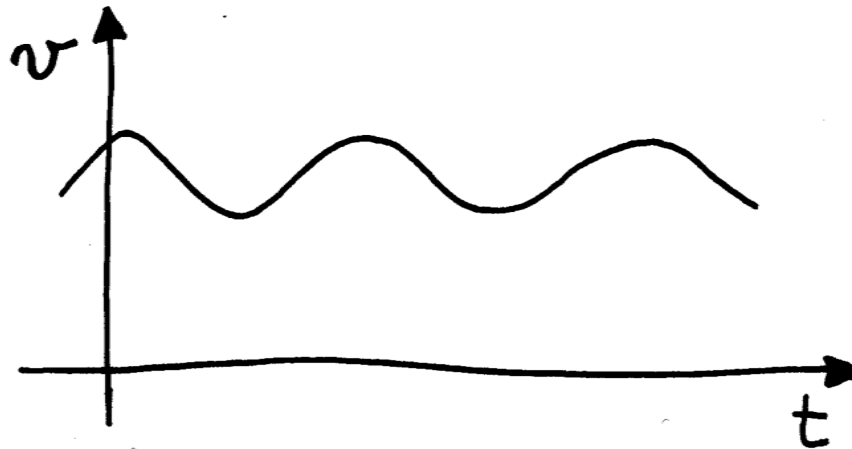




OSCILLOSCOPI ANALOGICI

L'oscilloscopio (oscillografo)

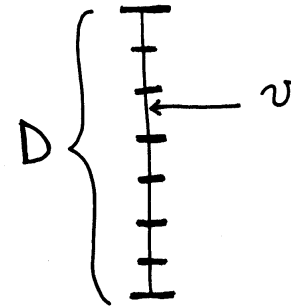
E' uno strumento di misura che consente la visualizzazione grafica dell'evoluzione temporale di un segnale di tensione (in ordinata) in funzione del tempo (in ascissa)



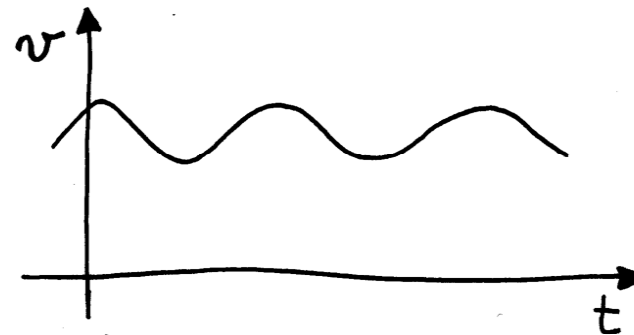
Utilizzando scale calibrate e graduate, è possibile effettuare misure quantitative oltre che qualitative

Confronto tra Strumenti di Misura

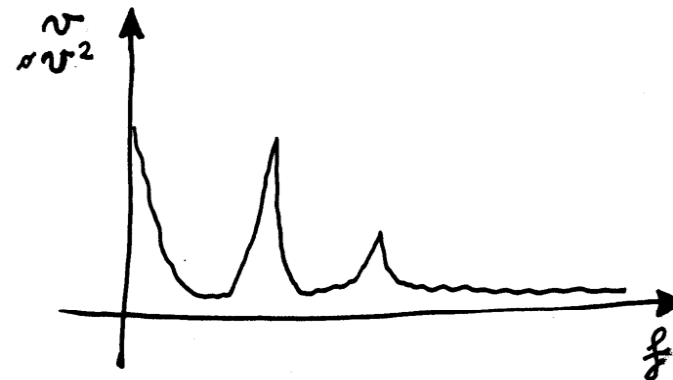
1) VOLTMETRI



2) OSCILLOSCOPI



3) ANALIZZATORI DI SPETTRO

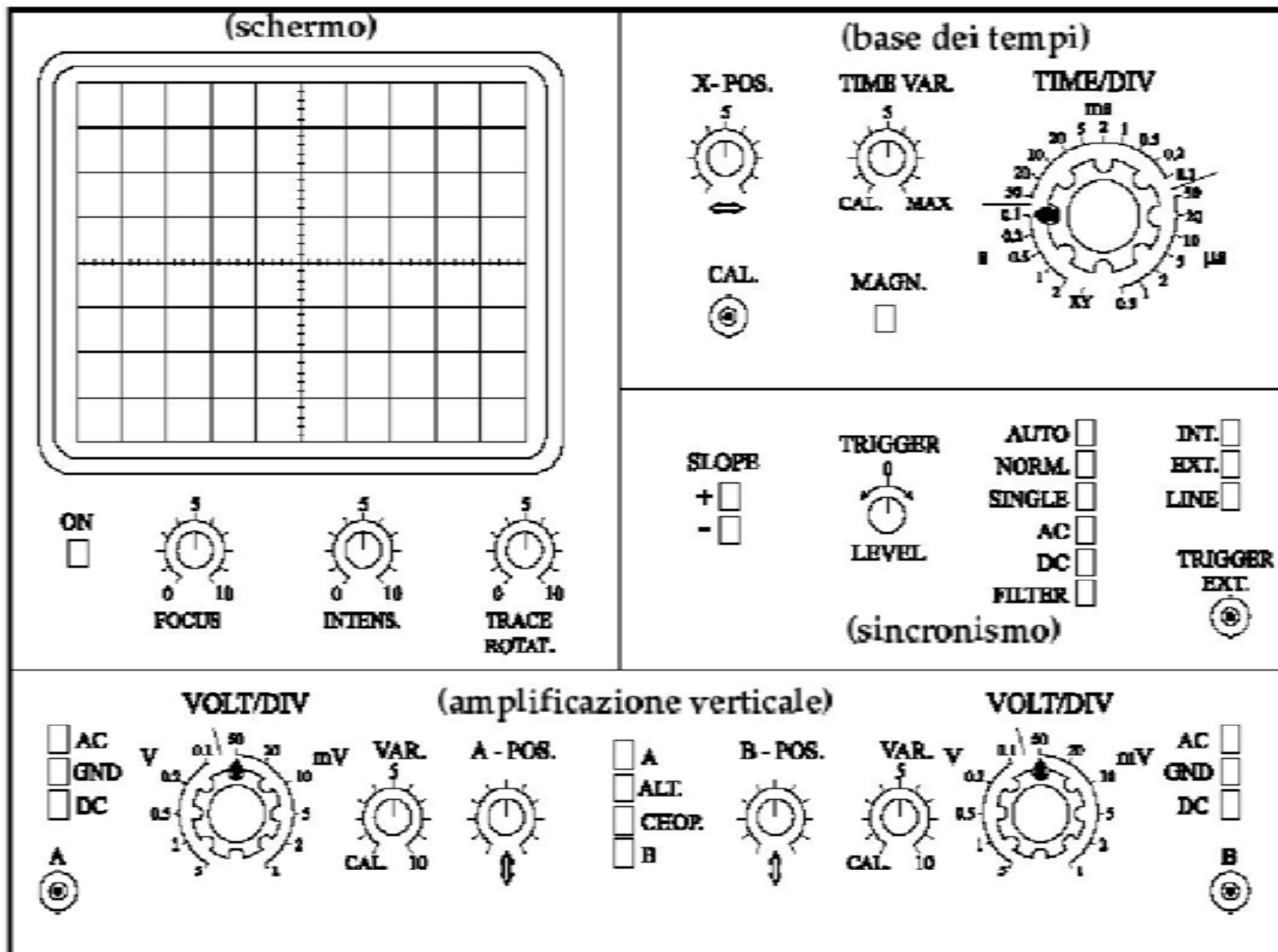


Sezioni dell'Oscilloscopio

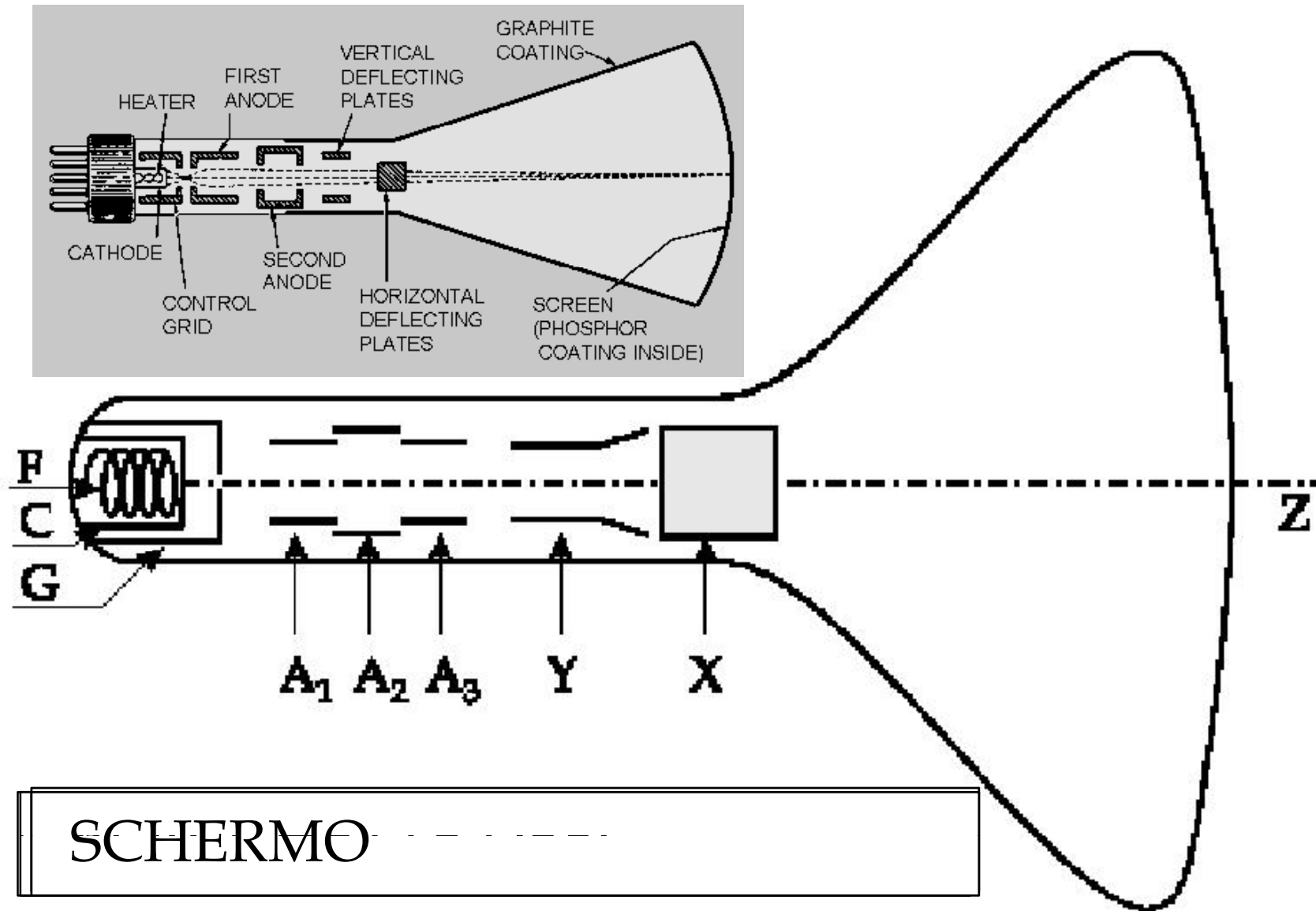
4 SEZIONI PRINCIPALI

- 1) Schermo e regolazione della traccia
- 2) Condizionamento e amplificazione verticale
(accoppiamenti e guadagni d'ingresso)
- 3) Sincronismo (trigger)
- 4) Base dei tempi (amplificazione orizzontale)

Pannello frontale



Tubo a raggi catodici (TRC o CRT)

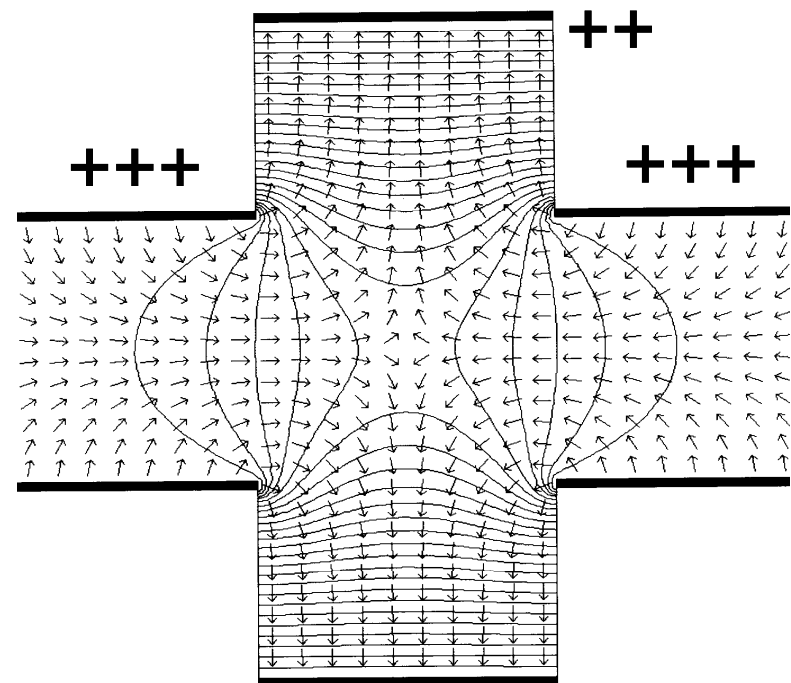


Lente elettrostatica

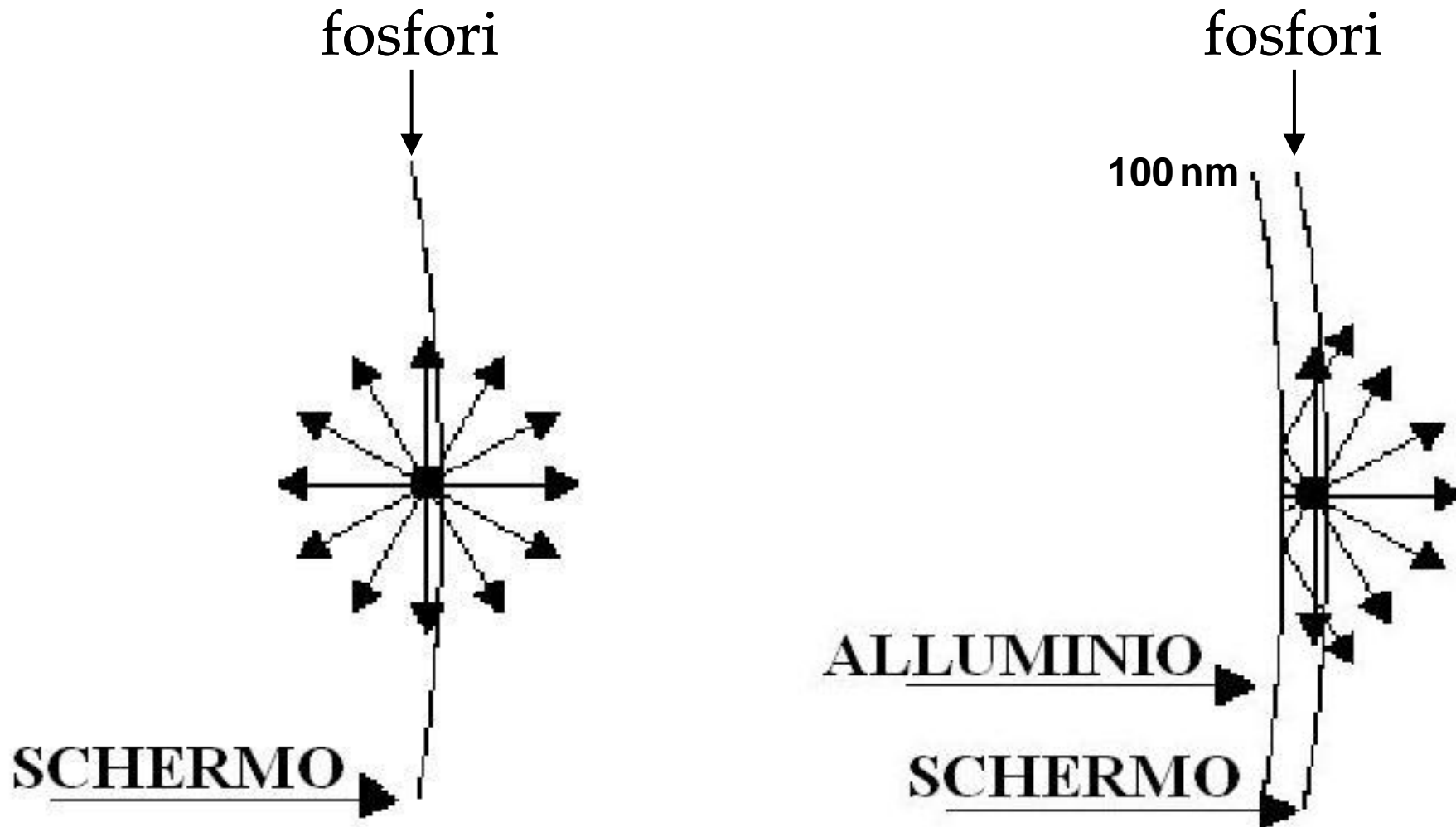


Sotto l'elettrodo centrale si crea un campo elettrico radiale con direzione centrifuga

L'elettrone, con carica negativa, è spinto in direzione centripeta e viene dunque "rifocalizzato" lungo l'asse Z del TRC

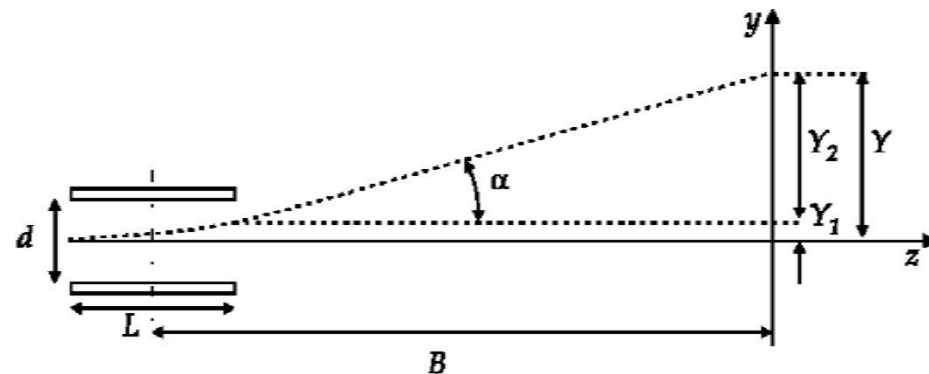


Alluminazione dello schermo



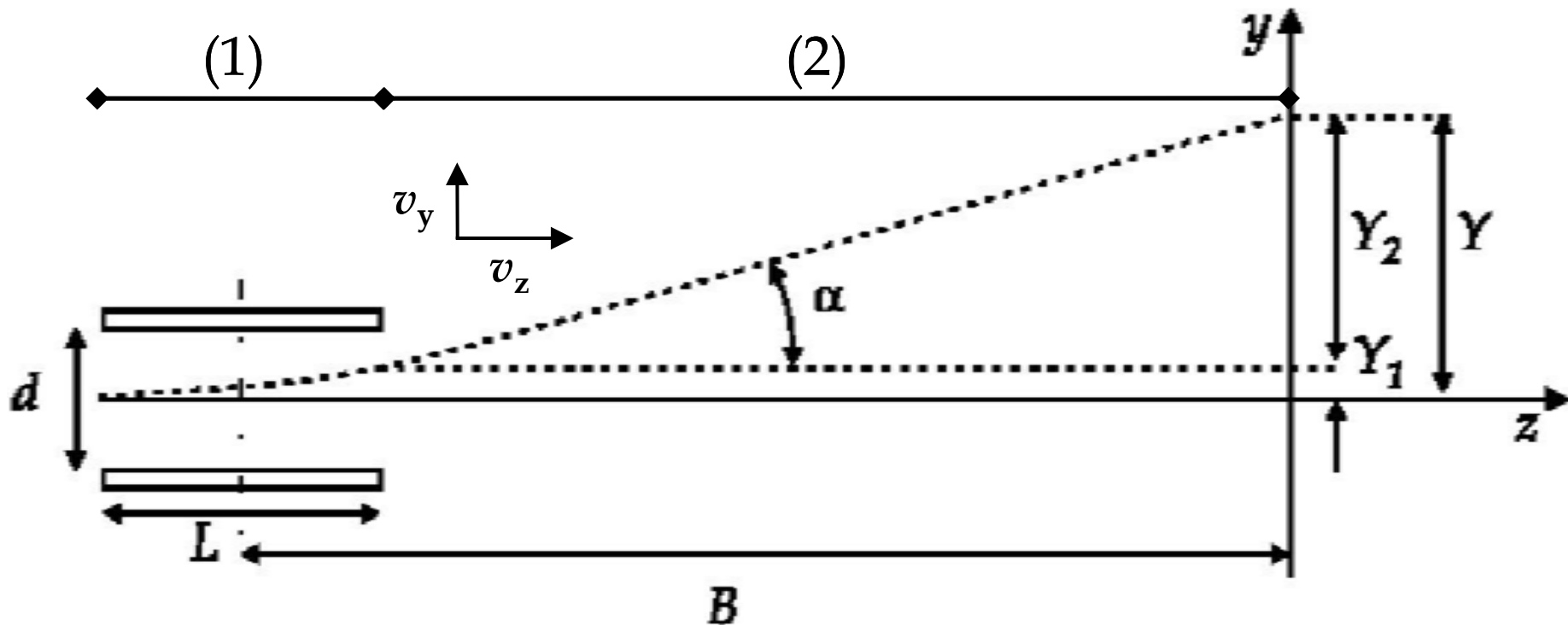
Parametri del TRC

- B la distanza tra lo schermo e il punto centrale delle placchette di deflessione;
- L la lunghezza delle placchette;
- d la distanza tra le due placchette;
- V_y la tensione applicata alle placchette;
- V_{acc} la tensione applicata tra anodo e catodo, che ha prodotto (nel triodo) l'accelerazione del fascio nella direzione z



Deflessione verticale

La velocità v_z (dopo il triodo) si mantiene costante



(1) zona ad accelerazione (verticale) costante

(2) zona con moto rettilineo uniforme (v_y e v_z cost.)

Sensibilità statica (1/3)

Si supponga inizialmente che V_y sia costante e che il campo elettrico da essa prodotto tra le placchette si possa ritenere uniforme e quindi di ampiezza

$$E_y = -V_y/d$$

forza $F_y = qE_y = -e \frac{-V_y}{d} = \frac{eV_y}{d} \Rightarrow a_y = \frac{eV_y}{m_e d}$

energia $eV_{\text{acc}} = \frac{1}{2} m_e v_z^2 \Rightarrow v_z = \sqrt{\frac{2 e V_{\text{acc}}}{m_e}}$

tempo (di volo) $\tau = \frac{L}{v_z} = L \sqrt{\frac{m_e}{2 e V_{\text{acc}}}}$ naturalmente $v_y = a_y \tau$

Sensibilità statica (2/3)

Parametri del TRC: $d=4$ mm $L=2$ cm $B=40$ cm
 $V_y=\pm 160$ V $V_{acc}=4$ kV

Costanti fisiche: $e=1.6\times 10^{-19}$ C $m_e=9.1\times 10^{-31}$ kg

$$a_y = \frac{eV_y}{m_e d} = 7\times 10^{16} \text{ m/s}^2 \gg g=9.8 \text{ m/s}^2$$

$$v_z = \sqrt{\frac{2eV_{acc}}{m_e}} = 3.7\times 10^7 \text{ m/s} \approx c/10$$

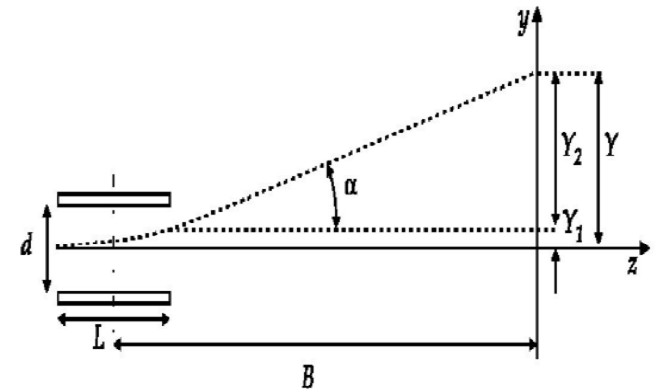
$$\tau = \frac{L}{v_z} = 0.5 \text{ ns} \qquad T_z = \frac{B}{v_z} = 11 \text{ ns} \qquad v_y = a_y \tau = 3.7\times 10^6 \text{ m/s}$$

Sensibilità statica (3/3)

$$v_y(t_0 + \tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} a_y dt = \frac{eV_y}{m_e d} \tau \equiv v_y \quad \tan \alpha = \frac{v_y}{v_z}$$

$$Y_1 = \frac{1}{2} a_y \tau^2 = \frac{1}{2} \frac{eV_y}{m_e d} \tau^2 = \frac{1}{2} v_y \tau = \frac{v_y}{v_z} \frac{L}{2}$$

$$Y_2 = \left(B - \frac{L}{2} \right) \tan \alpha = \left(B - \frac{L}{2} \right) \frac{v_y}{v_z}$$



$$Y = Y_1 + Y_2 = B \frac{v_y}{v_z} = B \frac{L}{2V_{acc}} \frac{V_y}{d} = \frac{BLV_y}{2dV_{acc}}$$

ampl. vert.
[V/cm]=[V/DIV]
1/sensibilità

$$S_s = \frac{Y}{V_y} = \frac{BL}{2dV_{acc}}$$

[cm/V]
" = 0.25 mm/V "
(con 160 V → 4 DIV)

Sensibilità dinamica (1/3)

Si consideri ora il caso di un segnale sinusoidale, e quindi variabile nel tempo, applicato alle placchette di deflessione verticali

