentre il coefficiente della fase rappresenta di quanto ogni sinusoidi è sfasata rispetto alla funzione $\sin(t)$ (se una armonica è sfasata di 180 gradi, invece di un seno sarà un coseno!).

Se del segnale si possiede una espressione matematica, l'analisi di Fourier è possibile con calcoli matematici (analisi "in forma analitica"). I coefficienti di Fourier, che si determinano risolvendo degli integrali, rappresentano l'ampiezza e lo sfasamento delle sinusoidi che compongono la serie di Fourier e sono quelli che danno la miglior approssimazione possibile del segnale iniziale con una somma di sinusoidi. Un teorema dimostra questa affermazione.

Se invece il segnale proviene dal "mondo reale" esso si potrà analizzare con un algoritmo per computer (FFT: Fast Fourier Transform), oppure con uno specifico strumento di misura (analizzatore di spettro).

Nell'analisi di Fourier in forma analitica le frequenze delle armoniche utilizzate partono da una certa frequenza detta "fondamentale" e continuano con armoniche di frequenza doppia (prima armonica), tripla (seconda armonica), e così via, fino al numero di armoniche considerato sufficiente per approssimare il segnale abbastanza bene.

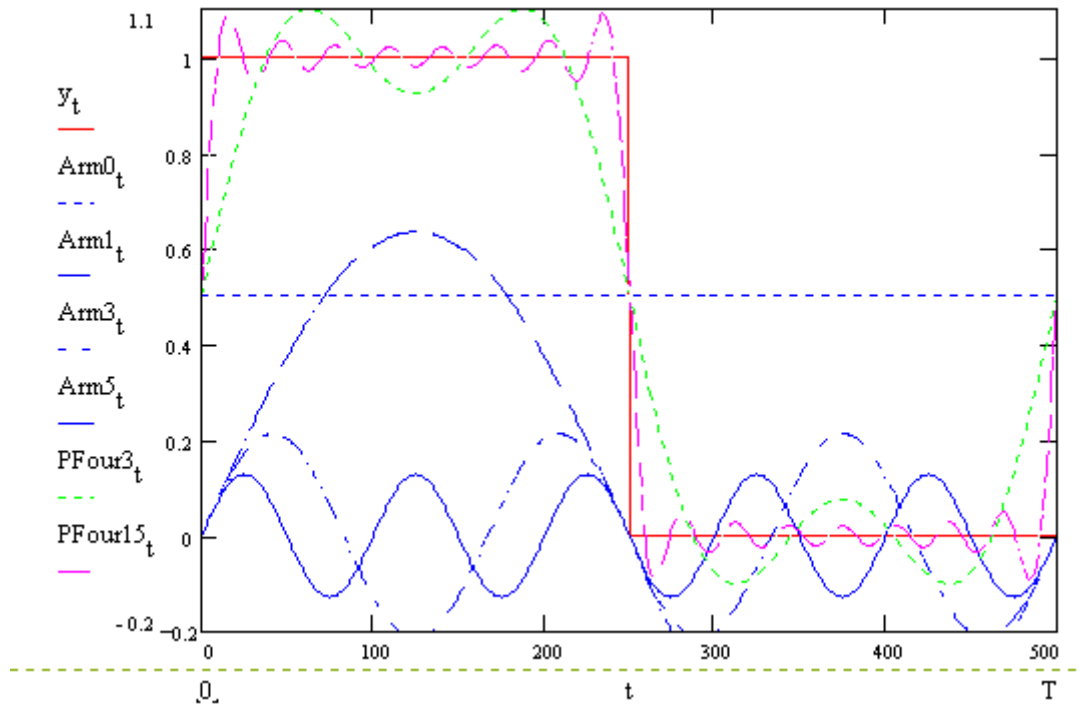


Figura 2: Armoniche e somme di Fourier di ordini diversi

In Figura 2 y_t è il segnale: onda quadra simmetrica (duty cycle 0,5) a valor medio diverso da zero. $Arm0, Arm1, \dots, ArmX$ sono le armoniche di ordine X . $PFour1, \dots, PFourY$, sono le somme di Fourier di ordine Y .

L'insieme dei coefficienti di Fourier è detto "spettro" del segnale ed è visualizzato graficamente con un insieme di "cane d'organo" di diversa lunghezza, ognuna delle quali rappresenta una sinusoide.

