RIASSUNTO DI “MISURE”

2020

Capitolo 1 - Misure

misurazione

Procedimento di misurazione: assegnamento di un valore a una grandezza fisica detta misurando
Risultato della misurazione: Valore + unità di misura + incertezza
Grandezze omogenee: Grandezze confrontabili direttamente tra loro (si esprimono con la stessa unità di misura)

Errori di misura

Cause di incertezza:

- **Riferimenti** rispetto al quale si esegue una misura hanno limiti di accuratezza e stabilità
- **Errori da taratura** a ogni passo della taratura di un campione riferendosi ad un altro di qualità superiore si commette un errore
- **Dati di origine o risultati di altre misure** che contengono già un errore
- **Relazione tra misurando e sistema di misura**
  - *Misure dirette:* effettuando la misurazione altero il misurando
  - *Misure indirette:* errore dovuto a inadeguatezza del modello (formula)
- **Parametri ambientali:** grandezze di influenza che interferiscono con il funzionamento dello strumento
- **Interazione occhio strumento:**
  - *Errore di parallasse* (posizione lancetta può sembrare diversa a seconda del punto di osservazione)
  - *Errore di interpolazione* (lancetta non è precisamente su una tacca, stimo valore)
  - *Errore di media* (lancetta non sta ferma e cerco valore intorno a cui oscilla)
- **Errore di offset** lo strumento commette un errore nel segnare il valore di zero, quindi la misura è sempre maggiore o minore di una certa costante rispetto al valore reale
- **Guadagno/pendenza** la retta delle misure ha pendenza diversa da quella teorica
- **Non linearità** la retta delle misure non mantiene linearità, incurvandosi
- **Isteresi** i valori misurati in una direzione non coincidono con quelli misurati nella direzione opposta (per esempio l'intensità di corrente prima aumentandola e poi diminuendola)

Definizioni metrologiche

- **Accuratezza**
  - *Accuratezza di campione*: scarto tra la grandezza realizzata con il campione e la definizione dell'unità.
  - *Accuratezza di misura*: accordo tra valore misurato e miglior stima del misurando.
  - *Accuratezza di strumento*: stima dell'incertezza dello strumento, o differenza della misura rispetto a quella effettuata con uno strumento migliore.
- **Risoluzione**: capacità di uno strumento di risolvere stati (livelli) diversi del misurando.
- **Sensibilità**: rapporto tra la variazione della grandezza di uscita e la corrispondente variazione della grandezza d'ingresso.
- **Incertezza**: stima del livello di non conoscenza del misurando.
- **Ripetibilità**: capacità di ottenere valori di lettura simili nel breve periodo di tempo a parità di procedimento e parametri ambientali.
- **Riproducibilità**: capacità di ottenere, per uno stesso misurando, risultati vicini tra loro in diverse e specificate condizioni di misura, indipendentemente dal momento in cui sono effettuate le misurazioni.
- **Stabilità**: capacità di ottenere, per uno stesso misurando, valori di lettura simili tra loro in un intervallo di tempo ben specificato.
- **Riferibilità**: proprietà di una misura di essere messa in relazione (riferita) con quella fornita da un campione riconosciuto.

Sistema internazionale (SI)

Unità di misura	**Definizione**	**Misurando**	**Incertezza relativa**
Secondo	Intervallo che contiene circa 9 miliardi di periodi della radiazione emessa dal cesio nella sua transizione tra due livelli iperfini	Intervallo di tempo	10^{-16}
Metro	lunghezza del tragitto compiuto nel vuoto dalla luce in un intervallo di tempo pari a 1/c di secondo	lunghezza	10^{-10}
Kg	*Vecchia:* massa del prototipo internazionale (campione) *Nuova:* derivato dalla costante di Planck espressa in $j \cdot s = kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$	Massa	0
Ampere	*Vecchia:* Intensità di corrente elettrica che, mantenuta costante in due conduttori rettilinei, paralleli, e posti alla distanza di 1m nel vuoto, produce tra i due conduttori una forza di $2 \cdot 10^{-7} N/m$ *Nuova:* derivato dal valore della carica elementare espressa in $C = A \cdot s$	Corrente elettrica	10^{-7}
Kelvin	*Vecchia:* $1/273{,}16$ della temperatura del punto triplo dell'acqua *Nuova:* derivato dalla costante di Boltzmann espressa in J/k	temperatura	10^{-5}
Mole	*Vecchia:* quantità di sostanza di un sistema che contiene tante entità elementari quanti sono gli atomi in 0,012 kg di carbonio 12 *Nuova:* quantità di sostanza che contiene tante entità elementari quante il Numero di Avogadro	Quantità di sostanza	$7{,}9 \cdot 10^{-8}$
Candela	Intensità luminosa, in una assegnata direzione, di una sorgente che emette luce gialla con intensità energetica di $1/683 W sr^{-1}$	Intensità luminosa	$3 \cdot 10^{-3}$

Kilo	k	10^3		Milli	m	10^{-3}
Mega	M	10^6		Micro	μ	10^{-6}
Giga	G	10^9		Nano	n	10^{-9}
Tera	T	10^{12}		Pico	p	10^{-12}
Peta	P	10^{15}		Femto	f	10^{-15}

Campioni

- Campioni primari: campioni conservati per realizzare l'unità con migliore accuratezza ottenibile.
- Campioni secondari: consentono di trasferire l'unità e di confrontare indirettamente i campioni primari e quelli di lavoro
- Campioni di trasferimento: campioni secondari particolarmente adatti al trasporto
- Campioni di 1° linea (o di riferimento): si usano nei centri di taratura e certificazione per tarare i campioni di 2° linea
- Campioni di 2° linea (o di lavoro): campioni utilizzati per le misure

Taratura: procedimento di valutazione dell'incertezza di un campione tramite il confronto con un campione di qualità superiore, al fine di ricavare delle correzioni.
Messa in punto: Insieme di regolazioni per portare lo strumento in condizioni di lavoro migliori possibili (come regolazione offset, zero, guadagno…)

Unità logaritmiche

Regola del cambio base: $\log_B x = \frac{\log_C x}{\log_C B}$

Il **bel** (B) esprime il rapporto di potenze in scala logaritmica base 10. 1 Bel rappresenta un rapporto 10: 1 quindi si utilizza il suo sottomultiplo Decibel che è più preciso

Decibel (db)

Un decimo del Bel, si usa per esprimere rapporti di potenze o ampiezze:

Potenze:

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)_{dB} = 10 \log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

Ampiezze:

$$\left(\frac{A_1}{A_2}\right)_{dB} = 20 \log_{10}\left(\frac{A_1}{A_2}\right)$$

$$1 \text{ Db} \cong 1{,}25$$

Rapporto di potenza	decibel
10 e 1/10	+10 e -10
2 e 1/2	+3 e -3
4 e 1/4	+6 e -6 $(2 \cdot 2 = +3dB + 3dB)$
5 e 1/5	+7 e -7 $(10 \cdot \frac{1}{2} = +10dB - 3dB)$
1,25 e 0,8	+1 e -1 $(10 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}$=+10dB-3dB-3dB-3dB)

dBx

Si può scegliere una qualsiasi costante P_x rispetto la quale esprimere la potenza in decibel

$$P_{dBx} = 10 \log_{10}\left(\frac{P}{P_x}\right)$$

Se $P_x = 1mW$ allora $P_{dBm} = 10 \log_{10}\left(\frac{P}{1mW}\right)$

Se $P_x = 1W$ allora $P_{dBW} = 10 \log_{10}\left(\frac{P}{1W}\right)$

Se $P_x = 1kW$ allora $P_{dBk} = 10 \log_{10}\left(\frac{P}{1kW}\right)$

Neper

$$R_{Np} = \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

Capitolo 2 - Incertezza

Incertezza di misura

Incertezza: stima della dispersione dei valori ragionevolmente attribuiti al misurando.

È la semiampiezza dell'intervallo $\bar{x} \pm \sigma$ dove cadono i valori misurati con una certa probabilità.

Tipi di errori:

- Sistematici: errori che rimangono inalterati se la misura si ripete
- Accidentali: errori dovuti a fenomeni casuali e dunque errori impredicibili

Incertezza standard stima della deviazione standard, indicata con il simbolo u

Probabilità e statistica

$$P(a < x < b) = \int_a^b P(x)dx$$

Media: $\mu(x) = E[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx$

Varianza: $\sigma^2(x) = E[(x-\mu)^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x-\mu)^2 p(x)dx$

Deviazione standard: $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$

Media campionaria: $\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} x_k$

Varianza campionaria: $\bar{s}^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}(x_k - \bar{x})^2$ oppure $\bar{s}^2 = \frac{1}{n-1}[(\sum_{k=1}^{n} {x_k}^2) - n\bar{x}^2]$

Deviazione standard campionaria: $\bar{s} = \sqrt{\bar{s}^2}$

Incertezza di categoria A

$$u_A(x) = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{k=1}^{n}(x_k - \bar{x})^2}$$

$\bar{x} =$ media campionaria $n =$ numero di misurazioni (ci sono $n-1$ gradi di libertà)

$s(x) =$ deviazione standard campionaria

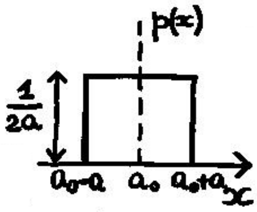
Allora il risultato di misura è: $\bar{x} \pm \frac{s(x)}{\sqrt{n}}$

Incertezza di categoria B

1. Si determina a priori, in base a conoscenze possedute, un intervallo entro il quale cadranno i valori
2. Si associa ad esso una densità di probabilità (PDF)
3. Si calcolano media μ_x, varianza $\sigma^2(x)$, deviazione standard $\sigma(x)$

PDF uniforme (rettangolare)

La misura rientra sempre nell'intervallo



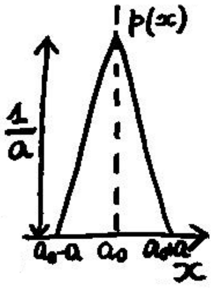
$a_0 \pm a$

$\mu_x = a_0 = \frac{a_{max}+a_{min}}{2}$
$Dx = 2a = a_{max} - a_{min}$

$\sigma(x) = \dfrac{Dx}{\sqrt{12}}$

PDF triangolare

La misura rientra sempre nell'intervallo



$a_0 \pm a$

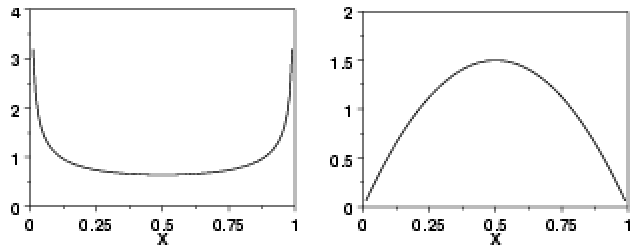
$\mu_x = a_0 = \frac{a_{max}+a_{min}}{2}$

$Dx = 2a = a_{max} - a_{min}$

$\sigma(x) = \dfrac{Dx}{\sqrt{24}}$

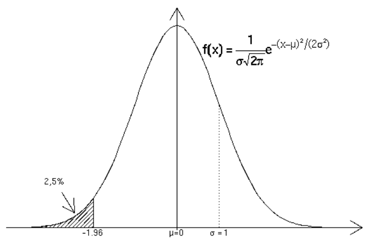
μ_x(triangolare) $\leq \mu_x$(uniforme)

PDF a U



PDF gaussiana (normale)

La misura può uscire dall'intervallo



Cifre significative dell'incertezza

L'incertezza per norma si misura con una o al più due cifre significative.

Nell'arrotondamento di un'incertezza a 1 cifra si deve sempre arrotondare per eccesso a meno che l'arrotondamento per difetto non comporti un errore inferiore al 5% del valore.

Nell'arrotondamento di un'incertezza a 2 cifre significative si utilizza l'usuale regola "≥ 5 in su, ≤ 4 in giù".

