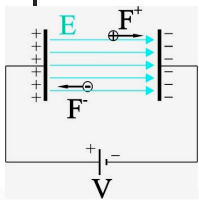


Oscilloscopio: schema e principio di funzionamento



Il concetto alla base del funzionamento di un oscilloscopio analogico (a placchette) è:

un fascio di elettroni può essere deviato da un campo elettrico E.

f : filamento

K : catodo

G : griglia

*A*₁ e *A*₂ : anodi focalizzatori

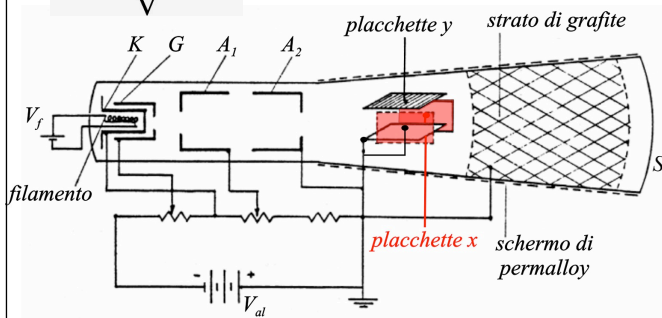
x : placchette deflettrici direzione *x*

y : placchette deflettrici direzione *y*

S : schermo (visualizzazione del segnale)

*V*_{ai}: tensione di accelerazione degli elettroni

*V*_f: tensione di alimentazione del filamento



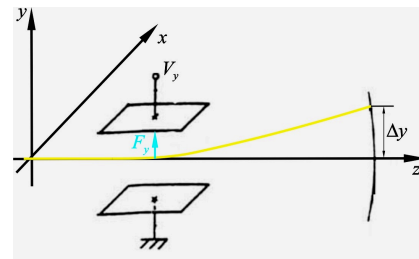
2

Oscilloscopio: principio di funzionamento

Si prenda in considerazione una singola carica elettrica che esce dal focalizzatore con velocità costante *u*_z: appena entrata nel condensatore, costituito dalle placchette, subirà una forza verticale proporzionale alla sua carica (*e*) e al campo elettrico (*E*_{*y*}) presente tra le armature.

*V*_{*y*} rappresenta la tensione imposta tra le placchette *y*.

$$|\bar{F}_y| = |e\bar{E}_y| = e \frac{V_y}{h}$$



La forza *F*_{*y*} imprime alla particella un'accelerazione lungo la direzione *y* pari a:

$$\bar{a}_y = \frac{\bar{F}_y}{m} = \frac{e V_y}{m h}$$

3

Oscilloscopio: principio di funzionamento

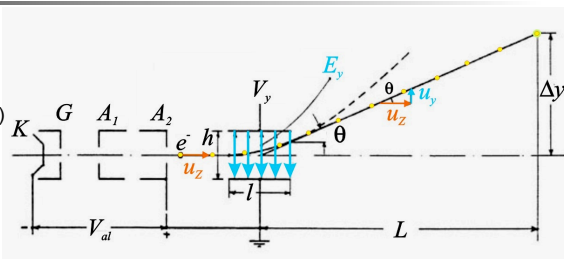
Il tempo impiegato per uscire dal campo elettrico (deviatore) *E*_{*y*} sarà: *t* = *l* / *u*_{*z*},

In cui *l* è la lunghezza delle placchette e *u*_{*z*} la velocità della particella.

La velocità dell'elettrone può essere calcolata dalla seguente relazione:

$$\frac{1}{2} m u_z^2 = e V_{ai}$$

In cui *V*_{ai} rappresenta la differenza di potenziale cui è soggetto l'elettrone durante il suo passaggio tra le placchette acceleratrici.



Nel tempo *t* di percorrenza, l'elettrone subisce un'accelerazione verticale *a*_{*y*} tale per cui all'uscita dal campo elettrico *E*_{*y*} la particella possiede una componente verticale della velocità *u*_{*y*} pari a:

$$u_y = a_y t = \frac{e V_y l}{m h u_z}$$

Questo può essere ritenuto vero anche per segnali variabili nel tempo se le variazioni della tensione *V*_{*y*} sono lente rispetto al tempo di transito dell'elettrone sotto le placche di deflessione

4

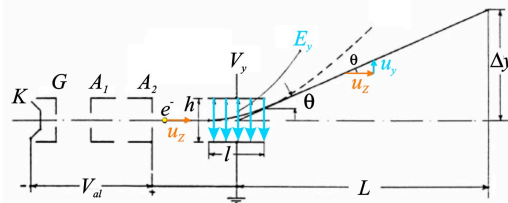
Oscilloscopio: sensibilità

L'angolo di uscita dell'elettrone dalle placchette y può quindi essere calcolato come:

$$\tan \theta = \frac{u_y e V_y l}{u_z m h u_z^2}$$

La deviazione Δy della traccia del pennello elettronico sullo schermo (rispetto al centro dello schermo) è:

$$\Delta y = L \tan \theta = L \frac{u_y e V_y l}{u_z m h u_z^2} = L \frac{u_y e V_y l}{u_z m h \frac{2eV_{al}}{m}} = \frac{1}{2} L \frac{l V_y}{h V_{al}}$$



Può quindi essere calcolata la sensibilità del dispositivo:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta V_y} = \frac{1}{2} L \frac{l}{h V_{al}}$$

Ipotizzando per le grandezze i seguenti valori:

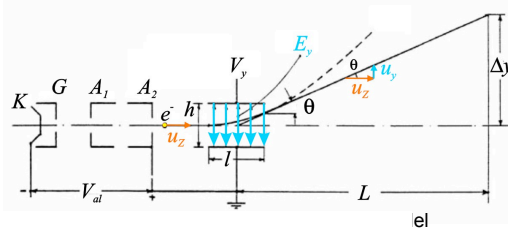
$L=400\text{mm}$; $l/h=20$; $V_{al}=4000\text{V}$, si ottiene una sensibilità dell'ordine di $S=1\text{mm/V}$.

