

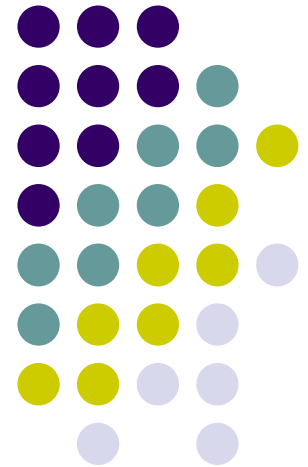
# Sistemi elettronici tecnologie e misure

---

Modalità di campionamento

Aliasing

Sonda oscilloscopio



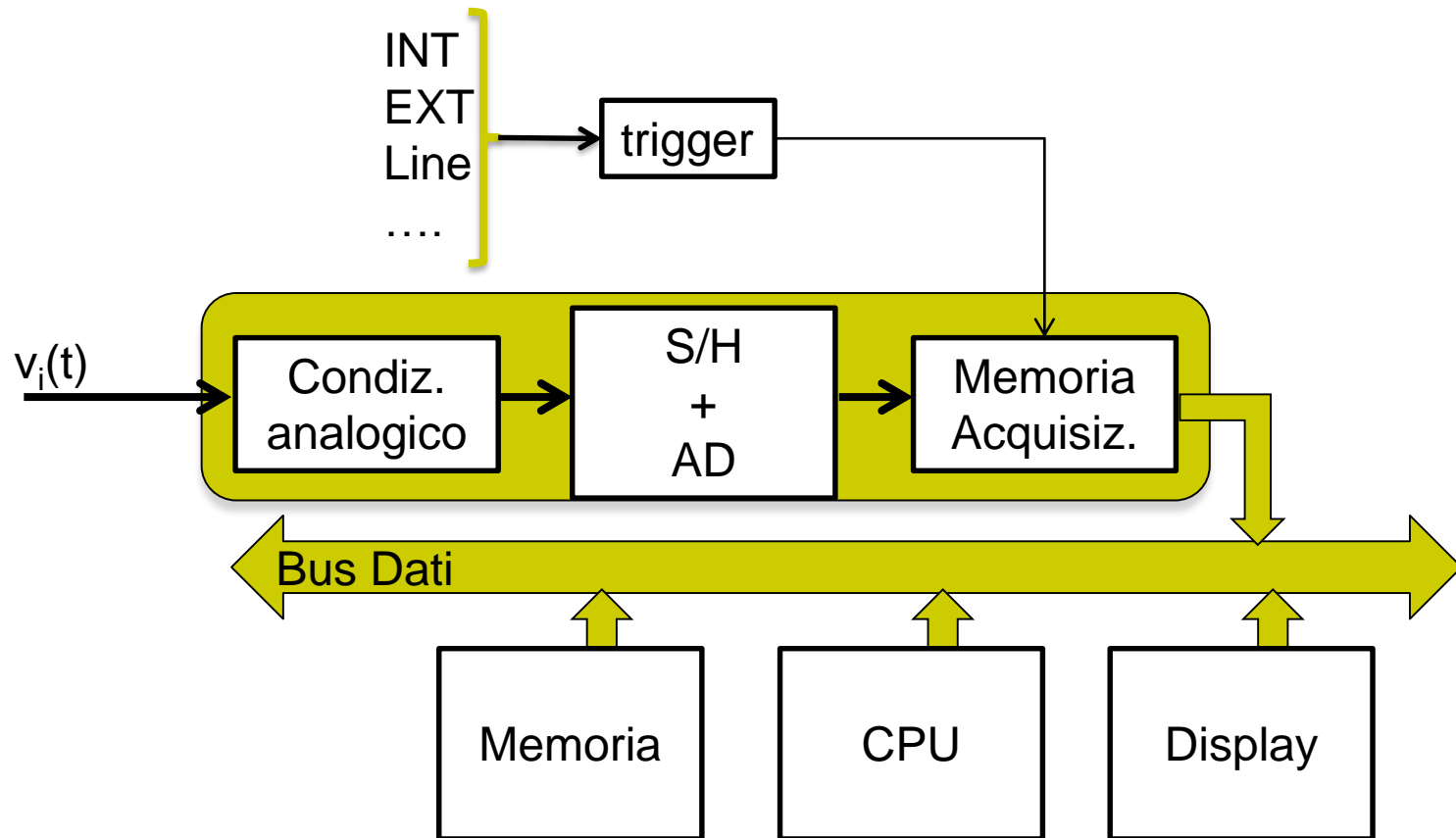
Testo di riferimento:

Fondamenti di misure e strumentazione elettronica

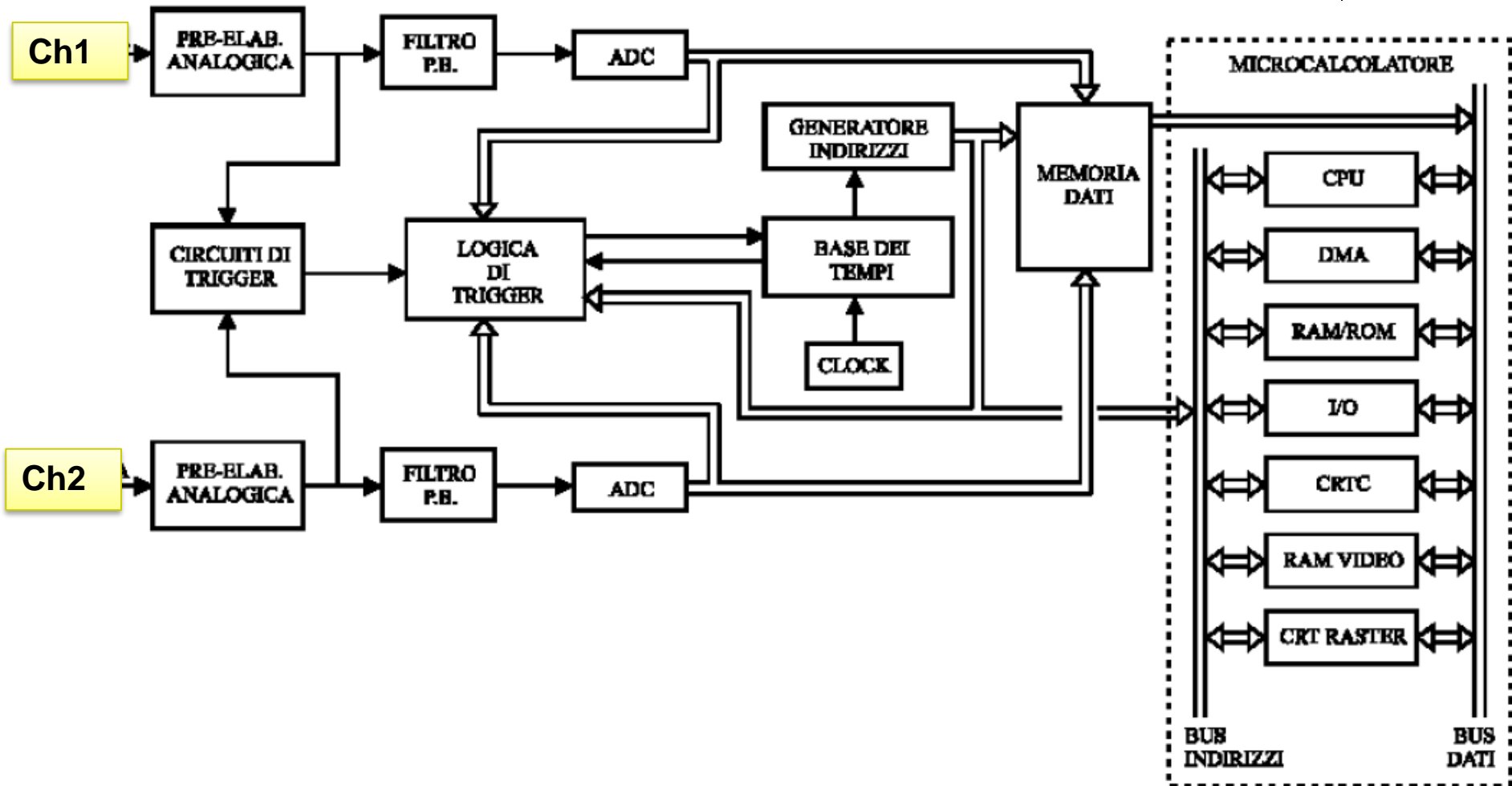
Carullo-Pisani-Vallan, CLUT-2006

Online consultate: [http://home.deib.polimi.it/svelto/didattica/materiale\\_didattico.html](http://home.deib.polimi.it/svelto/didattica/materiale_didattico.html)