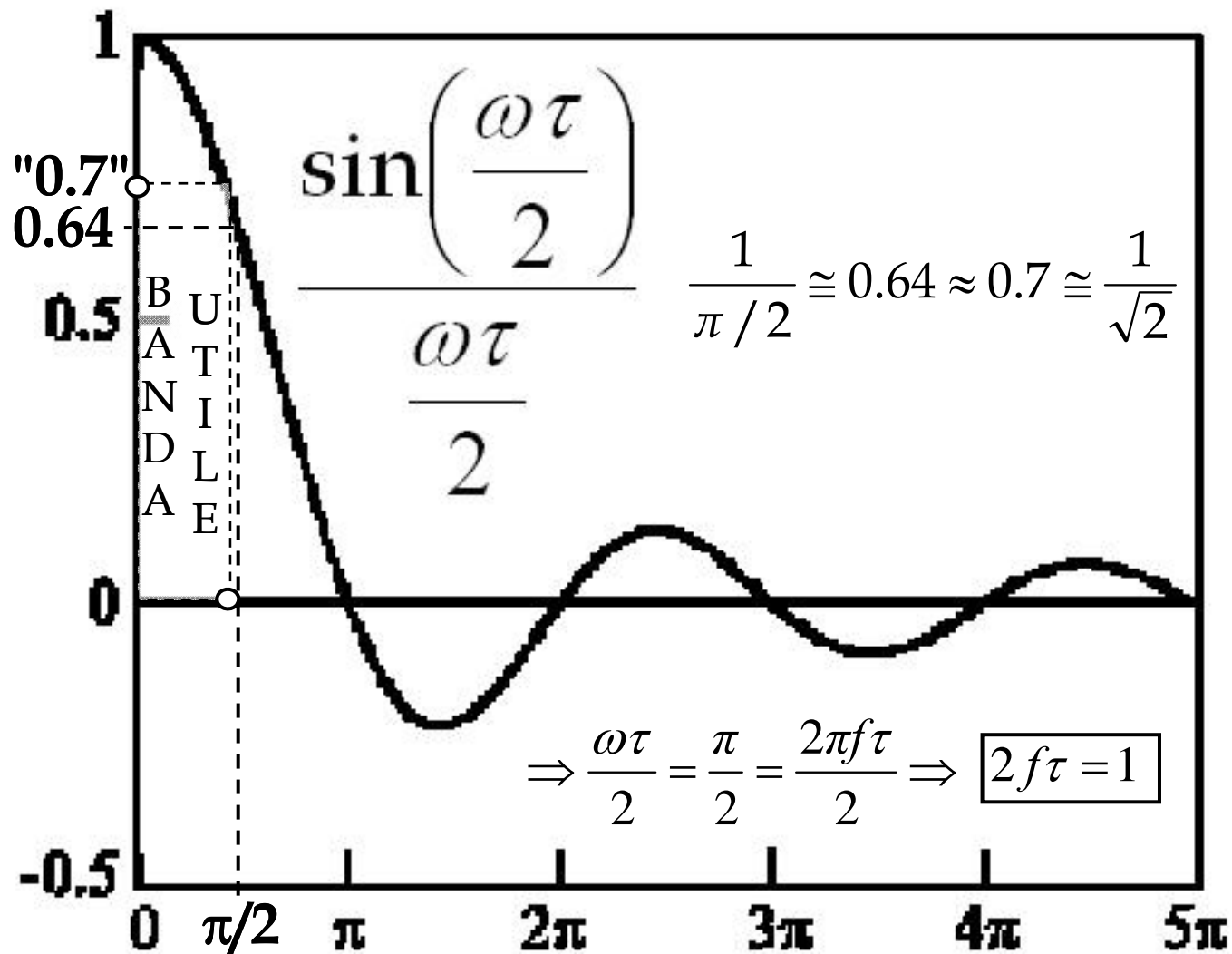
$$V_y(t) = V_y \sin(\omega t + \varphi) = V_y \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi\right)$$

$$Y = Y_1 + Y_2 \cong B \tan \alpha = B \frac{v_y(t_0 + \tau)}{v_z} \quad \text{si dimostra} \equiv \text{facendo i calcoli di } Y_1 (a_y \text{ variabile}) \text{ e } Y_2 (v_y \text{ costante})$$

$$v_y(t_0 + \tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} a_y dt = \frac{eV_y}{m_e d} \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \sin(\omega t + \varphi) dt \quad v_z = \sqrt{\frac{2eV_{\text{acc}}}{m_e}}$$

$$S_{d.} = \frac{Y}{V_y} = \frac{BL}{2dV_{\text{acc}}} \frac{\sin\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)}{\frac{\omega\tau}{2}} = S_{s.} \frac{\sin\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)}{\frac{\omega\tau}{2}}$$

Sensibilità dinamica (2/3)



Sensibilità dinamica (3/3)

Frequenza massima di lavoro è f_{\max} t.c. :

$$\frac{\omega\tau}{2} = \frac{\pi}{2} \text{ per cui l'ampiezza si riduce di } \frac{1}{\pi/2} \cong 0.64 \approx 0.7 \cong \frac{1}{\sqrt{2}}$$

“Banda utile” di lavoro per “misure non distorte”:

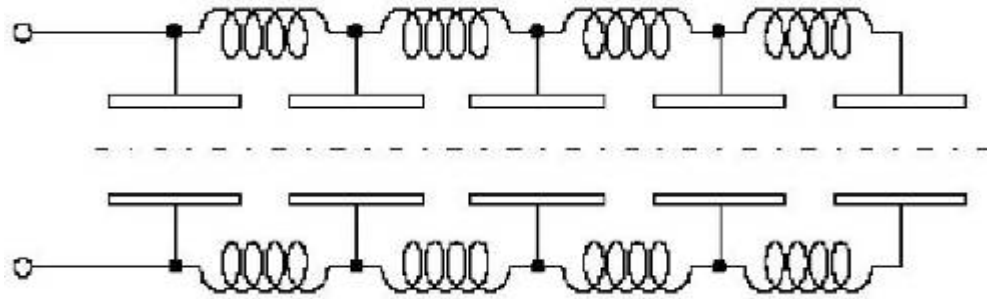
$$\frac{\omega\tau}{2} < \frac{\pi}{2} \Rightarrow \frac{2\pi f \tau}{2} < \frac{\pi}{2} \Rightarrow \boxed{f_{\max} = \frac{1}{2\tau}} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{eV_{\text{acc}}}{2m_e}}$$

Banda passante e sensibilità
sono requisiti contrastanti !!

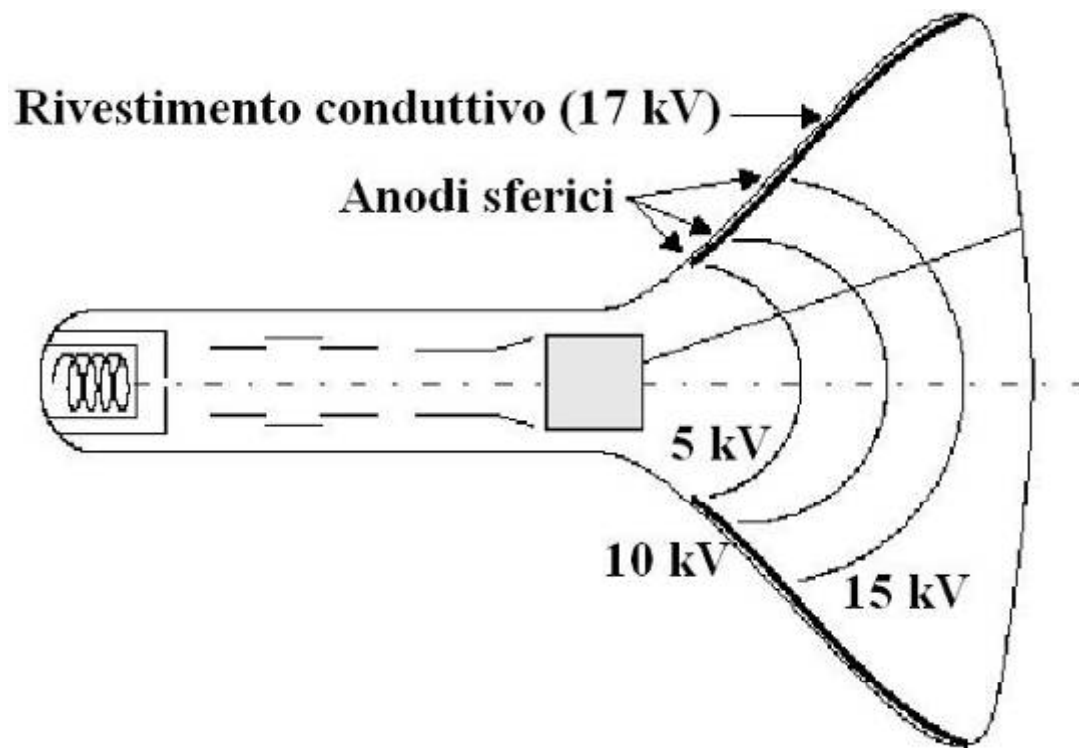
$$\boxed{S_s. = \frac{BL}{2dV_{\text{acc}}}}$$

$$B \approx f_{\max} \propto \frac{\sqrt{V_{\text{acc}}}}{L} \quad \text{mentre} \quad S \propto \frac{L}{V_{\text{acc}}}$$

"Alta banda e buona sensibilità"



Placchette
segmentate



Anodi di
post - accelerazione



OSCILLOSCOPI

ANALOGICI

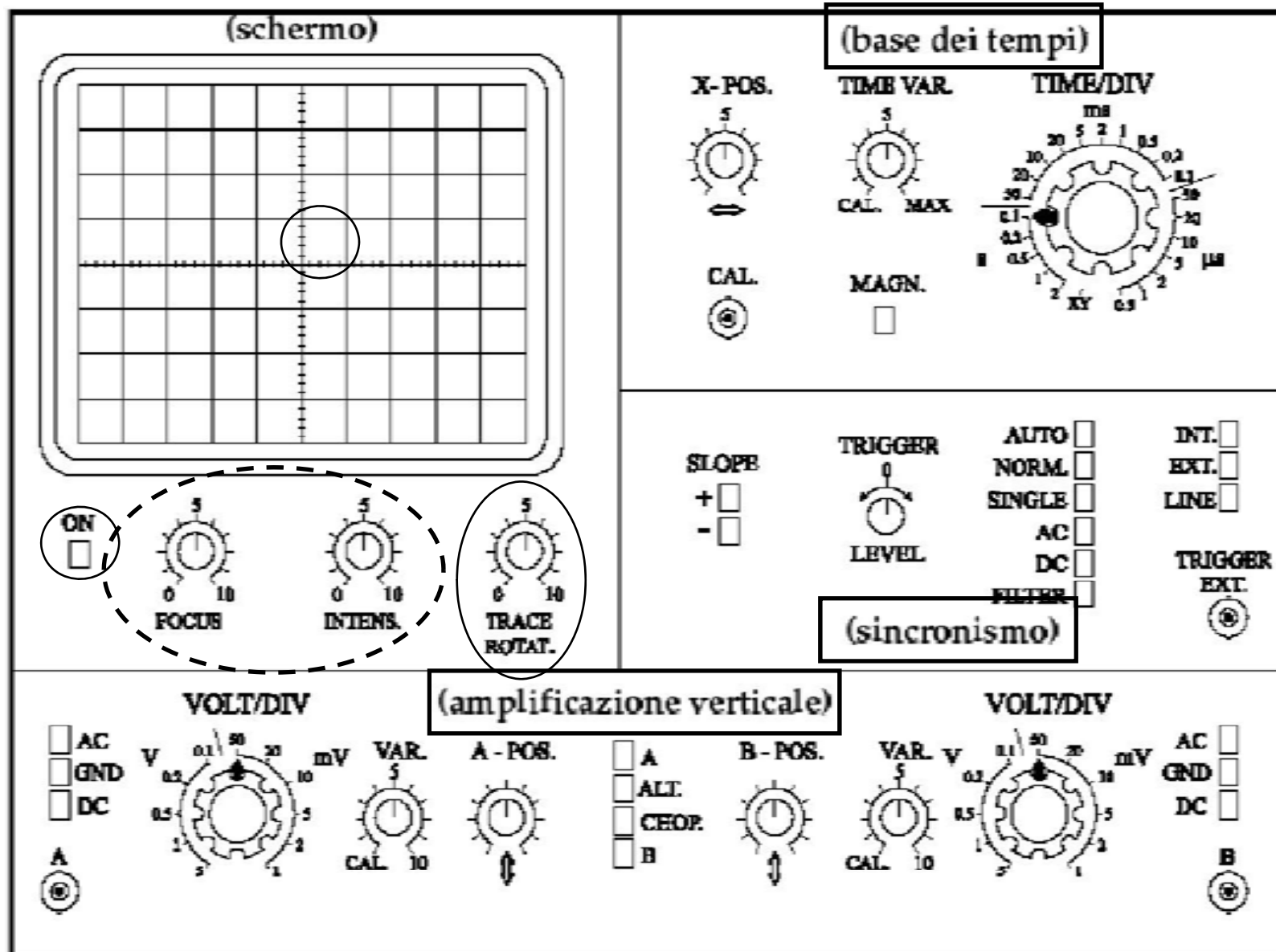
parte 2

Sezioni dell'Oscilloscopio

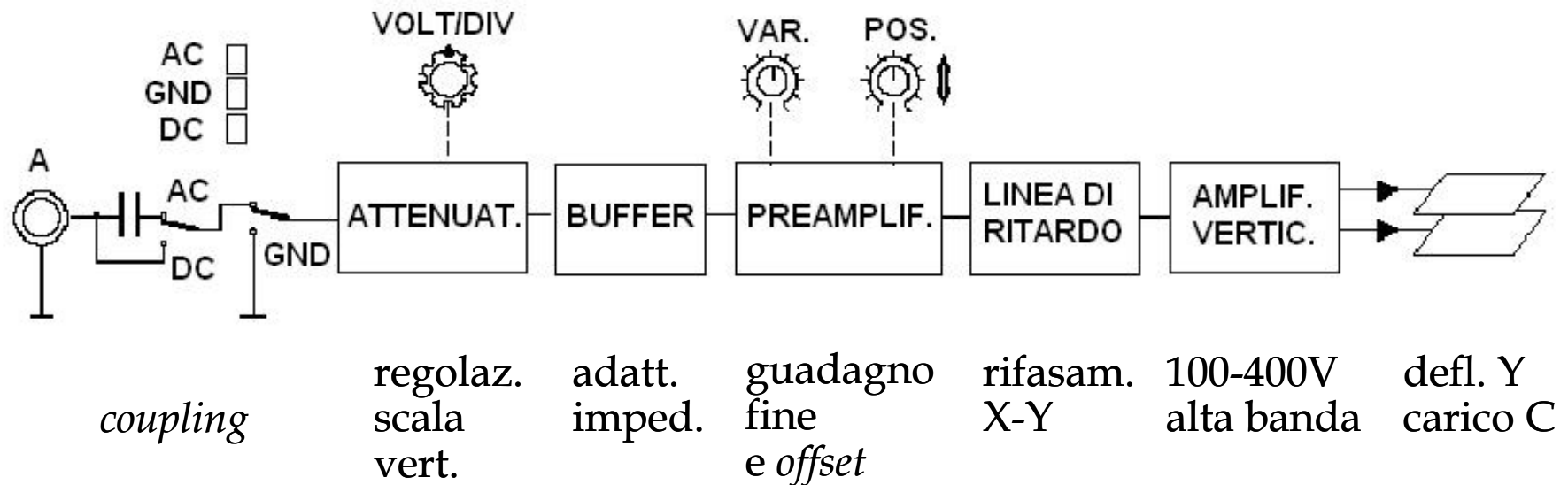
4 SEZIONI PRINCIPALI

- 1) Schermo e regolazione della traccia [visto con TRC]
- 2) Condizionamento e **amplificazione verticale**
(accoppiamenti e guadagni d'ingresso)
- 3) Sincronismo (*trigger*)
- 4) **Base dei tempi** (amplificazione orizzontale)

Pannello frontale



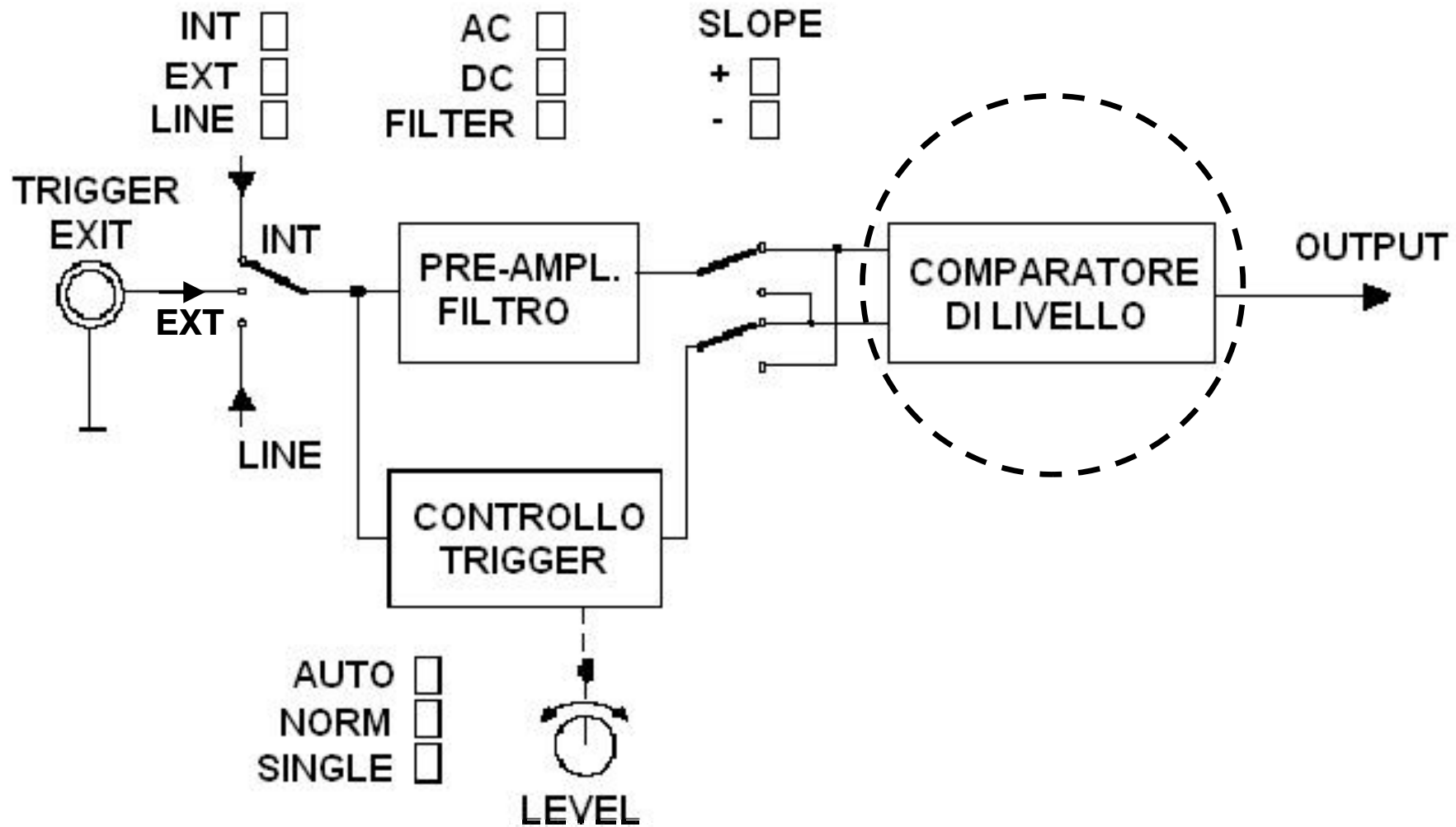
Condizionamento – ampl. verticale



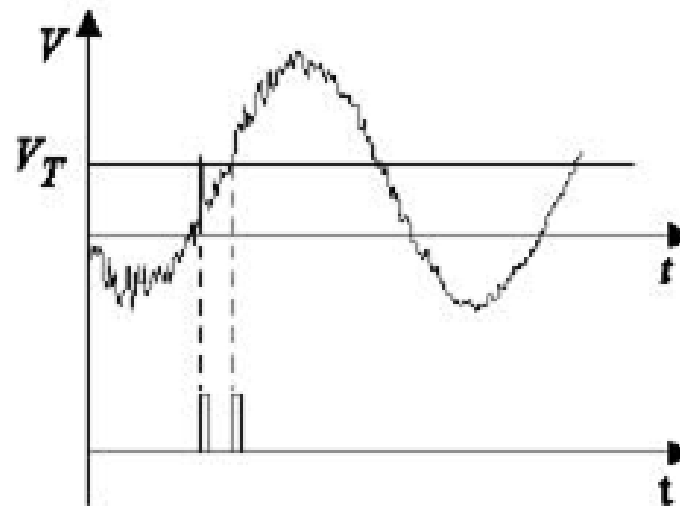
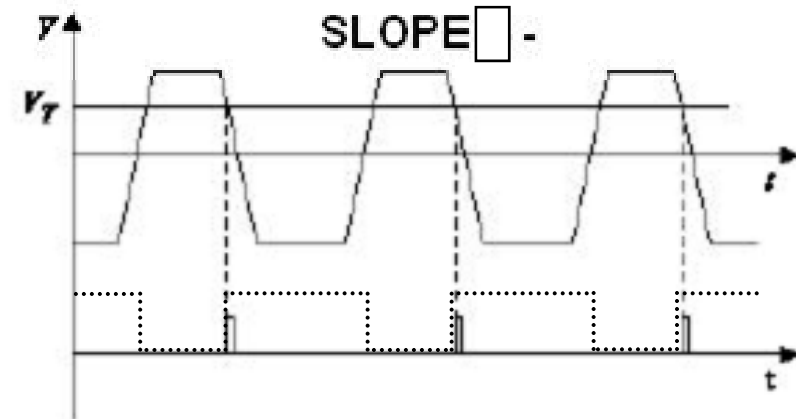
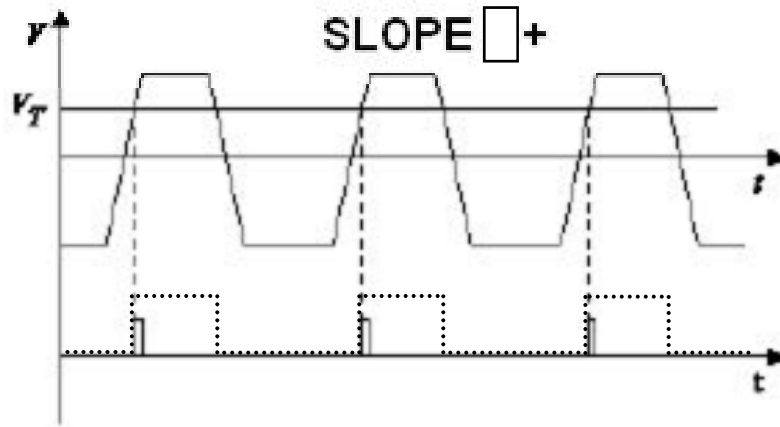
Tempo di salita dell'oscilloscopio:

$$t_{so} [s] = \frac{k}{B [Hz]} \begin{cases} k = 0.35 \text{ per funzione a un polo} \\ \text{(v. lucidi "Misure con l'Oscilloscopio")} \\ 0.35 < k < 0.5 \text{ per funzione a due poli} \end{cases}$$

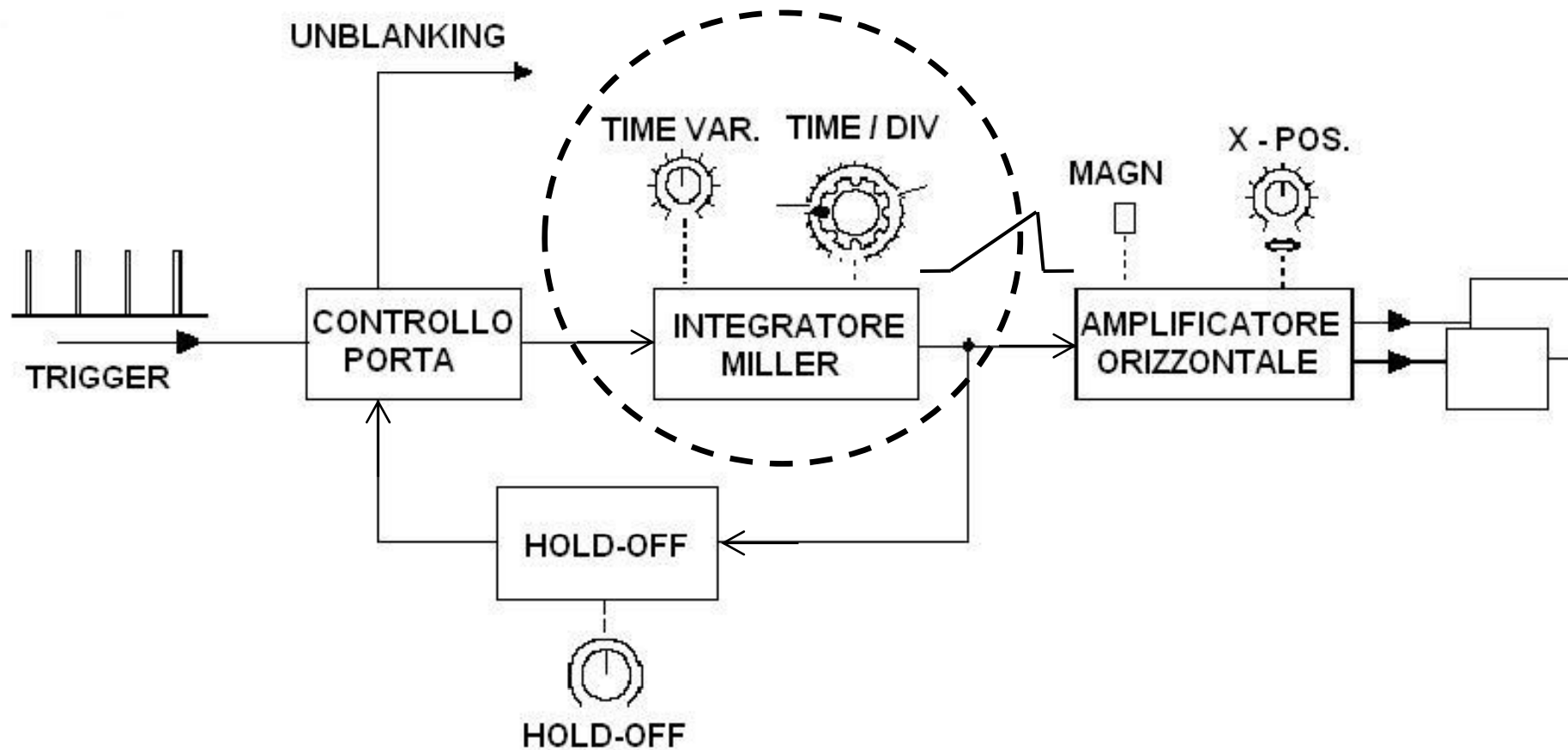
Sincronismo (*trigger*)



Trigger: slope e rumore additivo



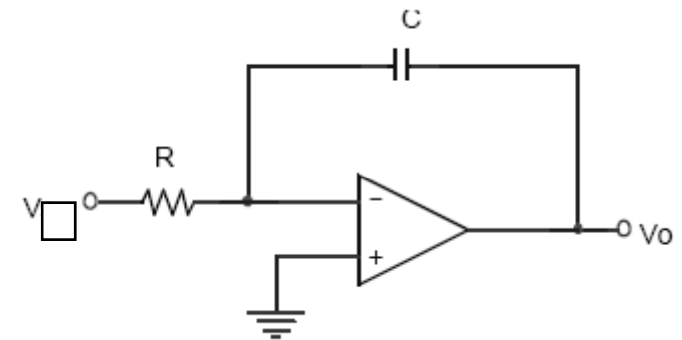
Base dei tempi (1/5)



Base dei tempi (2/5)

INTEGRATORE DI MILLER

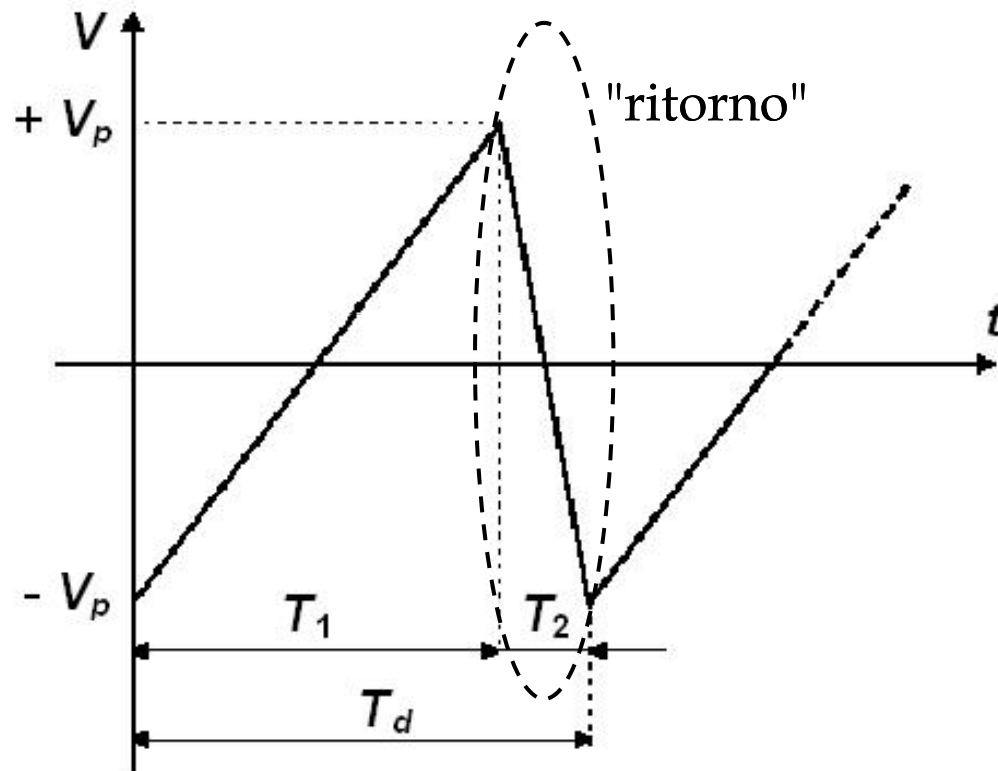
È un amplificatore operazionale, in configurazione invertente, con un condensatore (C) in reazione e una resistenza (R) in ingresso



È comandato da una tensione d'ingresso costante (V) che produce una corrente costante $I = V/R$ quindi integrata sul condensatore.

