

Segnali e modulazione – Appunti per il corso “ABACUS”

Cos'è un segnale?

I segnali, in svariate forme, costituiscono un elemento fondamentale della nostra vita d'ogni giorno. Basti pensare ai segnali sonori che sono alla base delle conversazioni a voce o per via telefonica. Un'altra forma di comunicazione umana tramite segnali è costituita da tutto ciò che è immagine, uomini o cose attorno a noi. Si pensi a tutto quello che riusciamo a comunicare tramite internet, con posta elettronica, ricerca di informazioni, pubblicità, telecomunicazione, educazione o giochi. Tutto ciò che è informazione comporta l'uso di segnali, di varia natura e caratteristiche.

Dall'ascolto del battito cardiaco di un paziente e dal monitoraggio della sua pressione sanguigna e temperatura, un medico è in grado di diagnosticare la presenza o meno di una patologia. Tutte queste quantità rappresentano segnali che forniscono informazioni al medico sullo stato di salute del paziente. Ascoltando le previsioni del tempo alla radio sono fornite informazioni relative alle variazioni quotidiane della temperatura, umidità, velocità e direzione dei venti. Le informazioni contenute in queste quantità ci aiutano, ad esempio, a formarci un'opinione se rimanere in casa o uscire all'aperto e per una passeggiata. Esempi di segnali possono continuare indefinitamente, dai segnali radar per stabilire la posizione di navi o veicoli, dai segnali provenienti dalle sonde interplanetarie alla ricerca di corpi celesti e in grado di tracciare profili di superfici solide, dalle immagini satellitari per segnalare la presenza di perturbazioni e corpi nuvolosi.

Formalmente un segnale può essere così definito:

- *una funzione a una o più variabili che trasporti delle informazioni inerenti alla natura di un fenomeno fisico.*

Quando la funzione dipende da una sola variabile, il segnale è detto mono-dimensionale. Un segnale sonoro prodotto dalla voce umana è un esempio di segnale mono-dimensionale la cui ampiezza varia nel tempo, a seconda delle parole pronunciate e da chi le pronuncia. Quando la funzione dipende da due o più variabili, il segnale è detto multidimensionale. Un'immagine è un esempio di un segnale a due dimensioni, dove queste sono rappresentate dalle coordinate orizzontali e verticali dell'immagine.

Negli esempi di segnali sopra riportati esiste sempre un “sistema” associato alla generazione di ciascun segnale e un altro sistema associato con l'estrazione dell'informazione dal segnale. Per esempio, nella comunicazione verbale, la sorgente del suono o del segnale eccita le corde vocali che rappresentano un sistema. L'elaborazione dei segnali sonori generalmente si fonda sull'uso di apparecchi uditivi (le nostre orecchie) e funzioni specializzate del nostro cervello. In questo caso i sistemi responsabili della produzione e della ricezione dei segnali esistono biologicamente in natura. Queste funzioni possono essere realizzate utilizzando sistemi elettronici che cercano di

emulare le loro controparti biologiche. Per esempio, l'elaborazione di un segnale vocale può essere realizzata da un riconoscitore vocale automatico in forma di programma informatico che riconosca le parole o le frasi.

In un sistema di comunicazione, la funzione del sistema è trasportare l'informazione contenuta in un messaggio del segnale su un canale di comunicazione e trasportarlo a destinazione nel modo più affidabile.

Possiamo definire un sistema come un dispositivo in grado di elaborare uno o più segnali per svolgere una funzione, creando anche nuovi segnali.

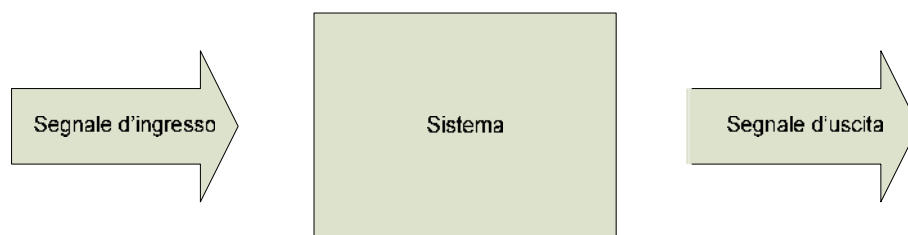


Figura 1

In ogni sistema di comunicazione sono individuabili 3 elementi fondamentali: trasmittente, canale, ricevente. L'elemento trasmittente è localizzato in un punto dello spazio, il ricevente è localizzato in un qualsiasi altro punto separato dal trasmittente e il canale è il mezzo fisico che li connette.