# L'Oscilloscopio Digitale: schema di massima

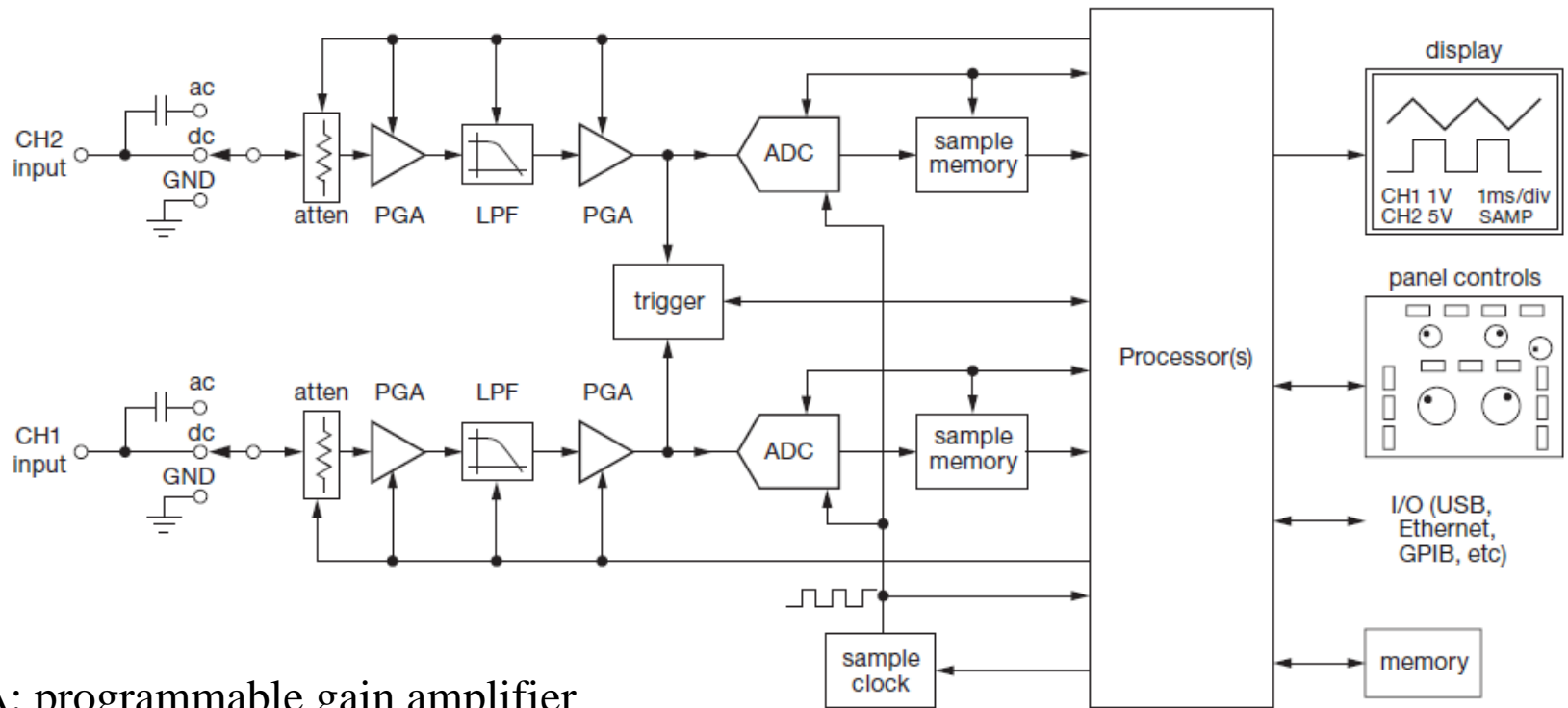


# L'Oscilloscopio Digitale: schema di massima



Vedere in <http://home.dei.polimi.it/svelto/...>

# L'Oscilloscopio Digitale: schema di massima



PGA: programmable gain amplifier

(from: P. Horowitz, W. Hill, *The art of electronics*, CUP, 2015)