Si ottiene in uscita una **rampa di tensione** con pendenza regolabile variando il valore della costante di tempo RC (e.g. variando R a scatti)

Base dei tempi (3/5)



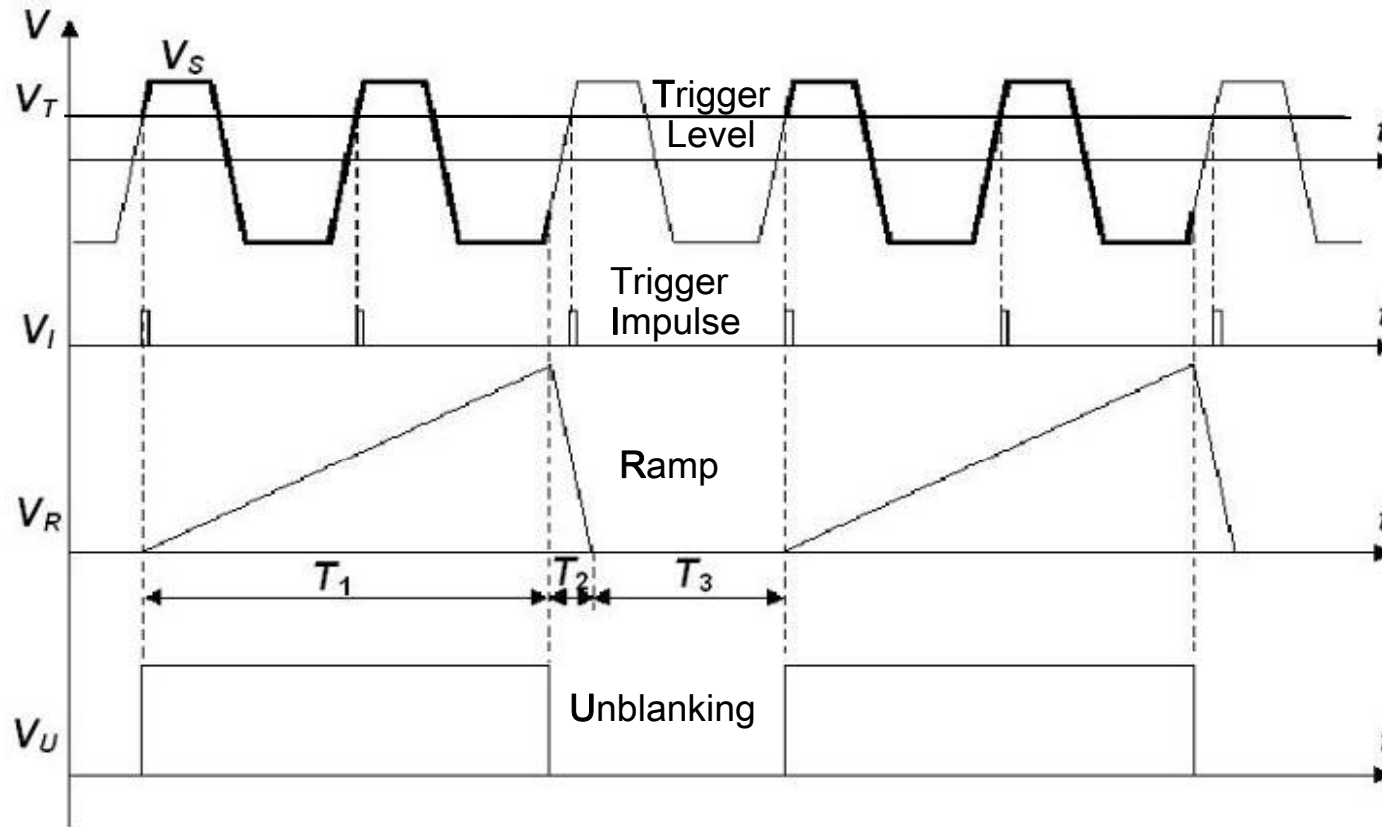
Rampa di
deflessione X

L'amplificazione
orizzontale è legata
alla pendenza della
rampa X $A_x \propto p^{-1}$
($1/p \cdot 2V_p/10\text{DIV}$)

Durante il "ritorno" del pennello elettronico (tempo T_2) un comando (*unblanking* - su V_G di griglia) regola a zero l'intensità della traccia luminosa

Base dei tempi (4/5)

Effetto del sincronismo sul segnale visualizzato

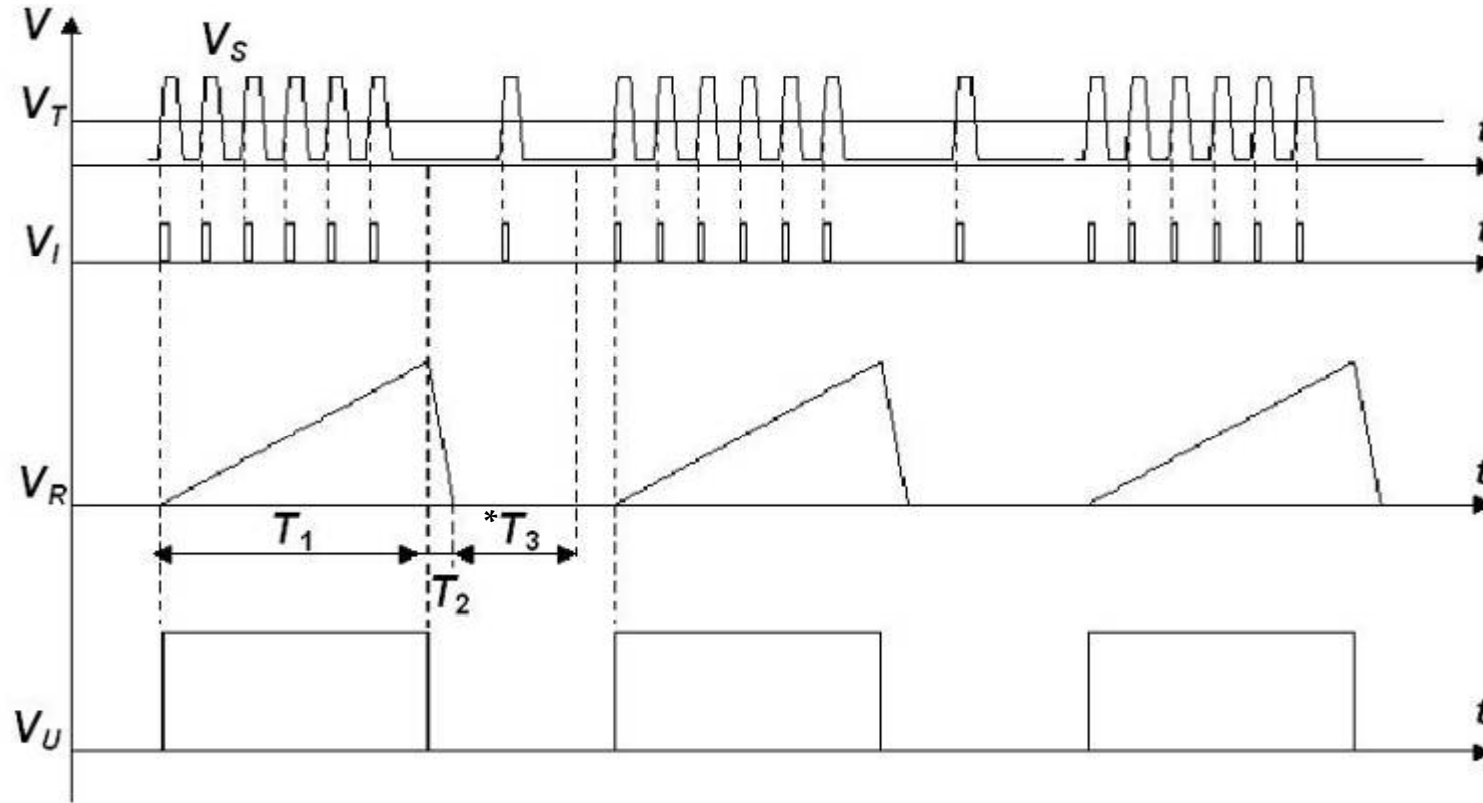


Il tempo T_2 occorre per riportare il pennello elettronico da dx a sx sullo schermo (il cannone elettronico è spento $\leftarrow V_U$ low)

Il tempo T_3 di attesa, prima di partire con il disegno di una nuova traccia, dipende dal segnale d'ingresso (da quando si ri-verificherà una condizione di *trigger* utile Oscilloscopi V_U rimane low)

Base dei tempi (5/5)

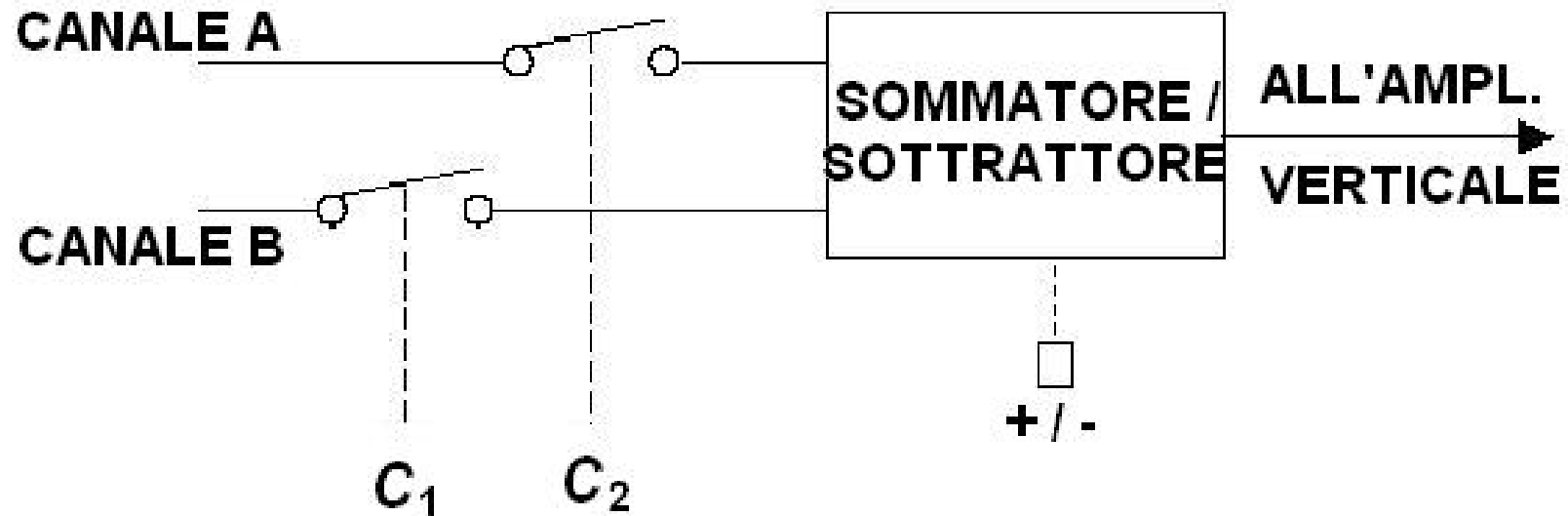
Comando di HOLD - OFF



Il tempo $*T_3$ “di attesa forzata” (*hold off*, mantenendo chiuso il controllo di porta) serve a evitare che la deflessione orizzontale riparta in un momento non desiderato (e.g. impulso isolato)

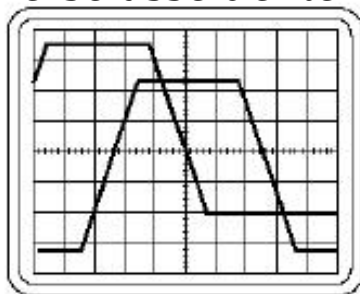
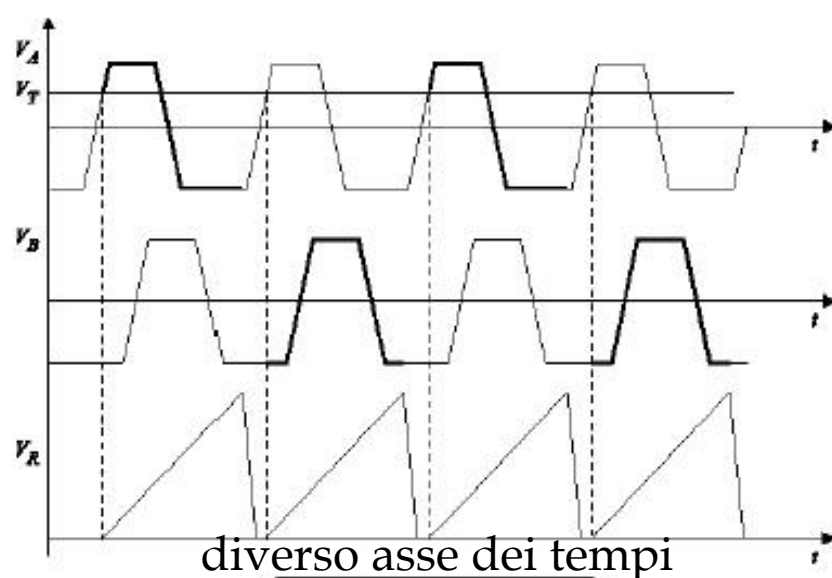
Amplificatore verticale per traccia multipla

Serve a inviare più segnali di misura all'unico amplificatore verticale che comanda le placchette di deflessione Y



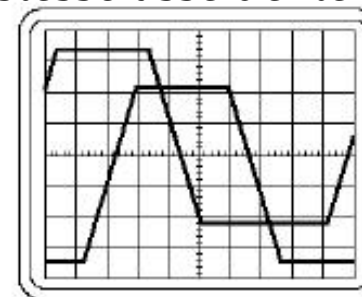
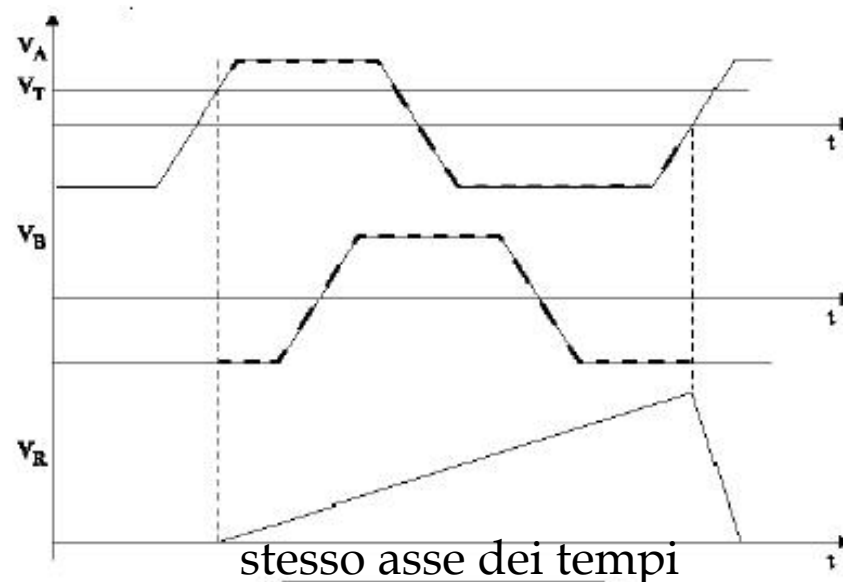
Gli interruttori C_1 e C_2 regolano quale/i canale/i andranno all'amplificatore verticale e secondo quale modalità temporale

Multitraccia: *ALTERNATED* e *CHOPPED*



ALTernated

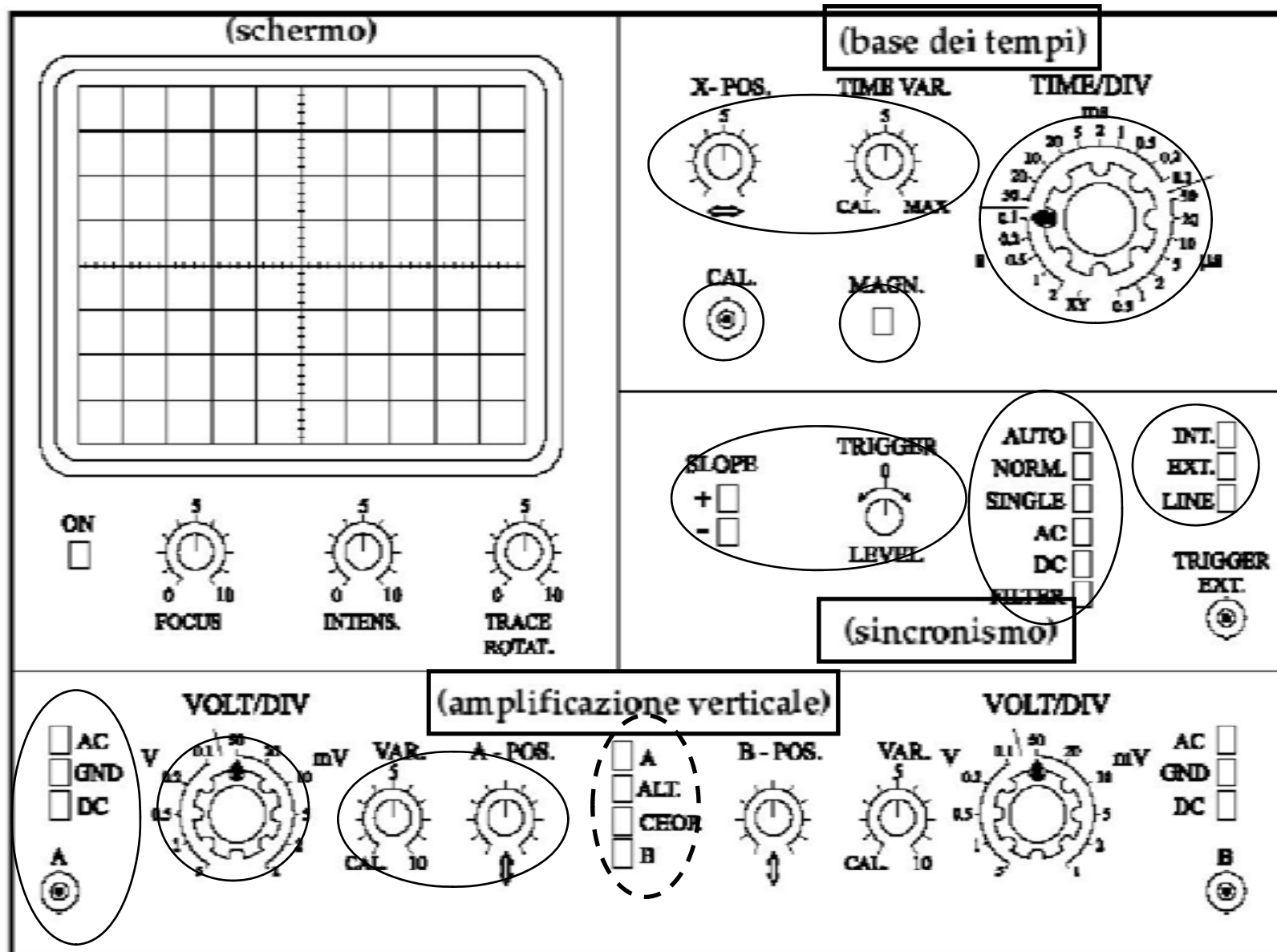
(visualizzazione)



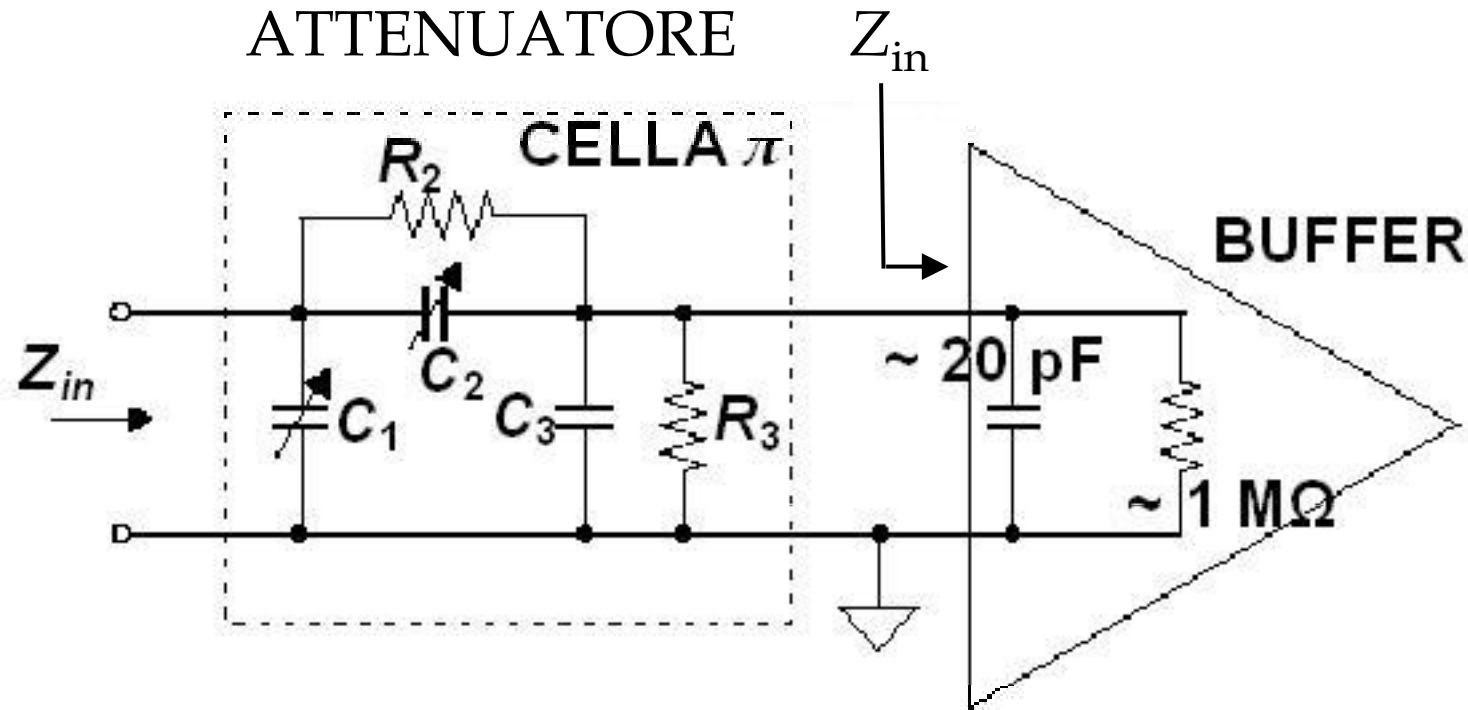
CHOPped

Per segnali “lenti” è preferibile la modalità *chopped* (che mantiene le relazioni di fase); per segnali “veloci” è preferibile (o necessaria) la modalità *alternated* (non si deve vedere una traccia segmentata)

Pannello frontale



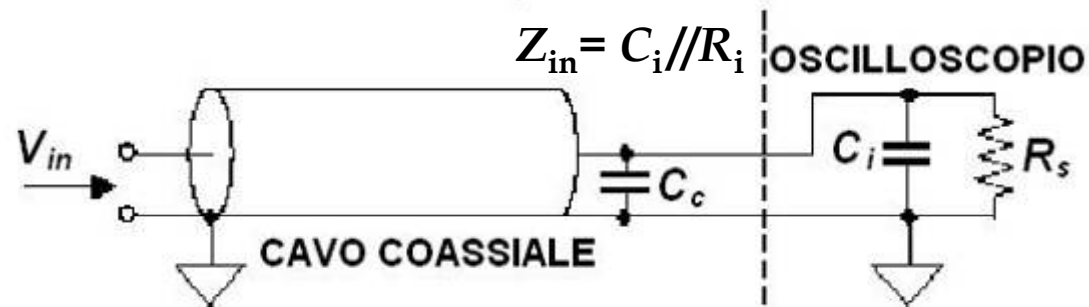
Impedenza d'ingresso



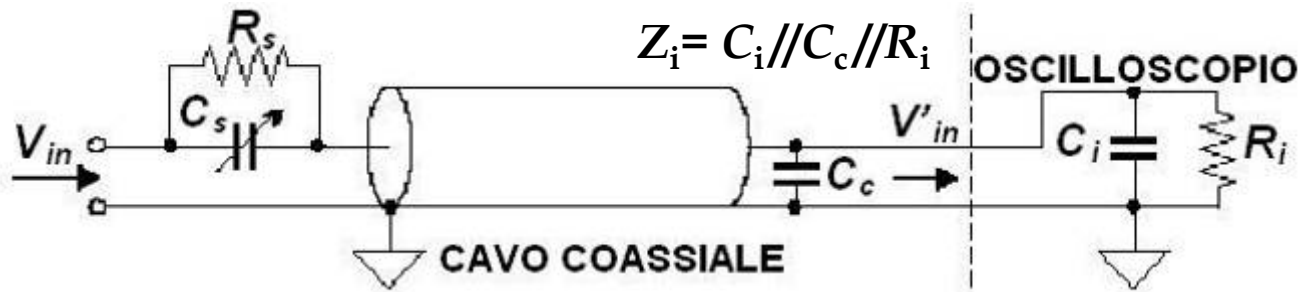
L'impedenza del *buffer* d'ingresso è capacitiva (diminuisce al variare della frequenza) \Rightarrow anche le celle a π hanno una componente capacitiva di modo da **non fare variare l'impedenza d'ingresso** (deve variare solo l'attenuazione) quando vengono inserite/disinserite

Sonde d'ingresso (1/2)

Poiché l'impedenza d'ingresso è elevata il segnale viene prelevato con un cavo schermato (e.g. coassiale) così da ridurre le interferenze esterne



A causa della capacità del cavo (C_c) l'impedenza d'ingresso (vista da V_{in}) varia con la frequenza e con il tipo/lunghezza di cavo



$$t = \frac{V'_{in}}{V_{in}}$$

$$a = \frac{V_{in}}{V'_{in}}$$

Se il cavo di collegamento fa parte di una sonda è possibile compensare l'impedenza complessiva d'ingresso (cavo + oscilloscopio), grazie alla capacità di compensazione C_s , di modo che l'attenuazione a tra V_{in} e V'_{in} sia puramente resistiva (indipendente dalla frequenza)

