

Il livello fisico

Parte I

<i>Basi teoriche della trasmissione dati</i>	1
Segnali analogici e segnali digitali	2
<i>Analisi di Fourier (analisi armonica)</i>	3
<i>Spettro di un segnale digitale e sua trasmissione</i>	5
<i>Alterazioni introdotte dai mezzi fisici</i>	7
Attenuazione	7
Distorsione da ritardo.....	8
Rumore	9
Riepilogo	9
Osservazione: uso di filtri.....	10

Basi teoriche della trasmissione dati

E' noto che è possibile trasmettere a distanza una certa quantità di **informazione** variando opportunamente una qualche caratteristica fisica del mezzo scelto per la trasmissione (detto **mezzo di trasmissione**, oppure anche *canale di comunicazione* e sinonimi vari): questa variazione, infatti, si propaga, con una certa velocità, lungo il mezzo di trasmissione e, dopo un certo tempo, arriva all'altra estremità del mezzo, dove può essere *rilevata* e opportunamente *interpretata*.

Ad esempio, se il mezzo in questione è un **cavo metallico**, si può variare la tensione applicata ad un'estremità, in modo che tale variazione si propaghi e si presenti all'altra estremità.

I mezzi trasmissivi sono sostanzialmente di tre tipi:

- **mezzi elettrici** (cavi);
- **mezzi wireless** (onde radio);
- **mezzi ottici** (fibre ottiche).

In tutti e tre i casi, il fenomeno fisico che viene utilizzato è l'**onda elettromagnetica**, ossia una combinazione di campo elettrico e campo magnetico variabili nel tempo; tale onda si propaga dalla **sorgente** alla **destinazione**, in modi diversi a seconda del mezzo considerato. Ad esempio, nel caso dei *mezzi wireless*, l'onda si propaga liberamente nello spazio (si parla perciò di **propagazione libera**) e quando raggiunge un dispositivo ricevente (**antenna**) induce in esso una corrente elettrica; nei *mezzi ottici*, la *frequenza* ⁽¹⁾ dell'onda elettromagnetica è talmente alta da renderla visibile: si parla perciò comunemente di **luce** che si propaga. Nei *mezzi elettrici*, avviene sostanzialmente lo stesso fenomeno dei mezzi wireless, con la differenza che la propagazione dell'onda è forzata all'interno di opportune strutture fisiche (dette **strutture guidanti**).

Segnali analogici e segnali digitali

In linea di principio, la trasmissione può avvenire con due modalità differenti: trasmissione di *segnale analogico* e trasmissione di *segnale digitale*. La differenza fondamentale è la seguente:

- un **segnale analogico** può variare gradualmente in un intervallo costituito da un numero infinito di possibili valori;
- al contrario, un **segnale digitale** può variare solamente passando bruscamente da uno all'altro di un insieme molto piccolo di valori (da due a qualche decina).

E' importante, però, tener presente un concetto: il fenomeno fisico utilizzato realmente non è mai digitale, ma sempre analogico, in quanto un qualsiasi segnale non può passare istantaneamente da un valore ad un altro, ma impiegherà sempre un certo tempo per effettuare la **transizione**. La conseguenza è che un qualsiasi mezzo fisico farà del suo meglio per trasportare un segnale digitale, ma non riuscirà a farlo arrivare esattamente com'è partito. Queste considerazioni saranno più chiare quando illustreremo i fondamenti dell'*analisi di Fourier*.

Alla luce di quanto detto, segnaliamo che risultano un po' *improprie* alcune definizioni come **linea digitale**: una *linea*, cioè un mezzo di comunicazione, è un supporto fisico che trasporta onda elettromagnetiche, le quali, come detto poco fa, hanno una natura intrinsecamente analogica; di conseguenza parlare di "linea

¹ Il concetto di frequenza sarà ripreso e chiarito più avanti

digitale” o “linea analogica” può avere un senso solo se si intende dire che nel primo caso i segnali sono di *tipo* digitale e, nel secondo, sono di *tipo* analogico.

Analisi di Fourier (analisi armonica)

Abbiamo detto prima che la trasmissione dell'informazione a distanza si basa sullo sfruttamento di un fenomeno fisico, l'*onda elettromagnetica*. Rappresentando allora il valore nel tempo del fenomeno fisico utilizzato come una funzione $f(t)$, si può studiare matematicamente il segnale risultante. Ad esempio $f(t)$ potrà essere un campo elettrico o una tensione o una corrente.