# L'Oscilloscopio Digitale: le modalità di campionamento

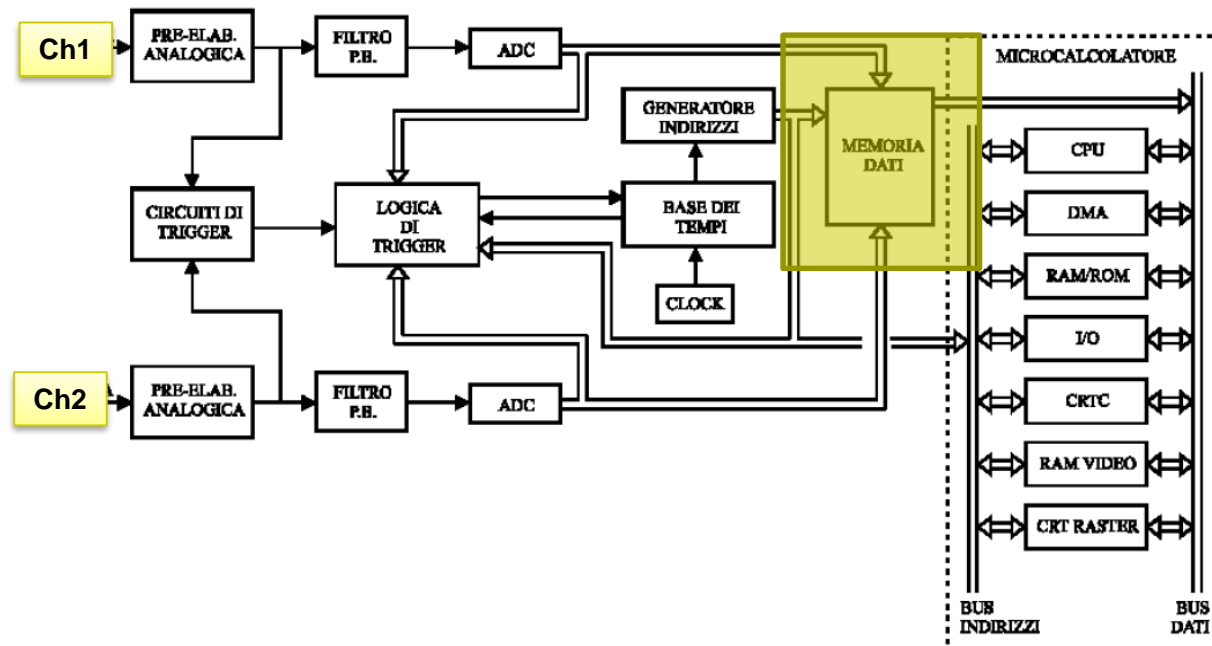


- Tipicamente si hanno tre modalità di campionamento:
  - In tempo reale (single shot)
  - Campionamento sequenziale in tempo equivalente
  - Campionamento casuale in tempo equivalente
- La prima modalità è applicabile ad ogni segnale mentre le altre due solo a segnali periodici

# L'Oscilloscopio Digitale: campionamento in tempo reale



- I campioni sono prelevati continuamente fino al completo riempimento della memoria di acquisizione (memoria dati) del DSO