Sonde d'ingresso (2/2)

Attenuazione:

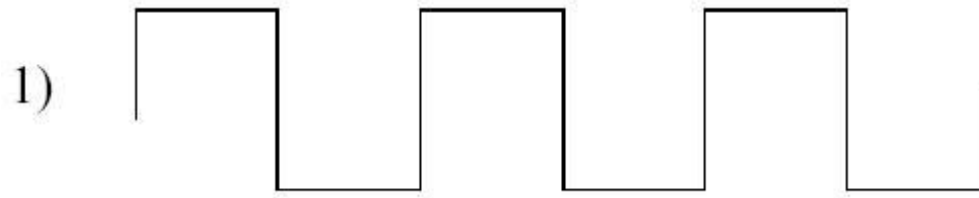
$$a = \frac{V_{\text{in}}}{V'_{\text{in}}} = \frac{Z_i + Z_s}{Z_i} = \frac{\frac{R_i}{1 + j\omega R_i(C_i + C_c)} + \frac{R_s}{1 + j\omega R_s(C_s)}}{\frac{R_i}{1 + j\omega R_i(C_i + C_c)}}$$

Durante la compensazione della sonda si varia la sua capacità d'ingresso C_s sino a ottenere un comportamento equalizzato in frequenza:

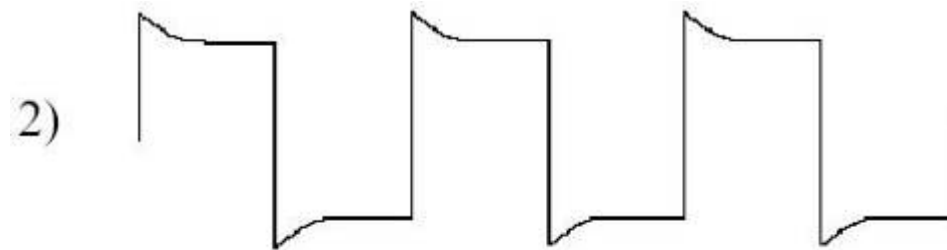
$$R_i(C_i + C_c) = R_s C_s \Rightarrow a = \frac{V_{\text{in}}}{V'_{\text{in}}} = \frac{Z_i + Z_s}{Z_i} = \frac{R_i + R_s}{R_i}$$

**Tipicamente con $R_i = 1 \text{ M}\Omega$ e $R_s = 9 \text{ M}\Omega$ (sonda 10×)
si attenua il segnale di un fattore 10 e si ottiene $R_{\text{in}} = 10 \text{ M}\Omega = 10 R_i$
(dunque aumenta anche l'impedenza d'ingresso! ☺)**

Compensazione sonda (1/2)

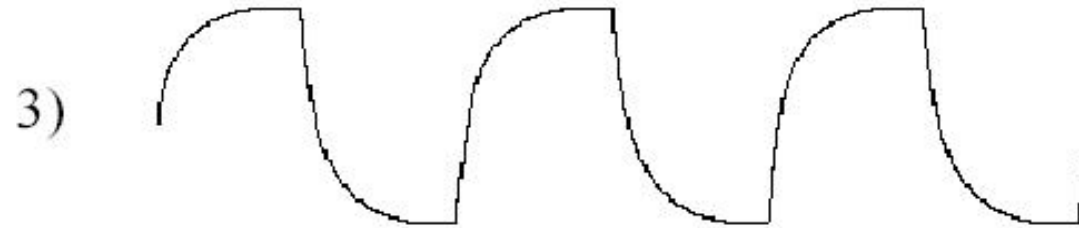


Compensazione corretta: la forma d'onda visualizzata è effettivamente di tipo rettangolare



Sovracompensazione della sonda: il valore di C_s è troppo elevato e vengono poco attenuate le armoniche a più alta frequenza (PASSA-ALTO)

Compensazione sonda (2/2)



Sottocompensazione della sonda: il valore di C_s è troppo piccolo e vengono attenuate maggiormente le armoniche a più alta frequenza (PASSA-BASSO)

Limiti prestazionali dell'oscilloscopio analogico

Le Croy LA314H

With **four channels** and wide **470 MHz bandwidth**, these leading-edge analog oscilloscopes offer the highest level of performance available today

CRT: 6-inch rectangular, internal graticule (8 x 10 DIV) meshless CRT

Accelerating voltage: Approximately 20 kV **Rise time:** approx. **745 ps**

BW limiter: 20 MHz and 100 MHz selectable

Input RC: Hi-Z input: 1 Mohm $\pm 1.5\%$ // 16 pf ± 2 pf, Lo-Z input: 50 ohm $\pm 1\%$.

$$B \cong 0.35 / t_{\text{rise}} = 0.35 / 745 \times 10^{-12} = 469.8 \text{ MHz}$$

Four channels up to **470 MHz** are available with **highest sensitivity (2 mV/DIV)**

Channel 1, 2 Sensitivity: 2 mV/div - 5 V/div $\pm 2\%$, 11 step (1-2-5)

Sweep speed: 5 ns/div - 500 ms/div $\pm 2\%$, 25-step (1-2-5)

fastest sweep speed (10x MAG) is 500 ps/DIV (5 ns X-axis)

Built-in 5 digit counter for frequency measurements (2 Hz - 400 MHz)
with **$\pm 0.01\%$ accuracy**

MISURE CON L'OSCILLOSCOPIO

Misure di ampiezza (1/4)

Per effettuare misure di ampiezza con l'oscilloscopio di norma si eseguono in sequenza i seguenti passi:

1. Si procede innanzitutto alla predisposizione del **livello di riferimento dello zero sullo schermo**. Per effettuare questa operazione si pone il selettore di ingresso sulla posizione **GND** e la modalità di *trigger automatico*. A questo punto sullo schermo appare una linea orizzontale, che può essere traslata in senso verticale, fino a farla collimare con la linea centrale del reticolo, mediante il **comando Vert. Pos.** del canale di ingresso prescelto. Alla linea centrale viene in questo modo assegnata la tensione di riferimento zero.
2. Si deve poi operare sul controllo d'**intensità e focalizzazione** del fascio affinché la linea appaia sufficientemente luminosa e ben focalizzata. Un eccesso di intensità luminosa può infatti portare ad un danneggiamento dei fosfori, mentre una traccia poco nitida pone un limite all'accuratezza della misura, come spiegato in seguito

Misure di ampiezza (2/4)

3. Quindi, è necessario stabilire se la tensione da misurare è continua oppure variabile nel tempo (ma sempre di tipo periodico). Nel primo caso è necessario predisporre un **accoppiamento** di tipo **DC** nella sezione verticale dell'oscilloscopio. Nel secondo caso è invece possibile utilizzare anche l'accoppiamento **AC**, particolarmente utile per eliminare una eventuale componente continua sovrapposta alla componente variabile del segnale. In questo caso è però necessario assicurarsi che la frequenza del segnale sia convenientemente più elevata di quella del filtro passa alto dell'accoppiamento AC, in modo da evitare grossolane alterazione del segnale di misura.

Misure di ampiezza (3/4)

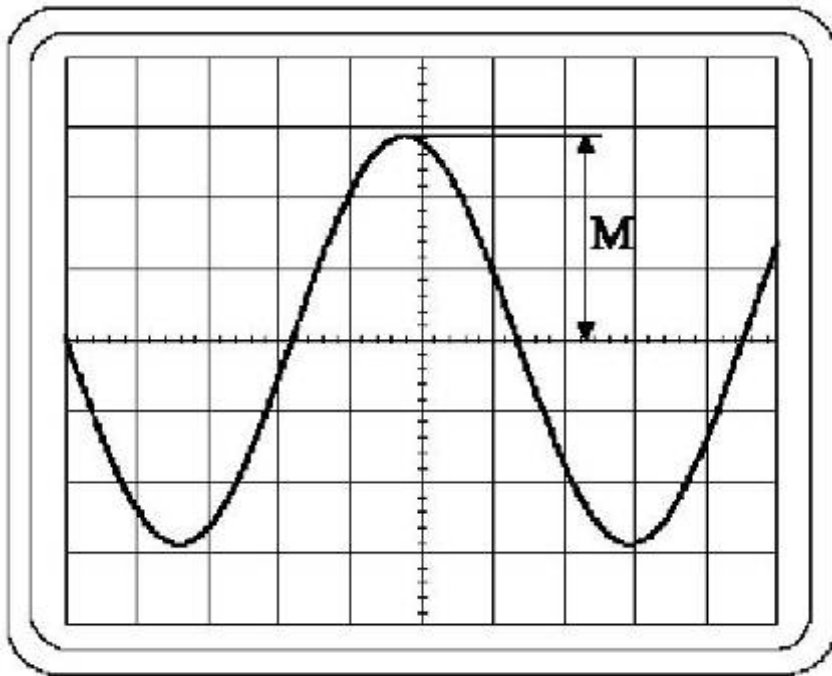
4. Nel caso di componente continua da misurare, è necessario predisporre il *trigger* nella modalità automatica e non è richiesta la regolazione del livello di *trigger*. Nel caso di segnale variabile, è possibile utilizzare anche la modalità normale, preferibile nel caso di segnali a bassa frequenza, ed è necessario **regolare il livello del *trigger*** in modo da sincronizzare la base dei tempi con il segnale di misura. E' opportuno regolare il livello di *trigger* in modo che esso cada nel tratto a maggior pendenza del segnale, così da aumentare l'insensibilità dell'istante di scatto al rumore additivo di ampiezza inevitabilmente presente sul segnale. Sempre per limitare l'effetto del rumore è opportuno utilizzare i filtri in ingresso del *trigger*, per limitare la bande passante di questa sezione allo stretto necessario

N.B. Si noti che amplificazione verticale (A_Y in V/DIV) e orizzontale (A_X in s/DIV) sono i reciproci delle corrispondenti sensibilità verticale (S_Y in DIV/V) e orizzontale (S_X in DIV/s) dell'oscilloscopio (TRC+ampl. elettronica). Di norma 1 DIV = 1 cm

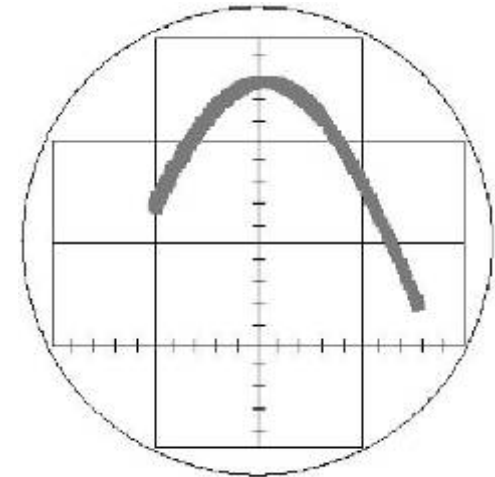
Misure di ampiezza (4/4)

5. Ci si deve assicurare che il comando di attenuazione di ingresso abbia il **potenziometro di attenuazione variabile nella posizione di esclusione**, di modo che l'attenuazione introdotta corrisponda solamente a quella indicata dal commutatore a scatti, calibrata ed espressa in volt/divisione (ampl. vert. A_Y)

Visualizzare a schermo almeno un periodo della forma d'onda

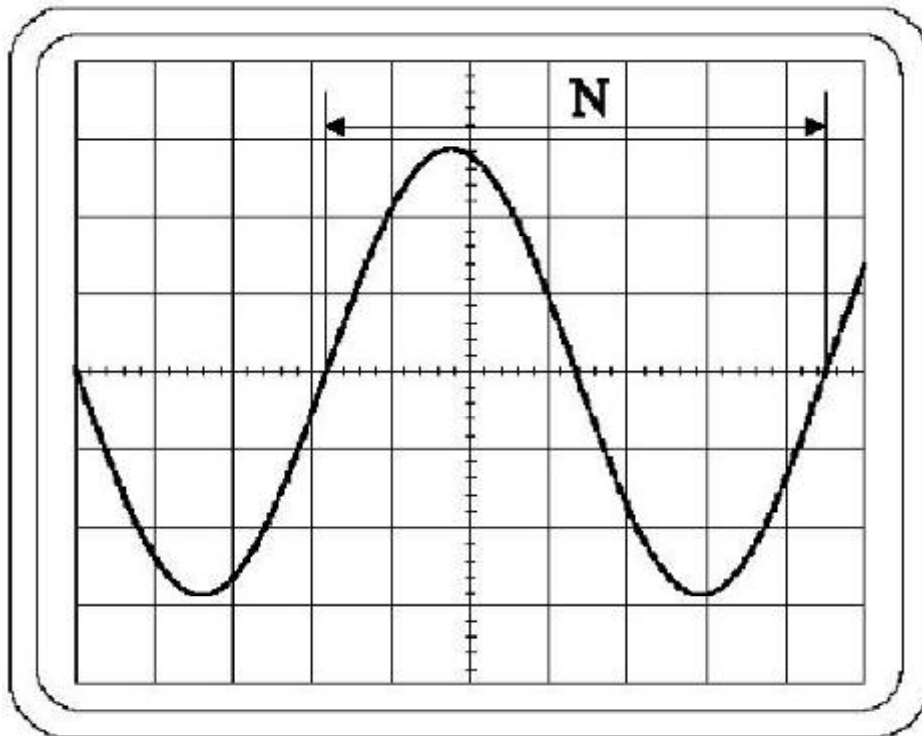


$$V_p = M A_Y$$

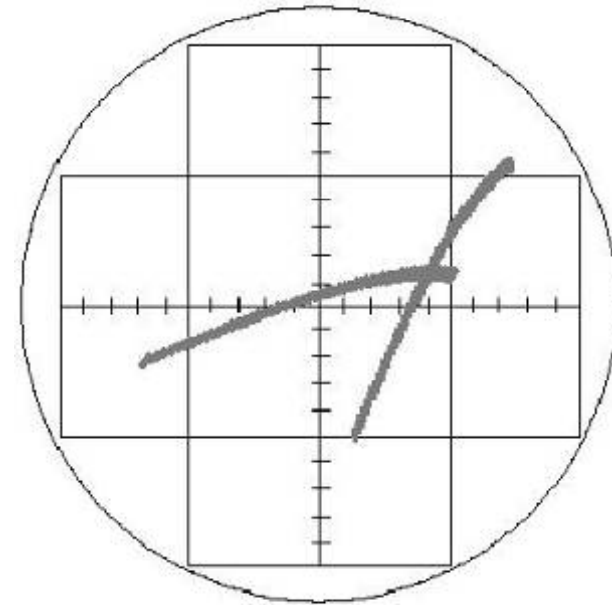


Lo spessore della traccia
limita la capacità di
apprezzare i livelli/tempi

Misure di tempo e periodo/frequenza

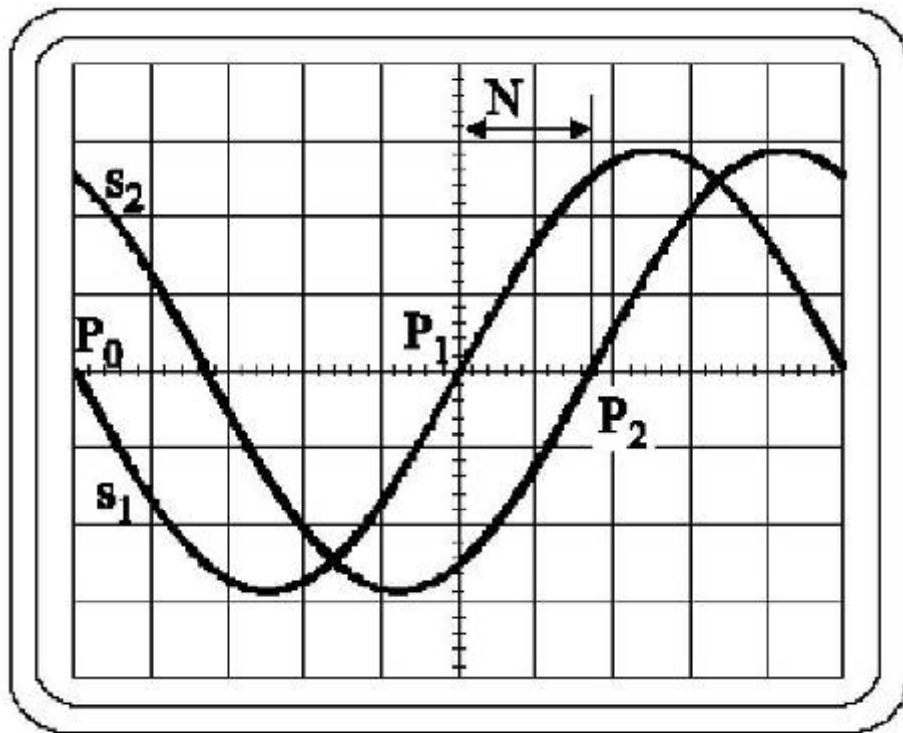


$$T = N A_x$$



Maggior pendenza del segnale =
migliore valutazione dell'ascissa
del punto di attraversamento
(aiuta anche una traccia sottile)

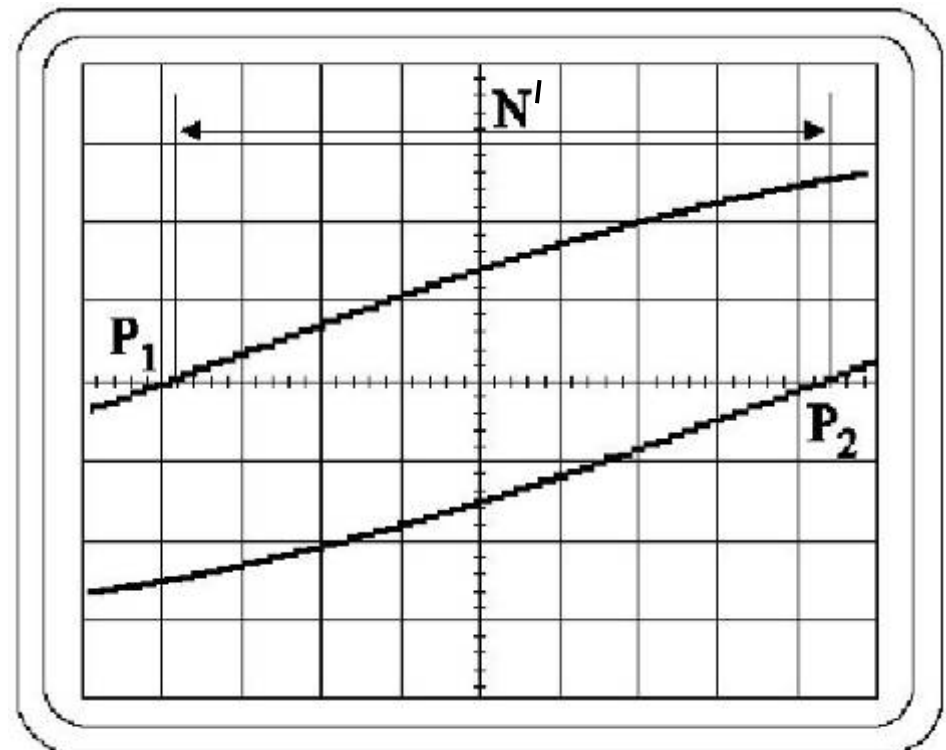
Misure di sfasamento



Misura di sfasamento tra 2 segnali sinusoidali

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} \quad [\text{rad}]$$

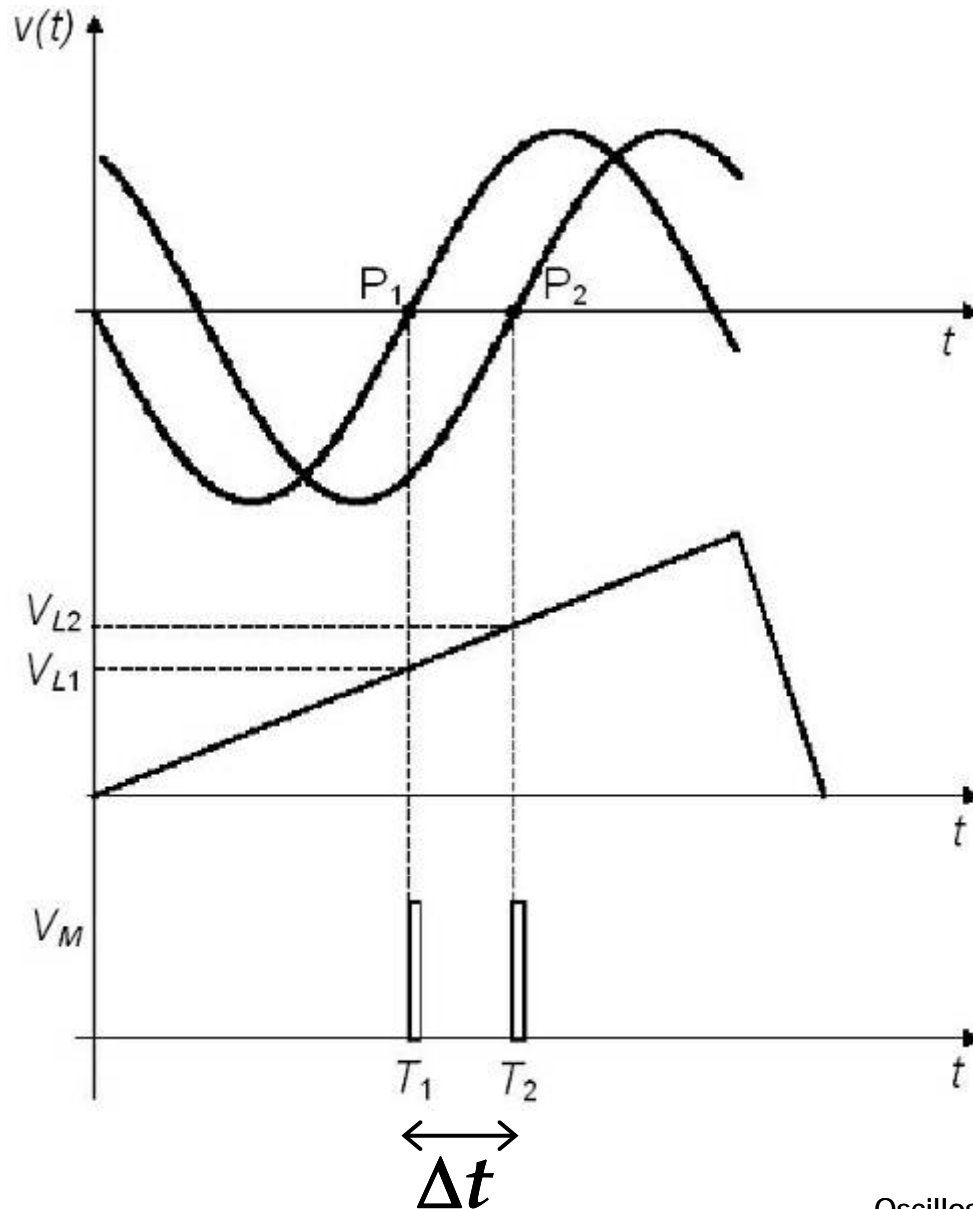
con $\Delta t = N A_x$



Una maggiore espansione del tratto P_1P_2 determina una migliore risoluzione della misura

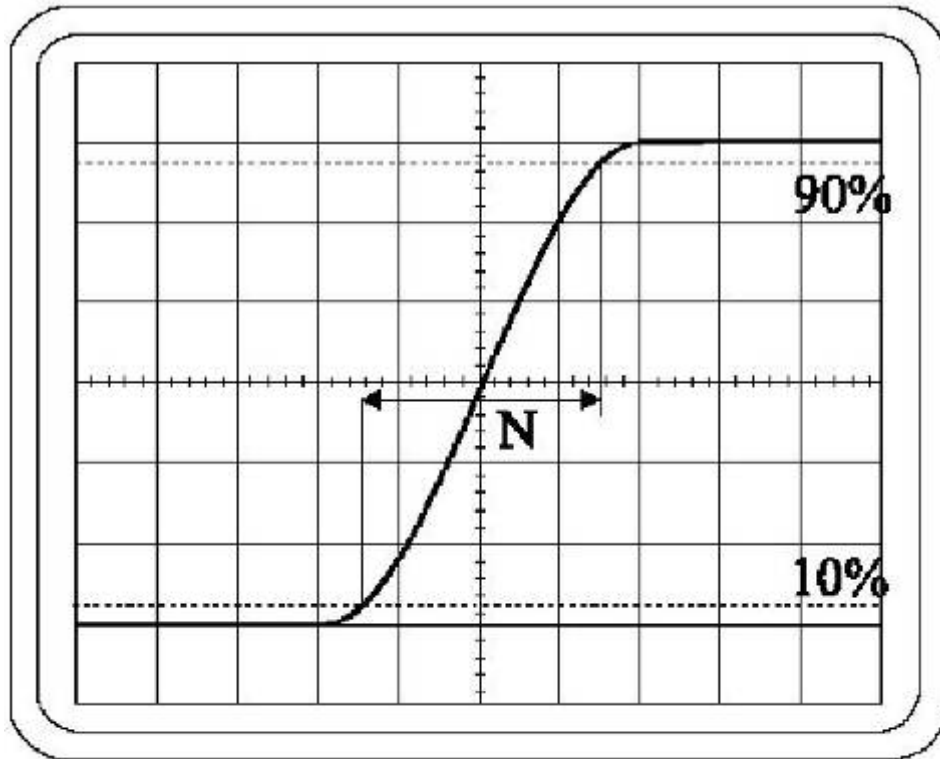
(**ZOOM 5×... ma come?**)

Marker(s) per misure di ΔT



Schema semplificato del funzionamento dei *marker(s)*
Gli impulsi emessi in coincidenza della uguaglianza tra i livelli di tensione regolabili $V_{L1,2}$ e la rampa principale, determinano una **maggiore luminosità dei punti P_1 e P_2**
Attraverso un contatore elettronico interno allo strumento viene misurato con precisione l'intervallo di tempo tra l'istante T_1 e T_2

Misure di tempo di salita



7^a div. da basso

Utilizzo delle linee del reticolo per la **misura del tempo di salita** di un segnale a gradino