Un particolare tipo di funzione $f(t)$ è la **funzione sinusoidale**, quale il seno o il coseno, che è caratterizzata da alcuni parametri :

- **ampiezza** A : è la differenza fra il valore massimo ed il valore medio assunti dalla funzione (dove il valore medio, per una funzione sinusoidale, è zero);
- **periodo** T : è la quantità T di tempo trascorsa la quale la funzione si ripete;
- **frequenza** : è l'inverso del periodo, $f = 1/T$, ed è misurata perciò in **cicli al secondo (Hz)**.

Fourier (matematico francese dell'800) dimostrò che una funzione periodica $g(t)$, definita in un intervallo T , può essere espressa come una somma di un numero infinito di funzioni sinusoidali:

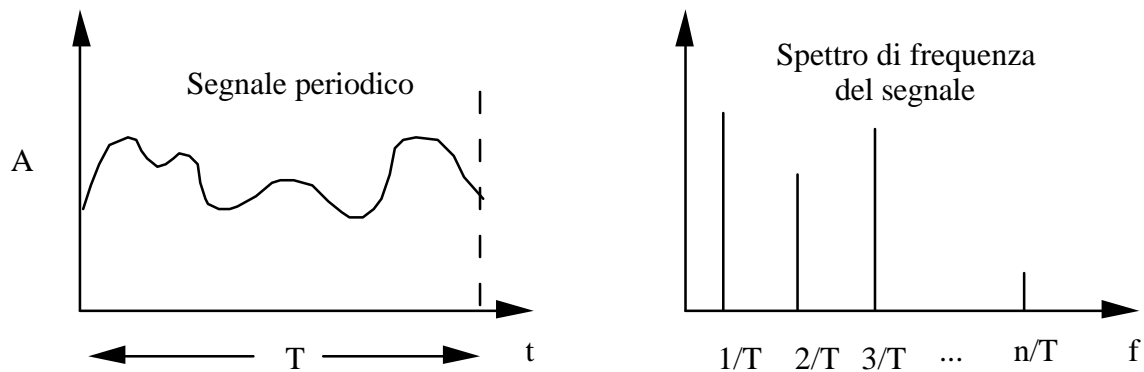
$$g(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

In questa espressione, la quantità $f=1/T$ è la cosiddetta **frequenza fondamentale** del segnale $g(t)$ in questione; i coefficienti a_n e b_n sono le ampiezze dell'**armonica di ordine n** , che cioè ha una frequenza n volte più grande della frequenza fondamentale (che si ottiene per $n=1$). Il coefficiente a_0 rappresenta il cosiddetto **valor medio** di $g(t)$, detto anche **componente in continua** per i motivi che vedremo.

I valori di a_0 , a_n e b_n sono tutti calcolabili come opportuni integrali di $g(t)$ nel tempo.

In sostanza, quella espressione dice che *un segnale variabile nel tempo in modo periodico è di fatto equivalente ad una somma di funzioni sinusoidali, aventi ciascuna una propria ampiezza e frequenza* (quest'ultima multipla della frequenza fondamentale). Nella realtà, però, i segnali periodici propriamente detti non esistono, in quanto dovrebbero avere durata infinita e questo non è possibile. Tuttavia, un segnale digitale di durata finita T può essere gestito immaginando che esso ripeta il suo intero schema per sempre: in altre parole, il segnale risulta avere lo stesso identico andamento nel periodo $[0, T]$, poi nel periodo $[T, 2T]$ e così via fino (teoricamente) all'infinito.

Si può quindi rappresentare un segnale $g(t)$ di durata T in un modo diverso dalla sua rappresentazione nel tempo e cioè attraverso il suo **spettro di frequenze**, ossia attraverso la sua scomposizione in sinusoidi:



Un segnale di durata finita T e il suo spettro di frequenze

Questo è il concetto di **trasformata di Fourier** di un segnale qualunque, comunque variabile nel tempo (anche non in modo periodico).

Qualunque segnale è dunque caratterizzato da un intervallo di frequenze nel quale sono comprese tutte e sole le frequenze delle sinusoidi che lo descrivono. Tale intervallo di frequenza va sotto il nome di **banda** del segnale in questione.