Incertezza relativa

$u_r(x) = \dfrac{u(x)}{\bar{x}}$

Serve per confrontare tra loro incertezze di misure di grandezze non omogenee

Incertezza estesa

$U(x) = k \cdot u(x)$

Fattore di copertura k	Confidenza che la misurazione ricada in un intervallo di semiampiezza $U(x)$
1	68%
2	95%
3	99.7%

Misure dirette

Incertezza composta: $u_C = u_A + u_B$

Misure indirette

Il misurando è ottenuto indirettamente da una *relazione funzionale* $f(x_i)$ di n altre grandezze misurate direttamente

Valore di misura: $\bar{y} = f(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_n})$

Incertezza composta:

$$u_C(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)\left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) u(x_i, x_j)}$$

I termini $c_i = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)$ sono detti coefficienti di sensibilità e indicano quanto varia il misurando Y rispetto al variare del valore di x_i

Coefficienti di correlazione:

$$r_{ij}(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)}$$

Se $r_{ij} = 0$ allora le due grandezze x_i e x_j sono statisticamente indipendenti

L'incertezza composta si può scrivere quindi anche come:

$$u_C(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)\left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) r_{ij} u(x_i) u(x_j)}$$

Se le grandezze sono indipendenti allora:

$$u_C(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}$$

Casi particolari

- La relazione funzionale è una somma o differenza di misure

$$y = n_1x_1 + n_2x_2 + \cdots + n_Nx_N$$
$$\bar{y} = n_1\bar{x}_1 + n_2\bar{x}_2 + \cdots + n_N\bar{x}_N$$
$$u_C(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} {n_i}^2 u^2(x_i)}$$

Se inoltre è sempre $n = 1$ allora $u_C(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} u^2(x_i)}$

- La relazione funzionale è un prodotto o rapporto di misure
L'incertezza è la somma quadratica delle incertezze relative

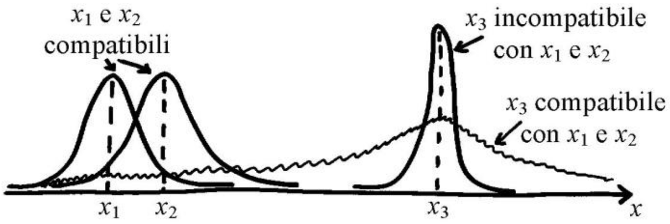
$$y = {x_1}^{n_1} \times {x_2}^{n_2} \times \ldots \times {x_N}^{n_N}$$
$$\bar{y} = {\bar{x}_1}^{n_1} \times {\bar{x}_2}^{n_2} \times \ldots \times {\bar{x}_N}^{n_N}$$

$$u_{r,C}(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} {n_i}^2 {u_r}^2(x_i)}$$

Se inoltre è sempre $n = 1$ allora $u_{r,C}(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} {u_r}^2(x_i)}$

Compatibilità tra misure

Due misure sono compatibili se la loro differenza può essere ricondotta a una fluttuazione statistica intorno al valore nullo



$d = |x_1 - x_2| \leq k\sqrt{u^2(x_1) + u^2(x_2) - 2r_{12}u(x_1)u(x_2)}$

con $r_{12} = 0$ se misure indipendenti e k fattore di copertura

Se la distanza tra due misure è maggiore della somma delle loro incertezze moltiplicata per il fattore di copertura k, allora non può esserci compatibilità.

Media pesata

Avendo una serie di N misure compatibili, indipendenti e normalmente distribuite, è possibile calcolare la migliore stima di misura effettuandone la media pesata:

$$\bar{x}_{MP} = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i x_i}{\sum_{i=1}^{N} w_i}$$

Dove i pesi sono: $w_i = \frac{1}{u^2(x_i)}$ e indicano la confidenza che si ha nella misura x_i

L'incertezza della media pesata è sempre minore della minima incertezza della serie di misure.

$$u(\bar{x}_{MP}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{N} w_i}}$$

Numero di gradi di libertà

Indicano la precisione di una incertezza, da molto scarsa $v = 1$ a ideale $v = \infty$

Per incertezze di categoria A: $v = n - 1$ dove n è il numero di misure considerate

Per incertezze di categoria B: va stimato sulla base della credibilità della certezza (meglio sottostimare che sovrastimare)

Incertezza dell'incertezza: $\sigma[u(x)] \cong \frac{u(x)}{\sqrt{2v}}$

Qualità della stima di incertezza: $u_r\big(u(x)\big) \cong \frac{1}{\sqrt{2v}}$

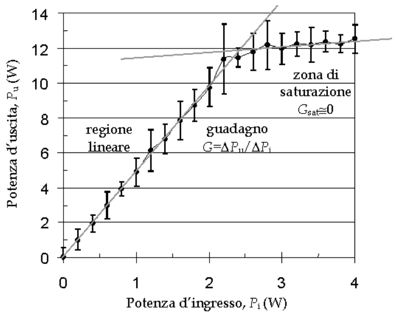
Capitolo 3 – Rappresentazione dati

Grafici

Possono avere coordinate cartesiane o polari

Quantitativi sugli assi valori numerici e unità di misura

Qualitativi per indicare andamenti e tendenze



Barre di errore: indicano un intervallo di confidenza che va specificato (per esempio di $\pm 1\sigma$ cioè del 68%)

Sugli assi si possono utilizzare scale logaritmiche su uno o più assi

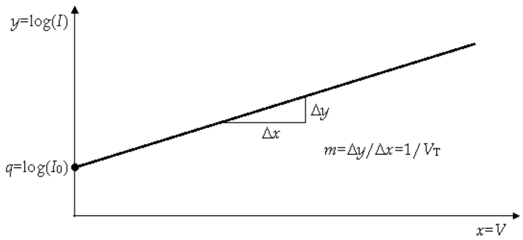
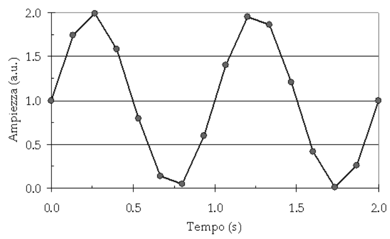


Diagramma semilogaritmico

Interpolazione

La misura è un insieme di valori discreti, per interpolazione si intende il riempimento delle parti di grafico dove non ci sono valori in modo da dare continuità ai dati. Si ottiene una funzione detta *interpolante*.

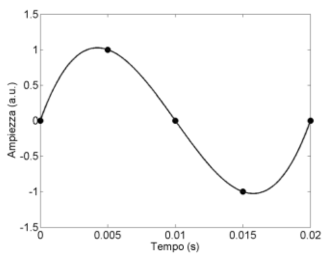
Interpolazione lineare



Congiunge i punti con una spezzata

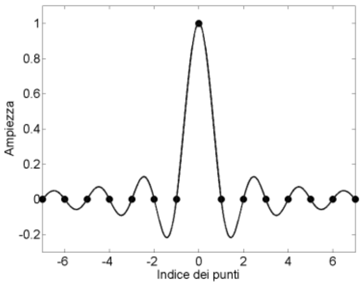
Non sono utilizzate le informazioni date dalla posizione dei punti adiacenti

Interpolazione polinomiale cubica



Curva che passa per i punti mantenendo inalterate derivata prima e seconda

Interpolazione a seno cardinale



Si ottiene nel dominio del tempo attraverso la convoluzione del segnale campionato con la funzione $sinc(\pi x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$

Utilizzata per la ricostruzione di segnali campionati nel tempo

La precisione dell'interpolazione è più scarsa man mano che ci si avvicina agli estremi del dominio

Regressione

Serve a trovare la relazione matematica tra le grandezze coinvolte nella misura

Regressione ai minimi quadrati

Si considera la dipendenza $y = f(A, B, \dots, x)$ di y da x e da parametri $A, B, \dots$ e si effettuano n misure di y

Si definisce la funzione *distanza* tra le misure effettuate

La più utilizzata è: $\Phi = \sum_{i=1}^{n} {\delta_i}^2$ con $\delta_i = y_i - f(x_i)$

Si minimizza tale funzione

Regressione lineare (LS)

Si considera la dipendenza lineare $y = mx + b$ di cui si vogliono ricavare i parametri m e b e si effettuano n misure di y

Ogni punto si considera lo scarto: $\delta_i = y_i - [\, mx + b]$

Si definisce la funzione *distanza*: $\Phi = \sum_{i=1}^{n} {\delta_i}^2 = \sum_{i=1}^{n} [y_i - (mx + b)]^2$

Per trovare il minimo si annullano le derivate prime parziali:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial m} = 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial b} = 0 \end{cases}$$

In generale il risultato è:

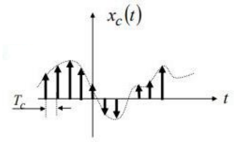
$$m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum {x_i}^2 - (\sum x_i)^2} \qquad b = \frac{\sum y_i - m \sum x_i}{m} = \bar{y} - m\bar{x}$$

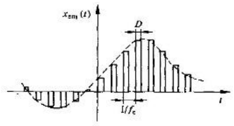
Capitolo 4 – campionamento e DAQ

Campionamento ideale/reale

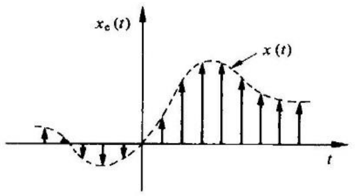
Idealmente il campionamento avviene in intervalli infinitesimi, nella realtà in intervalli finiti.

- In un campionamento <u>ideale</u> il segnale è moltiplicato per una serie di Delta di Dirac (funzione che vale 1 in un punto, quindi intervallo infinitesimo, e 0 in tutti gli altri)
- In un campionamento <u>reale</u> il segnale è moltiplicato per una serie di rettangoli di durata finita centrati negli istanti di campionamento

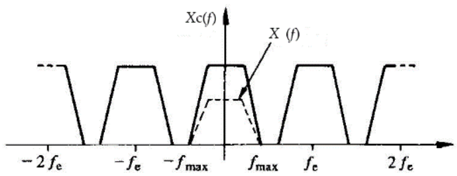




Segnale campionato nel <u>dominio del tempo</u>



Segnale campionato nel <u>dominio dello spettro</u>



Lo spettro del segnale campionato è un segnale periodico che contiene infinite repliche dello spettro del segnale, distanziate con un passo f_C(frequenza di campionamento).
<u>**Spettro**</u> insieme delle frequenze di un segnale periodico

Teorema di Shannon

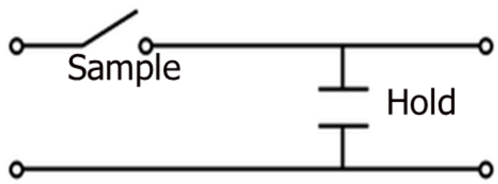
Un filtro passa-basso (PB) ideale con frequenza di taglio pari alla frequenza di Nyquist $f_{Nyq} = \frac{f_C}{2}$ permette di ricostruire il segnale originale, dal segnale campionato, se la massima frequenza f_{max} del segnale d'ingresso è tale che $f_{max} \leq f_{Nyq}$

<u>**filtro passa basso**</u> un sistema che permette solo il passaggio di frequenze al di sotto di una data soglia, detta frequenza di taglio, bloccando le alte frequenze

Si può quindi ricostruire il segnale originale a partire da quello campionato a patto di avere una frequenza massima che è $f_{Nyq} = \frac{f_C}{2}$ cioè metà della frequenza di campionamento.

Se $f_{max} > f_{Nyq}$ si ha ***aliasing*** e si ottiene un segnale equivoco.

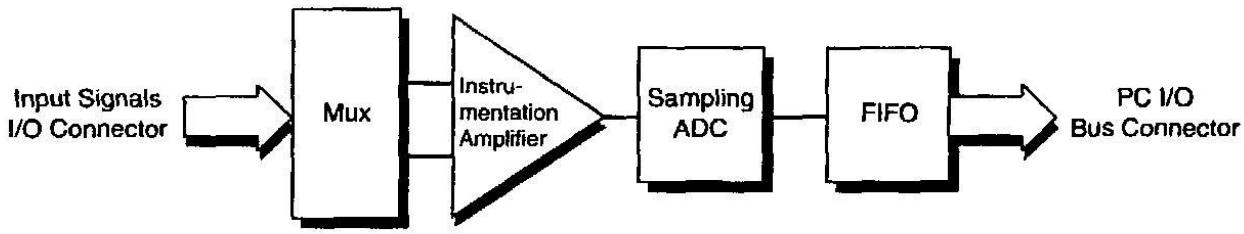
Campionature Sample & Hold



A interruttore chiuso la tensione campionata viene "memorizzata" dal condensatore che la mantiene quando l'interruttore è aperto.

Al posto di interruttori possono esserci transistor che permettono di raggiungere frequenze molto più elevate per l'accensione e spegnimento, mentre resistori permettono di campionare frequenze in generale più alte normalmente non mantenibili dal condensatore.