1^a div. da basso

$$t_{sm} = \sqrt{t_{ss}^2 + t_{so}^2}$$

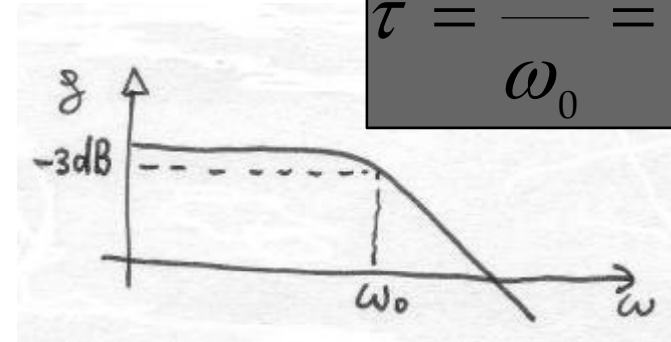
$$t_{ss} = \sqrt{t_{sm}^2 - t_{so}^2}$$

con $t_{so} \cong 0.35/B$

Sistema a singolo polo dominante

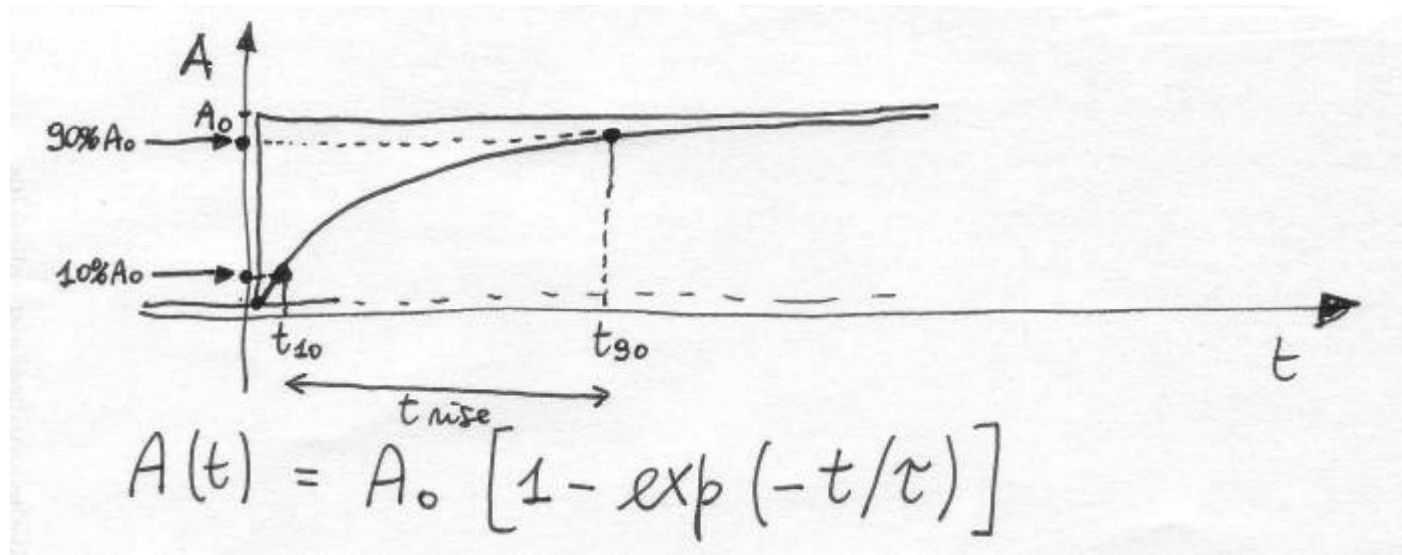
Risposta in frequenza

$$g(s) = \frac{1}{1 + s\tau} = \frac{1}{1 + j\omega / \omega_0}$$



$$\tau = \frac{1}{\omega_0} = \frac{1}{2\pi f_0}$$

Evoluzione nel tempo della risposta al gradino



Sistema a singolo polo dominante

$$\frac{A(t)}{A_0} = 10 \% = [1 - \exp(-t_{10} / \tau)]$$

$$\frac{A(t)}{A_0} = 90 \% = [1 - \exp(-t_{90} / \tau)]$$

$$t_{\text{rise}} = t_{90} - t_{10}$$

e dunque:

$$\exp(-t_{10} / \tau) = 0.9$$

$$\exp(-t_{90} / \tau) = 0.1$$

Facendo prima il ln e poi la diff. :

$$-t_{10} / \tau + t_{90} / \tau = \ln(0.9/0.1)$$

così da ottenere:

$$t_{\text{rise}} = t_{90} - t_{10} = (\ln 9) \tau \cong 2.2 \tau$$

e infine...

$$f_0 = \frac{1}{\omega_0} = \frac{1}{2\pi\tau} \cong \frac{2.2}{2\pi} \cdot \frac{1}{t_{\text{rise}}} \cong \frac{0.35}{t_{\text{rise}}}$$

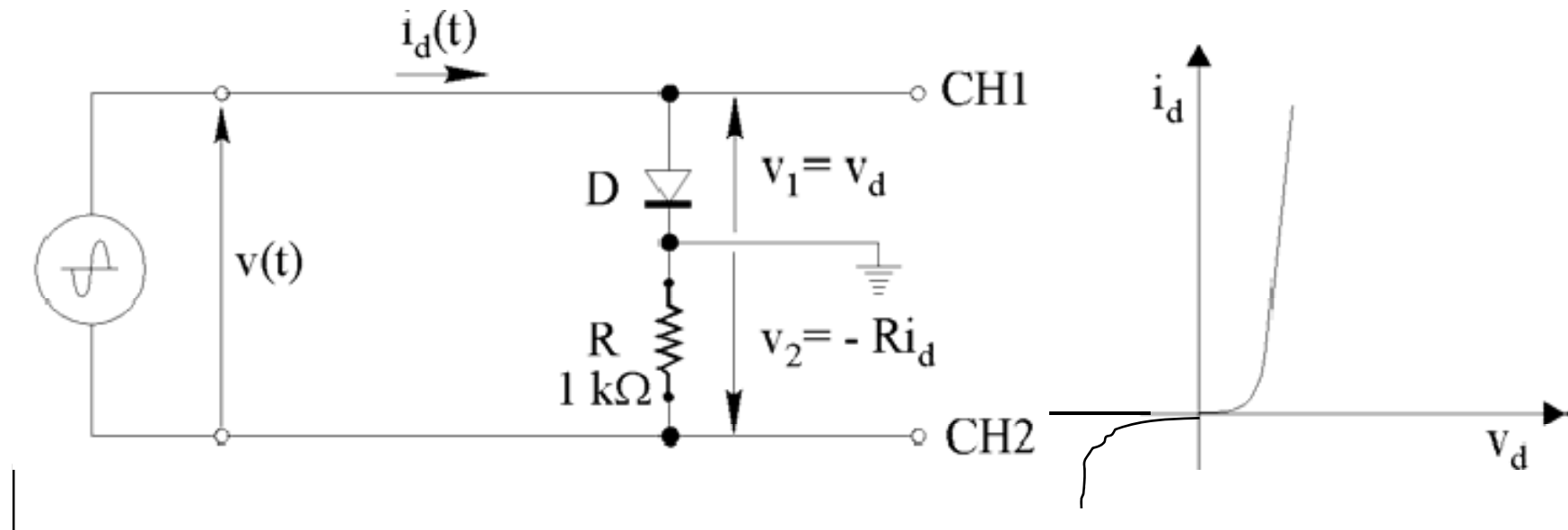
Modalità X-Y

La modalità di visualizzazione X-Y applica i due segnali presenti su gli ingressi CH1 e CH2, rispettivamente alle placche di deflessione orizzontale e verticale. Pertanto la sezione di trigger viene esclusa



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 tensione-corrente (V-I) di componenti o dispositivi.

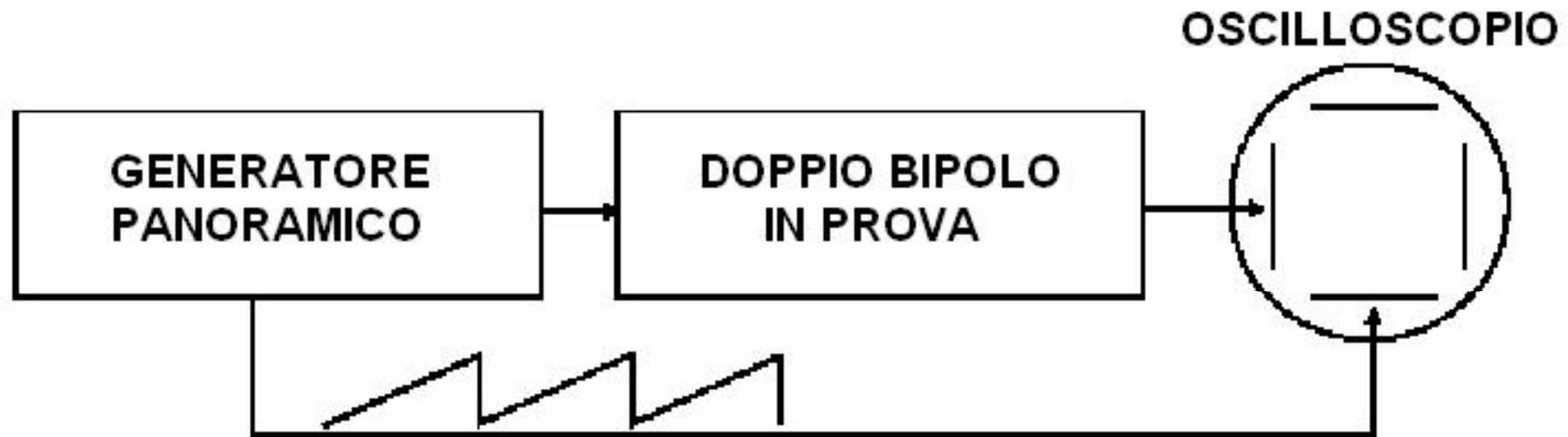
Misura della caratt. I-V di un diodo



Misura, mediante oscilloscopio in modalità X-Y, della caratteristica corrente-tensione (I-V) di un diodo a semiconduttore

Per osservare una traccia stabile, occorre “ripetere nel tempo” (con una opportuna rampa di tensione) la d.d.p. applicata ai capi del diodo

Misura funzione di trasferimento (1/3)

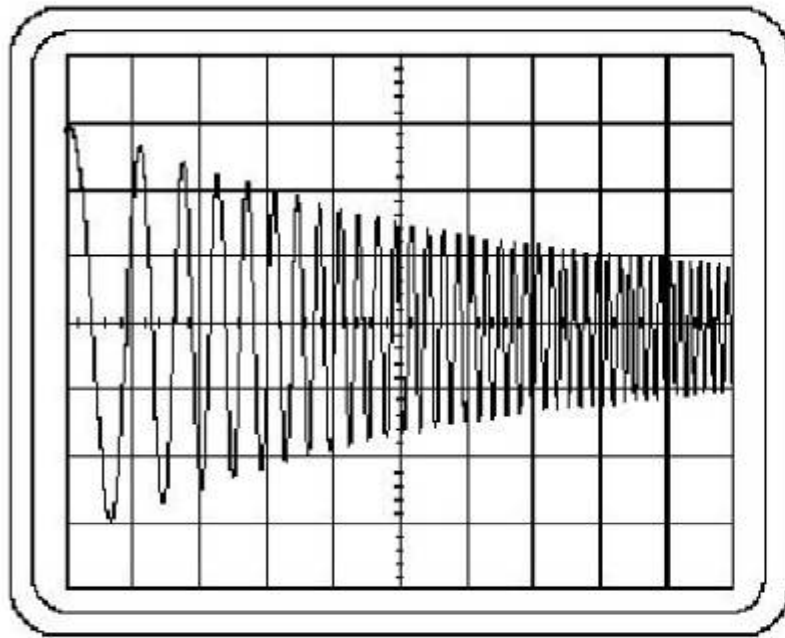


Schema semplificato per la **misura**/visualizzazione **della risposta in frequenza di un doppio bipolo** in prova.

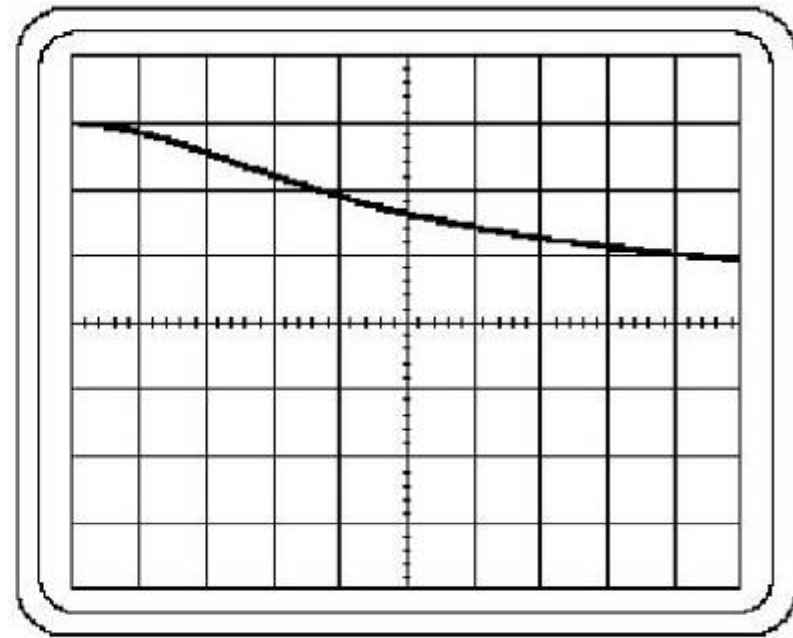
La rampa di tensione, che produce la variazione (modulazione) del segnale sinusoidale erogato dal generatore panoramico, viene inviata anche al sistema di deflessione orizzontale (canale X) dell'oscilloscopio.

Al sistema di deflessione verticale (canale Y), viene invece inviato il segnale sinusoidale in uscita al doppio bipolo.

Misura funzione di trasferimento (2/3)



a

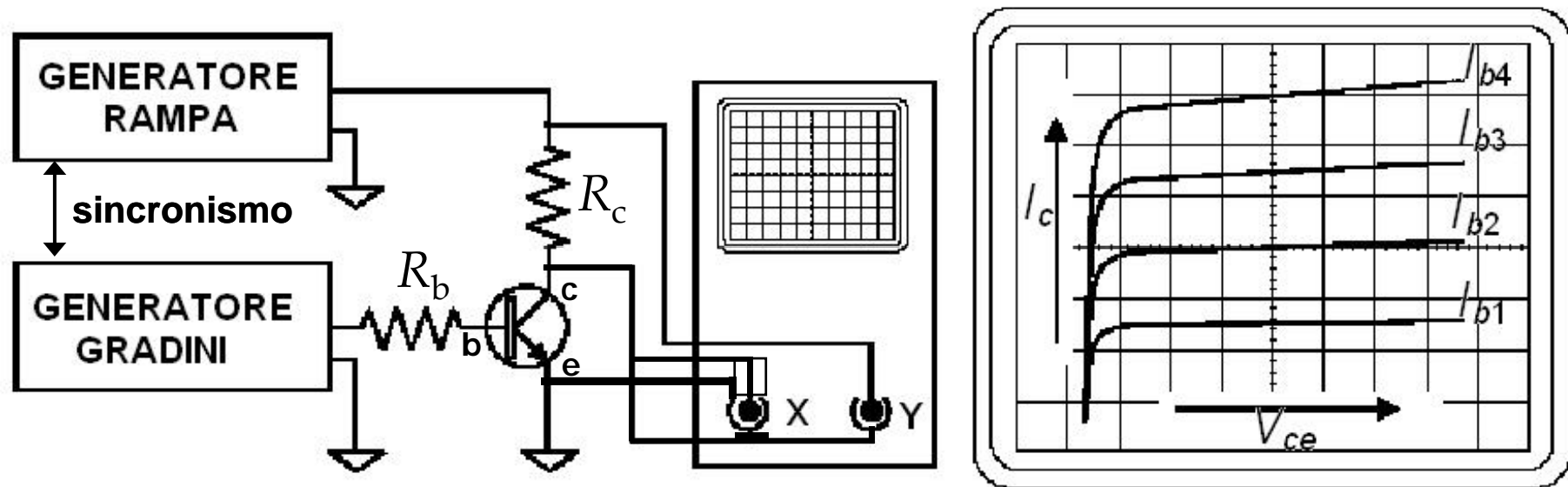


b

Rappresentazione sullo schermo dell'oscilloscopio del **segnale misurato in uscita da un filtro passa basso** eccitato da un segnale vobulato, utilizzando la tensione/frequenza di vobulazione per pilotare l'asse orizzontale

Nel primo caso, il segnale in uscita dal filtro viene applicato direttamente all'ingresso dell'oscilloscopio, mentre nel secondo caso viene utilizzato un rivelatore di picco per migliorare la visualizzazione

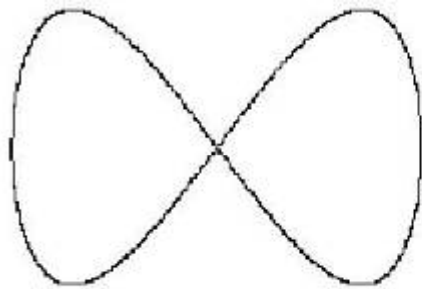
Misura funzione di trasferimento (3/3)



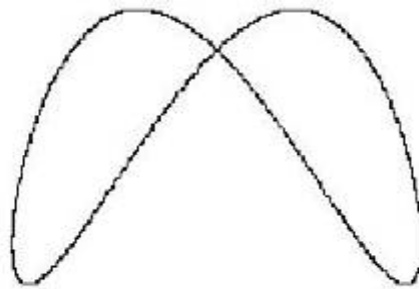
Schema di principio di un circuito per la **misura diretta delle caratteristiche di un transistor** ed esempio della rappresentazione sullo schermo dell'oscilloscopio della famiglia di curve caratteristiche $I_c - V_{ce}$ al variare della corrente di base ($I_{b1} < I_{b2} < I_{b3} < I_{b4}$)

si osservi che $V_Y = I_c / R_c = I_c$ e $V_X = V_{ce}$

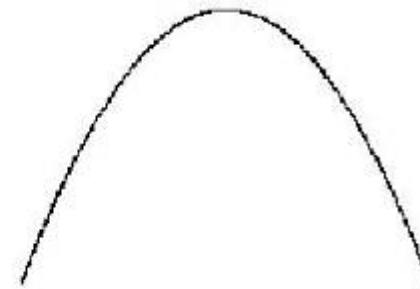
Figure di Lissajous (1/2)



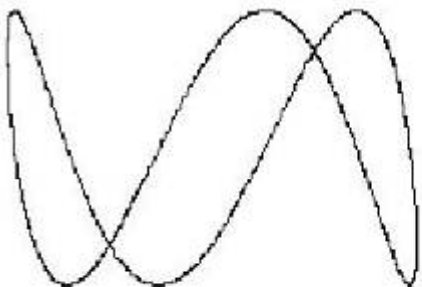
$$f_1 : f_2 = 2$$
$$\varphi = 0^\circ$$



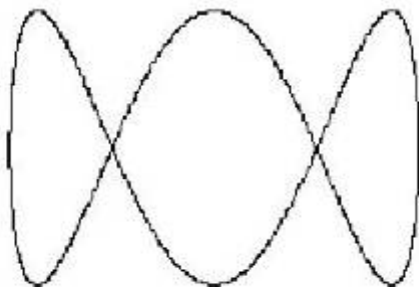
$$f_1 : f_2 = 2$$
$$\varphi = 45^\circ$$



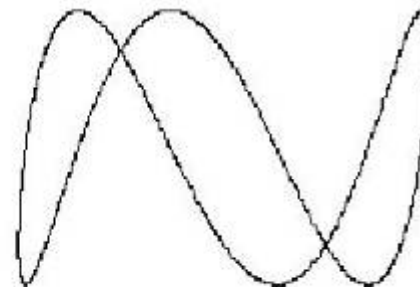
$$f_1 : f_2 = 2$$
$$\varphi = 90^\circ$$



$$f_1 : f_2 = 3$$
$$\varphi = 45^\circ$$



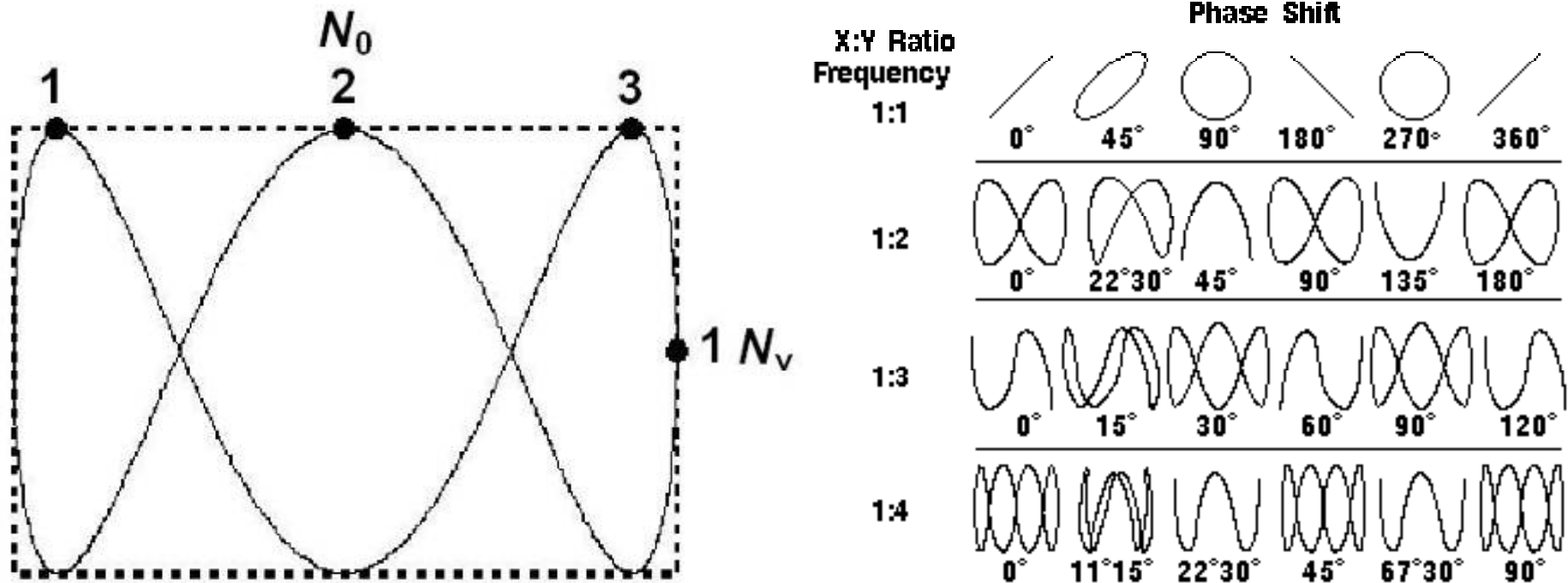
$$f_1 : f_2 = 3$$
$$\varphi = 90^\circ$$



$$f_1 : f_2 = 3$$
$$\varphi = 135^\circ$$

Figure di Lissajous: prodotte da due segnali sinusoidali (in modalità X-Y) con differenti frequenze e sfasamenti

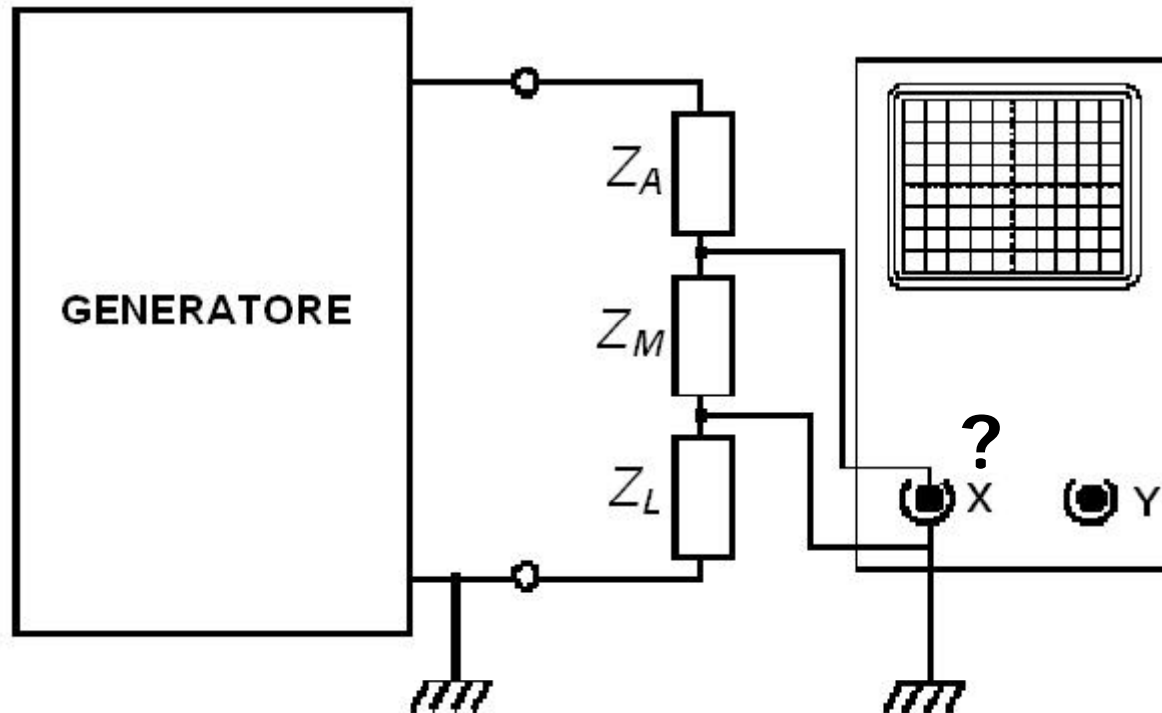
Figure di Lissajous (2/2)



Misura del rapporto di frequenza tra due segnali mediante il conteggio del numero dei punti di tangenza. In questo caso $N_O = 3$ e $N_V = 1$: il rapporto di frequenza è quindi pari a $N_O / N_V = 3$

Figure di Lissajous per due sinusoidi di pari ampiezza, al variare del rapporto di frequenza e dello sfasamento delle due onde

Misure differenziali (1/2)

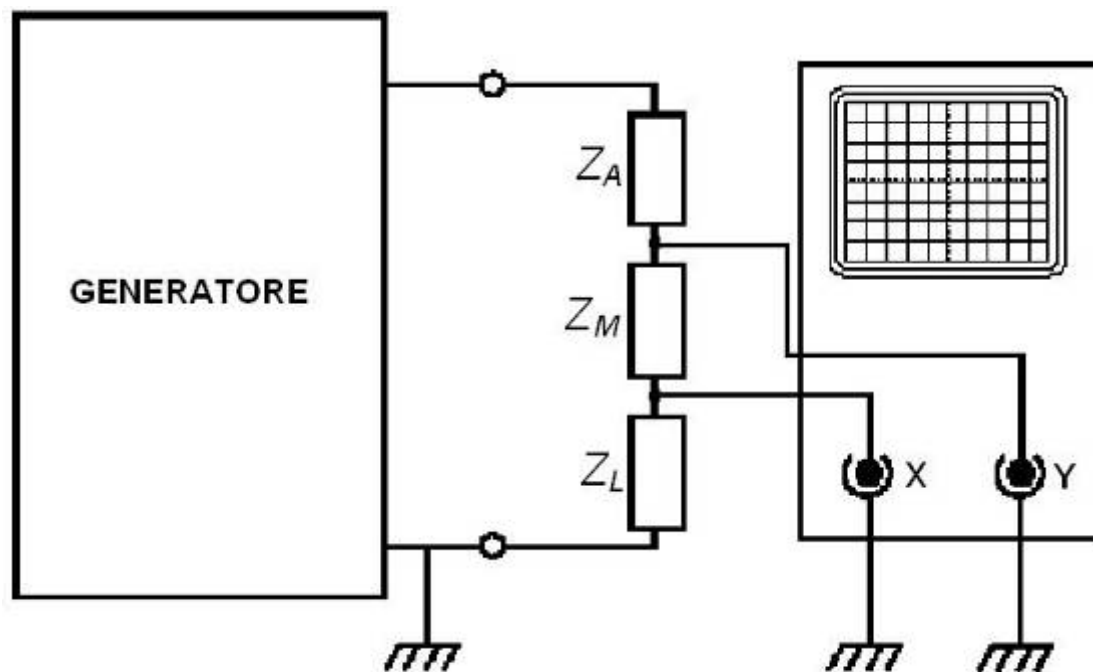


Gli ingressi dell'oscilloscopio sono **di tipo sbilanciato** (cioè hanno un terminale connesso a massa). Un singolo ingresso può non essere adatto per misure di tipo differenziale

Gli ingressi sbilanciati dei canali di amplificazione verticale dell'oscilloscopio e la connessione elettrica del morsetto di riferimento alla terra della rete elettrica di alimentazione possono portare a problemi di misura quando nel circuito sotto misura siano presenti altri dispositivi dotati di connessione a terra

Misure differenziali (2/2)

L'impedenza Z_M non ha alcun estremo connesso a massa

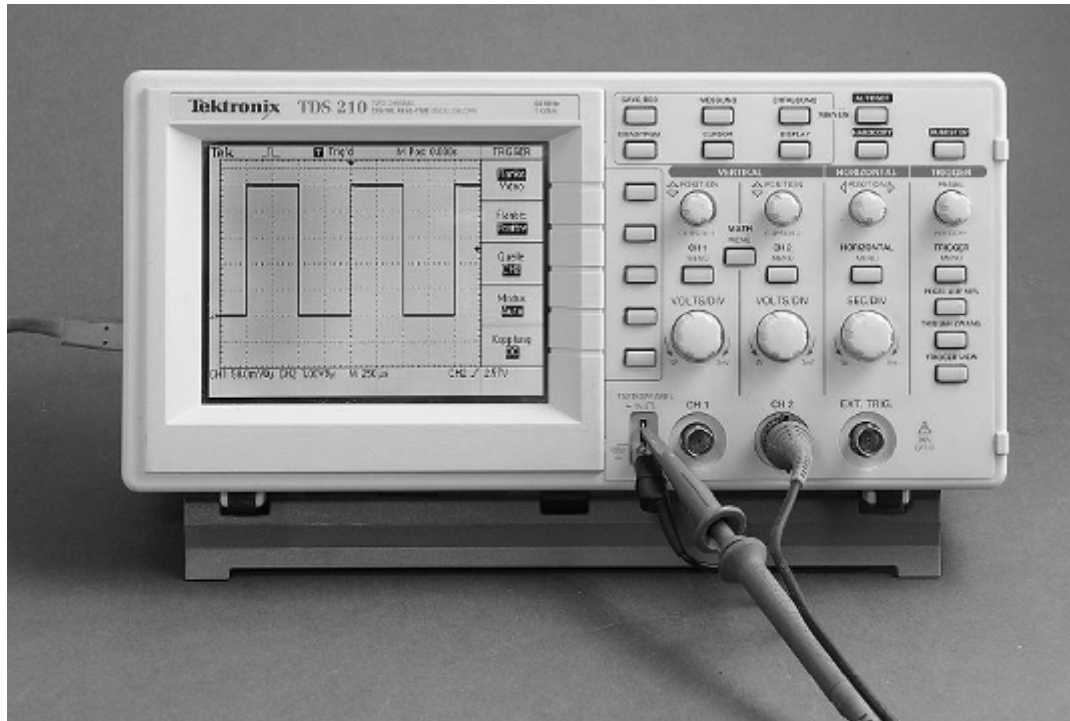


Collegando i due ingressi dell'oscilloscopio ai morsetti dell'impedenza Z_M e visualizzando sullo schermo la **tensione differenza** ($V_Y - V_X$), si ottiene una corretta misura della caduta di tensione sull'impedenza

Per misurare la tensione V_M senza alterare le condizioni di funzionamento (impedenze e punti di massa) del circuito sotto misura, si impiegano entrambi gli ingressi dell'oscilloscopio e si visualizza la loro differenza

OSCILLOSCOPI DIGITALI

Oscilloscopio Digitale



Tektronix TDS 210:
8 bit, 1 GSa/s, $B=60$ MHz
2 canali, display monocrom.
misure automatizzate...
(sonda con calibratore su CH2, 1 V/DIV
e 250 us/DIV, che segnale è?)