Utilizzando un amplificatore a monte del segnale si raggiungono valori della sensibilità anche maggiori di $S=10\text{mm/mV}$

5

Oscilloscopio: sensibilità (2)

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta V_y} = \frac{1}{2} L \frac{l}{h V_{al}}$$



Aumentare sensibilità?

- aumentare L, ma
→ ingombri crescenti, defocalizzazione del fascio
- diminuire V_{al} , ma
→ minor energia cinetica, minor intensità luminosa sullo schermo

5

Oscilloscopio: banda passante

Poiché la massa dell'equipaggio mobile coincide con quella dell'elettrone, la banda passante dell'oscilloscopio è comunque molto elevata.

Il tempo di risposta dipende:

1. Dal tempo di risposta dell'amplificatore;
2. Dal tempo impiegato dall'elettrone per attraversare lo spazio fra le placchette nella direzione dell'asse del tubo catodico.

Per la prima limitazione ormai si costruiscono amplificatori con banda passante dell'ordine delle centinaia di MHz

Il tempo t di attraversamento delle placchette (ricordando la simbologia utilizzata in precedenza) è espresso dalla seguente relazione:

$$t = \frac{l}{u_z} = \frac{l}{\sqrt{2 \frac{e}{m} V_{al}}}$$

6

Oscilloscopio: banda passante

Il tempo di attraversamento delle placchette (ricordando la simbologia utilizzata in precedenza) è il seguente:

Con $l=20\text{mm}$; $e=1.6 \cdot 10^{-19}\text{C}$; $V_{al}=4000\text{V}$; $m=9 \cdot 10^{-31}\text{kg}$

$$t = \frac{l}{u_z} = \frac{l}{\sqrt{2 \frac{e}{m} V_{al}}}$$

Si ottiene un tempo di risposta dell'ordine di 10^{-9} ,
ossia una frequenza di taglio dell'ordine di 10^9Hz .

Dovendo assumere un ordine di grandezza in meno, ciò per consentire la visualizzazione corretta di almeno 10 valori di tensione che rapidamente si susseguono nel tempo, si può stimare una banda passante confrontabile con quella determinata dall'amplificatore e dell'ordine del centinaio di MHz.

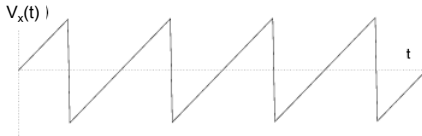
Per applicazioni particolari e con accorgimenti più o meno costosi, la banda passante può raggiungere l'ordine del GHz.

7

Oscilloscopio: visualizzazione del moto (1).

Per permettere una visualizzazione dell'andamento nel tempo del segnale in ingresso si impone all'elettrone (1) un moto verticale indotto dal segnale V_y da visualizzare (placchette y o "verticali"); ed (2) un moto orizzontale a velocità costante, imposto da un secondo campo elettrico, prodotto dalle armature di un'altra coppia di placchette, indicate in genere come "placchette x" o "placchette orizzontali", ortogonali a quelle di segnale descritte in precedenza.

Si utilizza solitamente imporre alle placchette orizzontali un segnale a dente di sega V_x del tipo rappresentato in figura sotto. In questo modo il pennello elettronico percorre ripetutamente lo schermo dell'oscilloscopio lungo la direzione x a velocità costante. Al fine di poter controllare tale velocità (poiché da essa dipende l'intervallo temporale entro cui il segnale V_y è rappresentato sullo schermo) è di cardinale importanza poter controllare la pendenza del segnale a dente di sega (ovvero il suo periodo).



$$V_x(t) = Kt;$$

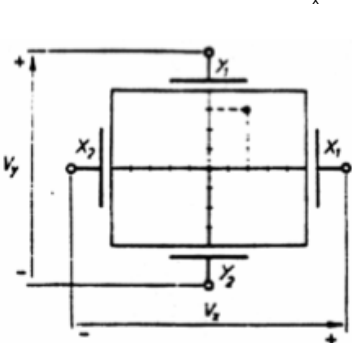
con t variabile tra $-T_x/2$ e $T_x/2$

Dove T_x rappresenta il periodo del dente di sega

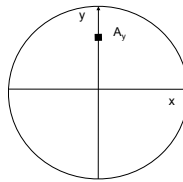
8

Oscilloscopio: visualizzazione del moto (2)

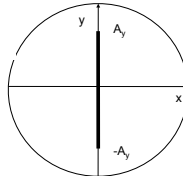
Esempi di visualizzazione sullo schermo al variare delle tensioni V_x e V_y alle placchette:



1. $V_y=A_y$; $V_x=0$



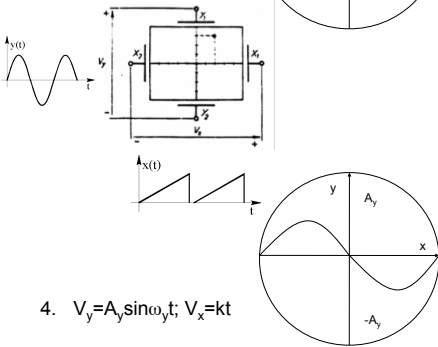
2. $V_y=A_y \sin \omega_y t$; $V_x=0$



9

Oscilloscopio: visualizzazione del moto (3)

3. $V_y = A_y$; $V_x = kt$



N.B.: Affinchè l'immagine a schermo resti fissa è necessario che il periodo T_x del segnale a dente di sega sia un multiplo o sottomultiplo intero del periodo T_y del segnale in ingresso!



sincronismo del segnale:

$T_x = M T_y$ oppure

$T_x = T_y / M$

Sempre con M intero.