Data AQuisition (DAQ)



<u>Multiplexer</u> per selezionare tra gli ingressi, che possono essere *single-ended* o *differenziali*

<u>Amplificatore</u> modifica ampiezza segnale per utilizzare tutta la dinamica del ADC

<u>Campionatore (Sampler) e ADC</u> converte la tensione in valore numerico

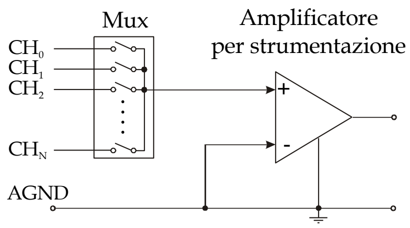
<u>FIFO</u> Invia i valori misurati al bus del pc

Le schede dispongono anche di <u>uscite analogiche (DAC)</u>, di linee di I/O Input/Output, e di sincronizzazioni analogiche e digitali (trigger e timer)

La frequenza di campionamento f_C è la massima frequenza a cui il DAQ può digitalizzare un segnale

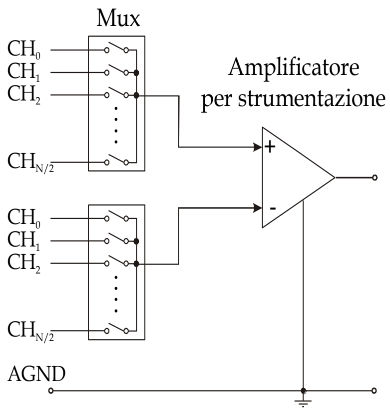
Se si esegue campionamento multicanale (N segnali acquisiti in parallelo): $f_{C,N} = \frac{f_C}{N}$

Ingressi single-ended o differenziali



Con ingressi **<u>single-ended</u>** la tensione di ingresso viene confrontata con il potenziale di terra

$n°\text{ di canali} = N$ dove N è il numero di ingressi



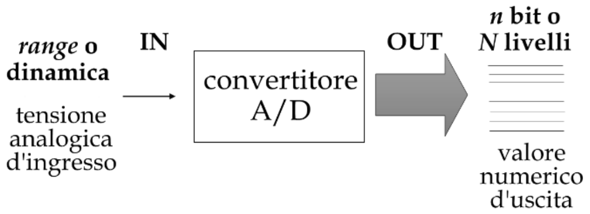
Con ingressi **<u>differenziali</u>** la tensione di ingresso viene confrontata con quella di altri ingressi.

Al contrario del caso di ingressi single-ended, è possibile eliminare il rumore su un segnale

A parità di numero di ingressi, con ingressi differenziali si hanno la metà dei canali a disposizione, perché se ne utilizzano due per segnale.

$n°\text{ di canali} = \frac{N}{2}$ dove N è il numero di ingressi

Analog to digital converter (ADC)



Può esserci un multiplexer per acquisire contemporaneamente più canali in ingresso

La velocità di campionamento per canale dipende da la frequenza di campionamento del convertitore A/D e numero di canali acquisiti contemporaneamente

Dinamica $\boldsymbol{D}[\boldsymbol{V}]$ range di ampiezza del segnale registrabile

La dinamica è fissa, quindi il segnale di ingresso viene amplificato e centrato per massimizzare la risoluzione e utilizzare tutta la dinamica

Il segnale ha quindi un **guadagno** $G = \frac{D_{ADC}}{D_{segnale}}$

Risoluzione numero di bit $n[bit]$ che l'ADC (il convertitore A/D) usa per rappresentare il segnale analogico.

I livelli per rappresentare il segnale sono quindi $N = 2^{n[bit]}$

Più sono i livelli, essendo fissa la dinamica, minore è la differenza di tensione rilevabile.

La tensione minima rilevabile è data dalla risoluzione:

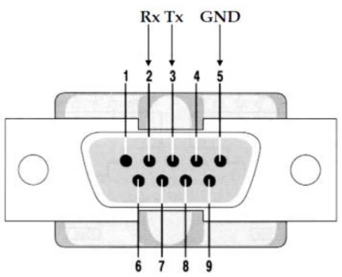
$\Delta V = \frac{D_{segnale}}{2^n} = \frac{D_{ADC}}{G \times 2^n}$ risoluzione dimensionale

$\delta = \frac{1}{N} = \frac{1}{2^n}$ risoluzione adimensionale

NB: per descrivere l'accuratezza si utilizzano i bit equivalenti, in modo da tener conto di rumore ed errori.

Protocolli di comunicazione

Interfaccia Seriale RS-232



3 linee:

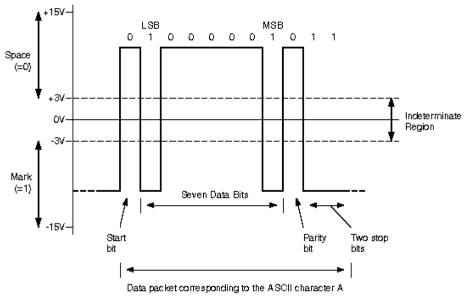
Rx ricezione

Tx trasmissione

GDN linea di massa (Ground)

I livelli Tx e Rx sono riferiti a massa

Si possono collegare tra loro solo due dispositivi, uno che invia dati e uno che li riceve.



Stato alto (1): [3V, 12V]

Stato basso (0): [-3V, -12V]

Lungo il cavo gli stati sono invertiti

Trasmissione *half-duplex* tra due dispositivi (bidirezionale ma parla uno alla volta)

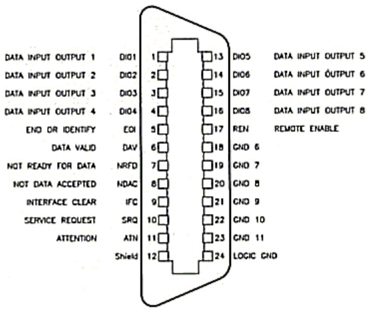
Velocità di trasmissione: $\sim 9.6\ kbit/s$

Pacchetto da 10 bit:

1 bit START	7 bit DATI	1 bit PARITA'	2 bit STOP

<u>Interfaccia IEEE-488 (GPIB)</u>

GPIB=General Purpose Interface Bus



8 linee dati

5 linee di gestione dell'interfaccia

3 linee dedicate all'handshake

Pacchetto da 8 bit:

7 bit DATI (in ASCII)	1 bit PARITA'

Trasmissione *full-duplex* tra al massimo 15 dispositivi

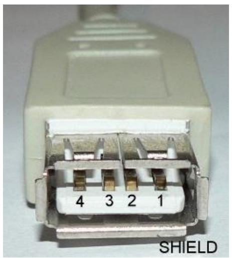
Velocità di trasmissione: da 1MB/s a 8MB/s (tra strumenti max $400\ kbyte/s$)

Dispositivi collegati possono avere ruolo di: LISTENER, TALKER, CONTROLLER, IDLER

<u>Interfaccia USB</u>

USB=Universal Serial Bus

Trasmissione *full-duplex* tra al massimo 127 dispositivi (USB 1.0 e 2.0 sono *half-duplex*)



4 fili:

1. Alimentazione
2. Ricezione dati
3. Trasmissione dati
4. Linea di massa

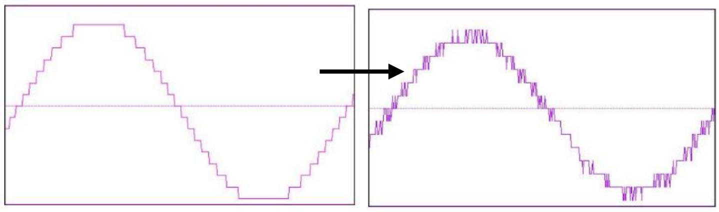
Velocità di trasmissione USB 3.1: $10\ Gb/s$

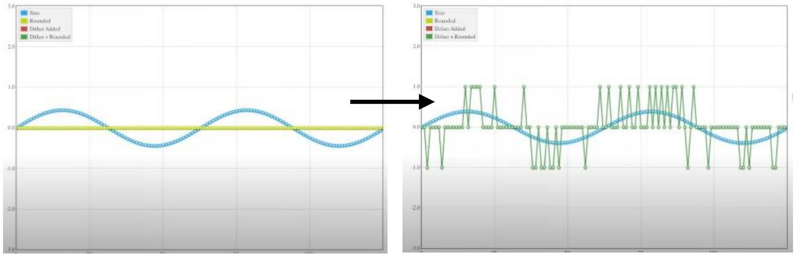
I dispositivi appena collegati assumono uno stato che ne determina il funzionamento:

- *Control*: configurazione e controllo dello stato
- *Isosinchronous transfer:* trasmissione continua
- *Interrupt transfer*: trasmissione prioritaria
- *Bulk transfer*: trasmissione non prioritaria

Dither

Si aggiunge rumore (variazioni casuali di ampiezza) al segnale in modo da evitare la sua divisione deterministica in passi di quantizzazione da parte dell'ADC

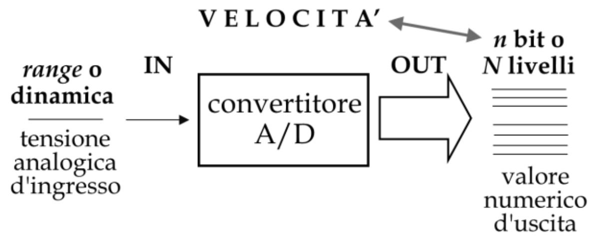




E' utile quando si hanno pochi bit: una divisione deterministica porterebbe a una perdita di informazione che si può diminuire con il dithering.

Capitolo 5 – Voltmetri digitali e convertitori

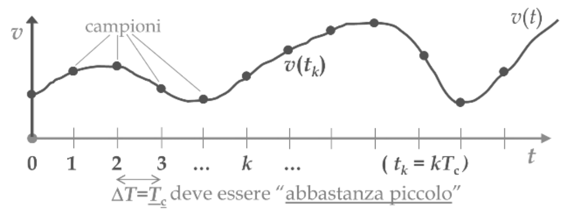
Convertitore A/D (ADC)



Un convertitore A/D (voltmetro) è uno strumento che riceve in ingresso una tensione analogica e la digitalizza, discretizzando in primo luogo il tempo (le misure vengono campionate in determinati intervalli), poi l'ampiezza (il valore misurato potrà assumere uno solo dei valori del set).

Se la grandezza analogica in input non è una tensione, allora la si converte in tensione prima di procedere alla conversione in formato numerico.

La <u>discretizzazione nel tempo</u> avviene campionando la tensione in istanti di tempo distanti un periodo di campionamento $T_C = \frac{1}{f_C}$. Con i campioni così ottenuti è possibile ricostruire l'andamento continuo senza perdita di informazione



La <u>quantizzazione in ampiezza</u> consiste nella suddivisione della dinamica D di misura in N livelli di larghezza costante $\Delta V = D/N$ (ΔV è la risoluzione)

Errori possibili:

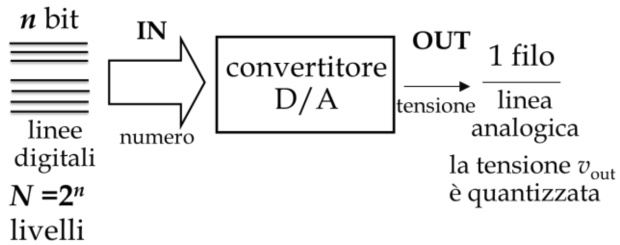
- Errore di quantizzazione
- Errore di offset
- Errore di gain (guadagno)
- Errore di *Differential non Linearity (DNL)*: intervalli ΔV con diversa ampiezza tra loro
- Errore di *Integral non Linearity (INL)*: Intervalli tutti di dimensione uguale ma errata

Teorema di Shannon

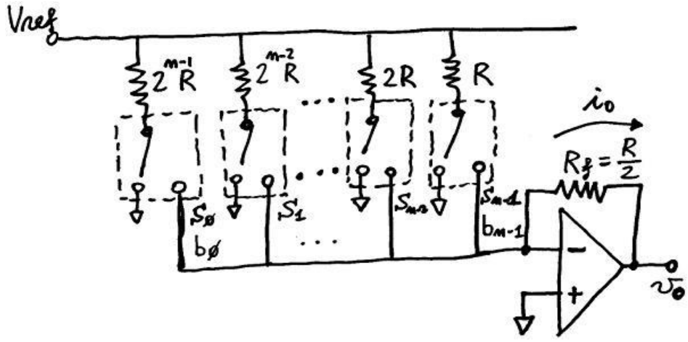
Per poter ricostruire un segnale con banda limitata è necessaria una frequenza di campionamento $f_c > 2B$ dove B è la banda massima del segnale.

$$f_c > 2B \Leftrightarrow T_c < \frac{1}{2B}$$

Convertitore D/A (DAC)



Ha in ingresso una n-upla di cavi (uno per bit) e converte il valore digitale in una tensione analogica emettendola da un singolo filo.



Un <u>convertitore D/A a rete di resistori R</u> consiste in un gruppo di resistori collegati in parallelo e controllati da interruttori, ognuno rappresentante un bit di input. Questi prelevano correnti da una tensione di riferimento costante V_{ref}. I resistori sono ordinati per resistenza e a quello con resistenza minore corrisponde il bit più significativo, in modo che da lui passi più corrente che dagli altri. L'amplificatore operazionale posto alla fine somma le correnti in uscita dai singoli resistori e converte, attraverso la resistenza di feedback R_f, la corrente risultante i_O in una tensione $V_O = -R_f i_O$

L'accuratezza del DAC dipende da V_{ref}, dalle resistenze e dalla qualità degli *switch*.