Interfacce di comun.:
seriale (RS-232),
parallela (Centronics)
GPIB (IEEE-488)

Introduzione

Principio di funzionamento: **campionamento e conversione del segnale** (campioni numerici), **memorizzazione della sequenza, elaborazione e visualizzazione**

Innovazione tecnologica: convertitori A/D, memorie a semiconduttore, microprocessori veloci,...

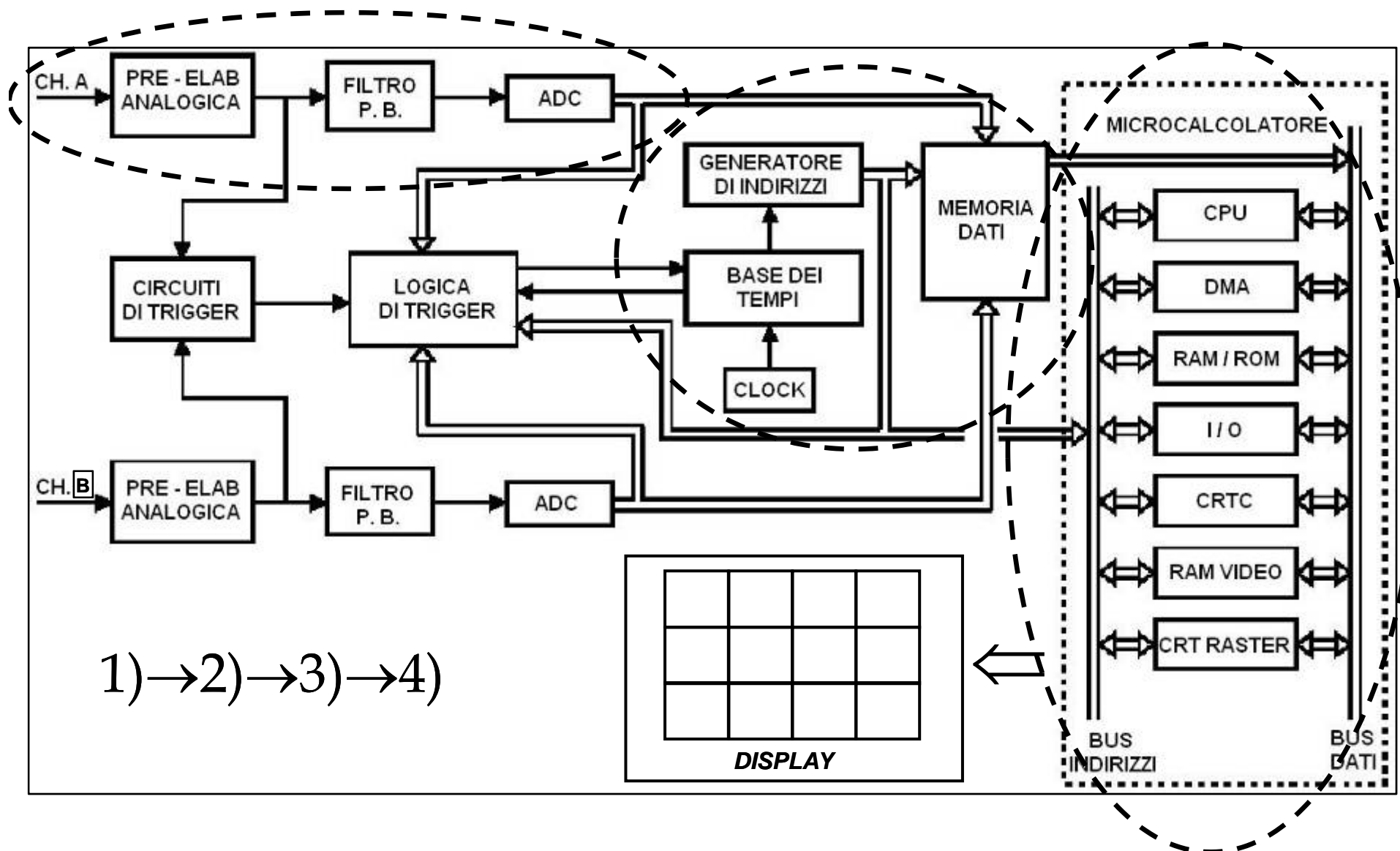


OSCILLOSCOPI DIGITALI o DSO
(Digital Storage Oscilloscope)

4 Sezioni o fasi di misura

- 1) **Condizionamento analogico**, campionamento e conversione in sequenza numerica del segnale di misura
- 2) Memorizzazione dei campioni
- 3) Elaborazione numerica (ricostruzione andamento del segnale nel tempo)
- 4) Visualizzazione sullo schermo (*display*): oscillogramma del segnale

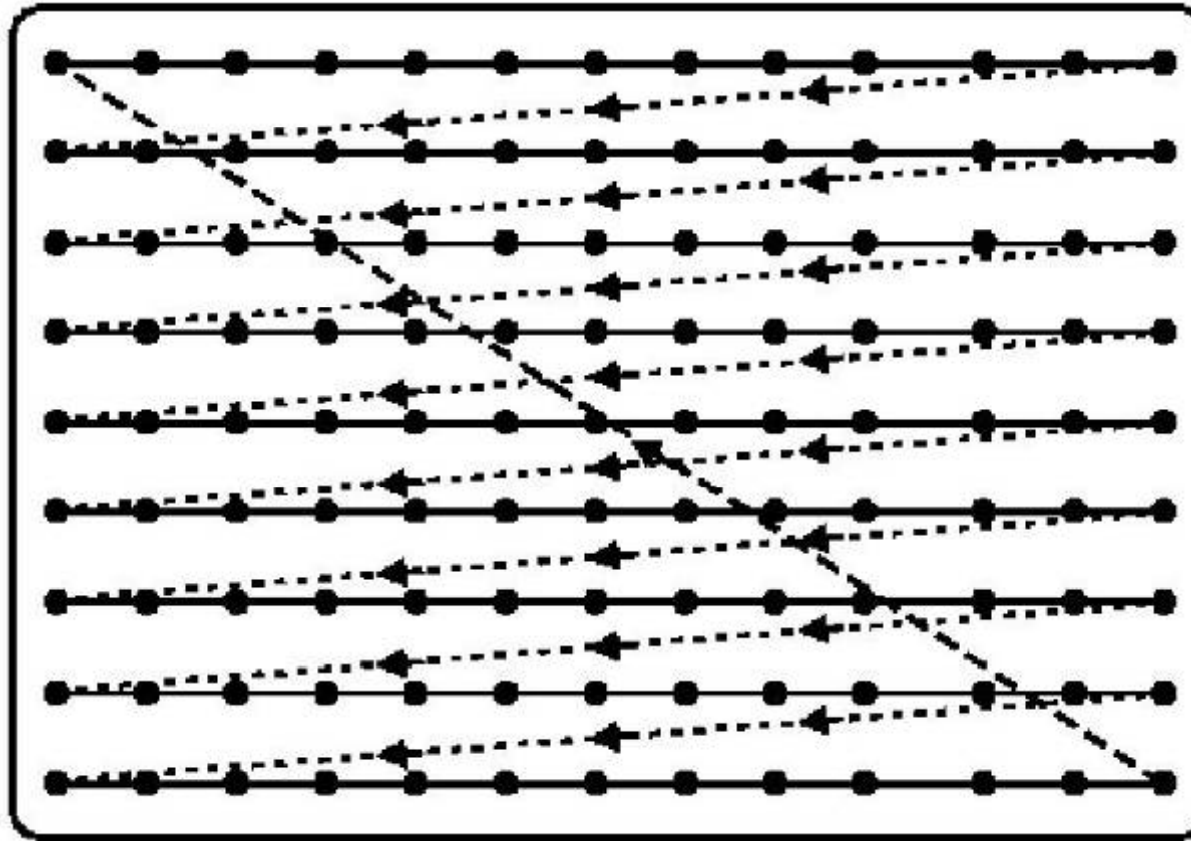
Schema a blocchi di un DSO



Elementi di novità

- Disaccoppiamento temporale tra il segnale e la visualizzazione (permesso dalla memorizzazione dei campioni e "successiva visualizzazione")
L'OSCILLOGRAMMA NON E' IN TEMPO REALE CON IL SEGNALE
- Visualizzazione mediante *display* di tipo *raster* (matrice bidimensionale di *pixel*)
- Memoria **RAM video** (la “mappatura” dell’immagine da realizzare ha una memoria dinamica dedicata)
- **Dispositivi Input/Output (I/O)** per trasferimento dati (stampante, *plotter*, memorie di massa, PC, rete Internet); interfacce RS-232, GPIB, USB, TCP-IP

Scansione linee/colonne dello schermo



Importante proprietà (*display raster*): il tempo necessario per tracciare l'immagine è indipendente dalla complessità dell'immagine

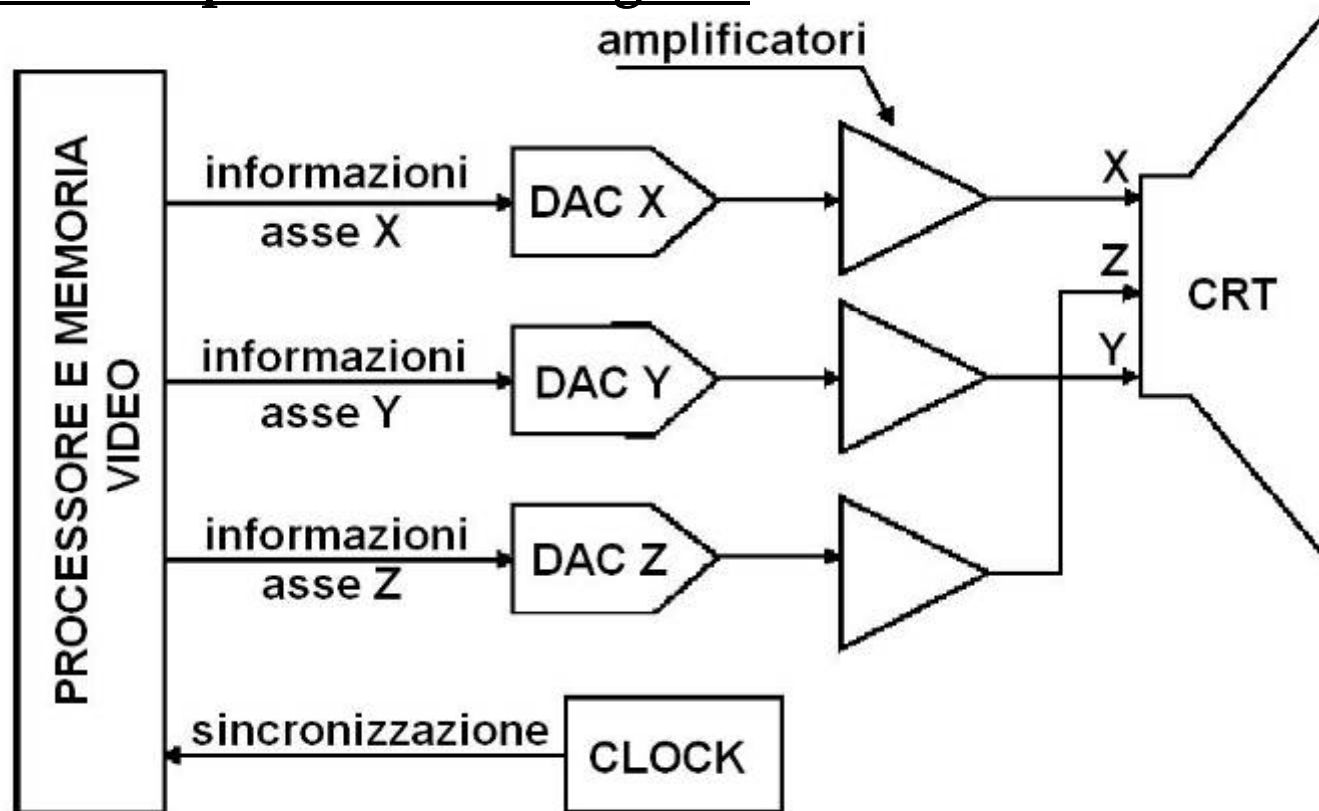
Parametri della visualizzazione *raster*

- Rinfresco quadro: il periodo di rinfresco, o **tempo di quadro**, deve essere più piccolo della somma del tempo di persistenza dell'immagine sulla retina con quello di fosforescenza dei fosfori: $10\text{ ms} \div 20\text{ ms}$
- Risoluzione dello schermo: **standard VGA** (640 righe orizzontali per 480 righe verticali, 307 200 *pixel*); vi sono oscilloscopi con risoluzioni più spinte (800 x 600 o anche 1024 x 1024)
- Requisiti di banda passante: una completa deflessione orizz. avviene in un **tempo di riga** ($20\text{ ms}/480 = 41.67\text{ }\mu\text{s}$) che è di 4 ordini di grandezza più lento del tempo minimo di scansione (5 ns) dei più veloci CRT per OA

Conv. DAC e amplificatori X – Y – Z

Visualizzazione con un **CRT tradizionale**
(a controlli analogici e scansione di tipo *vector*)

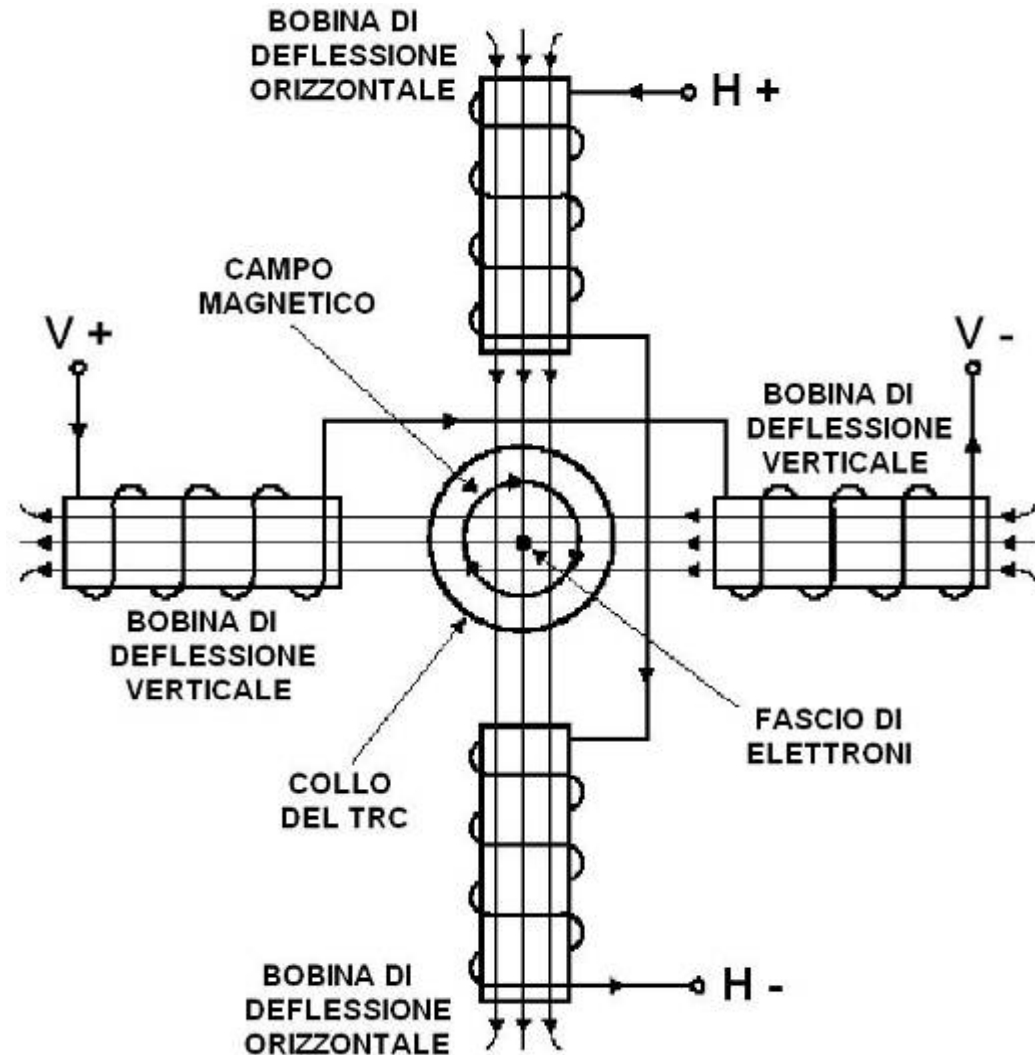
Oscilloscopio a memoria digitale



Z è il comando di **intensità** (griglia del CRT)

Deflessione e.m. in TRC di tipo *raster*

Le bobine di deflessione elettromagnetica sono meno "sensibili" (cm/V) [e di fatto più "lente"] delle placchette elettrostatiche ma consentono un comando elettrico semplice, in tensione/corrente, con la possibilità di regolare la posizione delle bobine (esterne) rispetto all'asse del tubo

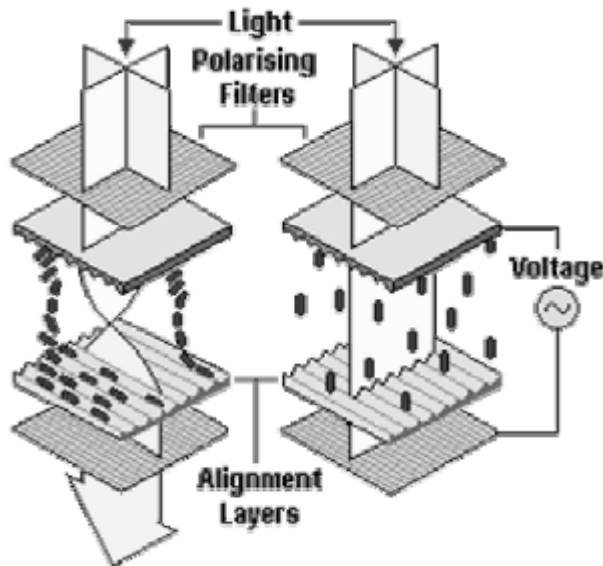
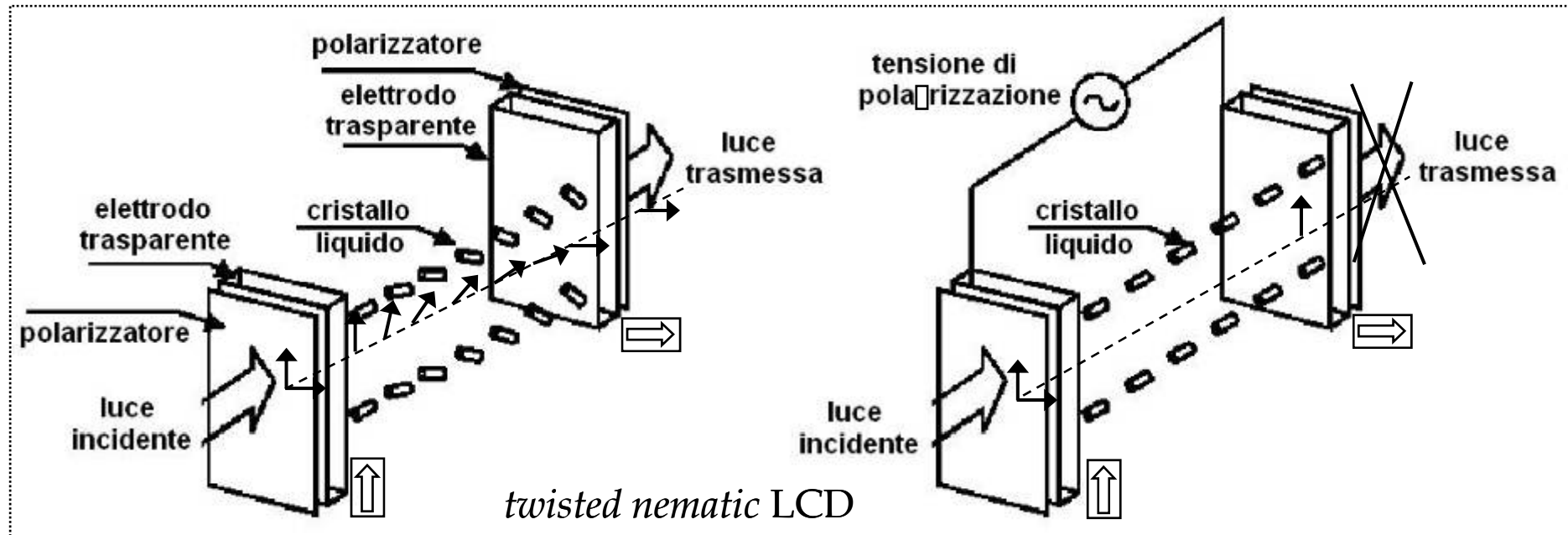


Display a schermo piatto (FPD)

L'evoluzione delle tecnologie elettro-ottiche ha reso disponibile, nel campo dei DSO, dispositivi per la visualizzazione che non richiedono la presenza di un tubo a vuoto. Le caratteristiche dei *display* FPD (*Flat Panel Display*) sono la ridotta profondità, il peso e il consumo assai limitati, e l'organizzazione dello schermo in una matrice di celle elementari (*pixel*)

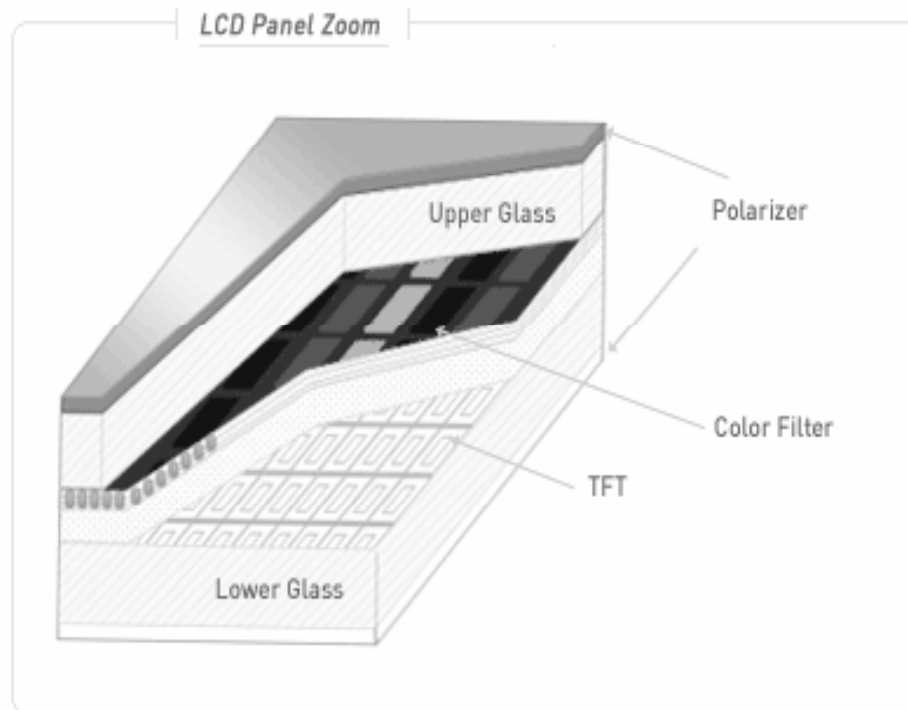
Diverse tecnologie: - **elettroluminescenza**
- **LED** (*Light Emitting Diode*)
- **LCD** (*Liquid Crystal Display*)
- **TFT** (*Thin Film Transistor*, LCD)
- ...**OLED** (*Organic LED*)

Visualizzatori a LCD



La luce polarizzata viene ruotata e trasmessa in assenza di campo elettrico applicato (*pixel* acceso) mentre non ruota e dunque viene bloccata in presenza della tensione di polarizzazione (*pixel* spento)

Display a TFT



La differenza tra TFT e LCD tradizionale è il modo in cui viene polarizzato il cristallo liquido. Mentre negli LCD tradizionali si applica una tensione dall'esterno del pannello di visualizzazione, come in un condensatore, nella tecnologia TFT il campo elettrico è applicato direttamente al *pixel* tramite un transistor a film sottile realizzato con un substrato di materiale semiconduttore trasparente depositato sulle superfici interne dei vetri che ospitano anche i cristalli liquidi.