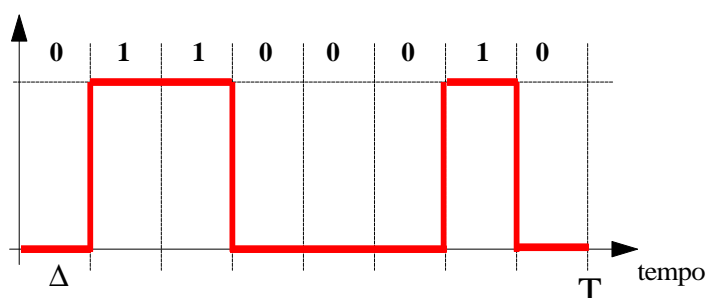
Particolare importanza ha la componente armonica a frequenza $f=0$, corrispondente al coefficiente a_0 citato precedentemente: essa è detta **componente in continua** in quanto non ha andamento sinusoidale, ma è costante nel tempo. E' detta anche **valor medio** del segnale in questione in quanto è il valore attorno al quale oscillano tutte le altre armoniche a frequenza >0 .

Diversi fattori influenzano le caratteristiche della banda di un segnale:

- in primo luogo, quanto più breve è la durata T del segnale, tanto più alto è il valore della frequenza fondamentale, ossia tanto più estesa è la banda del segnale: possiamo perciò dire la banda è inversamente proporzionale alla durata e viceversa;
- in secondo luogo, quanto più velocemente nel tempo varia la $g(t)$, tanto più numerose sono le armoniche necessarie a descriverlo. In altre parole, quanto più "veloce" è il segnale tanto maggiore è il suo contenuto spettrale, ossia tanto maggiore è il numero di armoniche che lo costituiscono.

Spettro di un segnale digitale e sua trasmissione

Una facile ed interessante applicazione dei concetti appena esposti riguarda la ricerca dello spettro di semplice segnale digitale come quello riportato nella figura seguente:



Questo è un tipico segnale digitale, formato cioè da una successione di *impulsi rettangolari*, di prefissata ampiezza, di durata uguale e finita, moltiplicati ciascuno per un coefficiente che vale 0 o 1 a seconda della sequenza di bit che si intende trasmettere:

$$g(t) = \sum_{k=0}^7 a_k \cdot h(t - k\Delta)$$

La funzione $\mathbf{h(t)}$ rappresenta dunque il singolo impulso rettangolare, di altezza unitaria (per semplicità) e durata Δ :



Nel caso riportato in figura, $\Delta=T/8$.

Il segnale complessivo è ottenuto componendo vari impulsi (8 nel caso preso in esame), traslati uno rispetto all'altro di Δ e moltiplicati ciascuno per un coefficiente a_k che può assumere valore 0 o 1 a seconda del corrispondente bit da trasmettere.

Nel caso preso in esame, la successione di bit considerata è 01100010 e corrisponde alla **codifica ASCII** della lettera b. Quindi, il segnale in questione può per esempio essere visto come il *voltaggio* in uscita dalla tastiera di un computer: alla pressione del tasto "b", viene generato un voltaggio con quell'andamento temporale.

Vogliamo allora vedere come è fatto lo spettro del segnale $g(t)$. L'analisi di Fourier (condotta ipotizzando che il segnale si ripeta periodicamente con periodo T) fornisce i seguenti risultati (non ci interessano in questa sede i dettagli matematici):

$$a_0 = \frac{3}{8}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi n} \left[\cos \frac{\pi n}{4} - \cos \frac{3\pi n}{4} + \cos \frac{6\pi n}{4} - \cos \frac{7\pi n}{4} \right]$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n} \left[\sin \frac{3\pi n}{4} - \sin \frac{\pi n}{4} + \sin \frac{7\pi n}{4} - \sin \frac{6\pi n}{4} \right]$$

Queste espressioni mostrano un primo risultato evidente: all'aumentare del valore di n, l'ampiezza delle armoniche diminuisce sempre più, il che significa che il segnale in questione, pur essendo teoricamente costituito da un numero infinito di armoniche, in realtà è descrivibile in modo approssimativamente completo da solo alcune di esse, quelle di entità maggiore (corrispondenti in questo caso ai valori minori di n). In particolare, sostituendo i valori di n partendo da 1, si trova che risultano significative solo le prime 15 armoniche.