In generale se si hanno in input n bit:

$$u(V_O) = \frac{\Delta V}{\sqrt{12}} = \frac{V_{O,max}}{2^n\sqrt{12}}$$

Voltmetri digitali

Notazione:

<u>Dinamica</u> D ampiezza range segnale campionabile

<u>Numero di bit</u> n

<u>Numero di cifre decimali</u> m

<u>Numero di livelli</u> $N = 2^n$ o $N = 2^m$

<u>Risoluzione</u>

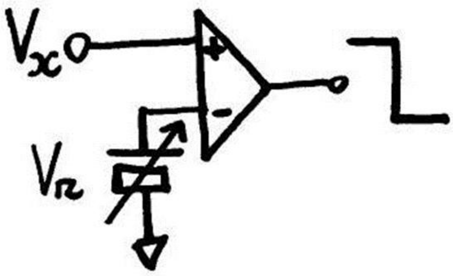
$\Delta V = \frac{D_{ADC}}{G \times 2^n}$ risoluzione <u>dimensionale</u>

$\delta = \frac{1}{N} = \frac{1}{2^n}$ o $\delta = \frac{\Delta V}{D}$ risoluzione <u>adimensionale</u>

NB: nei voltmetri il prodotto tra accuratezza e velocità di misura è costante, quindi aumentando una si perde l'altra

Voltmetro differenziale

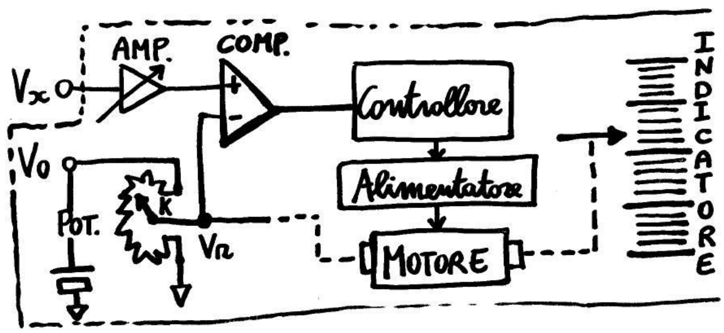
Effettuano la misura di una tensione incognita V_x mediante il confronto diretto con una tensione di riferimento V_r disponibile internamente allo strumento.



Al loro interno c'è un OP-AMP che funziona da comparatore, segna il livello 1 o 0 a seconda di quale delle due tensioni in ingresso è maggiore. Si mandano in ingresso la tensione da misurare e quella di riferimento.

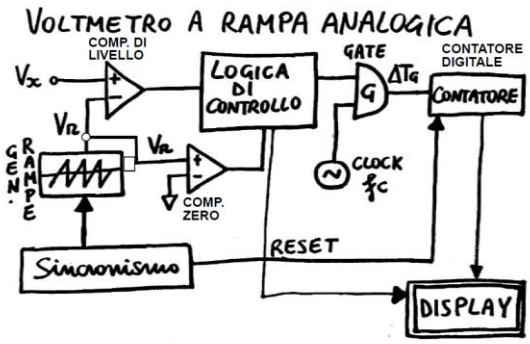
Data V_x fissa da misurare si fa variare V_r su tutta la dinamica, da $V_{r,min}$ a $V_{r,max}$, e si registra il valore che ha nel momento in cui avviene il cambiamento dell'uscita del comparatore.

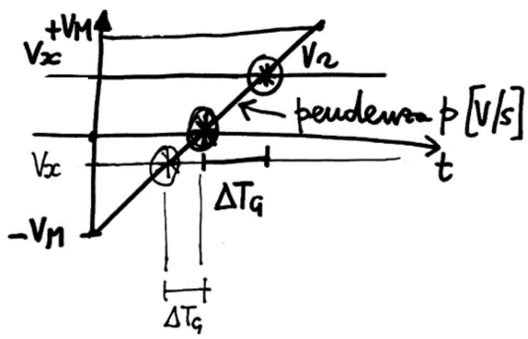
Voltmetro potenziometrico



La tensione di confronto viene variata da un potenziometro e il valore della tensione misurata viene mostrato tramite un indicatore a lancetta.

Voltmetro a rampa analogica





La tensione V_x viene misurata contando un numero N_C di periodi di clock T_C ,in un intervallo di tempo ΔT_G che impiega una tensione di riferimento che cresce linearmente (lungo la rampa) a raggiungere il valore di V_x facendo scattare il comparatore.

$$\Delta T_G = N_C \cdot T_C$$

La rampa analogica, di pendenza $p = \frac{2V_M}{T_{rampa}}$, varia linearmente da $-V_M$ a $+V_M$ durante una misurazione e per farlo impiega T_{rampa}, quindi il tempo di misura è uguale al tempo di rampa.

Il segno di V_x misurata si deduce da se scatta prima il comparatore di zero (la tensione di riferimento ha raggiunto lo 0) o quello di livello (la tensione di riferimento ha raggiunto V_x), cioè da se si raggiunge prima lo zero o la tensione da misurare lungo la rampa.

Dalla proporzione: $V_x : \Delta T_G = V_M : \frac{T_{rampa}}{2}$ si ricava il valore della tensione da misurare:

$$|V_x| = \frac{\Delta T_G}{T_{rampa}/2} V_M = \frac{N_C T_C}{T_{rampa}/2} V_M$$

Numero di livelli: $N = \frac{f_c}{f_{rampa}}$

Cifre decimali: $m = \log_{10} N$

Numero di bit: $n = \log_2 N$

C'è errore di quantizzazione sul conteggio di cicli del clock, con una incertezza di quantizzazione pari a: $u_q = T_c / \sqrt{12}$

Incertezza di ΔT_G: $u(\Delta T_G) = \frac{T_C}{\sqrt{6}}$

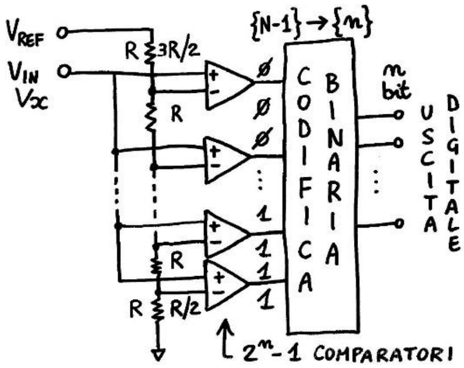
La risoluzione di solito è di 4 o 5 cifre.

<u>Voltmetro flash</u>

E' il convertitore A/D più veloce, infatti impiega circa un solo periodo di clock per effettuare la misurazione, ed è quindi adatto a misurare tensioni con alte frequenze, però ha un costo e una complessità circuitale molto alti che aumentano esponenzialmente con la risoluzione, quindi in genere si lavora a bassa risoluzione.

Di solitosi utilizzano $n = 8$ bit

Non è comunque conveniente aumentare eccessivamente la risoluzione perché data la elevata velocità di campionamento con alta banda di segnale e rumore il numero di bit equivalenti scende molto.



Ci sono $2^n - 1$ comparatori che ricevono in ingresso la tensione da misurare V_x e la confrontano con quella di riferimento del proprio livello, ottenuta da una linea di n resistori in serie che attenuano la tensione di riferimento di livello in livello.

Ci sono $N = 2^n$ livelli equi spaziati, ognuno che corrisponde a un bit.

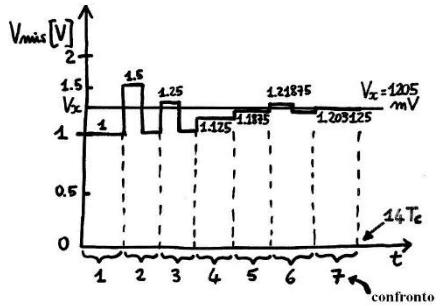
Su ogni resistore c'è una tensione crescente secondo: $V_i = i(V_{ref}/N)$, tranne il primo e ultimo resistore che hanno caratteristiche diverse dagli altri, ciò è utile per non avere offset.

Il primo e l'ultimo resistore sono diversi dagli altri, questo serve ad evitare errore di offset ed è utile alla conversione dei segnali bipolari

$\Delta V = \frac{V_{max}}{2^n} = \frac{D}{2^n}$ dove D è la dinamica $u(V) = \frac{\Delta V}{\sqrt{12}}$

Questo tipo di convertitore è utilizzato negli oscilloscopi digitali e per misurazioni di segnali molto veloci

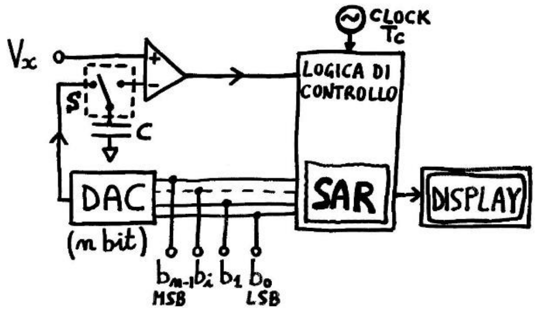
Voltmetro ad approssimazioni successive



Si sfrutta il metodo di bisezione per determinare il valore dei bit uno ad uno a partire dal bit più significativo.

Ad ogni confronto, se $V_x \geq V_r$, cioè la tensione in ingresso è maggiore di quella di riferimento, il bit del valore della misurazione assume il valore 1, altrimenti 0, poi si passa al bit successivo

Con n confronti si ha una risoluzione di $\delta = 1/2^n$



La tensione in uscita da DAC (utilizzata per il confronto) può assumere un qualsiasi valore che soddisfi questa equazione:

$$V_{\frac{D}{A}} = \frac{V_{FS}}{2^n}[b_{n-1}2^{n-1} + \cdots + b_1 2^1 + b_0 2^0]$$

Numero di confronti: $M = \log_2(N)$ di durata ciascuno: $T_{confr.} = mT_c \text{ con } 2 \leq m \leq 5$

Tempo di misura: $T_{mis} = nT_{confr.} = n(mT_c)$

$\Delta V = {}^{D}/_{2^n}$ dove D è la dinamica e n il numero di bit.

Il numero di misurazioni è: $N_{mis} = {}^{V_x}/_{\Delta V}$ che deve essere approssimato a un intero per difetto.

Allora la tensione misurata risulta: $V_{mis} = N_{mis} \cdot \Delta V$

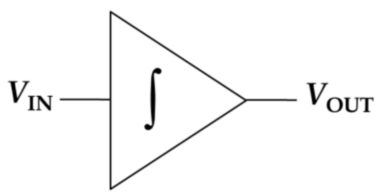
Nella misurazione si commette un errore in percentuale pari a: $\mathrm{ERR\%} = \frac{|V_x - V_{mis}|}{V_x}$

Il rumore è la principale causa di errore, quindi da esso dipende la risoluzione

Voltmetri a integrazione

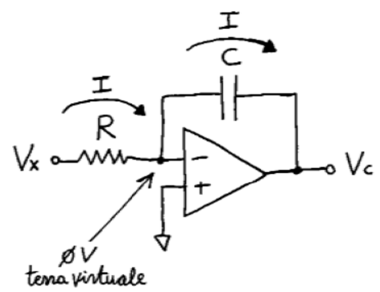
Il valore di misura dipende dalla tensione di ingresso secondo la relazione integrale:

$$V_m \propto \frac{1}{T_I}\int_0^{T_I} V(t)dt$$



Reiezione al disturbo: $V(t) = V_x + V_d(t)$ segnale più disturbo

Se si lavora con tempo di integrazione T_I abbastanza lungo in generale i contributi del rumore si annullano tra loro



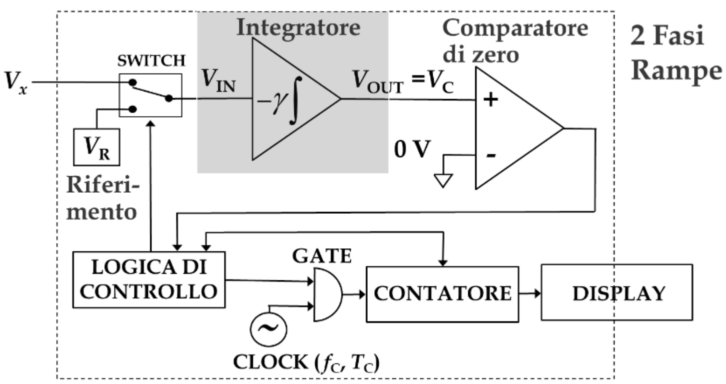
Dato che la corrente $I = V_x/R$ è costante (supponendo fissata V_x) il condensatore si carica a corrente costante, quindi la tensione ai suoi capi V_c cresce linearmente nel tempo

Trasmissione in potenza del disturbo: $T = \frac{\sin^2(x)}{x^2}$

Reiezione in potenza al disturbo: $R = \frac{x^2}{\sin^2(x)}$

Se si integra il segnale disturbato su un tempo che è multiplo intero del periodo del rumore si ottiene il segnale pulito

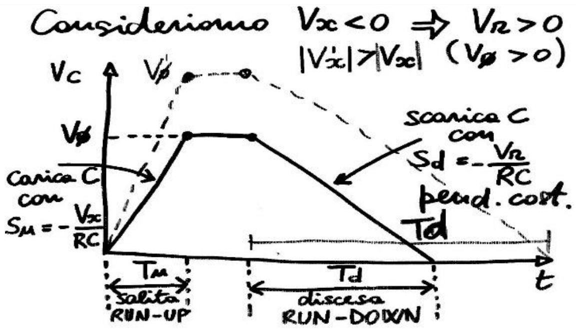
Voltmetro a doppia rampa



La tensione continua in input viene trasformata in una rampa di tensione dall'OP-AMP integratore.