VANTAGGIO: I e V basse e t rapidi

LCD a TFT (*Thin Film Transistor*): integra nella cella elementare anche un transistor per l'accensione e spegnimento del *pixel*. Tecnologia a matrice attiva, che permette di realizzare *display* a colori ad elevata risoluzione e con ampie dimensioni dello schermo

Condizionamento analogico

La sezione analogica di un DSO ricalca, in linea di principio, quella di un oscilloscopio analogico

Per evitare fenomeni di *aliasing*, si può effettuare un filtraggio di tipo passa-basso ma solitamente si preferisce omettere il filtro *anti-aliasing* per non limitare la banda di misura (v. camp. tempo equiv.)

Grazie alla modalità di campionamento in tempo equivalente la banda di misura, su segnali periodici o almeno ripetitivi, può essere anche superiore alla velocità di campionamento

(invece, per il teorema di Shannon $B_{\text{mis}} < f_c/2$)

Conversione A/D e acquisizione dati

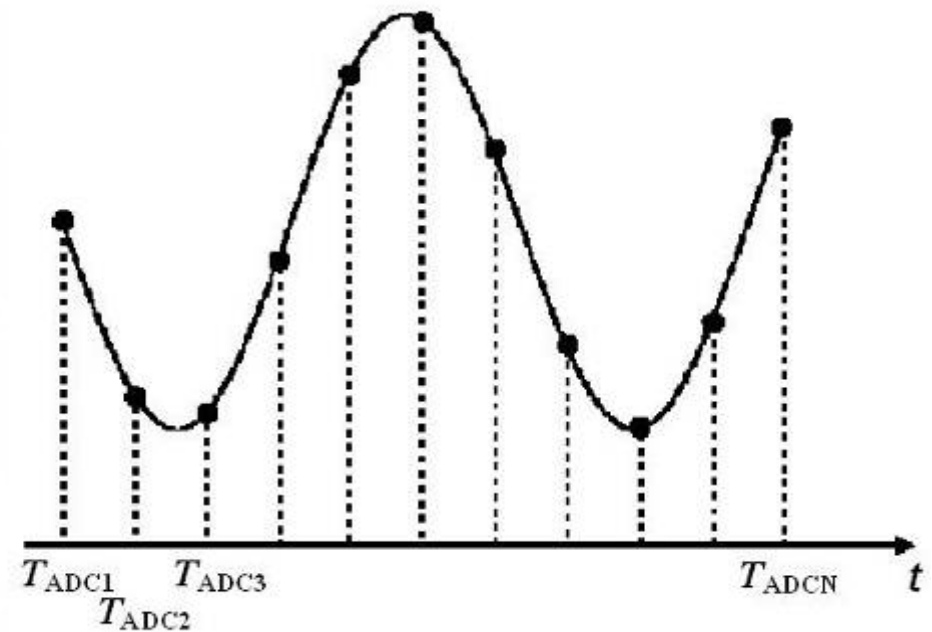
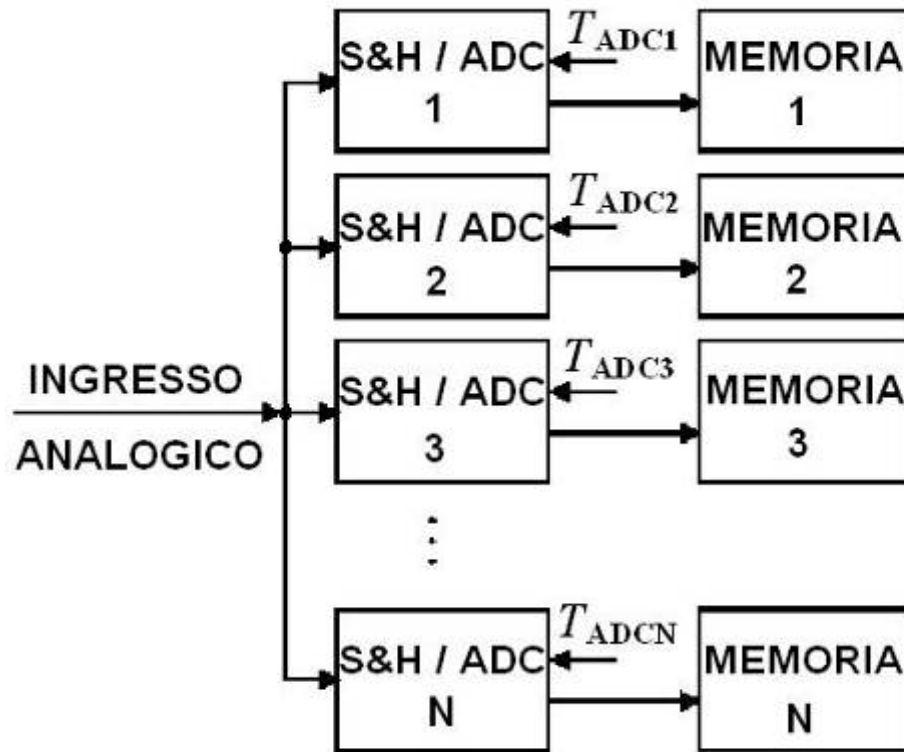


Parametri:

- **Risoluzione** del convertitore analogico / digitale
- Massima **frequenza** di campionamento e conversione
- Capacità (o profondità) massima di **memoria**, cioè il numero massimo di campioni memorizzabili

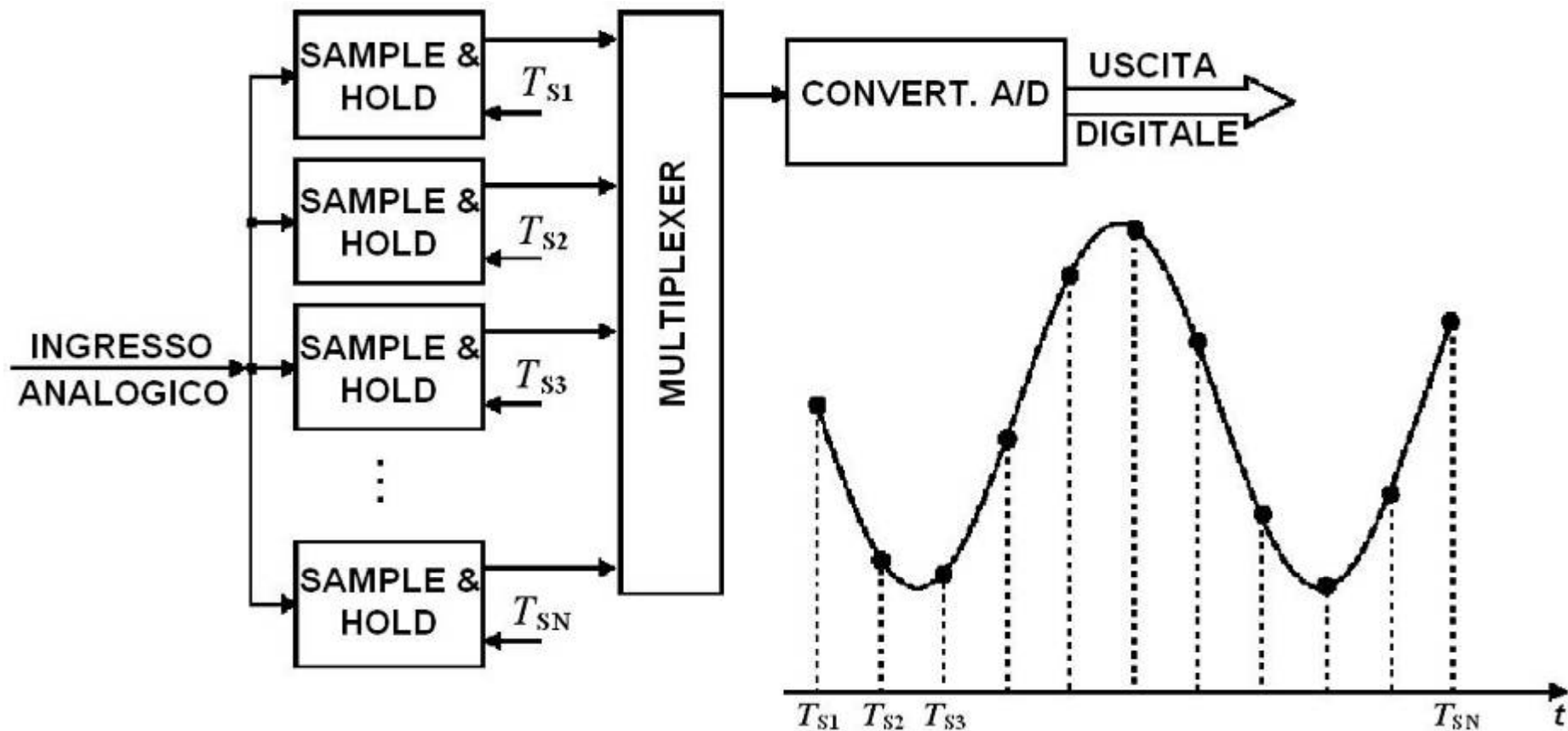
Esempi di configurazioni (1/2)

Campionamento e conversione a multiconvertitore



Esempi di configurazioni (2/2)

Struttura con singolo convertitore A/D in *multiplexing*

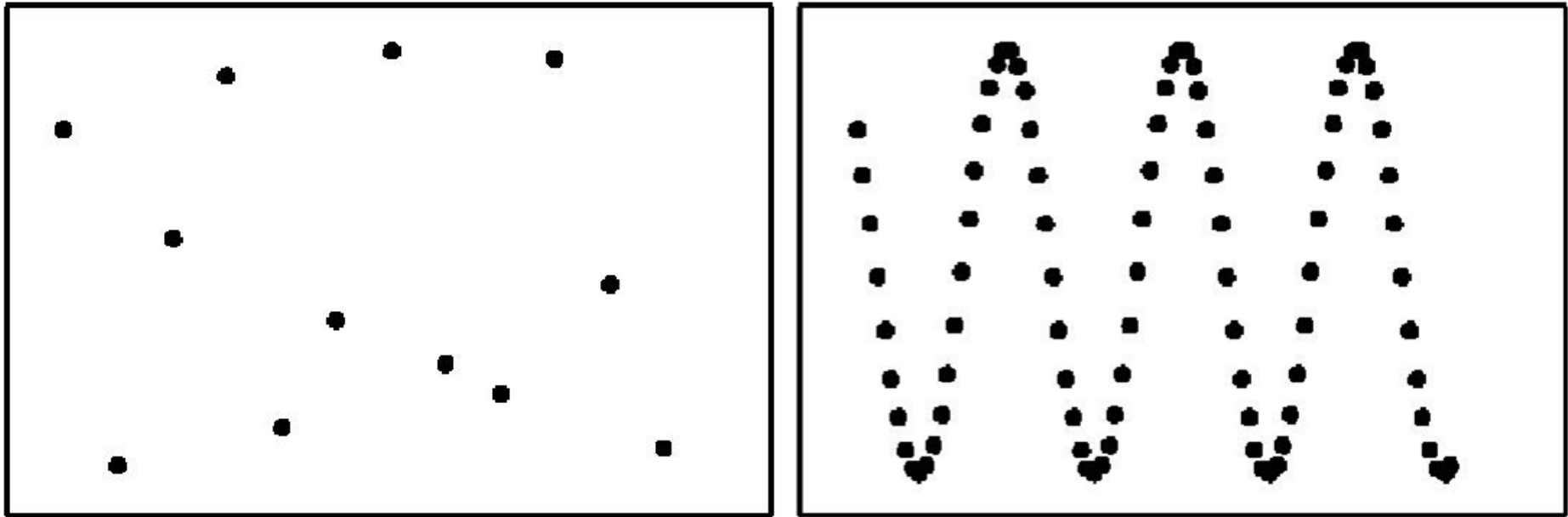


Problematiche del campionamento

Teorema del campionamento (e Pb. *aliasing*):
la **frequenza di campionamento** (in tempo reale) deve essere più **elevata** del doppio della massima frequenza del segnale

Visualizzazione per punti (Pb. *aliasing* percettivo):
affinché l'occhio possa riconoscere distintamente la forma d'onda, il numero di campioni acquisiti (su ciascun periodo) deve essere sufficientemente elevato da non generare ambiguità di percezione.
Con i segnali sinusoidali un valore convenzionale è di almeno 25 punti per periodo

Aliasing percettivo

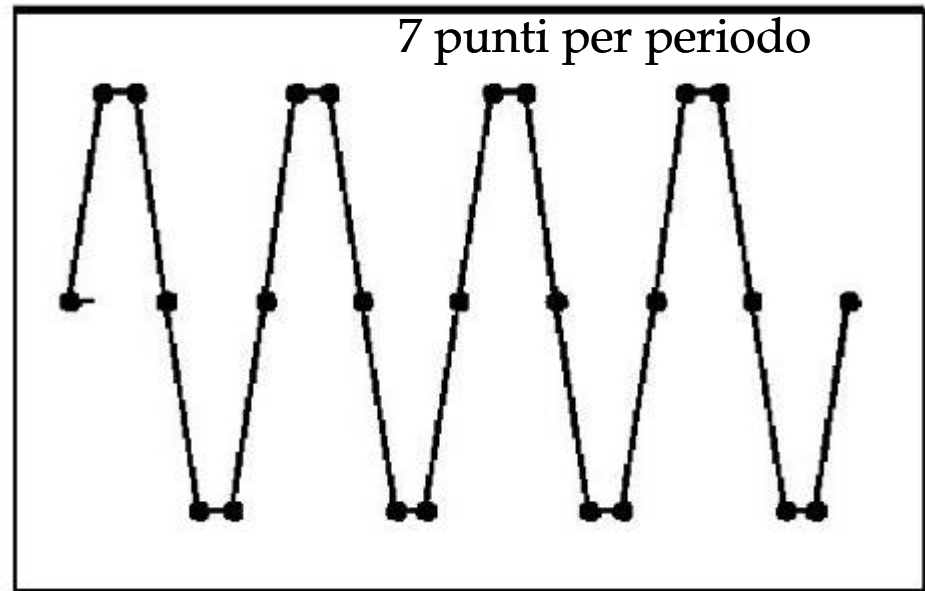
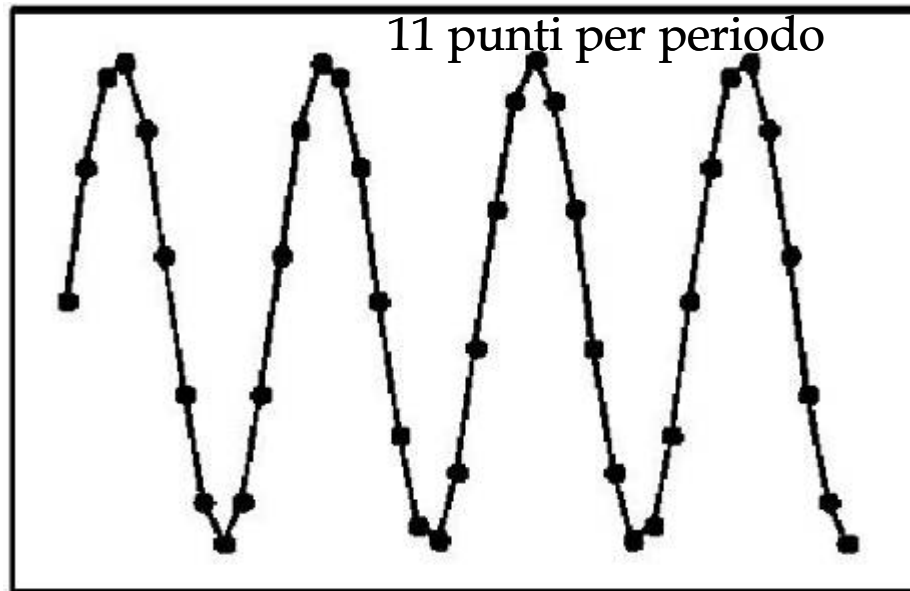


Anche rispettando il teorema del campionamento, con pochi punti per periodo la forma d'onda può non essere riconosciuta in maniera corretta

(la stessa sinusoide è visualizzata con
4 punti per periodo a sx e 25 a dx)

Interpolatori

Interpolatore lineare: riduce a circa 10 i punti necessari per periodo. Sotto questo valore è possibile interpretare erroneamente il segnale visualizzato



Interpolatore a $\sin(x)/x$: basato sulla teoria di Shannon, riduce a 2.5 il numero di punti necessari. La banda di misura risulta il 40% ($\approx f_c/2$) della massima frequenza di campionamento del convertitore A/D (in *real-time*)

Modalità di campionamento

Il campionamento di un segnale in un DSO può avvenire secondo tre differenti modalità:

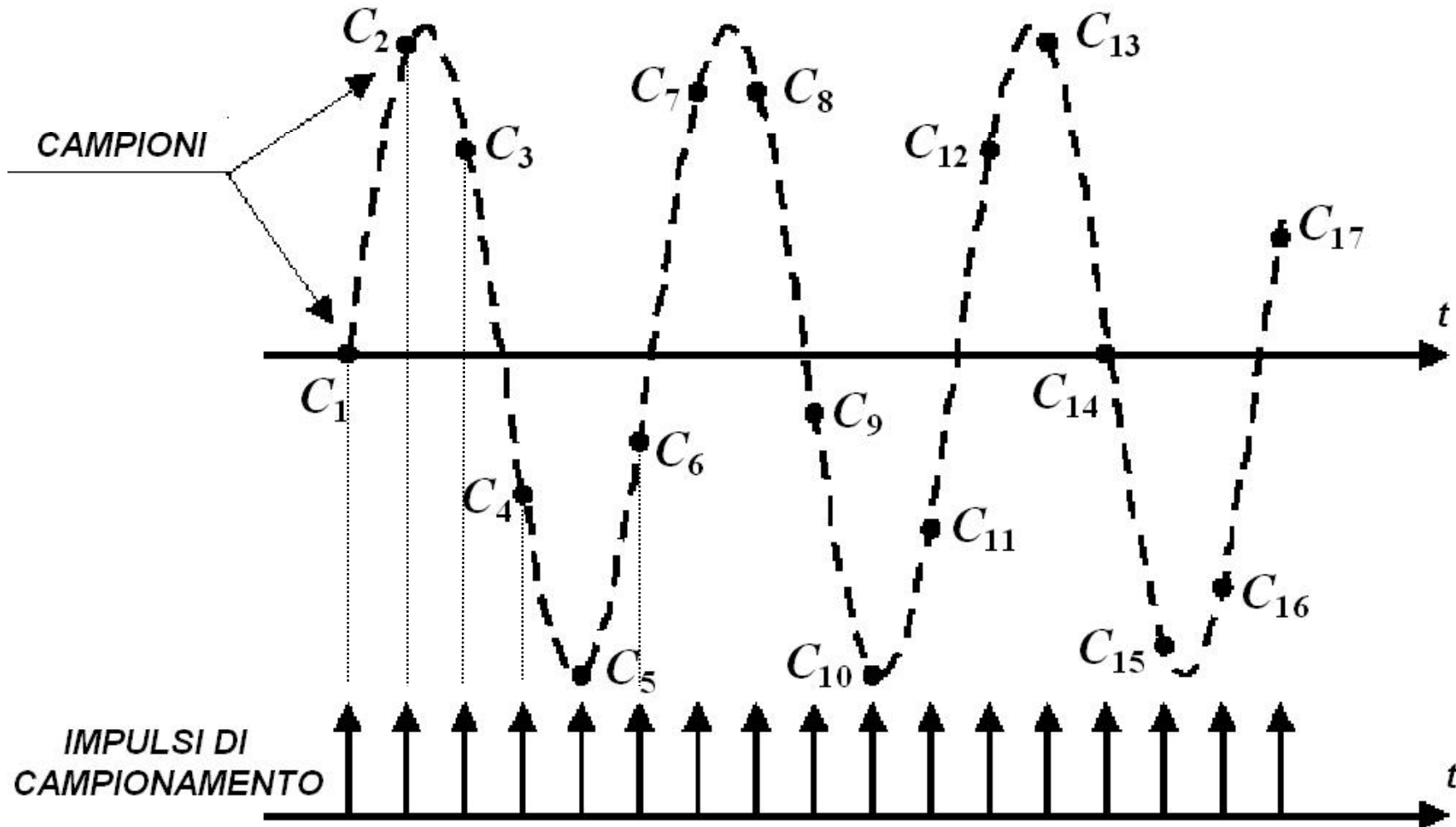
- Camp. **in tempo reale** (*single shot*)
- Camp. **in tempo equivalente di tipo sequenziale**
- Camp. **in tempo equivalente di tipo casuale**

La prima modalità ha validità generale (ma presenta limiti di banda); le altre due sono invece applicabili solo alla classe dei segnali ripetitivi o periodici (e consentono di visualizzare segnali molto veloci)

In tempo reale i campioni sono prelevati direttamente nel periodo/tempo del segnale da visualizzare.

In tempo equivalente i campioni sono presi su più periodi della forma d'onda e successivamente riordinati e visualizzati.

Campionamento in tempo reale

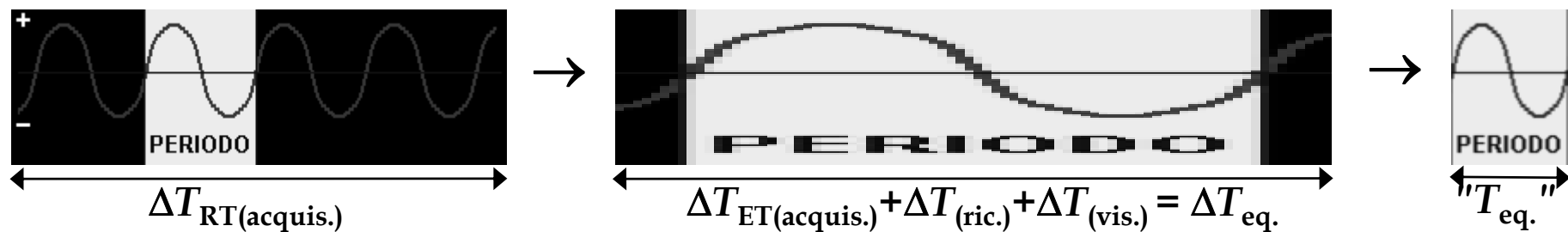


La sequenza dei dati acquisiti rispetta la sequenza temporale dei punti della forma d'onda che evolve sull'asse dei tempi

Camp. seq. in tempo equivalente (1/4)

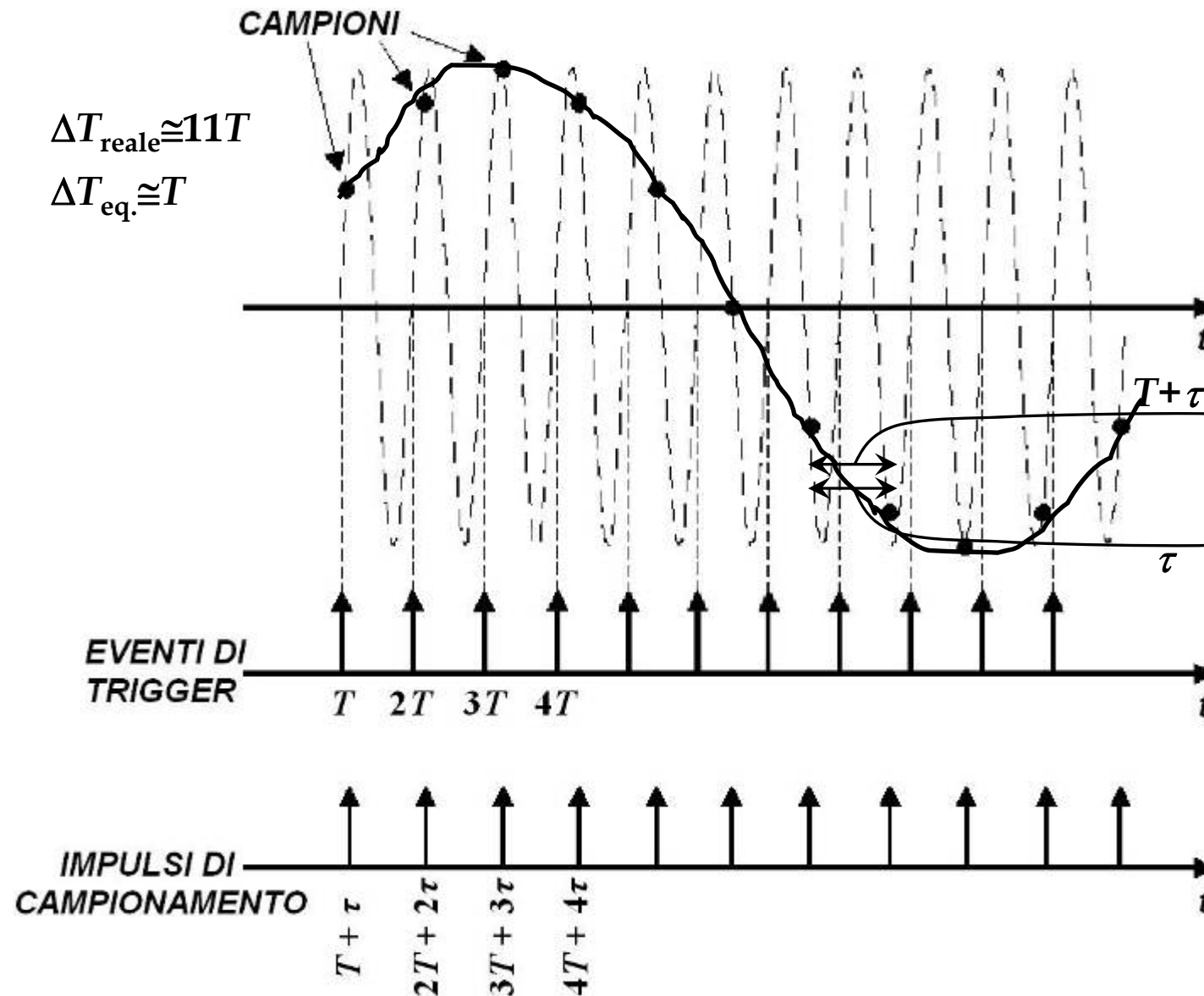
Si prendono i diversi campioni all'interno di periodi differenti del segnale (con una distanza temporale successivamente incrementata, dallo stesso punto di riferimento – *trigger* – scelto nel periodo).