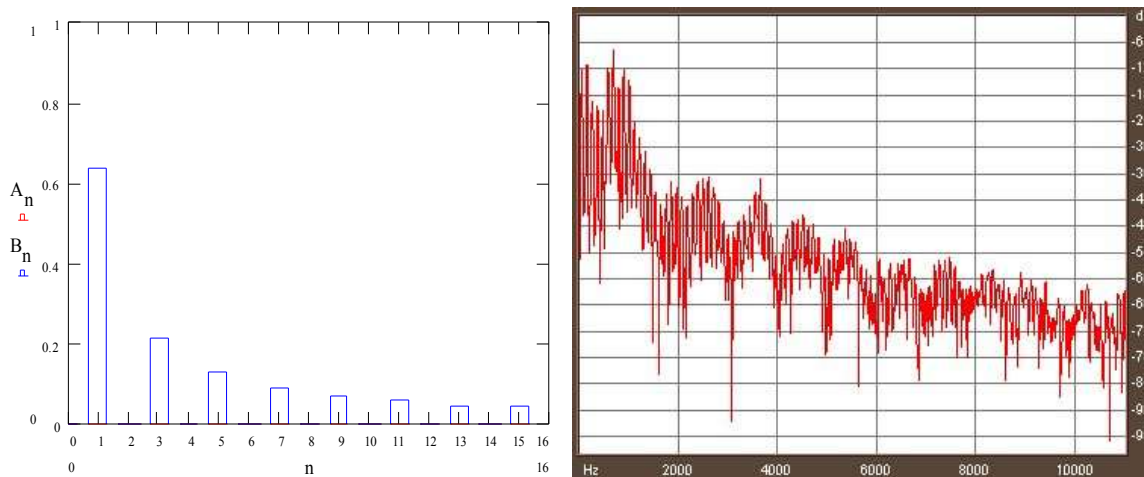


Figura 3: Segnali nel dominio delle frequenze: a sinistra lo spettro teorico dell'onda quadra, a destra lo spettro sperimentale della parola "mah!", già visualizzata nel dominio del tempo, calcolato con un procedimento FFT in un istante di tempo a 0,14 s dal suo inizio

La sintesi armonica è il procedimento contrario dell'analisi: possedendo i coefficienti delle armoniche, cioè i numeri che dicono quanto ogni sinusoide sia importante rispetto alle altre, si costruisce un segnale complicato, sommando le varie componenti sinusoidali (questo è il principio di base dei primi sintetizzatori musicali ("moog")). I grafici "Pfour.." della figura 3, essendo la somma di polinomi di Fourier, sono esempi di sintesi armonica.

Figura 4 A sinistra: segnale di un diapason nel dominio del tempo, a destra, stesso segnale nel dominio delle frequenze

Nella si noti che nel dominio del tempo il segnale non sembra perfettamente sinusoidale, infatti si può notare che nel dominio delle frequenze oltre all'armonica fondamentale a 440 Hz è presente una prima armonica consistente a 880 Hz.

Con tecniche matematiche ancora più sofisticate si può fare un'analisi armonica di segnali non periodici. Lo strumento matematico che si usa in questo caso è stato chiamato "trasformata di Fourier" e dà luogo a spettri continui (non a canne d'organo).

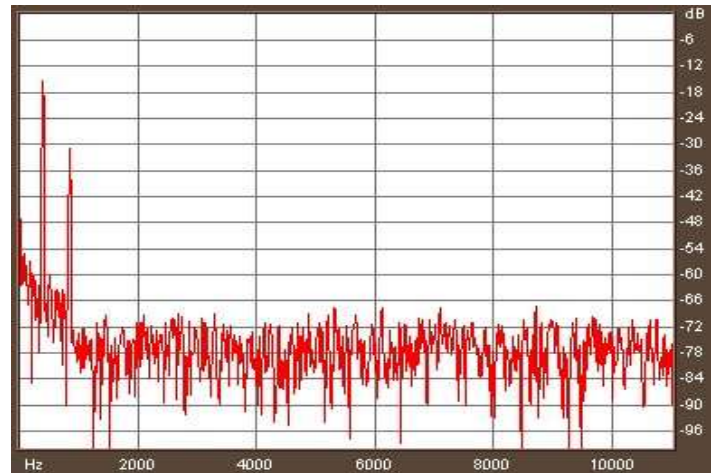
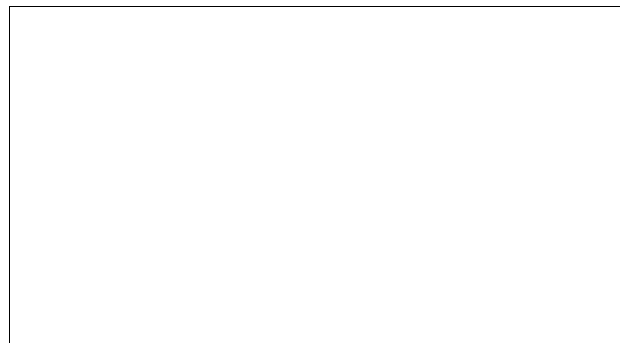