Quello appena trovato è un primo risultato importante e generale: un qualsiasi segnale digitale, pur contenendo teoricamente infinite armoniche (ossia avendo una

banda teoricamente infinita), in realtà è descrivibile tramite un numero limitato di queste, ossia ha **banda finita**.

Questo requisito della banda finita è condizione indispensabile per la trasmissione del segnale attraverso un qualsivoglia mezzo fisico: infatti, non esiste alcun mezzo fisico in grado di lasciar passare tutte le infinite componenti spettrali di cui un segnale può essere costituito; al contrario, ogni mezzo fisico è caratterizzato da un intervallo di frequenze, detto **banda passante**, che è in grado di trasmettere senza alterazioni eccessive. Complementare alla banda passante è la cosiddetta **banda arrestata**, che quindi include tutte le frequenze che il mezzo non può trasmettere da una estremità all'altra.

E' chiaro che, se un segnale qualsiasi avesse bisogno di tutte le proprie armoniche per poter essere univocamente identificato, non potremmo mai trasmetterlo da nessuna parte, in quanto il mezzo fisico, quale che sia, annullerebbe le armoniche che cadono nella banda arrestata e quindi lo renderebbe irriconoscibile alla destinazione. In parole semplici, solo un segnale a banda limitata può transitare completamente attraverso un mezzo fisico: in particolare, tale banda dovrà essere interamente contenuta nella banda passante del mezzo.

Alterazioni introdotte dai mezzi fisici

Abbiamo dunque capito che ogni mezzo fisico può far passare solo le armoniche del segnale che cadono nella sua **banda passante**, mentre invece “blocca” tutte le altre (quelle cioè che cadono nella banda arrestata). A questo bisogna però aggiungere che, pur riuscendo a transitare attraverso il mezzo, le armoniche appartenenti alla banda passante subiscono comunque delle **alterazioni**, il che significa che non arrivano comunque mai a destinazione così come sono state generate dalla sorgente.

Le alterazioni principali introdotte dal mezzo sono descritte di seguito.

Attenuazione

L'**attenuazione** è la perdita di energia subita dal segnale durante la sua propagazione, ossia, in termini di singole armoniche, la riduzione della loro ampiezza. Nei mezzi guidati, come i fili di rame o le fibre ottiche, il segnale decade logisticamente con la distanza; nella trasmissione via radio, il segnale decade con il quadrato della distanza. Questo significa che, a parità di potenza trasmessa e

di distanza percorsa dal segnale, l'attenuazione subita in aria è minore di quella subita in una struttura guidante.

L'attenuazione viene sempre espressa in **dB per chilometro** (e prende perciò il nome di **attenuazione specifica**): ad esempio, una attenuazione di 10 dB al km implica una attenuazione complessiva di 100 dB su un tratto di lunghezza 10 km.

In realtà, questa affermazione deve essere corretta, in quanto l'attenuazione dipende dalla frequenza: nei mezzi ad onde guidate, essa aumenta all'aumentare della frequenza, il che significa che questi mezzi lasciano passare le basse frequenze (mezzi **passa-basso**) e arrestano le alte frequenze; al contrario, la trasmissione via radio è caratterizzata da una attenuazione elevata alle basse ed altissime frequenze, mentre invece è più piccola alle frequenze intermedie (mezzo **passa-banda**), che peraltro si estendono su un intervallo (la banda passante) estremamente elevato.

In molti casi, le proprietà di attenuazione del mezzo sono note con discreta precisione, per cui possono essere usati degli **amplificatori** (sia in trasmissione sia in ricezione) per cercare di *compensare* l'attenuazione dipendente dalla frequenza. In ogni caso, comunque, si tenga sempre presente che la **compensazione** non può mai essere perfetta, per cui il segnale che giunge a destinazione non potrà mai coincidere con quello generato alla sorgente. Si tratta di volta in volta di valutare quanto rilevante può essere la differenza tra segnale trasmesso e segnale ricevuto affinché quest'ultimo risulti comunque utilizzabile per gli scopi previsti.