Oscilloscopio: trigger.

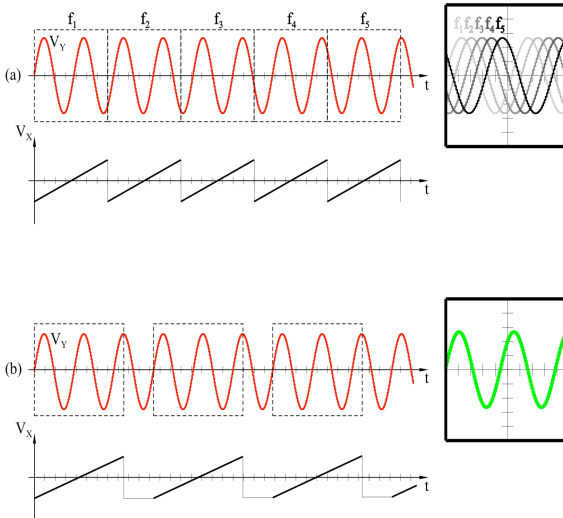
Nella pratica il segnale V_x a dente di sega è costituito da un insieme di rampe, ciascuna delle quali viene fatta partire quando per il segnale V_y si realizzano determinate condizioni. In genere:

Condizione (1) = $V_y > V_{trig}$

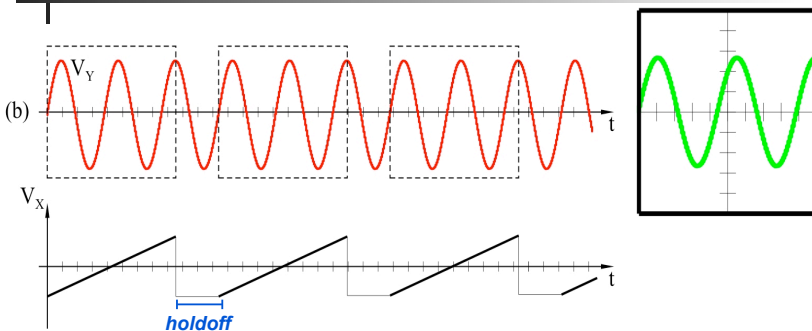
Condizione (2) = $dV_y/dt > 0$ oppure $dV_y/dt < 0$

Dove V_{trig} è la tensione di **trigger**

Il trigger costituisce l'insieme dei comandi deputati al sincronismo tra il segnale V_y ed il dente di sega V_x



Oscilloscopio: trigger (2)



Il trigger può essere regolato in:

- tensione di trigger (nell'esempio è zero), confrontata con la V in ingresso mediante un comparatore
- durata dell'**holdoff**
- sorgente (interna allo strumento oppure esterna)

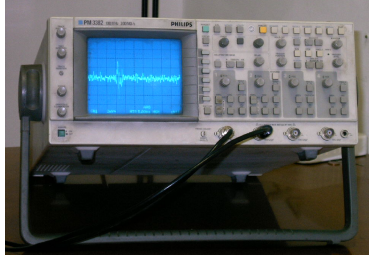
Il trigger può essere posto in **automatic**, ovvero viene avviato indipendentemente dall'ingresso.

Utile per segnali non periodici (DC) o con ambiguità nella V di ingresso da confrontare oer l'avvio del trigger (treni di impulsi...)

Oscilloscopio: impiego

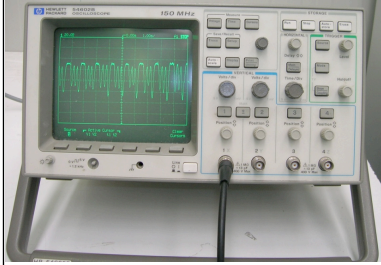
In virtù delle sue caratteristiche metrologiche, l'oscilloscopio viene impiegato fondamentalmente per **osservare forme d'onda** correlate a fenomeni che avvengono in **tempi estremamente brevi**.

L'oscilloscopio analogico, per sua natura, consente di osservare sullo schermo solo fenomeni periodici (v. trigger).



Oscilloscopi analogici che montano fosfori ad alta persistenza sullo schermo, permettono di osservare per brevi periodi di tempo (qualche minuto) anche fenomeni aperiodici.

I moderni oscilloscopi digitali, rispetto a quelli analogici, hanno il grande vantaggio di poter memorizzare i segnali visualizzati e possono pertanto essere impiegati anche per studiare fenomeni aperiodici come i transitori.