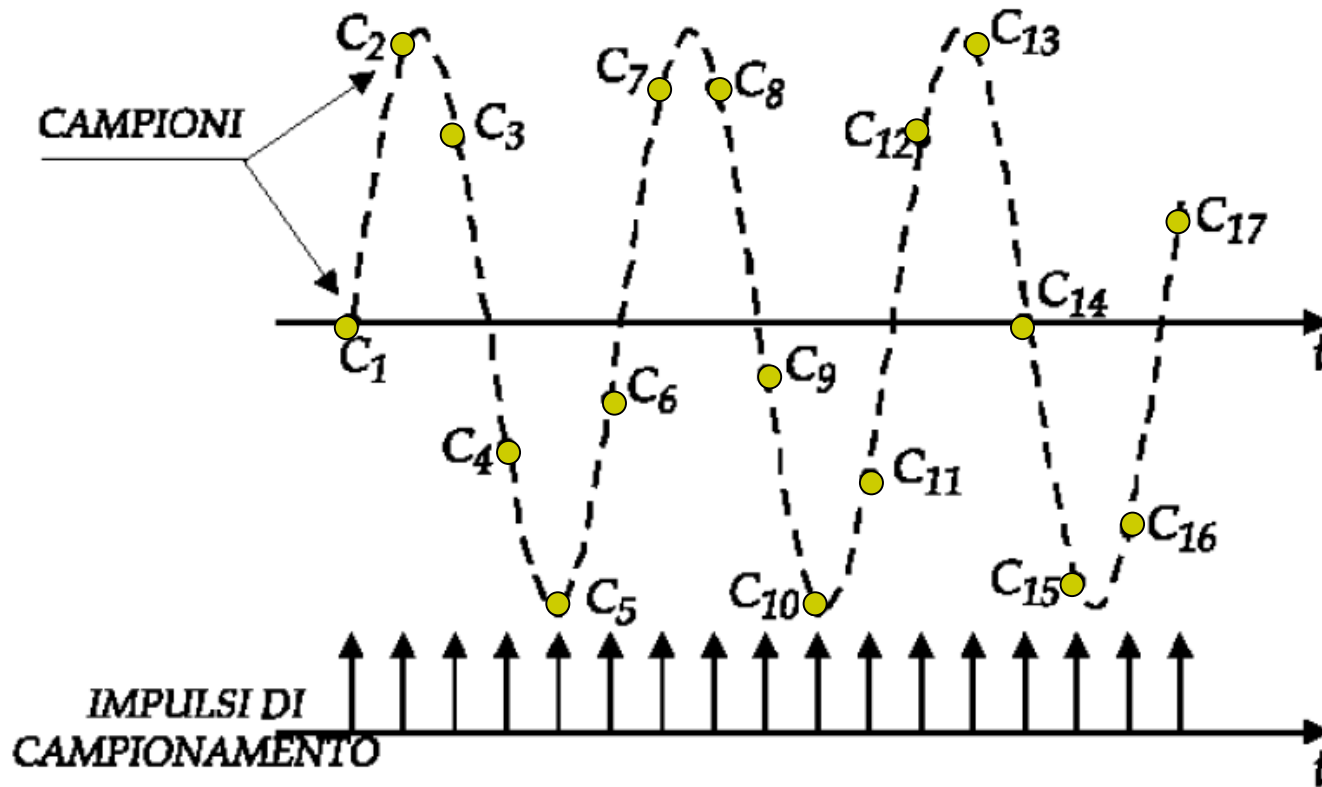


Vedere in [http://home.dei.polimi.it/svelto/...](http://home.dei.polimi.it/svelto/)

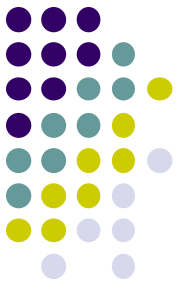
# L'Oscilloscopio Digitale: campionamento in tempo reale



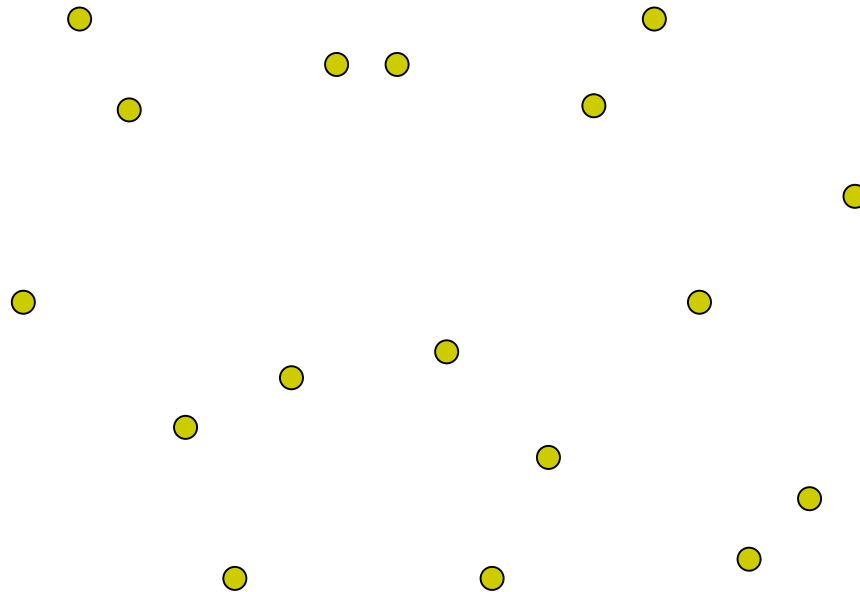
- Esempio: campionamento di una sinusoide (NB: 6 campioni ogni periodo)