Figura 5: Spettri di segnali non periodici: a) trasformata di Fourier dell'onda quadra di Fig.3; b) trasformata di



Fourier del segnale a gradino



Banda occupata da un segnale (signal bandwidth)

Lo spettro di un segnale ne definisce il contenuto armonico, ovverosia individua le frequenze "presenti" nel segnale stesso. L'intervallo delle frequenze che hanno una presenza significativa nello spettro del segnale è la banda da esso occupata.

Segnali più "movimentati", con transizioni più veloci occupano una banda più estesa di segnali più "placidi", cioè hanno spettri con componenti ad alta frequenza più importanti. La presenza di uno scatto infinitamente veloce nel segnale implica una occupazione di banda in teoria infinita, anche se l'importanza delle armoniche è sempre minore via via che le frequenze divengono più elevate. L'onda quadra, che ha infiniti scatti, occupa una banda in teoria infinita. Fra due onde quadre, quella che ha le componenti ad alta frequenza più importanti è, guarda un po', quella di frequenza più alta.

Un segnale telefonico occupa una banda di circa 4 kHz, uno televisivo circa 5 MHz.

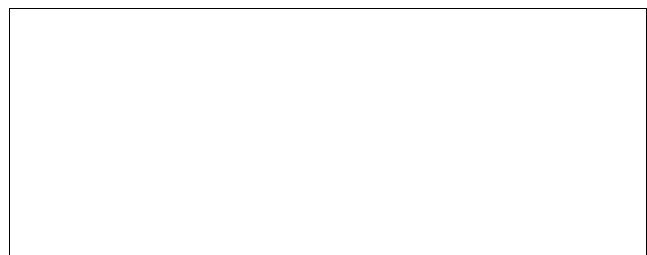
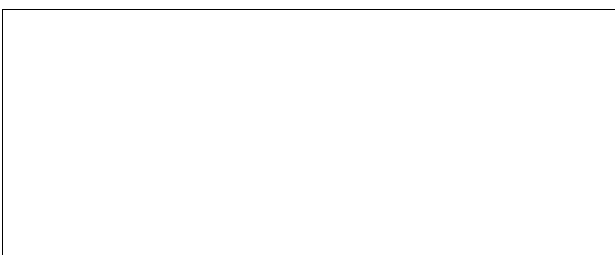


Figura 6: Spettro di un'onda quadra di 1 Hz, spettro di un'onda quadra di 1 kHz, nella stessa scala.