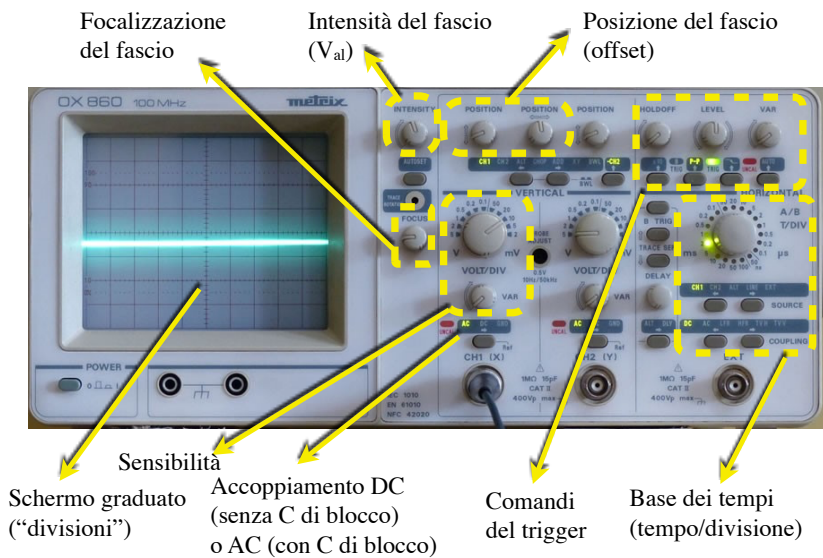
12

Enrico Silva - diritti riservati - Non è permessa, fra l'altro, l'inclusione anche parziale in altre opere senza il consenso scritto dell'autore

Oscilloscopio (segue)

Enrico Silva - diritti riservati - Non è permessa, fra l'altro, l'inclusione anche parziale in altre opere senza il consenso scritto dell'autore

Oscilloscopio analogico

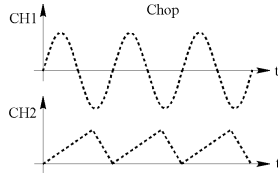


Oscilloscopio a due tracce

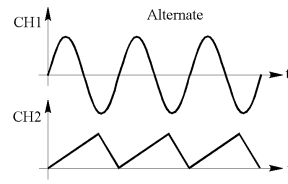
Pressoché tutti gli oscilloscopi in commercio possono visualizzare [almeno] due segnali (CH1, CH2) (*oscilloscopi a due tracce*) in due modalità:



“CHOP”: alle placchette di deflessione si applica successivamente CH1 e CH2 durante lo stesso periodo di trigger.



“ALTERNATE”: alle placchette di deflessione si applicano CH1 e CH2 alternativamente, in diversi periodi di trigger.



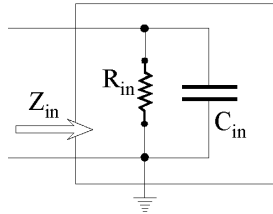
I due segnali possono anche essere visualizzati uno in funzione dell'altro (*modalità x-y*).

Applicazioni (esempi): – caratteristiche I-V
– sfasamenti (v. oltre)

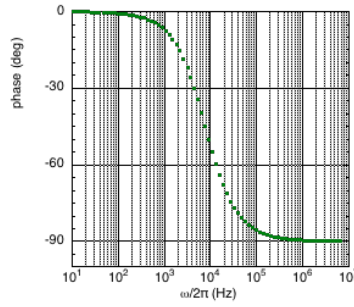
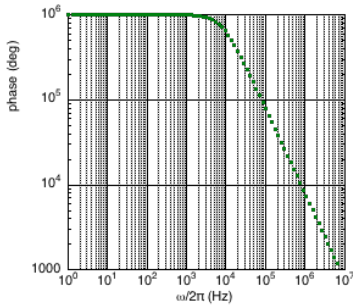
Oscilloscopio: impedenza di ingresso

- $R_{in} \sim 1M\Omega$
- $C_{in} \sim 20\text{ pF}$

$$Z_{in} = \frac{R_{in}}{1 + i\omega R_{in} C_{in}} = \frac{R_{in}}{1 + i\omega\tau}$$



taglio a ~10 MHz!



Oscilloscopio: impedenza di ingresso – 2

- $R_{in} \sim 1M\Omega$
- $C_{in} \sim 20\text{ pF}$

$$Z_{in} = \frac{R_{in}}{1 + i\omega R_{in} C_{in}} = \frac{R_{in}}{1 + i\omega\tau}$$

Funzione di trasferimento:

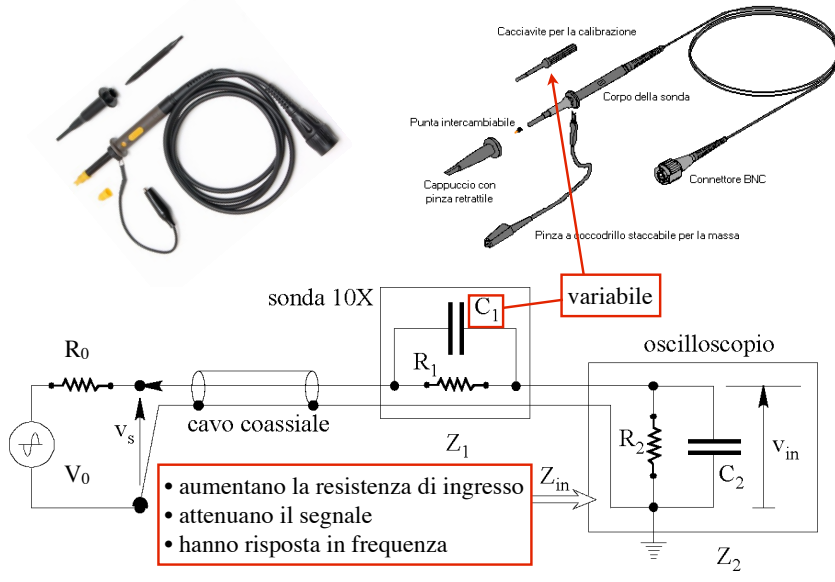
$$F = \frac{Z_{in}}{R_0 + Z_{in}} = \frac{R_{in}}{R_{in} + iR_0\omega R_{in} C_{in} + R_0} = \frac{1}{1 + i\omega\tau' + R_0/R_{in}} \approx \frac{1}{1 + i\omega\tau'}$$