# L'Oscilloscopio Digitale: campionamento in tempo reale

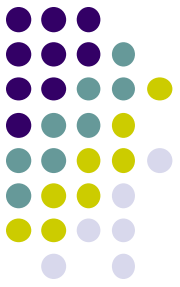


- Esempio: campionamento di una sinusoide  
(NB: 6 campioni ogni periodo)

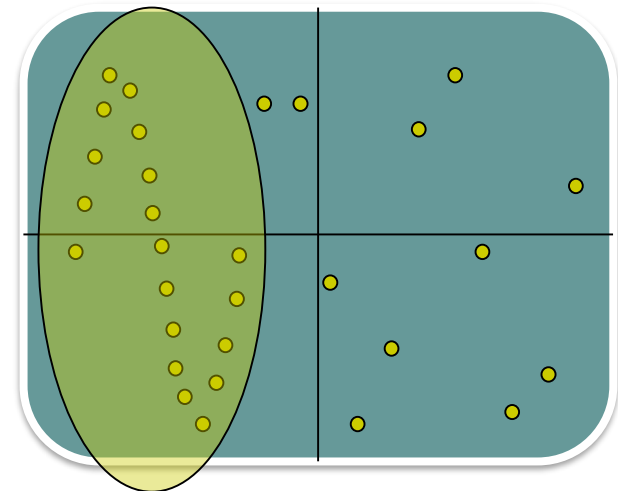
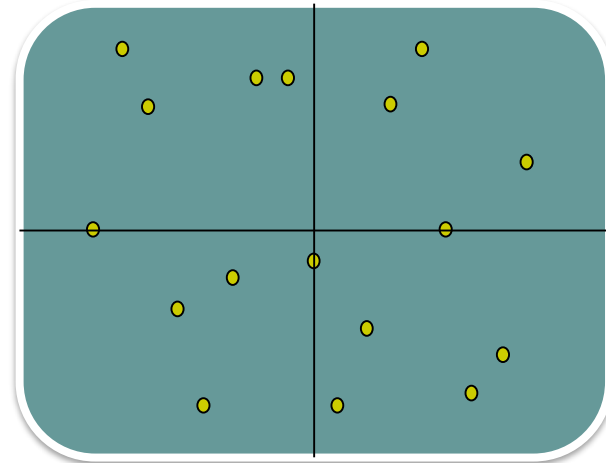




# L'Oscilloscopio Digitale: campionamento in tempo reale



- Risultato visivo:
- In generale risulta più adeguato effettuare un campionamento in modo tale da ottenere almeno 20-25 campioni ogni periodo oppure si utilizzano algoritmi di interpolazione



# L'Oscilloscopio Digitale: algoritmi interpolatori



- Negli oscilloscopi digitali esistono algoritmi interpolatori che permettono di avere una rappresentazione migliore del segnale
- Interpolatore lineare: con circa 10 punti la rappresentazione del segnale “è accettabile”
- Alcuni oscilloscopi utilizzano filtri ricostruttori del tipo  $\sin(x)/x$  per mezzo dei quali con circa 3 punti si ha già una comprensibile rappresentazione del segnale