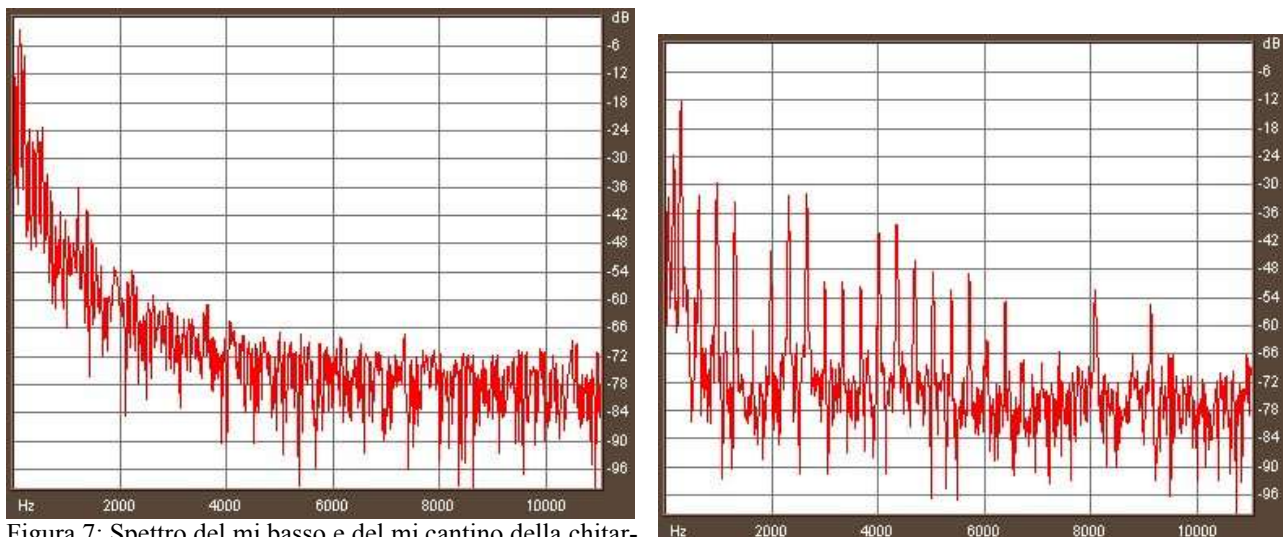


Figura 7: Spettro del mi basso e del mi cantino della chitarra dell'autore.

Larghezza di banda di un mezzo di trasmissione (medium bandwidth)

Un mezzo di trasmissione è il supporto fisico attraverso il quale può avvenire una trasmissione di informazione.

La larghezza di banda di un mezzo di trasmissione è la differenza fra la frequenza più alta e la più bassa che esso lascia passare da un suo capo all'altro senza attenuarle eccessivamente. Il mezzo di trasmissione si comporta in modo analogo ad un filtro, di solito di tipo passabasso o passabanda. Per esempio, la banda passante di un normale canale telefonico, che viene detta "banda fonica", va da 300 Hz a 3,4 kHz e permette di ottenere un segnale vocale intelligibile ma non di grande qualità. Se si vuole ascoltare musica di buona qualità questa banda è ampiamente insufficiente, e deve essere di almeno 20 kHz.

Velocità di trasmissione di un canale di trasmissione

Strettamente correlata con la larghezza di banda è la velocità che si può ottenere nelle trasmissioni numeriche con un certo mezzo di trasmissione. Infatti quanto più la banda passante di un mezzo è larga tanto più i fronti di salita dei segnali digitali possono essere ripidi, cioè il mezzo trasporta, senza rovinarli, un maggior numero di bit al secondo.

La velocità di un canale di trasmissione viene espressa in bit trasferiti al secondo (bit/s o, in modo improprio, bps) per i canali seriali ed in byte/s per i canali paralleli. Naturalmente vengono usati anche i multipli dell'unità fondamentale, con k che significa 1024 (es. kbit/s) e M 1024 * 1024 (es. MByte/s). La velocità di trasmissione viene chiamata anche "bit rate".

Nel gergo comune molto spesso si confonde la bit rate sopportata da un mezzo di trasmissione con la sua banda passante (bandwidth). Si fa peraltro notare che, per quanto i due concetti abbiano gli stessi effetti pratici, non sono la stessa cosa.

Segnali analogici

Segnali direttamente proporzionali al valore assunto dalla grandezza fisica che costituisce il segnale.

Nella letteratura in lingua Inglese vengono anche detti "passband signals" (segnali in banda traslata).

Vantaggi dei segnali analogici: contengono più informazione, avendo un insieme infinito di "livelli"

Segnali numerici (digitali)

Segnali discreti, in cui le informazioni da trasportare sono codificate con un numero finito di simboli, di solito numeri binari.

Vantaggi dei segnali numerici: riproducibilità, resistenza ai disturbi, precisione nei calcoli.

Nella letteratura in lingua Inglese vengono anche detti "baseband signals" (segnali in banda base).

Le comunicazioni fra computer, che ci interessano particolarmente nella nostra trattazione, sono necessariamente numeriche; tali saranno i segnali che essi si scambiano.

Per quanto nel futuro lontano si possa prevedere che tutti i segnali saranno trasmessi in forma digitale, esistono oggi esempi molto importanti di servizi di comunicazione che sono erogati con sistemi analogici (es. telefono, televisione).