con $\tau' = [R_0/R_{in}]\tau \ll \tau$

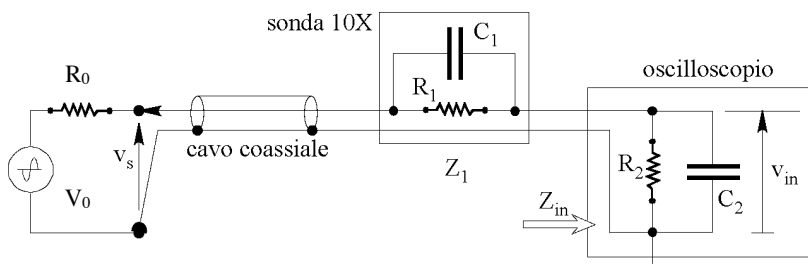
$$R_0 \ll R_{in}$$

Alcuni oscilloscopi forniscono un ingresso con $R_{in} = 50\ \Omega$: τ diminuisce molto ($1/i\omega C \gg R_{in}$)! (a spese ovviamente dell'errore di inserzione: può rendersi necessario attuare una trasduzione del segnale a monte)

Sonde di tensione - 1



Sonde di tensione - 2



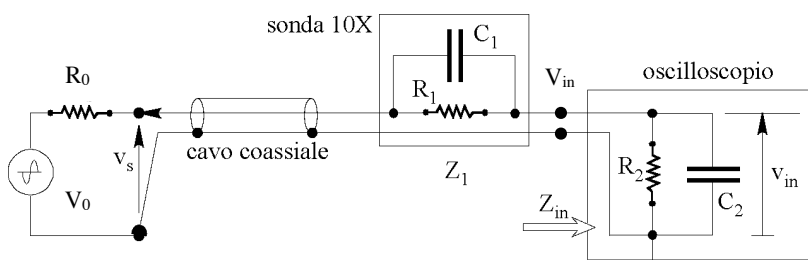
Sonda tipica 10 X (attenuazione 10):

$R_1 = 9 R_2$ quindi solitamente $R_2 = 9 \text{ M}\Omega$ (da cui attenuazione DC 10)

C_1 compensa la dipendenza dalla frequenza dell'attenuazione, se $R_1 C_1 = R_2 C_2$

NON dell'oscilloscopio!

Sonde di tensione - 3



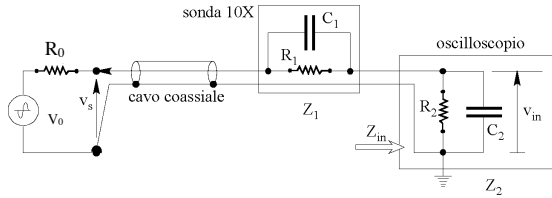
C_1 compensa la dipendenza dalla frequenza dell'attenuazione, se $R_1 C_1 = R_2 C_2$

Funzione di trasferimento della sonda (V_{in}/V_s):

$$F_{s,o} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2} = \frac{\frac{1}{R_1}(1 + i\omega\tau_1)}{\frac{1}{R_1}(1 + i\omega\tau_1) + \frac{1}{R_2}(1 + i\omega\tau_2)}$$

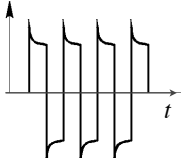
indipendente da ω solo per $\tau_1 = \tau_2 \rightarrow$ necessità di variare C_2 (ovvero τ_2)

Sonde di tensione - 4

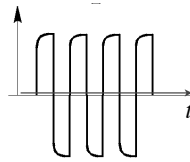


$\tau_1 > \tau_2 \rightarrow$ la componente capacitiva $1/i\omega C_1$ della sonda accentua la trasmissione delle alte frequenze, *anticipa* in fase ("sovracompensazione").

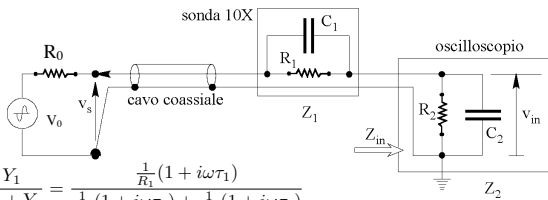
$\tau_1 < \tau_2 \rightarrow 1/i\omega C_1$ è "grande", e la sonda attenua la trasmissione delle alte frequenze, *ritarda* in fase ("sottocompensazione").



risposta a un'onda quadra (alte frequenze: componente "ripida" dell'onda quadra)