Ciascuno di questi 3 elementi può essere visto come un sistema con segnali ad essi associati.

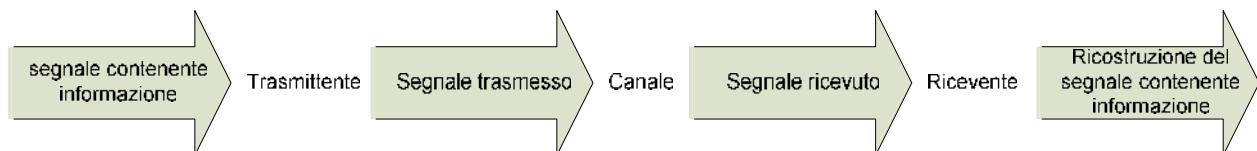


Figura 2

La funzione del trasmittente è quella di convertire il segnale contenente l'informazione prodotto da una sorgente di informazioni in una forma adatta per la trasmissione sul canale. Il segnale contenente l'informazione potrebbe essere un segnale sonoro prodotto da un dialogo tra persone, un segnale televisivo o dei dati elaborati da un computer. Il canale potrebbe essere una fibra ottica, un cavo coassiale, un canale satellitare o un canale radio mobile; tutti questi canali hanno la loro specifica area di applicazione.

Il segnale trasmesso che si propaga sul canale risulta distorto a causa delle caratteristiche fisiche del canale. Inoltre, rumore e segnali di interferenza originati da altre sorgenti contaminano l'uscita dal canale, con il risultato che il segnale ricevuto è una versione non fedele del segnale trasmesso. La funzione del ricevente è quella di operare sul segnale ricevuto in modo da riportarlo in una forma

riconoscibile del segnale contenente l'informazione originale e renderlo usufruibile. Il ruolo di elaboratore del segnale del ricevente è effettivamente inverso a quello del trasmittente, ma deve anche compensare gli effetti deleteri del canale sull'informazione.

I dettagli sulle operazioni effettuate nel trasmittente e nel ricevente dipendono dal tipo del sistema di comunicazione da considerare. Il sistema di comunicazione può essere di tipo analogico o di tipo digitale. In termini di processamento del segnale, il progetto di un sistema di comunicazione analogica è relativamente semplice. In particolare il trasmittente consiste in un modulatore e il ricevente consiste in un demodulatore. La modulazione consiste nel processo di conversione di un segnale contenente delle informazioni in una forma compatibile con le caratteristiche di trasmissione del canale. Generalmente, il segnale trasmesso è rappresentato come variazione di ampiezza, frequenza o fase di un segnale portante sinusoidale. Si parlerà quindi di modulazione d'ampiezza, di frequenza e di fase rispettivamente. Corrispondentemente, attraverso l'uso della demodulazione d'ampiezza, di frequenza o di fase viene ricreato il segnale originale contenente l'informazione all'uscita del ricevente. Ognuna di queste tecniche di modulazioni/demodulazioni ha i propri vantaggi e svantaggi.

Un sistema di comunicazione digitale, per contro, è considerevolmente più complesso, come viene descritto per sommi capi. Se il segnale contenente l'informazione è in forma analogica, come per segnali audio e video, il trasmittente deve operare le seguenti funzioni per convertirlo in forma analogica:

- Campionamento, che converte il segnale in una sequenza di numeri, ciascuno dei quali rappresenta l'ampiezza del segnale in un particolare istante di tempo.
- Quantizzazione, che implica la rappresentazione di ciascun numero prodotto dal campionatore riportato al livello più vicino considerato in un numero finito di livelli di ampiezza possibili. Per esempio, possiamo rappresentare ogni campione come un numero binario a 16 bit, nel qual caso vi saranno 2^{16} livelli d'ampiezza possibili. Dopo la combinazione del campionamento e della quantizzazione, sarà stata ottenuta la rappresentazione del segnale contenente l'informazione "discretizzata" sia nel tempo che in ampiezza.
- Codifica, lo scopo della quale è quello di rappresentare ciascun campione discretizzato da una parola in codice composta da un numero finito di simboli. Per esempio, in un codice binario i simboli possono essere 1 o 0.