Tecnica di trasmissione (signaling method)

A seconda del mezzo di trasmissione da utilizzare, potrebbe essere necessaria la conversione del segnale, per trasformarlo in un altro segnale, diverso, che sia in grado di propagarsi nel mezzo prescelto. Il secondo segnale deve peraltro mantenere lo stesso contenuto informativo del primo.

Potrebbe darsi cioè che un segnale numerico debba essere convertito in un segnale analogico, per poter passare entro particolari mezzi di trasmissione (p.es. un segnale numerico che debba passare in una linea telefonica classica); parimenti potrebbe accadere che un segnale analogico debba essere reso numerico e trasportato in tal forma (p.es. un segnale acustico che debba passare per una fibra ottica o per una linea telefonica moderna).

Nelle trasmissioni di segnali numerici, indipendentemente dalla tecnica di trasmissione, è necessario effettuare qualche forma di codifica ("encoding"), che associ i "simboli" che si possono trasmettere nel mezzo prescelto ai "numeri" che costituiscono il segnale numerico.

Trasmissione con tecnica analogica (o a banda limitata)

Per poter essere propagato in alcuni mezzi di trasmissione, il segnale numerico viene trasformato in un segnale continuo, che, pur essendo molto diverso dal segnale originario, ne mantiene tutto il contenuto informativo. Per far ciò si usa un segnale continuo sinusoidale, detto "portante". La portante da sola non contiene informazione, ma viene opportunamente modificata, in modo da aggiungere l'informazione che si deve trasmettere.

L'operazione di "aggiunta dell'informazione" viene detta "modulazione" della portante. Per ricostruire, alla ricezione, il segnale numerico originario, bisogna fare l'operazione inversa, che viene detta "demodulazione".

I dispositivi che effettuano queste conversioni vengono detti "modem" (MOdulator - DEModulator).

I metodi di modulazione (codifica) utilizzati nelle comunicazioni con modem sono molto diversi; alcuni di essi sono ASK, FSK, PSK, QAM, e verranno discussi in seguito.

L'operazione di modulazione realizza uno spostamento in frequenza del segnale, il cui spettro, dopo la modulazione, è centrato sulla frequenza della portante. L'operazione di demodulazione riporta il segnale nella sua banda originaria, eliminando la portante e rendendo lo spettro del segnale "identico" a come era prima.

Trasmissione con tecnica digitale (o in banda base)

Il segnale è trasmesso come una sequenza di livelli, di solito attraverso tensioni elettriche. Se esso è un segnale numerico mantiene la sua forma "binaria" e viene eventualmente trasformato solo dandogli una diversa codifica. Se invece il segnale è analogico esso deve essere prima convertito in numerico. La banda occupata con queste tecniche teoricamente non è limitata; in pratica però a frequenze molto alte il contenuto armonico dei segnali di trasporto sarà molto basso e potrà essere trascurato. Il segnale digitale non è comunque adatto ad essere limitato in bassa frequenza per mezzo di un filtro, come accade tipicamente nelle reti telefoniche ordinarie.

Alcuni dei metodi di codifica utilizzati per le trasmissioni con segnali in banda base sono: NRZ (Not return to zero, vedi la trattazione relativa all'interfaccia seriale RS 232), Manchester, Manchester differenziale (vedi la trattazione delle reti locali).

Trasmissioni a spettro diffuso (spread spectrum)

Una tecnica usata dai militari fin dalla seconda guerra mondiale è divenuta di stretta attualità solo da poco tempo.

In tutte le altre tecniche di trasmissione lo spettro del segnale utile viene concentrato il più possibile intorno alla portante. Al contrario nelle trasmissioni spread spectrum esso viene allargato, con una modulazione digitale, in tutta la banda disponibile. Il segnale modulante è una sequenza pseudocasuale, che ha una frequenza molto più alta del segnale da trasmettere. Più esattamente il segnale effettivamente trasmesso è il prodotto del segnale da trasmettere e della portante ed ha una tale componente "casuale" che sembra divenuto rumore bianco. Nel dominio delle frequenze il suo spettro si è sparpagliato in tutta la banda disponibile, determinata dalle caratteristiche della portante. Chiunque provi a ricevere il segnale lo vedrà come un po' di rumore in più, a meno che non possieda una chiave che gli permetta di ricostruire alla ricezione la sequenza pseudocasuale che ha modulato il segnale originario. In quel caso, dopo aver sincronizzato il segnale ricevuto con la portante "rifatta" in ricezione, chi riceve sarà in grado di estrarre, da questo "rumore" il segnale originale.