Oscilloscopio + sonda



$$F_{s,o} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2} = \frac{\frac{1}{R_1}(1 + i\omega\tau_1)}{\frac{1}{R_1}(1 + i\omega\tau_1) + \frac{1}{R_2}(1 + i\omega\tau_2)}$$

sonda perfettamente compensata: $Z_{tot} = Z_1 + Z_2 = \frac{R_1}{1 + i\omega\tau_1} + \frac{R_2}{1 + i\omega\tau_2} = \frac{R_1 + R_2}{1 + i\omega\tau}$ ($\tau_1 = \tau_2$)

e rispetto alla tensione del segnale V_0 :

$$R_0 \ll R_1 + R_2$$

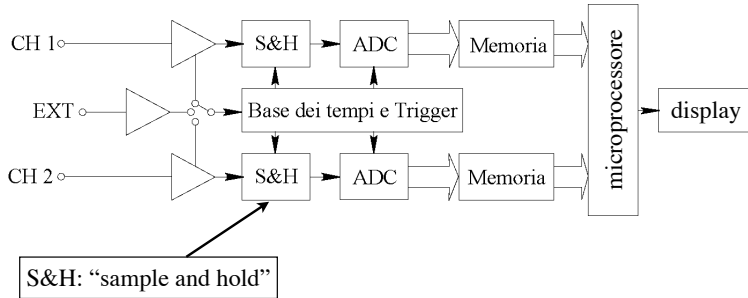
$$F_{tot} = \frac{V_s}{V_0} = \frac{Z_{tot}}{Z_{tot} + R_0} = \frac{\frac{R_1 + R_2}{1 + i\omega\tau}}{R_0 + \frac{R_1 + R_2}{1 + i\omega\tau}} = \frac{R_1 + R_2}{R_0 + R_1 + R_2 + R_0 i\omega\tau} \approx \frac{1}{1 + i\omega\tau \frac{R_0}{R_1 + R_2}} \equiv \frac{1}{1 + i\omega\tau''}$$

con $\tau'' = \tau \frac{R_0}{R_1 + R_2} \ll \tau \rightarrow$ aumento della banda passante (fattore circa 10)! (confronta con τ' senza sonda)

Oscilloscopio digitale

Oscilloscopio digitale – 1

- converte i segnali analogici in forma digitale
- dotato di memoria, quindi il display può essere “lento” rispetto all’osc. analogico
- può rilevare e visualizzare eventi singoli (\neq analogico)
- è comunque più veloce che accurato \rightarrow modesta risoluzione del display
- possibilità di elaborazioni automatizzate (rapporti, somme, valori medi/efficaci/massimi, FFT)



Oscilloscopio digitale – 2

Velocità vs. accuratezza \rightarrow uso di convertitori FLASH.
Campionamento da 100 ksample/s (economici) a > 20 Gsample/s (\$\$\$)
 \rightarrow limite dato da:
adeguata velocità degli stadi di ingresso (amplificatori, sonde)
teorema del campionamento

Memoria: la dimensione determina quanti punti possono essere visualizzati!
Molto diversa a seconda degli oscilloscopi (\$-\$\$\$): 10^3 - 10^8 punti.
 \rightarrow limite su

lunghezza del segnale visualizzabile
frequenza di campionamento (stessi tempi di misura/diverso campionamento a seconda della memoria disponibile)
Memoria FIFO

Oscilloscopio digitale – trigger

I dati sono comunque campionati e in memoria. (FIFO, i nuovi dati prendono il posto dei più vecchi)

Trigger nell’oscilloscopio digitale: determina quando prelevare i dati dalla memoria per la visualizzazione. NON determina la “presa dati”, ma la visualizzazione.

È possibile il *pretrigger*, ovvero la visualizzazione di N campioni *precedenti* al trigger. Tale valore è spesso una impostazione dell’utente. Usando il 50%, si ottiene la possibilità di centrare la rappresentazione al centro dello schermo.

Esempio: è possibile attendere un evento e visualizzare la forma d’onda per un certo tempo (un certo numero di campioni) *precedenti* all’evento stesso.

Campionamento – richiami

1

Lucidi a cura del dott. Andrea Scorza
Dipartimento di Ingegneria, Università Roma Tre Text

Sorgenti di segnale e sistemi di misura – segnali analogici

1

Segnale analogico: segnale il cui stato è “analogo” alla grandezza fisica G da cui ha avuto origine.



Il segnale analogico nel rappresentare la grandezza G di origine (es. tensione, corrente, ecc.), varia seguendo l'andamento di quest'ultima, ossia “in analogia” con essa

Peculiarità del segnale analogico:

- Può assumere infiniti valori nel suo campo di variabilità: è **continuo**.
- Varia con la medesima velocità con cui varia la grandezza G di origine (ha medesimo contenuto frequenziale o banda)

Conversione A/D

2

Quali sono gli svantaggi dell'utilizzo di segnali analogici?

- DIFFICOLTA' di MEMORIZZAZIONE
- SPAZIO (ingombro del supporto)
- DEPERIBILITA' del supporto
- INCERTEZZA introdotta dai SISTEMI DI REGISTRAZIONE
- LIMITATA POSSIBILITA' DI ELABORAZIONE a posteriori
- DIFFICILE REPERIBILITA' della singola INFORMAZIONE
- RUMORE

+ ELABORARE e MEMORIZZARE

→ TECNOLOGIA DIGITALE

Conversione A/D

3

Quali sono i vantaggi dell'utilizzo di segnali digitali?