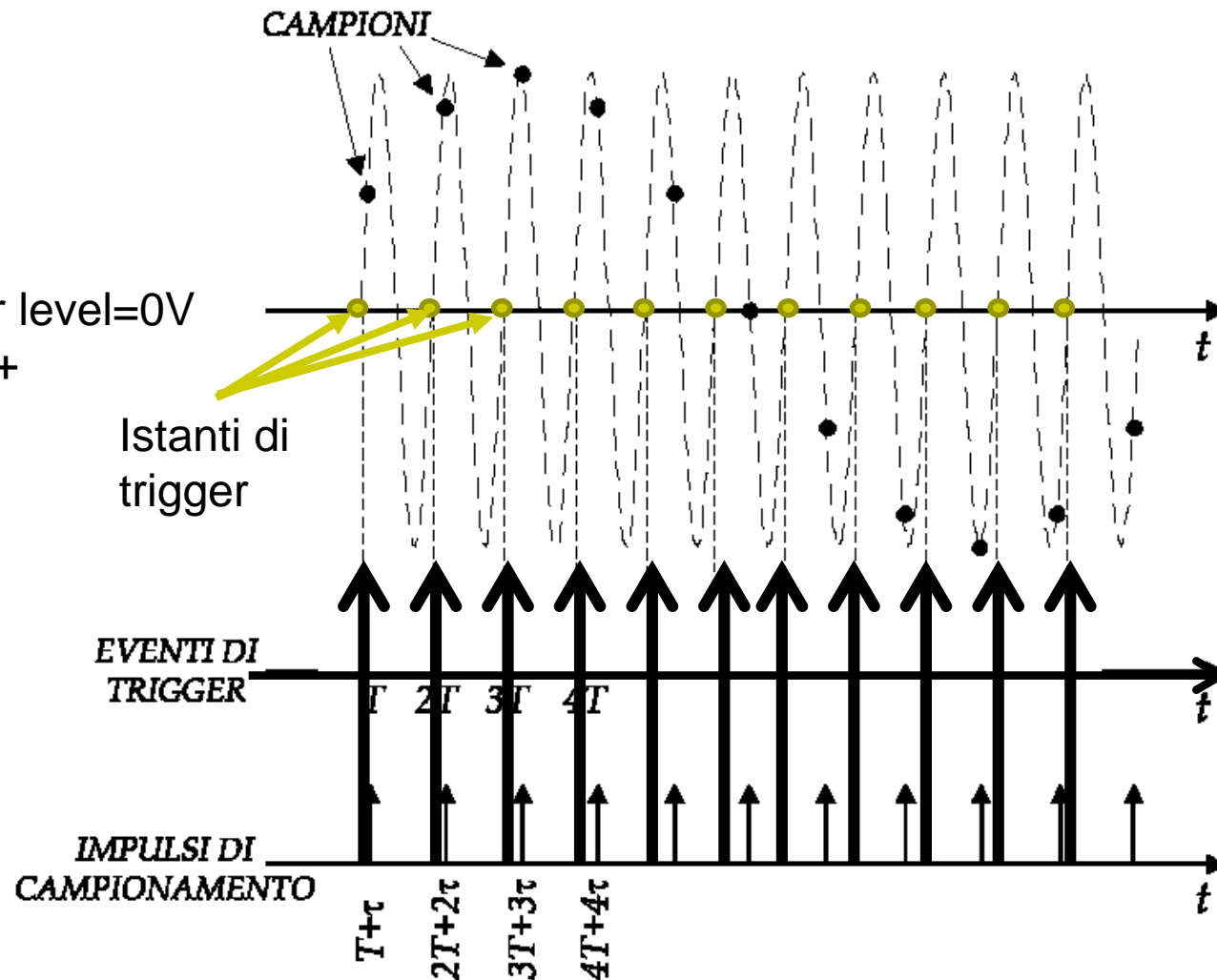
# L'Oscilloscopio Digitale: campionamento sequenziale in tempo equivalente



- Solo per segnali periodici!!!
- Il primo passo consiste nell'individuare un istante di trigger univoco definendo il trigger level e lo slope (come per gli osc. analogici)
- Individuato l'istante di trigger, sincrono con il segnale, si acquisiscono campioni del segnale con un ritardo rispetto all'istante di trigger pari a  $\tau$ ,  $2\tau$ ,  $3\tau$ ,  $4\tau$ , ...