Contrariamente alle operazioni di campionamento e codifica, la quantizzazione è completamente irreversibile, il che significa che una perdita di informazione è sempre associata alla sua applicazione. Comunque, questa perdita può essere piccola, praticamente insignificante per tutte le

applicazioni pratiche se si utilizza una quantizzazione con un numero sufficientemente grande di livelli di ampiezze discretizzate. Al crescere del numero dei livelli di discretizzazione, la lunghezza delle parole codificate cresce di pari passo. Se la sorgente dell'informazione è discreta fin dall'origine, nessuna delle operazioni descritte sopra è necessaria., come nel caso di elaboratori digitali.

Il trasmettente potrebbe necessitare di operazioni aggizionali, come la compressione di dati e la codifica di canale. Lo scopo della compressione dei dati è quella di rimuovere informazioni ridondanti dal segnale e, per rendere maggiormente efficiente l'utilizzo del canale, ridurre il numero di bit per campione necessari alla trasmissione. La codifica di canale, d'altra parte, implica l'inserimento di elementi ridondanti (extra symbols) nelle parole di codifica in modo controllato; questo avviene per garantire una protezione da rumori e segnali di interferenza aggiuntisi durante la trasmissione attraverso il canale. Infine, il segnale codificato viene modulato attraverso un'onda portante, generalmente sinusoidale, per la trasmissione sul canale.

Al ricevente, le operazioni descritte vengono applicate in ordine inverso. La ricostruzione del segnale originale contenente l'informazione è comunque attuata e fornita all'utilizzatore destinatario. Comunque, come già detto precedentemente, non vi può essere alcun effetto di recupero da parte del ricevente sulla natura irreversibile della quantizzazione.

Appare evidente da quanto detto che l'uso delle comunicazioni digitali può richiedere una quantità considerevole di circuiteria elettronica. Questo non risulta essere un particolare significativo poiché gli elementi elettronici sono relativamente economici, grazie alla disponibilità e al continuo incremento di circuiti elettronici integrati su larga scala in forma di chips. In effetti, grazie al continuo miglioramento nell'industria dei semiconduttori, le comunicazioni digitali sono sempre più spesso utilizzate per la loro economicità rispetto alle comunicazioni analogiche.

Esistono due tipi fondamentali di comunicazione:

- Broadcasting, che implica l'utilizzo di un singolo trasmettitore di potenza e numerosi ricevitori che sono relativamente economici da costruire. In questo caso i segnali che trasportano l'informazione scorrono in un unico verso.
- La comunicazione punto a punto, dove il processo di comunicazione avviene attraverso una connessione tra un singolo trasmettitore e un singolo ricevitore. In questo caso si instaura un flusso bidirezionale di segnali che trasportano l'informazione. Vi è un trasmettitore e un ricevitore su ciascun terminale della connessione.

Il modo di comunicazione broadcasting è esemplificato dalla radio e dalla televisione che sono elementi integranti della vita di ogni giorno. D'altra parte, la presenza del telefono in qualsiasi luogo fornisce l'idea della forma di comunicazione punto a punto, anche se in questo caso la

connessione fa parte di una rete telefonica molto complessa progettata per soddisfare un grandissimo numero di utenti a richiesta.

Tralasciamo, per questioni di brevità, la discussione sui sistemi di controllo e sulla gestione dei rumori nei canali trasmissivi, rimandando a trattazioni specifiche facilmente reperibili.