Distorsione da ritardo

Questo tipo di alterazione sul segnale è causata dal fatto che armoniche a frequenza diversa viaggiano anche a velocità diversa, per cui alcune armoniche possono arrivare prima di altre nonostante sono state trasmesse dopo. Ad esempio, nella trasmissione di segnali digitali, può capitare che componenti veloci di un bit raggiungano e superino componenti lente del bit che precede, mischiando così i due bit e aumentando la probabilità di una ricezione non corretta. Questo era un tipico problema che si presentò nelle prime applicazioni su fibra ottica, anche se poi è stato risolto con gli accorgimenti che vedremo.

Rumore

Il terzo ed ultimo problema legato alla trasmissione a distanza è il **rumore**: si tratta sostanzialmente di segnali non voluti, trasmessi da sorgenti diverse dal trasmettitore, che si sovrappongono al segnale utile. Due tipiche fonti di rumore nei sistemi di telecomunicazioni sono il **rumore termico**, causato semplicemente dal movimento casuale degli elettroni in un mezzo conduttore e per questo onnipresente, e la cosiddetta **diafonia** (o *cross talk*): quest'ultimo fenomeno è causato dall'*accoppiamento* (prevalentemente induttivo) tra due fili conduttori posti uno vicino all'altro; ad esempio, quando si parla al telefono, capita di ascoltare un'altra conversazione in sottofondo, il che avviene proprio perché due mezzi fisicamente indipendenti si sono *accoppiati*, per cui il segnale transitante su uno di essi si è parzialmente riprodotto nell'altro, interferendo con la normale trasmissione su di esso.

In aggiunta, c'è anche il cosiddetto **rumore di impulso**, che sorge in corrispondenza di picchi sulla linea di corrente o altre cause: è un disturbo poco recente ma potenzialmente più pericoloso dei precedenti.

Riepilogo

Possiamo dunque riepilogare, a proposito delle principali caratteristiche dei mezzi trasmissivi, nel modo seguente:

- i mezzi trasmissivi attenuano i segnali in proporzione alla distanza percorsa e alla frequenza del segnale;
- propagano inoltre i segnali a velocità proporzionali alle loro frequenze.

Una conseguenza evidente è che, per qualunque mezzo trasmissivo, la banda passante si riduce all'aumentare della lunghezza del mezzo stesso.

Perché un segnale sia ricevuto quasi come è stato trasmesso, è necessario che la banda passante sia uguale o più ampia della banda di frequenza del segnale stesso. In caso contrario, il segnale viene privato di alcune delle sue armoniche e viene quindi distorto, cioè alterato. Se un numero sufficiente di armoniche arriva a destinazione, il segnale è comunque utilizzabile.

Osservazione: uso di filtri

In generale, l'estensione della banda passante dipende dalle caratteristiche fisiche del mezzo trasmissivo, ad esempio dal diametro dei conduttori utilizzati oppure dalla loro lunghezza e via dicendo. Ci sono però ulteriori fattori che contribuiscono a limitarla: ci riferiamo essenzialmente alla presenza di **filtri** che tagliano le frequenze oltre una certa soglia (detta **frequenza di taglio**, f_c).

Tipico esempio è quello delle linee telefoniche tradizionali che collegano le singole abitazioni alle *centrali telefoniche*: queste linee sono quasi sempre realizzate tramite **doppino telefonico** ⁽²⁾, che di per sé ha una banda sufficientemente estesa, a partire da frequenza 0 Hz; tuttavia, prevedendo che su tali linee debba transitare solo il segnale vocale di qualità telefonica, la banda passante viene volutamente limitata a soli **3 kHz**, usando **filtri passa-basso** in corrispondenza delle centrali collegate alle abitazioni.

Come si vedrà più avanti, la banda passante di un mezzo di trasmissione impone anche un limite massimo alla velocità di trasmissione dei bit sul mezzo stesso: in particolare, le due cose sono direttamente proporzionali e questo sta creando sempre più problemi al giorno d'oggi, in quanto i 3 kHz messi a disposizione degli utenti consentono velocità di trasmissione oramai ritenute decisamente troppo basse non solo dagli utenti più ambiziosi, ma anche da quelli medi, meno attaccati alle prestazioni ma comunque desiderosi di ricevere servizi di buona qualità.

Autore: **Sandro Petrizzelli**

e-mail: sandry@iol.it

sito personale: <http://users.iol.it/sandry>

succursale: <http://digilander.iol.it/sandry1>

² Ne parleremo diffusamente più avanti