Dall'insieme di campioni acquisiti in “un tempo più lungo” del periodo T , si può ricostruire l'andamento della forma d'onda nel singolo periodo



Il tempo realmente occorrente per l'acquisizione (ΔT_{RT}) e il periodo equivalente sul segnale visualizzato ($T_{eq.}$) sono anche molto differenti tra loro e può essere $\Delta T_{RT} \gg T_{eq.}$

Camp. seq. in tempo equivalente (2/4)



Camp. seq. in tempo equivalente (3/4)

Per la ripetitività con periodo T del segnale $s(t)$, i campioni prelevati agli istanti di tempo τ e $\tau + kT$ (con k intero) risultano uguali. Quindi, anziché campionare con un intervallo ${}^*T_c = \tau$ (${}^*f_c = 1/{}^*T_c = 1/\tau$) si può adottare il periodo di campionamento “rallentato” $T_c = kT + \tau$ ($f_c = 1/T_c = 1/(kT + \tau)$), che risulta **superiore di un fattore $\xi = (kT/\tau + 1)$** rispetto al *T_c richiesto se si effettuasse un campionamento in tempo reale:

$$\begin{array}{ccc} \nearrow \text{freq.camp.eq.} & {}^*f_c = \frac{1}{\tau} & \nearrow \text{freq.camp.reale} \\ & & f_c = \frac{1}{kT + \tau} \end{array} \quad \frac{f_c}{{}^*f_c} = \frac{1}{kT / \tau + 1} < 1$$

La frequenza di campionamento in tempo equivalente ${}^*f_c = \xi f_c = 1/\tau$ è più elevata (può essere $\xi = 10-100$) della frequenza di campionamento in tempo reale (f_c)

Camp. seq. in tempo equivalente (4/4)

In queste condizioni può essere $f_c = f_{\max, A/D} < f_{\text{segnale}}$ pur consentendo una **corretta ricostruzione del segnale**, “con abbastanza punti per periodo”, per la qual cosa si deve avere $f_c > f_{\text{segnale}}$ o anche $f_c \gg f_{\text{segnale}}$

Nella sequenza campionata e quindi ricostruita in tempo equivalente, si ottiene una **distanza (risoluzione temporale) τ tra due campioni adiacenti** molto spinta, che non sarebbe ottenibile con un campionamento in tempo reale

Allo stato dell'arte, si possono raggiungere **risoluzioni temporali di 1 ps** tra i campioni e visualizzare **segnali con banda fino a 50 GHz** (dunque con ben 20 punti per periodo)

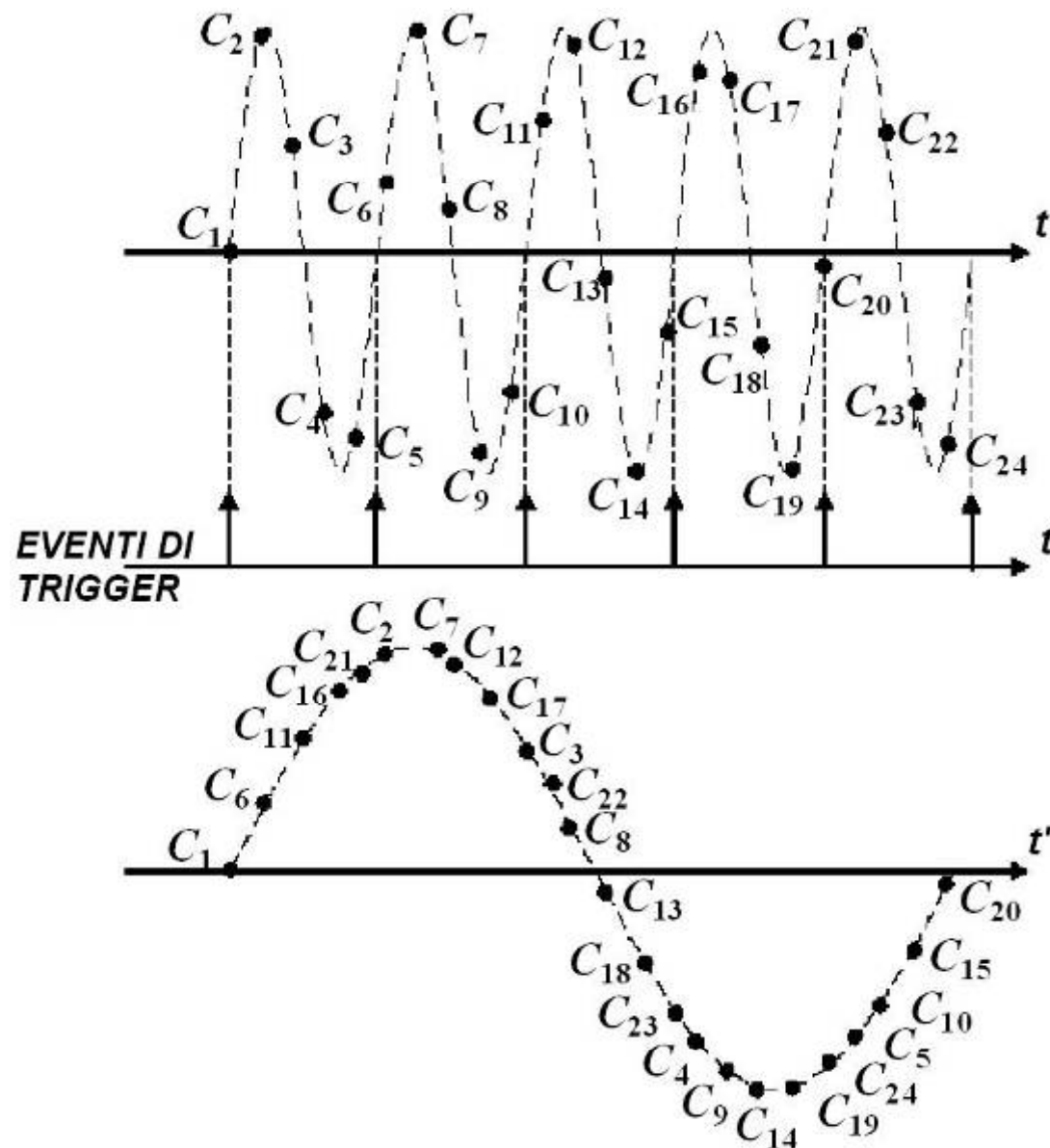
Camp. casuale in t. equivalente (1/2)

I campioni vengono prelevati dal segnale in **modo casuale (asincrono)**, sia prima, sia dopo gli eventi di *trigger*. L'ADC può lavorare alla sua massima velocità. L'**intervallo di tempo** ("positivo o negativo") tra ciascun evento di *trigger* e il successivo campione **deve essere misurato** in modo da poter ordinare correttamente i campioni sul *display* così da ricostruire l'andamento del segnale

A causa della scorrelazione temporale tra la frequenza di campionamento e la frequenza di *trigger*, i campioni acquisiti in cicli di *trigger* successivi possono essere da anteporre a quelli acquisiti in cicli di *trigger* precedenti.

τ non è più la ris. temp. del ritardo ma del contatore eln.

Camp. casuale in t. equivalente (2/2)



Modalità di *trigger* avanzate (1/3)

Nell'oscilloscopio analogico la sincronizzazione avviene attraverso l'individuazione di un livello o di una pendenza

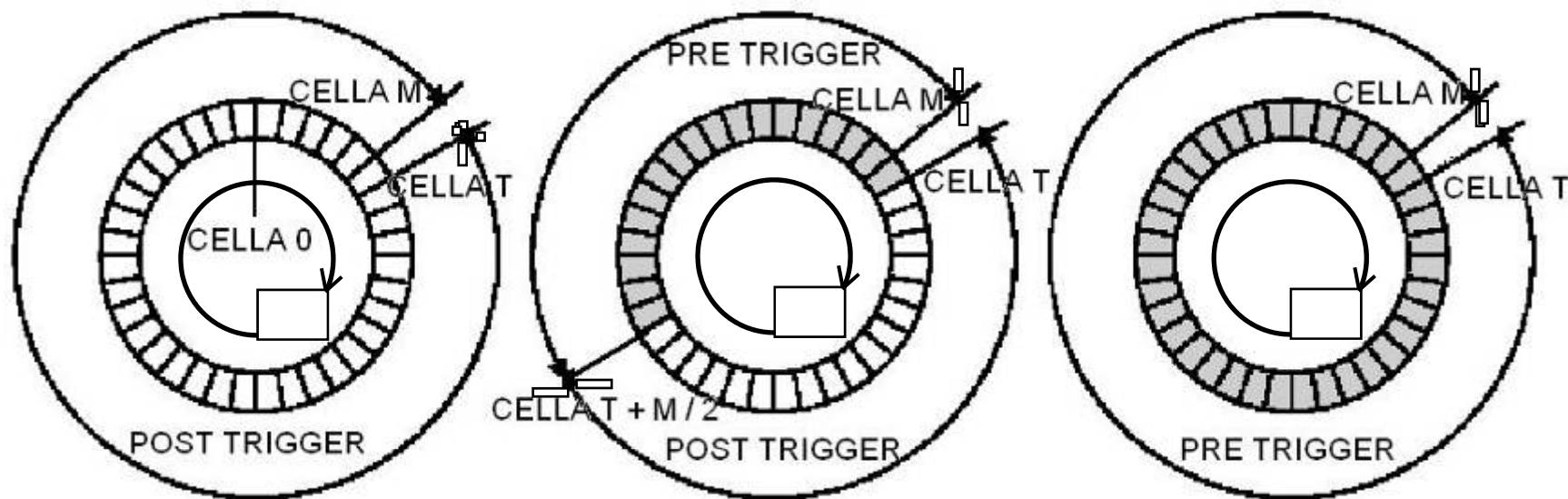
Nell'oscilloscopio digitale esistono modalità di sincronizzazione assai più evolute e complesse

Pre-trigger e memoria circolare: consente di visualizzare sullo schermo l'andamento del segnale anche "prima dell'evento di *trigger*"

Si può rappresentare la **memoria dati** come un ***buffer circolare*** con capacità di ***M* celle**

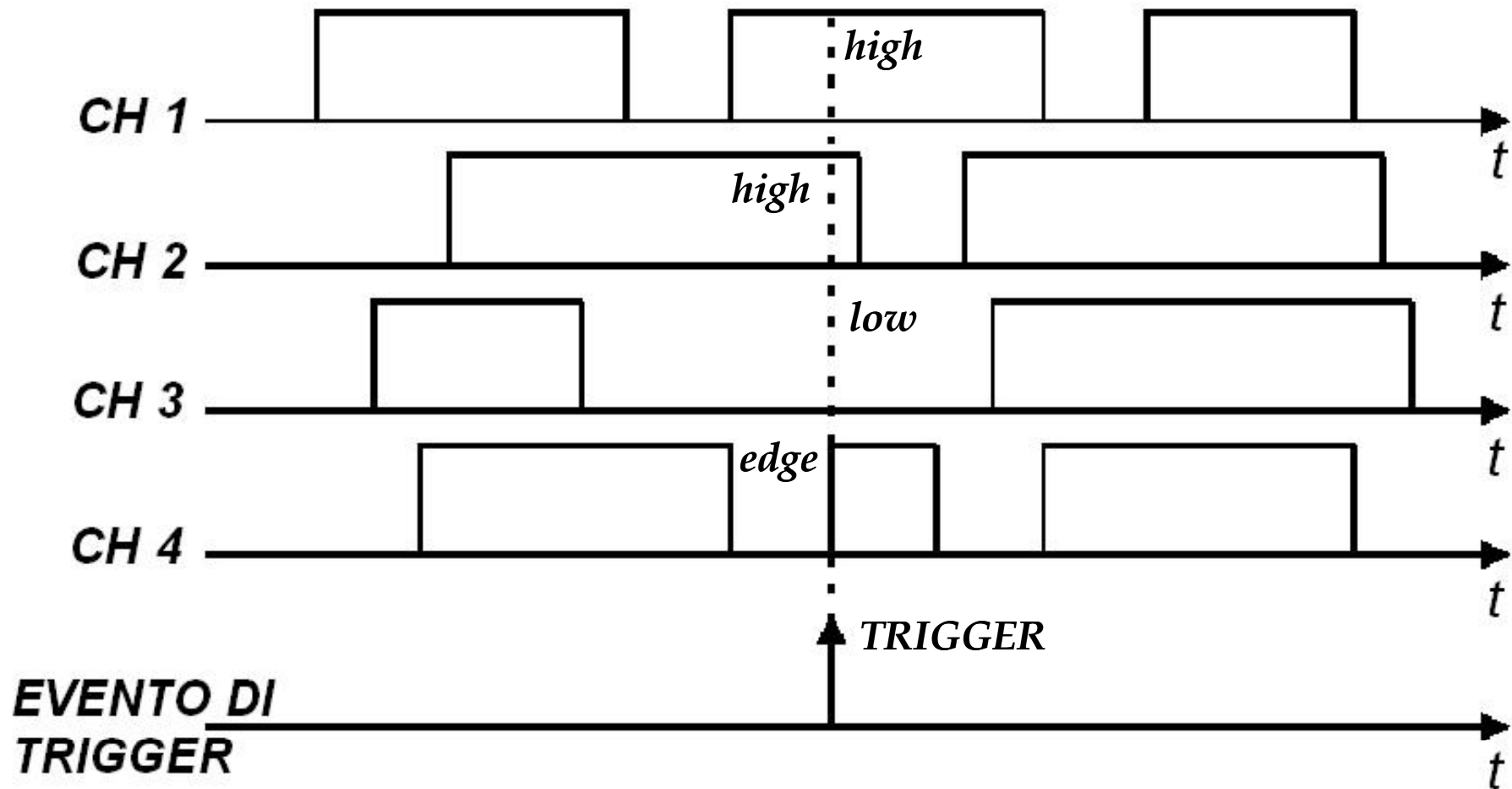
Modalità di *trigger* avanzate (2/3)

Durante il campionamento e la conversione le M celle vengono riempite in modo contiguo. Al verificarsi dell'evento *trigger* l'unità elaborativa del DSO contrassegna il campione acquisito a quell'istante, così da poter identificare i campioni precedenti e quelli successivi al campione/evento di *trigger*



Modalità di *trigger* avanzate (3/3)

Trigger booleano e funzionalità di “logica”



Risoluzione verticale (1/3)

Convertitore 8 bit \rightarrow 256 livelli (risoluzione teorica relativa pari a 0.39% del fondoscala, $u_q \approx 0.1\%$)

Assegnato un valore del coeff. di deflessione verticale, il campo dei valori di ampiezza ammessi (dinamica) con quello compreso tra le due linee orizzontali estreme del reticolo sullo schermo (8 div. $\times A_{y,V/\text{div.}}$)

Es. coeff. di deflessione verticale = 10 mV/DIV
con 8 divisioni verticali:

Max escursione picco-picco = 80 mV

Risoluzione (256 livelli) \cong 0.3 mV

Incertezza “quantizzazione” $\cong 90 \mu\text{V}$ (ma $u_{\text{Noise}} > u_q$)

Risoluzione verticale (2/3)

La risoluzione ha minore o maggiore incidenza sulla accuratezza della misura a seconda del fatto che il segnale di misura assuma valori compresi su tutta la scala dei valori d'ingresso del convertitore A/D oppure presenti un'ampiezza molto inferiore a quella del fondo scala (cmq. l'accuratezza è di qualche decina di mV)

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

Modalità di acquisizione **media** (*average*) e **alta risoluzione** (*high resolution o box car averaging*): n° *bit* effettivi può essere maggiore del n° *bit* reali [si ottiene una riduzione del rumore e migliora S/N]

Risoluzione verticale (3/3)

e.g.: visualizzare in DC il segnale $s(t) = A \sin(2\pi ft) + B$
 $A = 0.25 \text{ V}$ $B = 0.2 \text{ V}$ $f = 25 \text{ Hz}$ (8 DIV verticali)

L'escursione picco-picco è $\Delta V_{pp} = 2A = 0.5 \text{ V}$ con $V_{\min} = -0.05 \text{ V}$ e $V_{\max} = 0.45 \text{ V}$ e naturalmente la linea di zero (vert. pos. con accoppiamento GND) sarà posizionata al di sotto del centro schermo (così da avere l'offset di 0.2 V a centro schermo)

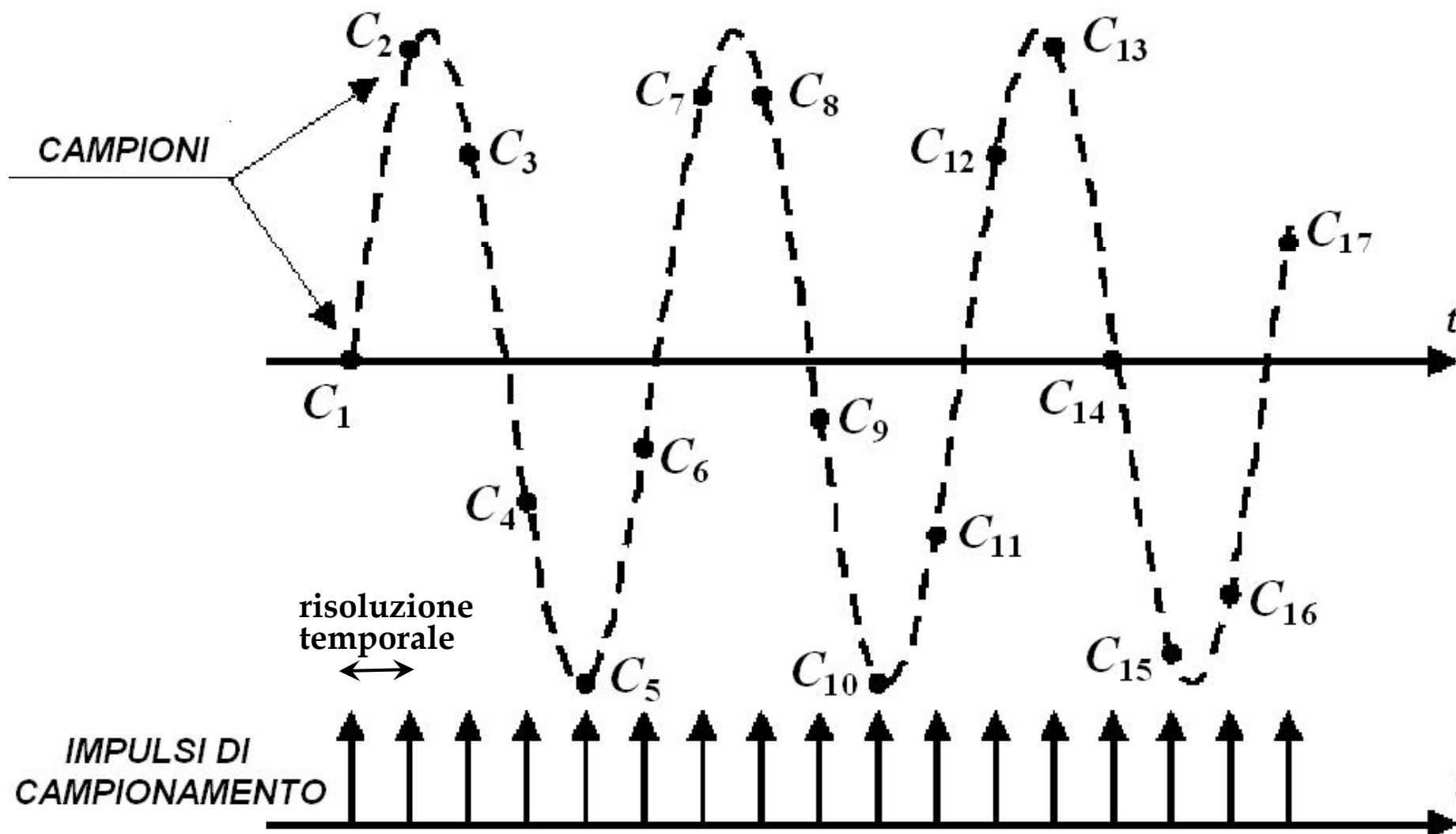
Oscilloscopio **analogico**:

coeff. di deflessione verticale $A_y = 100 \text{ mV/DIV}$
il segnale occupa 4.5 DIV nel verso positivo e 0.5 DIV nel verso negativo: ΔV_{pp} è 5/8 della dinamica verticale

Oscilloscopio **digitale**:

coeff. di deflessione verticale $A_y = 62.5 \text{ mV/DIV}$
il segnale occupa 6.7 DIV nel verso positivo e 1.3 DIV nel verso negativo. Il segnale non esce dal *display* e occupa appieno la scala/dinamica verticale

Risoluzione orizzontale (1/2)



Risoluzione orizzontale (2/2)

Principale limitazione della risoluzione temporale: f_C

Modalità *single shot (real time)*: miglior risoluzione = minimo T_C dell'ADC. T_C dipende dal coeff. di tempo scelto per la taratura dell'asse orizzontale \rightarrow la risoluzione temporale varia in funzione della configurazione scelta (A_x) per il DSO (e.g. 1024 punti asse X)

Camp. sequenziale in t equivalente: risoluzione limitata dalla "precisione" con cui viene controllato il ritardo τ tra campioni equivalenti adiacenti

Camp. casuale in t equivalente: risol. limitata da risol. e accuratezza della **misura dell'intervallo di tempo** tra l'istante di campionamento e l'evento *trigger*

Interfacce I/O e funzioni digitali (1/2)

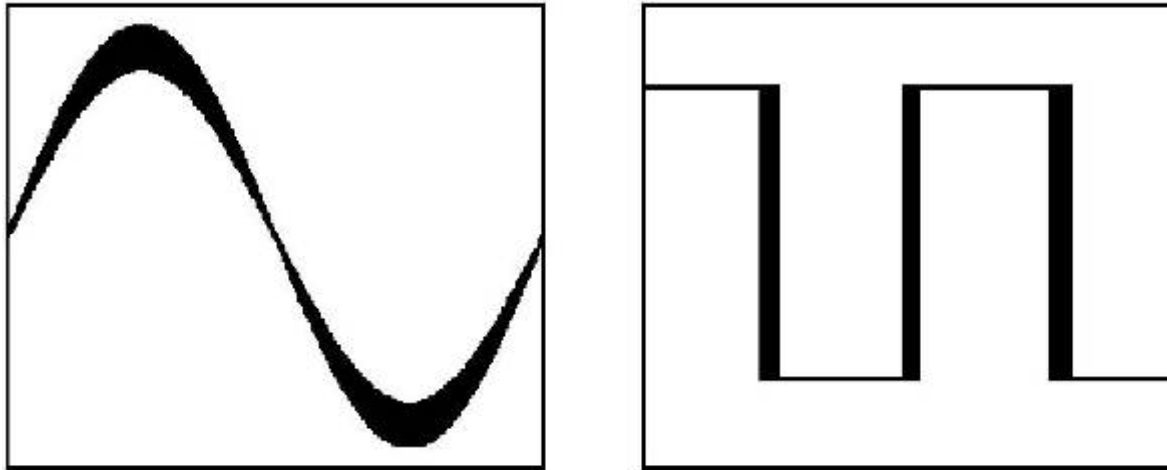
- Tutti i DSO sono dotati di **interfaccia con calcolatore elettronico** (controllo a distanza, sistema di misura automatico, salvataggio dati e *set up* dei comandi)
- **Autoset**: lo strumento cerca la migliore configurazione dei parametri di misura e la predispone (*source, coupling, trigger, coeff. defl. vert., coeff. defl. orizz. per la base dei tempi,...*)
- Cursori (o *markers*) di ampiezza e tempo, che consentono di leggere direttamente sul *display* misure di differenze di tensione o intervalli di tempo [in un OA ci sono solo i *marker* verticali]

Interfacce I/O e funzioni digitali (2/2)

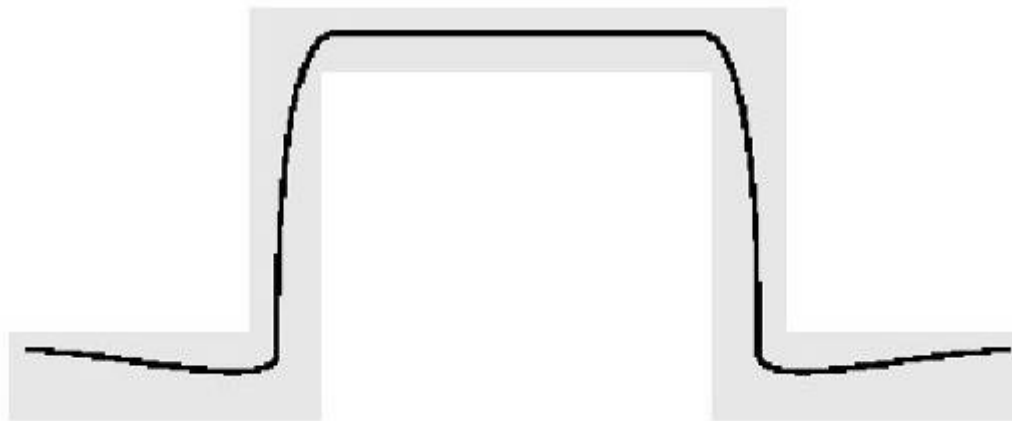
- **Misure standard automatizzate:** in ampiezza (valore medio, efficace, di picco, picco – picco) e in tempo (frequenza, periodo, t_{rise} , intervalli Δt , *duty cycle*)
- **Analisi semplici o più complesse** (spettro FFT, misura di THD, *time-jitter*, analisi statistica del segnale, conformità a una certa "maschera", *etc.*) dei dati di misura, ma in ogni caso “automatizzate”

Esempi di altre funzionalità

Persistenza infinita (DPO)



Controllo di conformità con maschera prestabilita



Vantaggi dei DSO (1/2)

- Maggior **banda** passante (no limite TRC)
- Capacità di **memorizzare** più segnali per "lunghi" intervalli di tempo ("tempo equivalente")
- **Visualizzazione stabile** anche di segnali a bassa o bassissima frequenza (no "sfarfallamento")
- Memorizzazione e visualizzazione **eventi *single-shot***
- Modalità di ***trigger* molto complesse**, adatte per misure in sistemi digitali, analisi di guasti in apparecchiature,...
- Visualizzazione dell'andamento del segnale anche in intervalli di tempo **precedenti l'evento di *trigger***

Vantaggi dei DSO (2/2)

- Capacità di effettuare **in modo diretto ed automatico misure sul segnale** nel dominio del tempo (misure di ampiezza, frequenza, sfasamento, ...) o frequenza
- Possibilità di **documentare facilmente la misura**, trasferendo i dati dal DSO ad una stampante o plotter
- Possibilità di **interfacciare il DSO a un calcolatore** esterno per inserirlo in ambienti di misura o di test automatizzati
- Capacità di effettuare **test di autocalibrazione ed autodiagnosi**
- **HW+DSP+SW+...** (manca solo il caffè!!!)

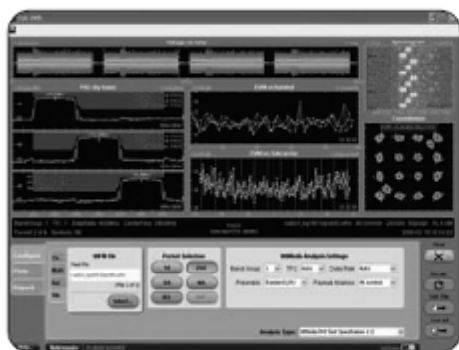
Limiti prestazionali dell'oscilloscopio digitale



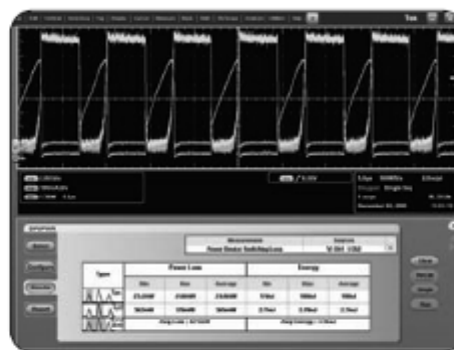
Tektronix Digital Phosphor Oscilloscope **DPO7000**

With four channels up to **20 GHz bandwidth**
Up to **50 GSa/s Real-time Sample Rate**
Up to 200 Megasamples Record Length
Waveform Capture Rate of 300,000 wfms/s

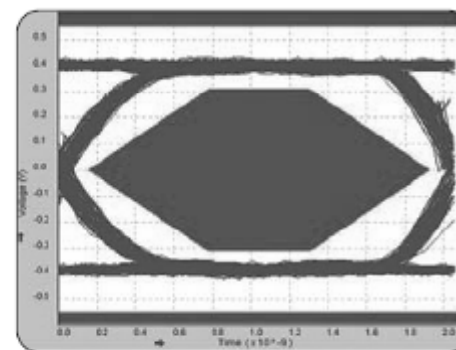
SEMINARIO "MOCA" di Tektronix...



► UWB WiMedia analysis and measurements.



► Power measurements and analysis.



► USB compliance testing.

Oscilloscopi