In questo modo i segnali possono essere trasmessi con potenze bassissime, anche più basse della soglia di rumore, non interferiscono con altri segnali e sono intrinsecamente sicuri, perché solo chi possiede la chiave per la decrittazione può demodularli.

Questa tecnica fa un uso molto più efficiente delle altre sia della banda a disposizione che della potenza del segnale trasmesso.

Queste tecniche sono usate nelle trasmissioni senza fili più moderne, in reti locali senza fili ed in alcuni tipi di telefoni cellulari (CDMA e DECT).

Ultrawideband

Un'altra tecnica a lungo coperta da segreti militari è quella detta "Ultrawideband" (UWB).

Brevissimi impulsi di bassa potenza, la cui durata è da 100 ps a 1,5 ns, vengono spediti dal trasmettitore al ricevitore.

L'informazione trasmessa è codificata usando l'intervallo di tempo fra un impulso e l'altro. Basandosi sull'istante in cui riceve l'impulso il ricevitore interpreta il segnale come un uno od uno zero. Per esempio esso interpreta come un uno il fatto che il prossimo impulso arrivi prima del momento atteso, come uno zero se invece arriva in ritardo.

Per "sparpagliare" lo spettro del segnale emesso e renderlo simile ad un rumore bianco il ritardo nominale fra gli impulsi non è costante, ma è modificato di una quantità pseudocasuale.

Dato che lo spettro è analogo a quello del rumore e che la potenza trasmessa è bassa, il segnale trasmesso si può confondere con il rumore emesso dai computer e dalle altre apparecchiature elettriche.

Come nel caso delle trasmissioni spread spectrum, solo il trasmettente ed il ricevente sono in grado di produrre la sequenza pseudocasuale, per questo solo il ricevente è in grado di dire se il ritardo fra un impulso ed il successivo rappresenta un uno od uno zero.

Nelle tecniche spread spectrum la banda è limitata da un filtro, mentre in UWB si usa sostanzialmente tutta la banda dello spettro elettromagnetico.

Le applicazioni di queste tecniche non sono solo relative alla telecomunicazioni ma anche alla misurazione accurata di distanze e velocità ed alla "visione oltre i muri".

Multiplexing (multiplazione)

Per utilizzare al meglio un mezzo di trasmissione molto spesso è necessario fare in modo che su di esso possano essere trasportati più di un segnale contemporaneamente. L'operazione viene detta multiplazione (multiplexing). Le tecniche di multiplexing sono molto diverse, a seconda che il segnale sia trasportato con tecnica digitale o analogica.

Multiplexing analogico (FDM)

Se il segnale viene trasportato in modo analogico, per trasmettere molti segnali contemporaneamente si farà in modo, con operazioni di modulazione, di spostare in frequenza i vari segnali, centrandoli ciascuno intorno a diverse frequenze portanti ("canali"). Al momento della ricezione, il ricevitore si dovrà "sintonizzare" sul canale corrispondente alla frequenza della portante che gli interessa, dovrà filtrare il segnale ricevuto, togliendo tutte le altre frequenze, che appartengono agli altri segnali trasmessi contemporaneamente, e dovrà demodulare ciò che ha ottenuto, per riportare il segnale in banda base. Le tecniche di multiplazione che funzionano in questo modo sono quelle a divisione di frequenza. (FDM: Frequency Division Multiplexing).

WDM

Wavelength Division Multiplexing

Multiplexing digitale

TDM

Se il mezzo di trasmissione viene utilizzato in banda base, per trasmettere più di un segnale "contemporaneamente" si dovrà destinare un po' di tempo a ciascuno dei segnali trasmessi, per esempio trasmettendo prima un bit di un segnale, poi un bit di un altro, uno di un altro ancora, e così via. Tecniche di multiplazione che funzionano secondo questo schema di principio si chiamano "a divisione di tempo" (TDM: Time Division Multiplexing, o TDMA: Time Division Multiple Access).