Nella fase di *run-up* il tempo e la corrente di ingresso sono fissati, quindi si carica sul condensatore una tensione che dipende dalla tensione da misurare V_x.

Nella fase di *run-down*, il tempo di scarica T_D dipende dalla tensione sul condensatore.



Viene misurato $\Delta T_G = T_D$

Ogni voltmetro a doppia rampa è formato da due voltmetri distinti, usati per misurare tensioni positive e negative. Ognuno di questi voltmetri ha $n - 1$ bit, dove n è il numero di bit dell'intero voltmetro. Il bit rimanente indica il segno della tensione.

FORMULE:

$T_u = T_c N_u$
$T_d = T_c N_d$
Per contrastare disturbo: $T_u = mT_{dist}$ con m un qualunque intero
Deve sempre essere $T_u < T_{ADC}$ quindi $T_u = mT_{dist} < T_{ADC}$
Se ci sono più disturbi: $T_u = m_1 T_{dist,1} = m_2 T_{dist,2}$
Tempo acquisizione: $T_{ADC} = T_u + T_{d,MAX}$
Tempo di clock: $T_C = \frac{\Delta V}{V_r} T_u$ con V_r tensione dell'alimentatore interno

Oppure sfruttare il fatto che: $T_{d,MAX} = T_C \cdot N_{d,MAX}$

Numero massimo di conteggi: $N_{d,MAX} = 2^{n[bit\ disponibili]}$

NB: il numero $n[bit\ disponibili]$ è il numero di bit tolto il bit usato per il segno, se il voltmetro è bipolare

Reiezione: $r = \frac{\pi \cdot f_S \cdot T_u}{\sin(\pi \cdot f_S \cdot T_u)}$ se $\sin(\pi \cdot f_s \cdot T_u) = 0$ allora reiezione infinita e caso ideale

Tensione da misurare: $V_x = -V_r \frac{T_d}{T_u}$ oppure $V_x = -V_r \frac{N_d}{N_u}$

Se si vuole calcolare V_r utilizzare la portata ($P = V_{x,MAX}$): $P = -V_r \frac{T_{d,MAX}}{T_u} = -V_r \frac{N_{d,MAX}}{N_u}$

Oppure: $\Delta V = -V_r \frac{1}{N_u}$

Risoluzione dimensionale (o assoluta): $\Delta V = \frac{D}{2^n}$

Risoluzione relativa: $\delta = \frac{1}{N} = \frac{1}{2^n}$ con n numero totale di bit (anche quello di segno)

Numero conteggi eseguiti: da $V_x = -V_r \frac{N_{d,x}}{N_u}$ ricavare $N_{d,x}$

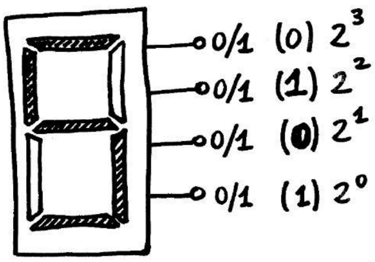
Errore di quantizzazione: $\varepsilon = V_x - V_{x,display}$

Incertezza di quantizzazione: $u(V_x) = \frac{\Delta V}{\sqrt{12}}$

Digital Multi-Meter

I Digital Multi-Meter sono strumenti per la misura di tensioni e correnti (sia AC che DC), resistenze, capacità, prova transistor o diodi, temperatura, ecc.

Per ogni grandezza che devono misurare, attraverso circuiti appositi, misurano una tensione proporzionale alla grandezza originale. Per esempio, per misurare la resistenza di un resistore faccio scorrere al suo interno una corrente nota e misuro la tensione che si sviluppa ai suoi capi.

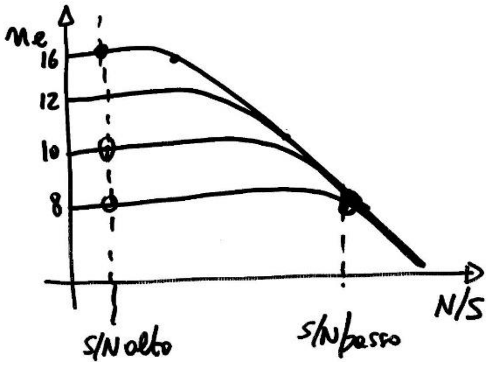


Hanno un'uscita digitale a display a 7 segmenti comandato con codifica BCD (Binary Coded Decimal)

In generale: $u(V) = \frac{\Delta V}{\sqrt{12}}$

Bit equivalenti

Il segnale in ingresso in un voltmetro è affetto da rumore. Questo disturbo può impedire al voltmetro di realizzare una misura al massimo della sua risoluzione, e questo fenomeno è rappresentabile come una riduzione dei bit effettivi a disposizione



In un quantizzatore ideale: $n[bit] = \frac{1}{2}\log_2\left(\frac{S}{N_q}\right)$

Dove signal: $S = {\sigma_S}^2 = \frac{D^2}{12}$ e noise: $N_q = {\sigma_q}^2 = \frac{DV^2}{12}$

Sono legati da $\frac{S}{N_q} = 2^{2n}$

Se è presente rumore (caso reale): $N = N_q + N_{A/D} + N_{ext}$

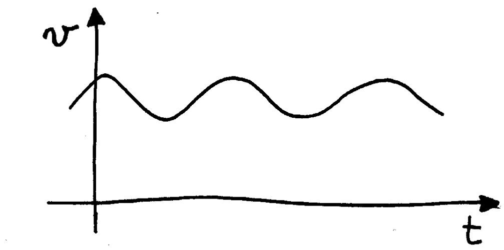
Numero di bit equivalenti: $n_e = \frac{1}{2}\log_2\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{1}{2}\log_2\left(\frac{S}{N_q+N_{A/D}+N_{ext}}\right)$

Oppure FORMULA: $n_e = n - \frac{1}{2}\log_2\left(1 + \frac{{\sigma_N}^2}{{\sigma_q}^2}\right)$ dove ${\sigma_q}^2 = \frac{DV^2}{12}$ è la varianza di quantizzazione e ${\sigma_N}^2 = {V_{rumore,eff.}}^2$ è la varianza del rumore

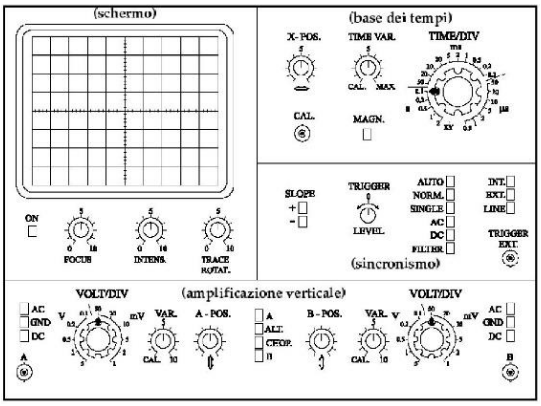
Si perde un bit equivalente ogni volta che il rapporto segnale/rumore diminuisce di un fattore 4 $(-6\ dB)$, mentre se il rapporto dimezza $(-3\ dB)$ si perde solo 1/2 bit.

Capitolo 6 – Oscilloscopio

L'oscilloscopio è uno strumento che consente di visualizzare l'evoluzione temporale di un segnale di tensione in funzione del tempo. Usando scale graduate è possibile non solo vedere che forma ha un certo segnale (misura qualitativa), ma anche fare delle misure quantitative.



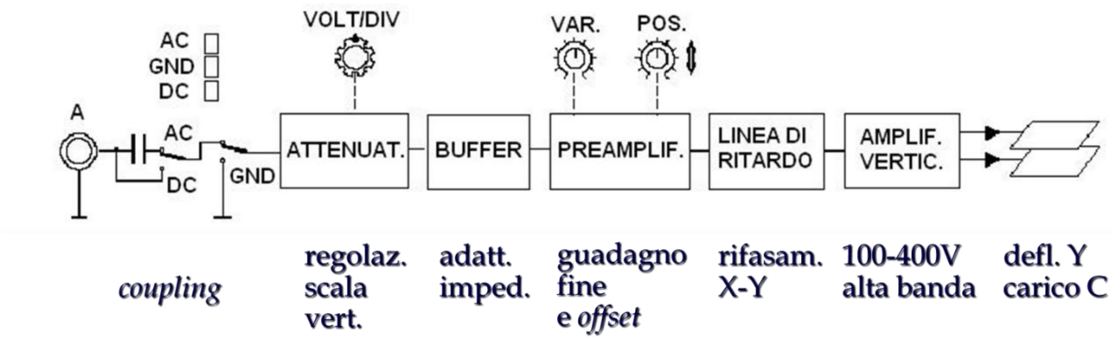
Oscilloscopio analogico



1. Schermo e regolazione della traccia: visualizza una traccia luminosa che evolve nel dominio del tempo (asse X) tenendo conto dei livelli di tensione (asse Y).
2. Condizionamento e amplificazione verticale: servono ad accoppiare il segnale in corrente alternata o continua e a scegliere il fattore di scala verticale da utilizzare.
3. Sincronismo (*trigger*): consente di ''agganciare'' un livello, con una data pendenza, sul segnale di trigger e da quel punto fa partire la visualizzazione
4. Base dei tempi (amplificazione orizzontale): consente di scansionare il segnale lungo l'asse orizzontale e di scegliere il fattore di scala orizzontale da utilizzare.

Amplificazione verticale

L'amplificazione verticale è la parte dell'oscilloscopio che si occupa dell'amplificazione e della regolazione del segnale in ingresso.



- Coupling: permette di scegliere il riferimento da prendere nella misura
  - AC: tensione alternata, un condensatore elimina la componente continua del segnale, questa modalità serve se si vuole visualizzare la sola componente variabile del segnale.
  - DC: tensione continua, il segnale viene trasmesso senza alterazioni (*Direct Coupling*)
  - GND: Mostra il valore di terra, serve a regolare la posizione verticale del segnale.

NB: A basse frequenze la modalità AC potrebbe impedire una corretta misura dei segnali.

- Regolazione della scala verticale
- Adattamento impedenza
- Guadagno fine e offset: regolazione guadagno e offset spostando la traccia su e giù

- Rifasamento X-Y: se l'oscilloscopio ha più canali serve a mantenerli in fase
- Amplificatore verticale: per muovere le placchette serve una tensione molto più grande di quella in input, viene quindi amplificata

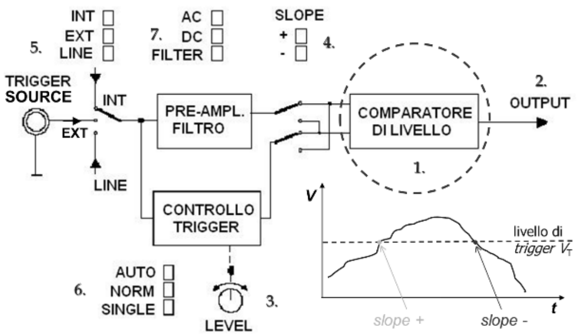
L'oscilloscopio si comporta come un filtro passa-basso: in questo caso quando il periodo del segnale scende sotto t_{so} il segnale non è visibile

Tempo di salita: $t_{so}[s] = \frac{k}{B[Hz]}$

$k = 0{,}35$ per funzioni di trasferimento ad un polo

$0,35 < k < 0,5$ per funzioni di trasferimento a due poli

Sincronismo (trigger)



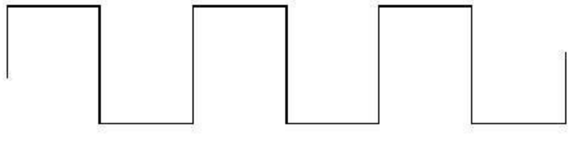
A mantenere la sincronia tra il segnale già rappresentato e quello da rappresentare è il trigger.
Si assicura che il segnale sia disegnato sempre a partire dallo stesso punto del periodo

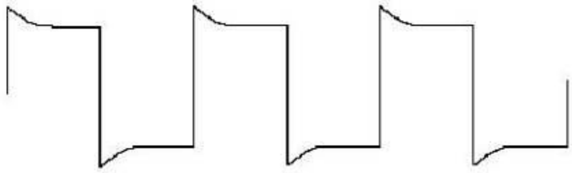
- Trigger source: scegli quale segnale prendere da riferimento per il trigger tra quello disponibile internamente all'oscilloscopio, uno fornito appositamente dall'esterno o il segnale di linea (della presa di corrente)
- Controllo del trigger: si regolano condizioni in cui scatta il trigger, la ampiezza del controllo può essere regolata tramite il controllo LEVEL
- Filtro pre-amplificatore: utile ad evitare che il rumore ad alta frequenza faccia scattare il trigger, si amplifica il segnale e si manda in un filtro che può essere passa alto, passa basso, passa tutto.
- Slope: in un periodo una funzione periodica passa due volte per lo stesso valore, si regola se il trigger deve scattare quando passa in discesa o in salita
- Comparatore di livello: circuito principale del trigger, compara due livelli

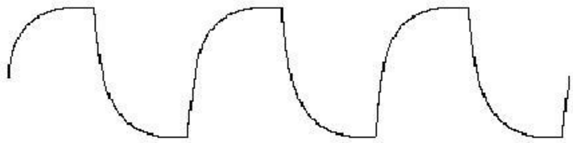
Ci possono essere degli errori se il comparatore di livello fa scattare il trigger nel momento sbagliato, prendono il nome di errori di jitter

Compensazione della sonda

Per controllare che la sonda e l'oscilloscopio siano correttamente calibrati, si genera un'onda quadra e si visualizza sullo schermo. In base alla sua forma si ricalibra l'oscilloscopio al meglio.