Segnali analogici e segnali digitali

Le operazioni di elaborazione dei segnali coinvolte nella costruzione di sistemi di comunicazione, sistemi di controllo, strumentazione con sensori e strumentazione per l'analisi di segnali biologici, tra le molteplici applicazioni dell'elaborazione dei segnali, possono essere implementate in due modi differenti: a) l'approccio analogico o temporale, b) l'approccio digitale o discreto. Per molti anni a farla da padrone nello studio dei segnali è stato l'approccio analogico, e rimane tuttora un mezzo potente e affidabile per moltissime applicazioni. Come fa capire il nome stesso, lo studio analogico dei segnali si basa sull'uso di dispositivi in circuiti analogici, come ad esempio resistori, induttori, condensatori, transistor, amplificatori e diodi. L'elaborazione del segnale digitale, d'altra parte, si basa sull'uso di 3 componenti digitali fondamentali per il calcolo: sommatore, moltiplicatori e memorie.

La caratteristica più importante dell'approccio analogico è la naturale capacità di risolvere equazioni differenziali che descrivano i sistemi fisici, senza che vi sia la necessità di ricorrere a loro soluzioni approssimate. Queste soluzioni, inoltre, sono ottenute in tempo reale, indipendentemente dall'intervallo della frequenza del segnale d'ingresso, proprio per la natura fisica naturale dei dispositivi responsabili delle operazioni di approccio analogico. Al contrario, l'approccio digitale si fonda su calcoli numerici per le sue operazioni. Il tempo richiesto per eseguire queste operazioni determina la possibilità dell'approccio digitale di operare in tempo reale. In altri termini, l'approccio analogico è supportato da operazioni in tempo reale, ma questo non è ugualmente sempre vero per l'approccio digitale.

In ogni caso, l'approccio digitale ha dei notevoli vantaggi:

- flessibilità, lo stesso hardware può essere utilizzato per implementare differenti versioni di un'operazione per l'elaborazione di segnali d'interesse, come il filtraggio, semplicemente modificando il software gestito dall'hardware in considerazione. Nel caso dell'approccio analogico, quando vi è una modifica del segnale si devono necessariamente riprogettare i dispositivi in gioco;
- ripetibilità, concernente il fatto che un'operazione riguardante l'elaborazione di un segnale può essere ripetuta esattamente più volte quando implementata in maniera

digitale. I sistemi analogici risentono invece della variazione di una serie di parametri ambientali e fisici.

In ultima analisi, la scelta tra i due approcci per la soluzione di un problema relativo all'elaborazione di un segnale può essere determinata esclusivamente dall'applicazione d'interesse, dalle risorse disponibili e dai costi in gioco per la costruzione del sistema. Andrebbe fatto notare che la maggior parte dei sistemi costruiti in pratica sono di natura mista, combinando le caratteristiche più appropriate degli approcci analogico e digitale per il processo dei segnali.

Applicazione ai sistemi di trasmissione - Modulazione

La funzione di un sistema di comunicazione è quella di trasportare un segnale contenente informazione (generato da una qualsiasi sorgente) attraverso un canale e fornire ad un utilizzatore una qualche rappresentazione di quella informazione. Per esempio il segnale contenente l'informazione potrebbe essere un discorso, il canale potrebbe essere un canale satellitare o un canale di un telefono cellulare. La modulazione è l'operazione fondamentale per l'utilizzo di un sistema di trasmissione. La modulazione fornisce la possibilità di spostare l'intervallo delle frequenze contenute nel segnale informativo in un altro intervallo di frequenze adatto per la trasmissione attraverso un canale trasmissivo e operare un corrispondente ripristino delle frequenze originali una volta che il segnale sia giunto a destinazione (demodulazione). Formalmente, si potrebbe definire *la modulazione come quel processo attraverso il quale alcune caratteristiche di un'onda portante vengono modificate concordemente con l'informazione contenuta nel segnale generato dalla sorgente dell'informazione stessa*. Il Segnale contenente l'informazione è denominato "onda modulante" e il risultato del processo di modulazione è denominato "onda modulata". Nel ricevente, la demodulazione è usata per ripristinare il segnale contenente l'informazione dall'onda modulata. La demodulazione è il processo inverso della modulazione.