- SPAZIO limitato dei supporti di memorizzazione (ingombri limitati dei supporti)
- limitata DEPERIBILITA' del supporto
- ELEVATA POSSIBILITA' DI ELABORAZIONE a posteriori
- REPERIBILITA' della singola INFORMAZIONE
- ELEVATA CAPACITA' INFORMATIVA (es. l'acquisizione di un segnale per via digitale può protrarsi per tempi molto lunghi senza eccessive difficoltà)

Conversione A/D

4

Il segnale digitale è il risultato della CONVERSIONE A/D del corrispondente segnale analogico, quest'ultima può essere schematizzata in tre fasi:

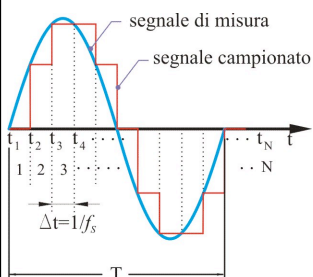
- DISCRETIZZAZIONE (o CAMPIONAMENTO)
- QUANTIZZAZIONE
- CODIFICA

Il dispositivo che attua la conversione A/D viene indicato genericamente con il termine di CONVERTITORE ANALOGICO/DIGITALE (Analog to Digital Converter o ADC)

Conversione A/D – Campionamento (1)

5

Durante la discretizzazione il segnale di misura viene campionato: TRACK&HOLD, SAMPLE&HOLD



Qualsiasi sia il metodo e la circuiteria adottati per il campionamento, essi dipendono comunque dalla FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO f_s (sampling frequency)

f_s : numero di campioni per unità di tempo/spazio impiegati per descrivere il segnale



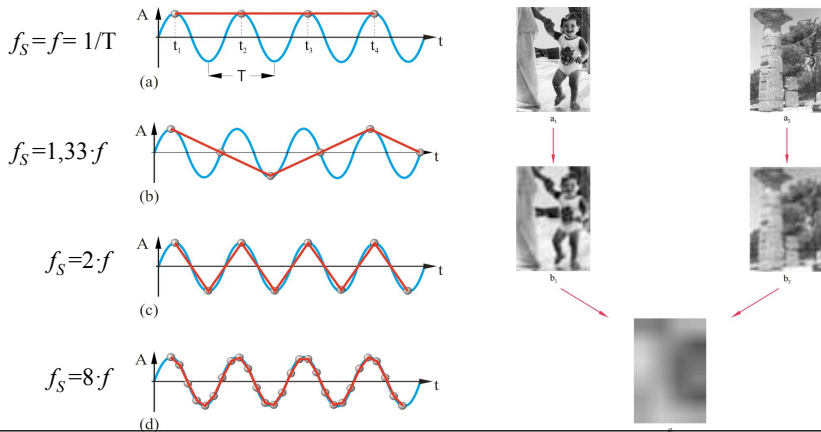
Teorema di NYQUIST-SHANNON:

$f_s > 2 f_{MAX}$ dove f_{MAX} è l'armonica più alta del segnale da campionare (tale da consentire una adeguata scomposizione del segnale in ingresso secondo serie di Fourier)

Conversione A/D – Campionamento (2)

6

Se la frequenza di campionamento f_s non è superiore a 2 volte la frequenza caratteristica del segnale $f=1/T \rightarrow$ **ALIASING**. Per un corretto campionamento $f_s \approx 10 f_{MAX}$.



Conversione A/D – Quantizzazione (1)

7

Durante la quantizzazione il segnale campionato viene ricondotto a livelli definiti (o "quantizzati")

Il numero n di **bit** utilizzati per rappresentare il segnale analogico determina la **RISOLUZIONE** dell'ADC:

$$LSB = \frac{Range}{2^n - 1}$$

n = numero di bit

Range = intervallo tra il massimo ed il minimo livello del segnale analogico che l'ADC può digitalizzare

Il LSB (Least Significant Bit) individua teoricamente la più piccola variazione del segnale analogico in ingresso che può essere rilevata e convertita dall'ADC.

Conversione A/D - Quantizzazione

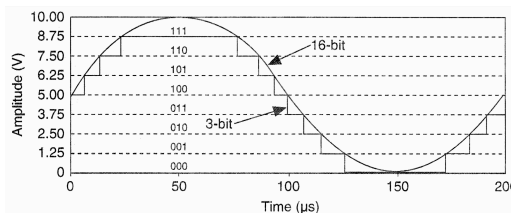
8

Es. ADC 3bit vs 16bit

Range=10V

$$LSB_{3bit} = \frac{10}{2^3 - 1} = 1,43 \text{ V}$$

$$LSB_{16bit} = \frac{10}{2^{16} - 1} = 0,15 \text{ mV}$$



in un SAD n è fisso, pertanto è necessario valutare attentamente il campo di variazione del segnale di misura ed eventualmente adattarlo al Range dell'ADC (es. tramite guadagno di un Programmable Gain Amplifier o PGA) in modo da evitare lo "spreco" di bit di risoluzione.