CDM

Code Division Multiplexing (vedi W.CDMA)

Mezzi di trasmissione

1.1.1 Disturbi

Parlando in termini generali, si può dire che ogni modifica non voluta ad un segnale che deve essere trasmesso può definirsi un disturbo. I disturbi sono di vari tipi ed hanno varie cause. Le diverse origini dei disturbi ne determinano le caratteristiche e possono individuare le tecniche per la loro minimizzazione.

Attenuazione

Nel loro percorso dalla sorgente al destinatario, i segnali perdono potenza, per molte cause, fra le quali le più importanti sono la caduta ohmica sulla resistenza del cavo ($V = Ri$) e l'emissione di onde elettromagnetiche. Il segnale che giungerà al destinatario sarà perciò meno "energetico". Si dice che esso ha subito una "attenuazione". Se l'attenuazione è troppo grande il ricevitore può avere difficoltà a ricostruire l'informazione contenuta nel segnale originario.

Per superare i problemi posti dall'attenuazione, si fa uso di due tipi di dispositivi:

amplificatori: che aumentano l'energia del segnale (disturbi compresi). Sono tipici delle tecniche di trasmissione analogiche.

ripetitori: che ricevono un segnale digitale e lo ritrasmettono amplificato. I ripetitori digitali possono ricostruire il segnale esattamente come era stato trasmesso, ciò perché moderate differenze di tensione non significano differenze nei bit trasportati.

Tratta e lunghezza di tratta

Un mezzo di trasmissione che deve coprire una grande distanza dovrà essere suddiviso in tronconi, separati da ripetitori od amplificatori che rigenerano il segnale, ormai degradato dall'attenuazione. Questi tronconi vengono detti "tratte" e la loro lunghezza "lunghezza di tratta".

Distorsione

La distorsione è una modificazione della forma d'onda del segnale. Vedendo il grafico nel dominio del tempo, ad una schermata all'oscilloscopio, del segnale, il segnale distorto ha un aspetto diverso.

Distorsione armonica

In ogni mezzo di trasmissione l'attenuazione cambia a seconda della frequenza del segnale trasmesso. Se il segnale non è una sinusoidale avrà componenti a frequenze diverse che potranno essere trasmesse con diverse attenuazioni. Vista nel dominio dei tempi la distorsione armonica è una modifica alla forma d'onda.

Equalizzazione

Ogni mezzo di trasmissione degrada il segnale trasmesso, distorcendolo. Sapendo come si comporta il mezzo di trasmissione (la sua "risposta in frequenza") è possibile trasmettere, invece del segnale che si vuole che sia ricevuto, un segnale "predistorto" in cui saranno amplificate le frequenze che si sa che verranno attenuate dal mezzo di trasmissione. In questo modo, alla fine della linea di trasmissione si otterrà il segnale che si voleva trasmettere. Questa operazione, che permette di eliminare la distorsione armonica del segnale, viene detta "equalizzazione".

Distorsione non lineare

TODO

La distorsione non lineare non si può eliminare con l'equalizzazione

Interferenze

Le interferenze sono causate da altri segnali o da dispositivi, vicini al segnale in trasmissione, che emettono onde elettromagnetiche che influenzano il segnale stesso.

Le interferenze non possono essere eliminate con un'equalizzazione, non essendo deterministiche (prevedibili).

Notare che i mezzi di trasmissione possono anche causare interferenze,

Compatibilità elettromagnetica (EMC: **E**lectromagnetic **C**ompatibility)

I disturbi

rumore bianco

causato dall'agitazione termica delle molecole

rumore di intermodulazione

rumori impulsivi

Diafonia (crosstalk)

E' un fenomeno causato dalla tendenza dei mezzi di trasmissione a comportarsi come antenne; per questo il segnale che passa in un filo può "cattare" parte di quello che passa nel filo vicino. Questo fenomeno si evidenzia per esempio fra i diversi fili contenuti in uno stesso cavo multipolare. In pratica la diafonia è la misura di quanto un cavo disturba un altro cavo vicino.

Digitalizzazione del segnale acustico, PCM e compressione**Teorema del campionamento**

Aliasing

Linee di trasmissione

Impedenza caratteristica

Adattamento d'impedenza (impedance matching)

L'adattamento d'impedenza è detto anche "terminazione" delle linee.