Tipi di modulazione

Il tipo specifico di modulazione utilizzata in un sistema di comunicazione è determinata dalla forma dell'onda portante usata per produrre la modulazione. Le due forme comunemente usate come tipologia di portante sono:

- Onda sinusoidale
- Treno d'impulsi periodici

Corrispondentemente si possono identificare due tipologie principali di modulazione come successivamente descritto.

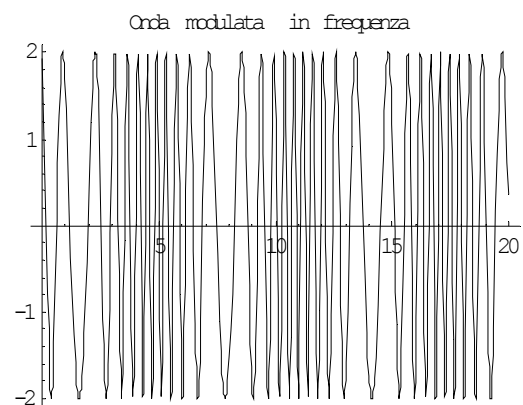
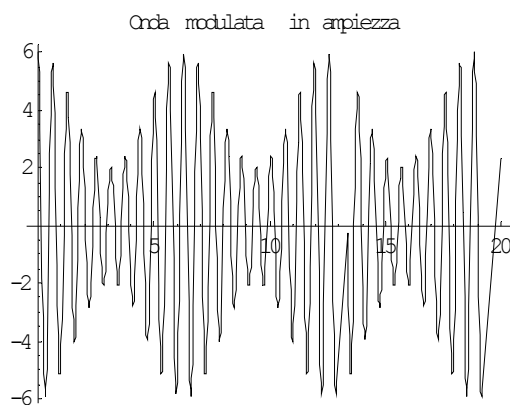
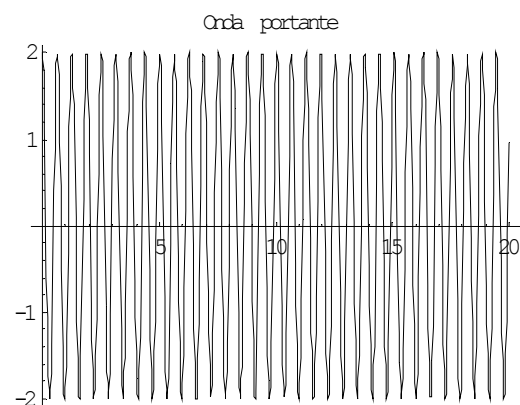
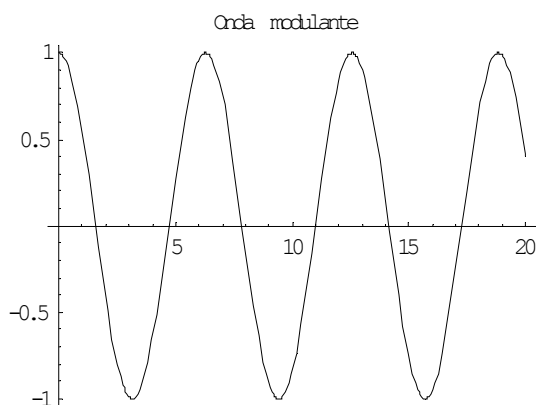
1. Modulazione ad onda continua (analogica)

Consideriamo l'onda sinusoidale della portante:

$$p(t) = A_p \cdot \cos(\Phi(t))$$

identificata in maniera univoca dall'ampiezza della portante A_p e dall'angolo $\Phi(t)$. A seconda di quale di questi due parametri siano scelti per la modulazione, si possono identificare due sottotipologie di modulazione a onda continua:

- Modulazione d'ampiezza, nella quale l'ampiezza della portante viene modificata dal segnale contenente l'informazione (modulante)
- Modulazione angolare, dove l'angolo della portante viene modificato dalla modulante.



La modulazione d'ampiezza può essere a sua volta implementata in più forme differenti. Per un dato segnale informativo il contenuto in frequenza dell'onda modulata dipende dal tipo della modulazione d'ampiezza utilizzata.