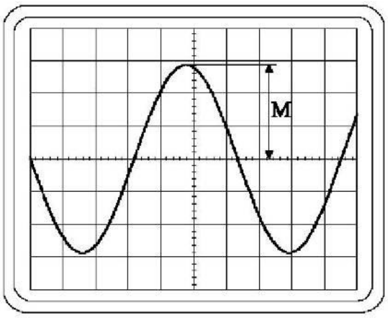
1)

Compensazione corretta

2)

Sovracompensazione

3) 

Sottocompensazione

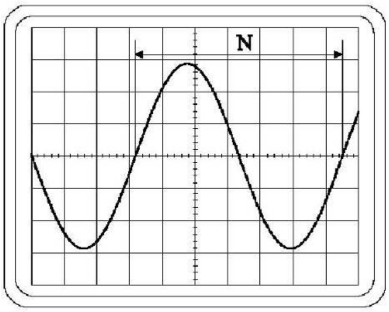
Misure con l’oscilloscopio



Misure di ampiezza

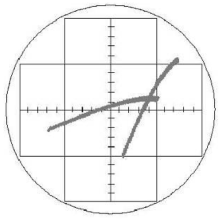
Visualizzare a schermo almeno un periodo della forma d’onda perodica

$V_p = MA_Y$



Misura di tempo e periodo/frequenza

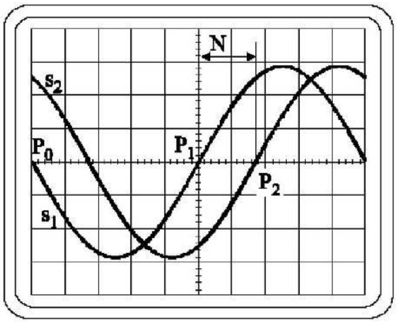
A maggiore pendenza del segnale corrisponde maggiore precisione nella valutazione della ascissa del punto di attraversamento. Anche un segnale più sottile può aiutare in questo senso.



Misurando la distanza N tra i due punti corrispondenti di attraversamento dell’asse orizzontale, il periodo vale:

$$T = NA_x$$

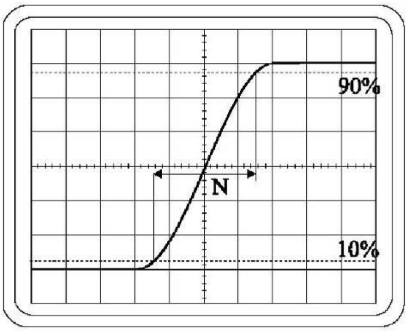
Dove A_x è l’amplificazione orizzontale



Misure di sfasamento

Misurando la distanza M tra i punti dei due segnali che attraversano lo stesso asse orizzontale, si ricava lo sfasamento:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} \ [rad]$$
$$\Delta t_{(P_2 - P_1)} = NA_x$$



Misure di tempo di salita

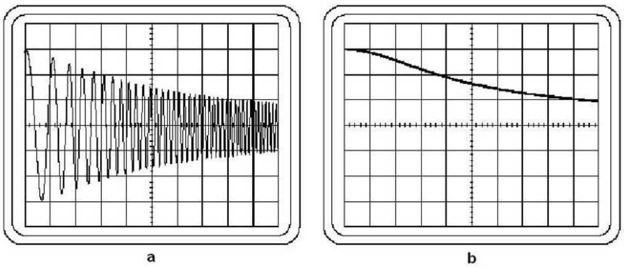
Per misurare il tempo di salita del segnale si misura il tempo che impiega a passare dal 10% al 90% dell’intervallo verticale.
Si misura il tempo di salita di un altro segnale a gradino e si utilizza per calcolare quello del segnale

$$t_{salita} = \sqrt{{t_{segnale}}^2 + {t_{oscilloscopio}}^2}$$

NB: $t_{oscilloscopio} = {}^{0,35}/_{B}$

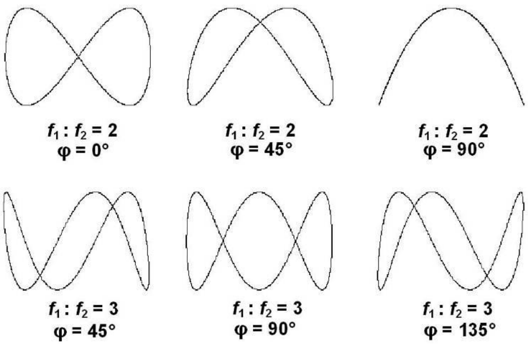
$$t_{segnale} = \sqrt{{t_{salita}}^2 - {t_{oscilloscopio}}^2}$$

Misure differenziali
In alcuni casi connettere i due morsetti di un singolo canale ad un elemento può portare a dei problemi al circuito da misurare poiché un capo del cavo è direttamente collegato a terra.
Per evitare questo, si sfruttano i connettori non a massa di due canali diversi dell'oscilloscopio e si imposta la modalità di visualizzazione per differenza, per visualizzare la loro differenza di tensione.
Modalità X-Y
Tale modalità consente la visualizzazione di un segnale (V_Y su CH2) in funzione di un altro segnale (V_X su CH1) e dunque di osservare la caratteristica V_Y vs. V_X di una grandezza fisica in funzione dell'altra. Una tipica applicazione è costituita dal rilievo delle funzioni caratteristiche corrente-tensione (I-V) di componenti o dispositivi.
Misura risposta in frequenza



Si utilizza una rampa di tensione per produrre una variazione di frequenza (vobulazione) del segnale sinusoidale e la stessa rampa di tensione che la produce viene inviata anche al canale X dell'oscilloscopio.
Al canale Y viene inviato il segnale sinusoidale in uscita dal doppio bipolo collegato.

Figure di Lissajous



Rappresentando due segnali sinusoidali in modalità X-Y si ottengono figure di Lissajous.

A seconda della figura che si forma sullo schermo è possibile capire quanto valga il rapporto tra le frequenze dei due segnali e di quanto siano sfasati.

Oscilloscopio digitale

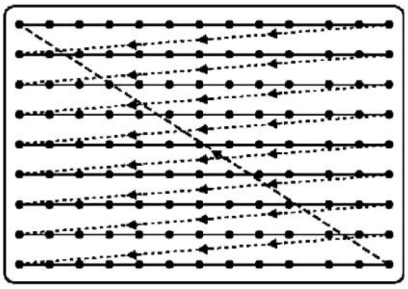
Gli oscilloscopi digitali o DSO (Digital Storage Oscilloscope) hanno il seguente principio di funzionamento:
1. campionamento e conversione del segnale
2. memorizzazione della sequenza
3. elaborazione del segnale
4. visualizzazione

Nei DSO il segnale non viene visualizzato sullo schermo in real-time, ma prima vengono salvati un certo numero di campioni, poi questi vengono elaborati, e infine viene visualizzato il risultato sullo schermo.
E' quindi possibile memorizzare i dati in memoria e collegare il dispositivo ad altri dispositivi esterni a cui inviare i dati.
Fasi di misura
1. Condizionamento analogico, <u>campionamento</u> e <u>Conversione</u> A/D del segnale di misura (*produzione sequenza numerica*)
2. <u>Memorizzazione</u> dei campioni (*salvataggio dati in memoria RAM*)
3. <u>Elaborazione numerica</u> (*ricostruzione andamento segnale nel tempo*)
4. <u>Visualizzazione</u> sullo schermo (*oscillogramma del segnale sul display*)

Le prime due fasi sono in real-time, mentre le ultime due possono essere ritardate, quindi il segnale visualizzato su display può non corrispondere al segnale misurato nell'esatto momento di visualizzazione.

Schermo raster

Nello schermo vector degli oscilloscopi analogici il pennello elettronico si muove seguendo l'andamento del segnale da rappresentare, illuminando i fosfori corrispondenti.



Nello schermo raster invece il pennello fa una scansione completa di tutto lo schermo, illuminando solo i fosfori necessari per comporre l'immagine. Per questo motivo è necessaria la RAM video, una volta composto il quadro da visualizzare, bisogna memorizzare quali punti accendere durante l'intera scansione.

Il tempo necessario per visualizzare l'immagine non dipende quindi dalla sua complessità ma è costante.

tempo di rinfresco quadro deve essere minore del tempo di permanenza dell'immagine, di solito è di $20\ ms$

risoluzioe dello schermo VGA o maggiore

requisiti di banda passante una completa deflessione orizzontale avviene in un tempo di riga $42\ \mu s$, che è 4 volte più lento del tempo minimo di scansione dei migliori oscilloscopi analogici

Display a schermo piatto

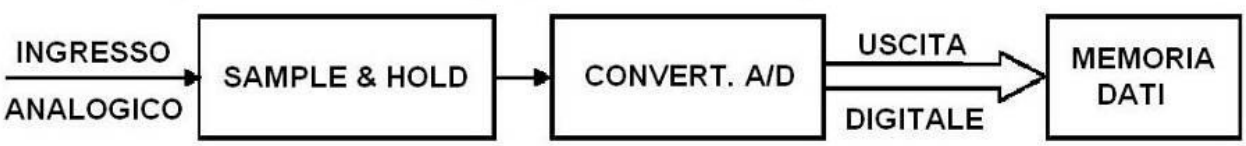
- Basati su Elettroluminescenza di materiali quando attraversati da corrente
- LED
- LCD
- TFT
- OLED

Condizionamento analogico

Il condizionamento analogico di un oscilloscopio digitale è molto simile a quello analogico.

La differenza sta nel fatto che di solito non è presente un filtro passa-basso al fine di non limitare la banda di misura.

Conversione A/D e acquisizione dati

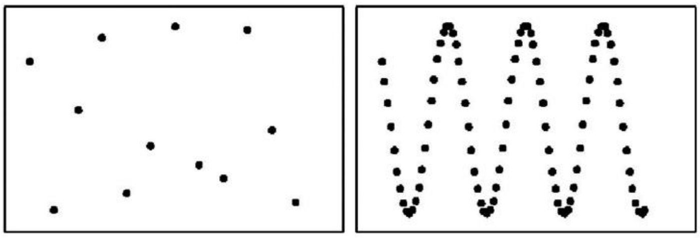


Il segnale, dopo essere passato dalla parte di condizionamento analogico, passa dal campionatore e dal convertitore A/D, quindi i dati vengono salvati nella memoria.

PARAMETRI:

- Risoluzione del ADC
- Massima frequenza di campionamento
- Capacità della memoria
- Capture-rate (forme d'onda al secondo)

campionamento e conversione a multiconvertitore: si possono collegare n convertitori in parallelo e facendoli operare con $1/n$ di periodo di sfasamento reciproco, si ottiene lo stesso effetto di un singolo campionatore a frequenza n volte più alta.



Aliasing percettivo: Anche rispettando il teorema del campionamento, cioè utilizzando una frequenza di campionamento superiore al doppio della banda massima del segnale da misurare, se si hanno pochi punti per periodo (in generale meno di 25 per periodo) la forma d'onda può non essere riconosciuta in maniera corretta.

Interpolatori

- Interpolatore lineare: necessari 10 punti per periodo al fine di una visualizzazione corretta
- Interpolatore a seno cardinale: necessari 2,5 punti per periodo

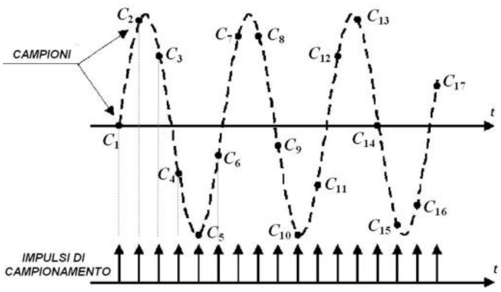
Modalità di campionamento

- Campionamento in tempo reale
- Campionamento in tempo equivalente di tipo sequenziale
- Campionamento in tempo equivalente di tipo casuale

Con la prima modalità i campioni sono prelevati direttamente nel periodo da visualizzare, con le altre due i campioni sono prelevati da più periodi del segnale, poi riordinati e visualizzati.

La prima ha limiti di banda mentre le ultime due sono più veloci ma applicabili solo a segnali periodici.