- $n=8bit \rightarrow 256$ livelli
- $n=10bit \rightarrow 1\ 024$ livelli
- $n=12bit \rightarrow 4\ 096$ livelli
- $n=16bit \rightarrow 65\ 536$ livelli
- $n=24bit \rightarrow 16\ 777\ 216$ livelli

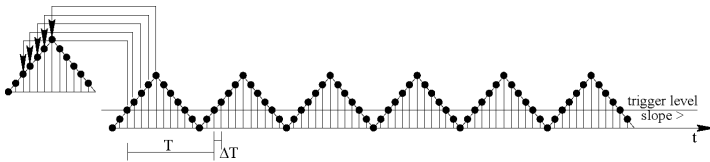
Es. Range 10V vs 20V, ADC 3bit

$$LSB_{3bit} = \frac{10}{2^3 - 1} = 1,43 \text{ V} \quad LSB_{3bit} = \frac{20}{2^3 - 1} = 2,86 \text{ V}$$

Oscilloscopio digitale: metodi di campionamento

Campionamento real time (in tempo reale)

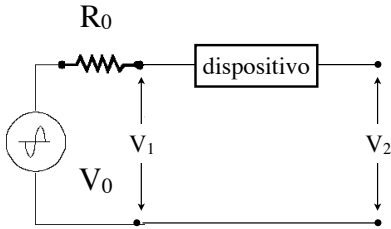
- Utilizzato da [quasi] tutti gli oscilloscopi digitali
- campioni acquisiti sequenzialmente
- campioni acquisiti a intervalli temporali *equispaziati*.
- visualizzazione: data dal trigger
- banda passante: data da $\min\{f_c, f_{an}\}$ dove $f_c = 1/\Delta T$ è la frequenza di campionamento e f_{an} è la banda passante della circuiteria analogica.



Equivalent time sampling (in tempo equivalente)

- Adatto a segnali che si ripetono
- Richiede base di tempi stabile
- La forma d'onda viene ricostruita a partire da *numerosi* intervalli di ripetizione della forma stessa

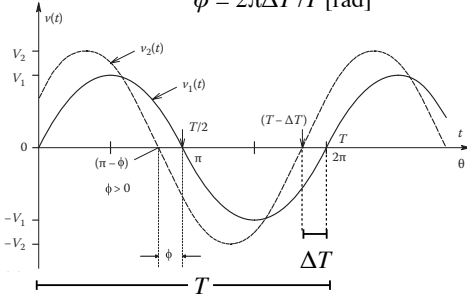
Misura di fase relativa – 2: doppia y



$$V_1 = V_{xM} \sin \omega t \rightarrow \text{CH1}$$

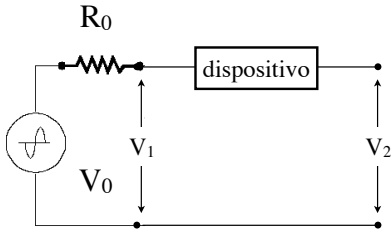
$$V_2 = V_{yM} \sin(\omega t + \phi) \rightarrow \text{CH2}$$

$$\phi = 2\pi \Delta T / T \text{ [rad]}$$



- centrare sullo 0 i canali!
- attenzione alle funzioni di trasferimento (oscilloscopio e sonda)
- è su CH2 che vi sono le maggiori limitazioni in frequenza: CH1 non dà significativo contributo al comportamento del dispositivo

Misura di fase relativa – 3: xy

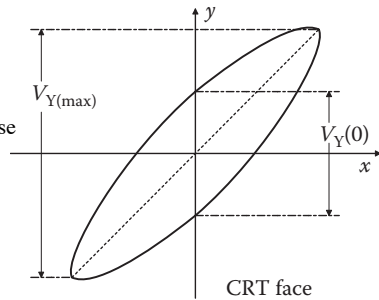


$$V_1 = V_{xM} \sin \omega t \rightarrow \text{base dei tempi, } V_x$$

$$V_2 = V_{yM} \sin(\omega t + \phi) \rightarrow \text{CH1, } V_y$$

$$\begin{cases} V_x(t) = V_{xM} \sin \omega t & \text{equazione dell'ellisse} \\ V_y(t) = V_{yM} \sin(\omega t + \phi) & \text{parametrica} \end{cases}$$

$$\sin \phi = V_y(t=0) / V_{yM}$$



Misura di fase relativa – 4: xy

$$\begin{cases} V_x(t) = V_{xM} \sin \omega t & \text{equazione dell'ellisse} \\ V_y(t) = V_{yM} \sin(\omega t + \phi) & \text{parametrica} \end{cases}$$

$$\sin \phi = V_y(t=0) / V_{yM}$$

In fase ($\phi = 0$)

ellisse degenera in una retta (I e III quadrante),

pendenza V_{yM} / V_{xM} .

Stessa ampiezza \rightarrow pendenza 45°

Opposizione di fase ($\phi = 180^\circ$)

ellisse degenera in una retta (II e IV quadrante),

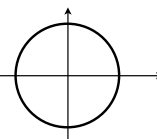
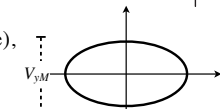
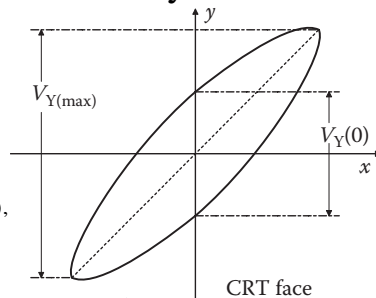
pendenza $-V_{yM} / V_{xM}$

Stessa ampiezza \rightarrow pendenza 135°

In quadratura ($\phi = \pm 90^\circ$)

Ellisse con i semiassi coincidenti con gli assi x e y.

Stessa ampiezza \rightarrow cerchio



Con le stesse scale X e Y sull'oscilloscopio!!!

⚠ il canale x può non essere sufficientemente veloce! metodo limitato a frequenze "basse"