Campionamento in tempo reale

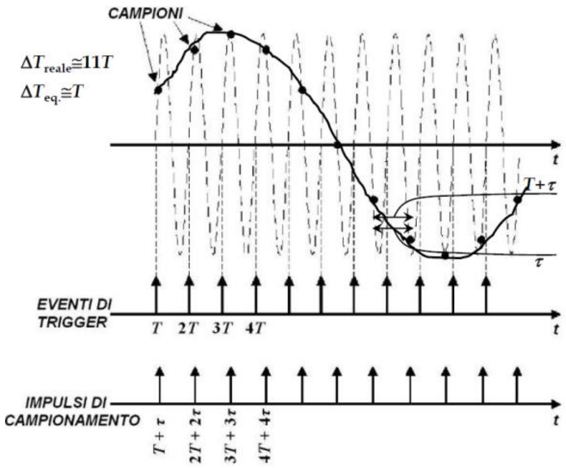


La sequenza dei dati acquisiti rispetta la sequenza temporale dei punti della forma d'onda che evolve sull'asse dei tempi

$$T_{campionamento} = \frac{1}{f_{c\ MAX\ ADC}}$$

Campionamento in tempo equivalente sequenziale

Supponendo che il segnale non cambi tra un periodo e l'altro, si prendono diversi campioni all'interno di diversi periodi, con una distanza dal trigger incrementata a ogni misura. In questo modo si prendono punti in posizioni diverse del periodo del segnale e, dopo averli riordinati, si ottiene un segnale con molti più punti per periodo di quelli che il semplice campionatore avrebbe potuto prendere.



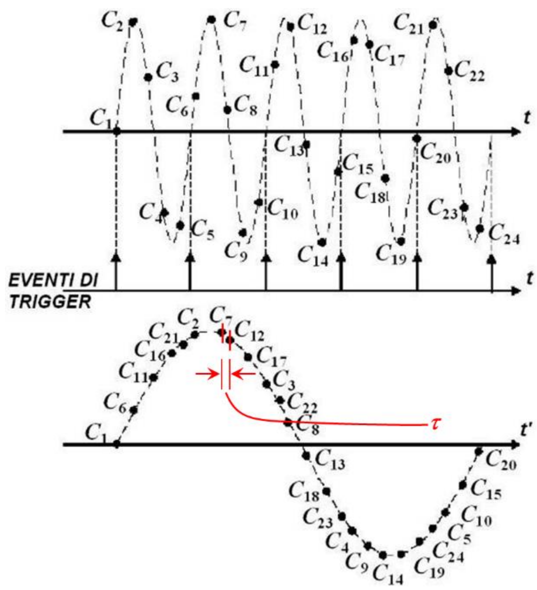
Il trigger è utilizzato ora come punto di riferimento per l'ordinamento dei campioni

$$f_c = \frac{1}{\tau}$$

τ è la distanza ottenuta tra i campioni a fine del processo

La massima banda di visualizzazione dei segnali ottenibile è di $50GHz$

Campionamento in tempo equivalente casuale



In questa modalità i campioni non vengono presi aspettando un certo intervallo dal trigger, ma vengono catturati ogni qual volta l'ADC sia pronto. Questi dati vengono quindi salvati abbinati al tempo che li distanzia dal trigger e poi riordinati in seguito. Questo permette di far lavorare l'ADC alla massima velocità possibile.

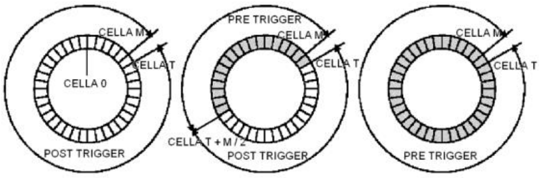
Modalità di trigger avanzate

Nell'oscilloscopio analogico la sincronizzazione avviene attraverso l'individuazione di un livello e di una pendenza (trigger level e trigger slope)

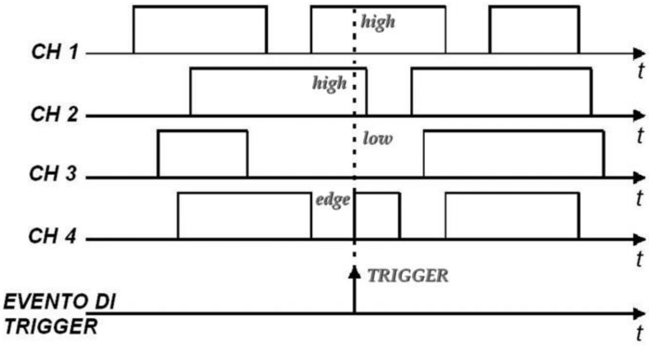
Nell'oscilloscopio digitale esistono anche altre modalità di sincronizzazione assai più evolute e complesse, realizzate tramite trigger digitale

<u>Pre-trigger</u> sulla memoria circolare: consente di visualizzare sullo schermo l'andamento del segnale anche per tempi "prima dell'evento di trigger“
La posizione del trigger sullo schermo può essere scelta

La memoria dati (FIFO) è rappresentabile come un buffer circolare con capacità di M celle. Durante il campionamento e la conversione le *M* celle vengono riempite in modo contiguo. Al verificarsi dell'evento *trigger* la CPU del DSO contrassegna il campione acquisito all'istante di *trigger*, così da poter identificare i campioni precedenti e quelli successivi al campione/evento/istante di *trigger*



<u>Trigger booleano</u>:



<u>Risoluzione verticale</u>

Nei DSO la possibilità di impostare variazioni fini in condizioni di taratura, sia del coeff. di deflessione (AY) sia dell'offset (comando vertical position), consente di ridurre l'effetto della quantizzazione.

E' possibile anche acquisire segnali in modalità media (*average*), facendo la media di intere tracce misurate in momenti successivi, o in modalità alta risoluzione (*high resolution* o box car averaging), acquisendo un segnale lento a frequenza molto alta, e poi facendo la media tra un gruppo di punti vicini, visualizzandone uno solo. Con queste modalità è possibile ridurre il rumore, aumentando il rapporto S/N e, in alcuni casi, portando il numero di bit effettivi a essere maggiore di quelli reali.

<u>Risoluzione orizzontale</u>

L'asse X a schermo ha un numero fissato di punti fisici (pixel) e dunque la risoluzione temporale del segnale visualizzato dipende dalla amplificazione A_X (s/DIV)

Nella modalità a tempo equivalente il limite è dato dalla precisione con cui si stabilisce la distanza tra il trigger e il campione acquisito.

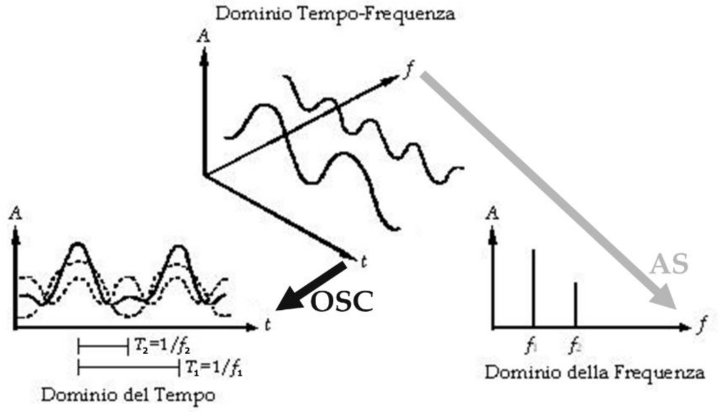
<u>Interfacce I/O e funzioni digitali</u>

- Tutti i DSO sono dotati di interfaccia con calcolatore elettronico
- Autoset: auto regolazione dei parametri per migliore misura
- Cursori e markers per leggere direttamente sul display differenze di tensione e intervalli di tempo

Capitolo 7 – analizzatori di spettro

<u>Analizzatori di spettro</u>

Strumenti per l'analisi di un segnale (la sua ampiezza o la sua potenza) nel dominio della frequenza



Le componenti sinusoidali di un segnale sono mostrate dall'analisi spettrale in modo distinto, mentre un oscilloscopio avrebbe mostrato la loro somma

Lo spettro in frequenza di un segnale $s(t)$ nel tempo è calcolata come la sua trasformata di Fourier:

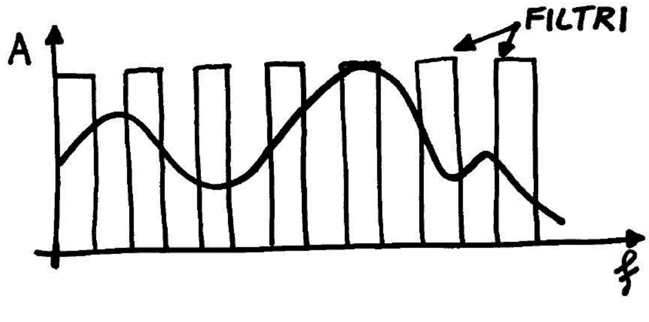
$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-j\omega t}dt$$

Dove $\omega = 2\pi f$ è la pulsazione angolare (spettrale) con f frequenza spettrale (o di Fourier)

Nella pratica si possono misurare solo spettri di segnali troncati, cioè osservati in un tempo finito:

$$S_T(\omega) = \int_{t_0}^{t_0+T} s(t)e^{-j\omega t}dt$$

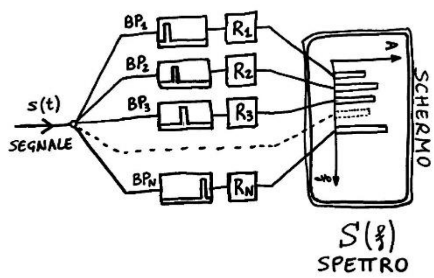
AS a banco di filtri (a filtri contigui)



<u>filtro passa banda</u> è un dispositivo passivo che permette il passaggio di frequenze all'interno di un dato intervallo (la cosiddetta banda passante)

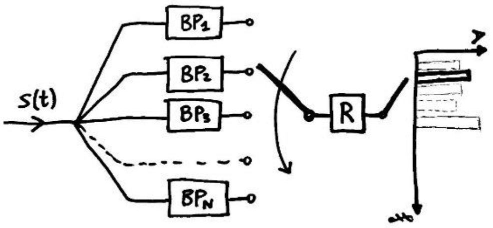
In questo tipo di AS c' è un filtro passa banda per ogni intervallo di frequenza misurabile dall'analizzatore di spettro, in modo che ogni intervallo sia misurato a sé per costruire il dominio delle frequenze.

Ciascun canale invia la frequenza filtrata nel suo intervallo ad un rivelatore che fornisce in uscita un valore di ampiezza o potenza del segnale collocabile al livello di frequenza centrale del relativo filtro passa banda



<u>Più rivelatori</u>

Il modo in cui è costruito lo rende rapido e in grado di analizzare in modo parallelo più bande, ma è costoso, ha una dinamica ridotta dal costo di molti canali e risoluzione in frequenza modesta.

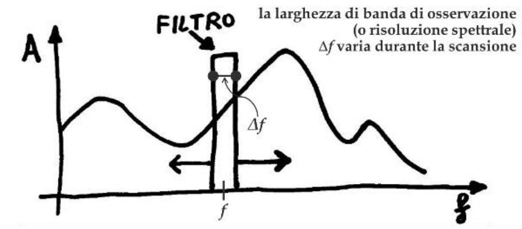


Unico rivelatore

Per rendere più economica la realizzazione si collegano le uscite dei singoli filtri, in rapida successione temporale, ad un unico rivelatore

L'analisi non è più parallela ma sequenziale, questo porta a errori di sovrastima e sottostima

AS a filtro accordabile

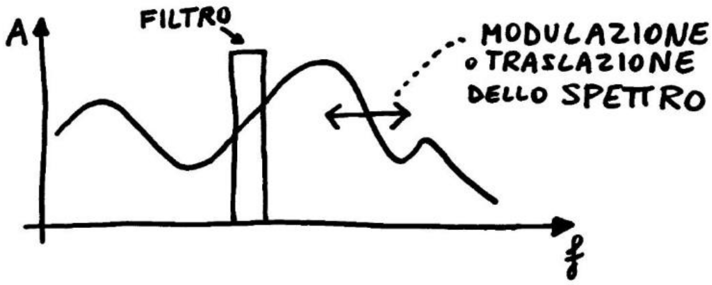


Si utilizza un solo filtro passa banda elettronicamente accordabile, cioè si può regolare quale intervallo di frequenza deve filtrare, che spazia l'intervallo di frequenze da esaminare. La velocità di scansione è molto limitata perché il filtro ha un tempo di ritardo fisso per la sua selettività.

Per come è costruito il filtro, è difficile mantenere costante la larghezza degli intervalli di banda che si impostano ad ogni passo, infatti succede che all'aumentare del valore delle frequenze centrali degli intervalli aumenta anche la larghezza dell'intervallo.

Fattore di merito: $Q = \frac{f}{\Delta f} = cost.$

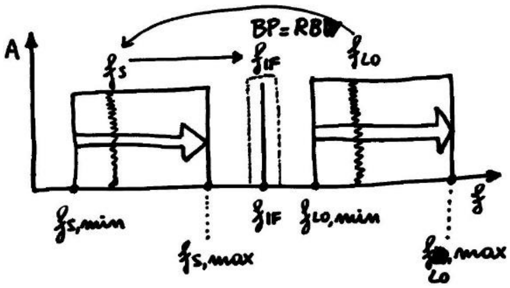
AS a eterodina



Il filtro è sempre impostato su un certo intervallo di frequenza, ma si adatta il segnale da misurare per entrare in quell'intervallo.

Si fa variare la frequenza f_{LO} di un oscillatore locale e si somma per trasferire la particolare frequenza da misurare in un dato istante a una frequenza intermedia f_{IF} che è nell'intervallo del filtro.

$$f_{IF} = |f_{LO} \pm f_S|$$



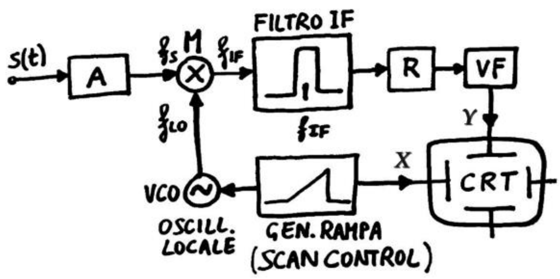
Risultano due frequenze, una corretta in input e una immagine che passa nel filtro. Misurata quella immagine si risale a quella in input.

$$Q = \frac{f}{\Delta f} = cost.$$

$\Delta f = RBW(\text{Resolution BandWidth}) = cost.$

Se $f_{LO} > f_{IF} > f_S$ allora $f_{IF} = f_{LO} - f_S$ per eliminare la frequenza immagine

l'accuratezza in frequenza è dettata dall'oscillatore locale



la risoluzione è determinata dall'ultimo filtro a frequenza intermedia

Il video filter serve a ridurre la rumorosità della traccia visualizzata: è un filtro passa-basso posto dopo il rivelatore che segue il filtro IF e prima del canale di deflessione Y del TRC.

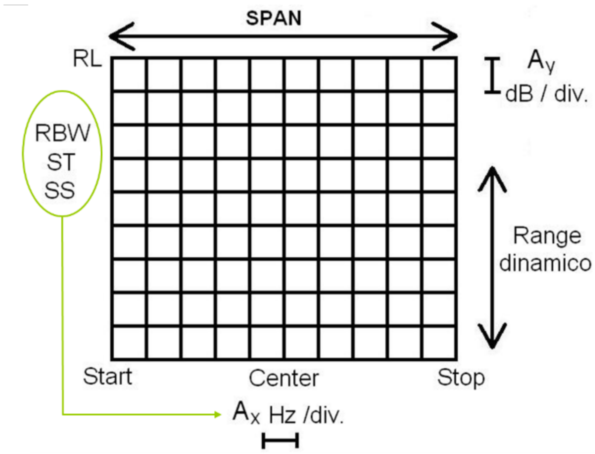
Il VCO dell'oscillatore locale è comandato da una rampa di tensione, di modo da produrre una scansione lineare della frequenza nel tempo.

Il tempo di risposta del filtro e del rilevatore non è istantaneo: $MT \approx \tau = k\frac{1}{RBW}$

Per un filtro gaussiano di solito $k = 3$

Allora il tempo di scansione totale è: $ST = N \times MT \approx k\frac{\Delta f_{span}}{RBW^2}$

PARAMETRI E FORMULE:



Reference level: $RL = [dBm]$

Frequency span: $\Delta f_{span} = f_{stop} - f_{start}$

Resolution BandWidth: $RBW = [Hz]$

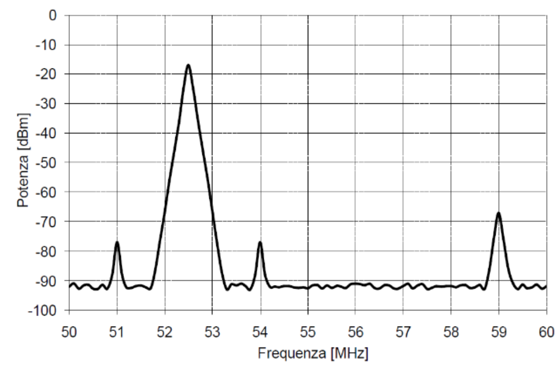
Equivalent points: $N = \frac{\Delta f_{span}}{RBW}$

Tempo di misura: $MT \approx \tau \approx k\frac{1}{RBW}$

Sweep time: $ST = N \cdot MT$

Sweep speed: $SS \approx \frac{\Delta f_{span}}{ST} \approx \frac{RBW}{MT}$

ESEMPIO:



$f_{start} = 50\ Mhz \quad f_{stop} = 60\ MHz \quad \Delta f_{span} = 10\ MHz$

Reference level: $RL = 0.dBm$ (livello più in alto)

Amplificazione verticale: $A_y = 10dBm/DIV$

$RBW = 100\ kHz$ (legato ad A_x, come?)

$ST = k\frac{\Delta f_{span}}{RBW^2} = k \cdot 100\mu s$

in genere $k = 3$ per tenere conto del tempo di risposta del filtro gaussiano

Rumore termico e fondo di rumore

$$P_{NOISE} = \int_{f_A}^{f_B} p(f)df$$

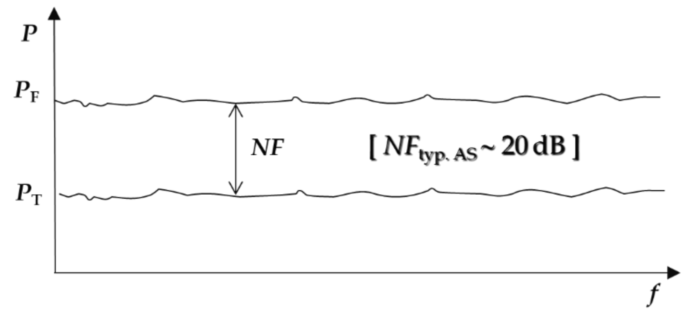
Dove $p(f)$ è la densità spettrale di rumore considerato.

Nel caso del rumore termico: $p_T = kT$ dove k è la costante di Boltzmann $k = 1{,}38 \times 10^{-23}$

In particolare, dunque: $P_T = p_T B = kTB\ [W]$ è il rumore termico in una banda B.

Se $T = 290K = 17°C$ che è circa la temperatura ambientale, allora $p_T \cong 4 \times 10^{-21}\frac{W}{Hz} = -174\ dBm/Hz$

$$P_T = p_T \times RBW = -174\ dBm + 10\log_{10}\left[\frac{RBW}{(1Hz)}\right]$$



<u>Noise Figure</u> NF (in numero o in dB) ci dice di quanto il rumore complessivo (termico+elettronico), detto "fondo di rumore", è superiore al "solo" rumore termico valutato alla temperatura di 290 K

$$NF = \frac{P_{F(\text{totale})}}{P_T}$$

Ricordando $P_T = kTB = kT \times RBW$

AS a FFT

Negli AS a *Fast Fourier Transform*, l'analisi spettrale si ottiene algoritmicamente per elaborazione numerica di segnali acquisiti nel tempo, in particolare l'elaborazione numerica della trasformata di Fourier discreta.

Sono prelevati dei campioni di un segnale $s(t)$ ogni periodo T_C ottenendo il segnale discreto $s_D(n) = s(nT_C)$, questo è utilizzato per creare una trasformata di Fourier discreta (DFT) per descrivere l'andamento del segnale. Il metodo di trasformazione è eseguito da processori dedicati mediante il procedimento di trasformata veloce di Fourier (FFT). Per ragioni di efficienza memoria i dati di input, quindi il numero di campioni, devono essere una potenza di 2.

Il segnale viene visualizzato per una sua finestra $T = NT_C$

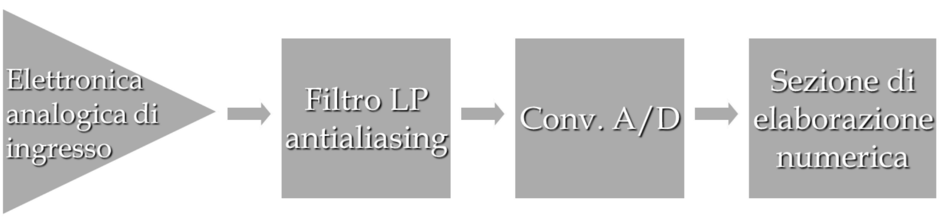
Risoluzione in frequenza Δf: $\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{1}{NT_C}$

La finestra di analisi temporale si estende per $NT_c = N\Delta t$ mentre quella di analisi spettrale per $N\Delta f$

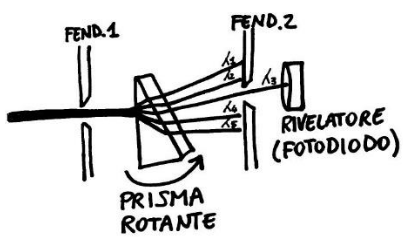
Massima frequenza dello spettro: $f_{max} = \frac{f_C}{2} = \frac{1}{2}N\Delta f$ che è la frequenza di Nyquist.

$$Nr.points = \frac{Nyquist}{RBW} = \frac{N}{2}$$

Se non è rispettato il teorema di Shannon si verificano fenomeni di *aliasing*

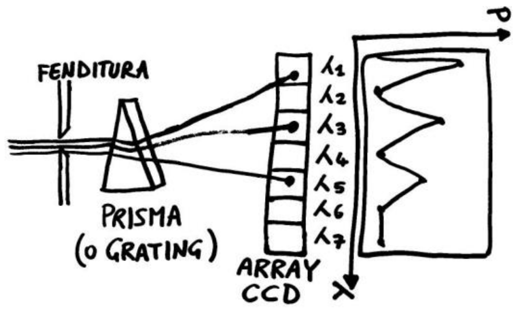


AS ottico



<u>Sequenziale</u>: sono trasmesse in successione su un unico rivelatore le diverse lunghezze d'onda

<u>Parallelo</u>:



Capitolo 8- affidabilità

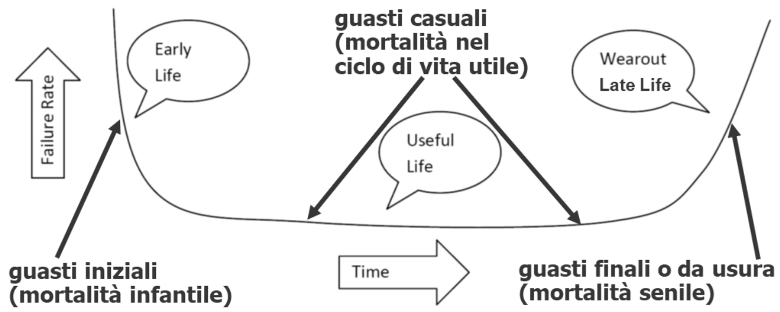
I componenti e sistemi sono inevitabilmente affetti dalla presenza di guasti non solo in produzione ma anche durante il loro impiego.

Intendiamo affidabilità (reliability) di un componente o di un sistema, o anche di una persona, la sua capacità di avere un ''corretto funzionamento'' per un tempo $0 - t$ in specificate condizioni d'impiego

Conoscendo l'affidabilità di un componente (sottointeso d'ora in poi) si ricava la probabilità che funzioni per un dato intervallo di tempo $[t_a - t_b]$

Guasti: riparabili o non riparabili

Si studia il tasso di guasto (Failure Rate) di un PC, di un aeroplano, di un impianto chimico, di una centrale nucleare, e si vuole sapere come cambia nel tempo la probabilità di guasto nell'unità di tempo

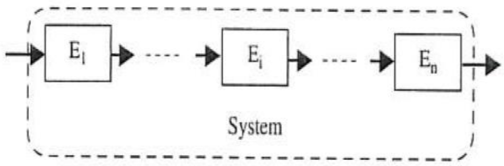


Il tasso di guasto $l(t)$ è ricavabile dalla conoscenza della funzione di affidabilità $R(t)$: empiricamente (analisi delle misure) o analiticamente (analisi statistica)

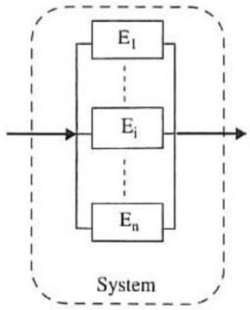
Prova di affidabilità: insieme di operazioni volte a determinare il comportamento (e il tempo di vita) di un componente sottoposto nel tempo a diverse condizioni operative

Una prova di laboratorio semplificata consiste nell'applicare al componente due differenti valori (*stress levels*) per una o più condizioni di lavoro (*stress*), con una serie di *k* cicli di *stress*

Un sistema, o apparecchiatura, composto da più elementi presenta una affidabilità che dipende dalle affidabilità dei suoi elementi costitutivi e da come essi sono disposti tra loro per ottenere il funzionamento del tutto



L'affidabilità di un sistema in serie dipende da quella del suo componente meno affidabile



L'affidabilità di un sistema in parallelo dipende da quella del suo componente più affidabile