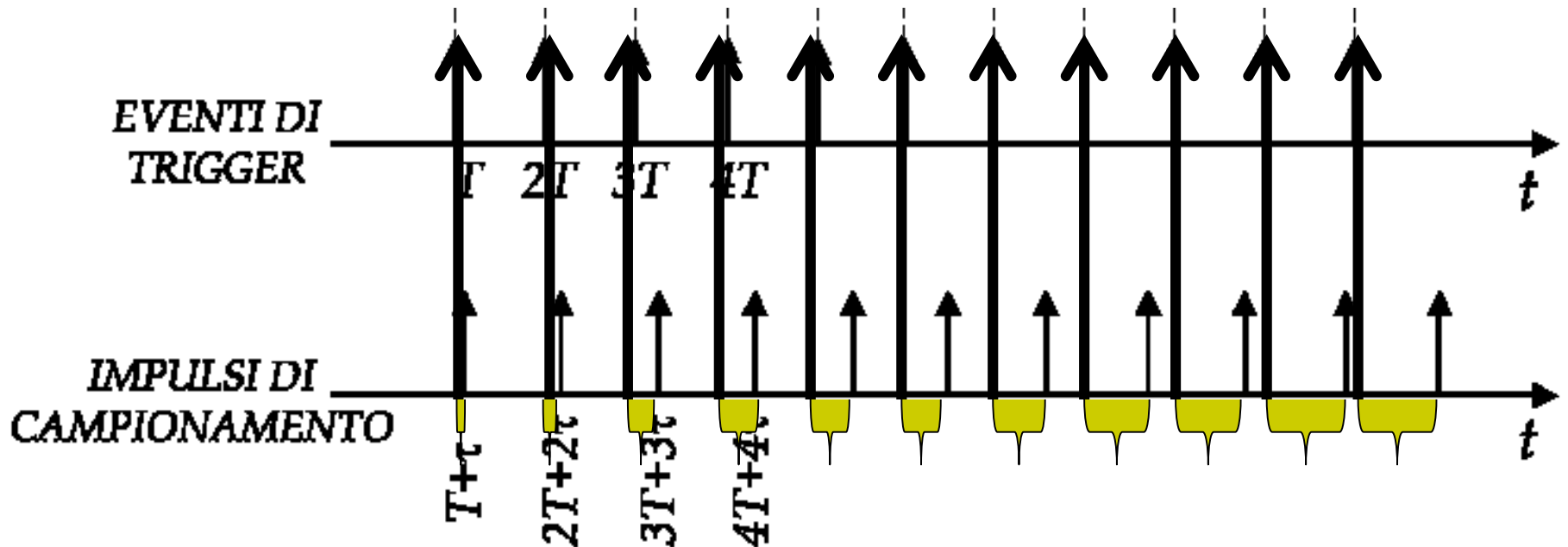
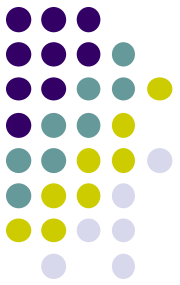
# L'Oscilloscopio Digitale:

## campionamento sequenziale in tempo equivalente



# L'Oscilloscopio Digitale:

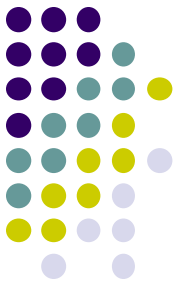
campionamento sequenziale in tempo equivalente



- L'istante in cui si campiona il segnale avviene in corrispondenza dell'evento di trigger ritardato di un intervallo di tempo  $\tau$ ,  $2\tau$ ,  $3\tau$ , ...

# L'Oscilloscopio Digitale:

campionamento sequenziale in tempo equivalente



- Sfruttando la periodicità  $T$  del segnale i campioni all'istante  $\tau$  e  $\tau+nT$  sono uguali
- Anziché campionare alla frequenza

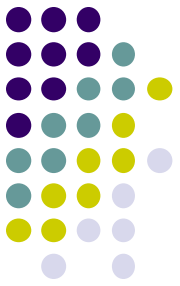
$$f_c = \frac{1}{\tau}$$

è possibile campionare alla frequenza

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

# L'Oscilloscopio Digitale:

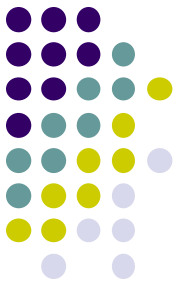
campionamento sequenziale in tempo equivalente



- Tanto minore è  $\tau$  tanto maggiore risulta la frequenza di campionamento equivalente ottenuta
- Il limite inferiore di  $\tau$  è legato alla risoluzione temporale con cui il DSO può gestire il ritardo fra l'evento di trigger e l'impulso di campionamento (in alcuni DSO di elevata qualità si ottengono anche risoluzioni di alcuni ps)

# L'Oscilloscopio Digitale:

campionamento casuale in tempo equivalente

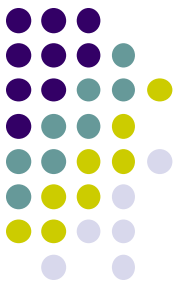


- L'acquisizione del campione avviene in un istante assolutamente casuale rispetto l'evento di trigger
- Per ogni campione acquisito si misura l'intervallo di tempo  $\Delta t_i$  fra l'evento di trigger e l'istante di acquisizione del campione i-esimo  $C_i$
- La rappresentazione sullo schermo avviene ricostruendo il segnale ordinando i campioni da sx verso dx a seconda del valore di  $\Delta t_i$

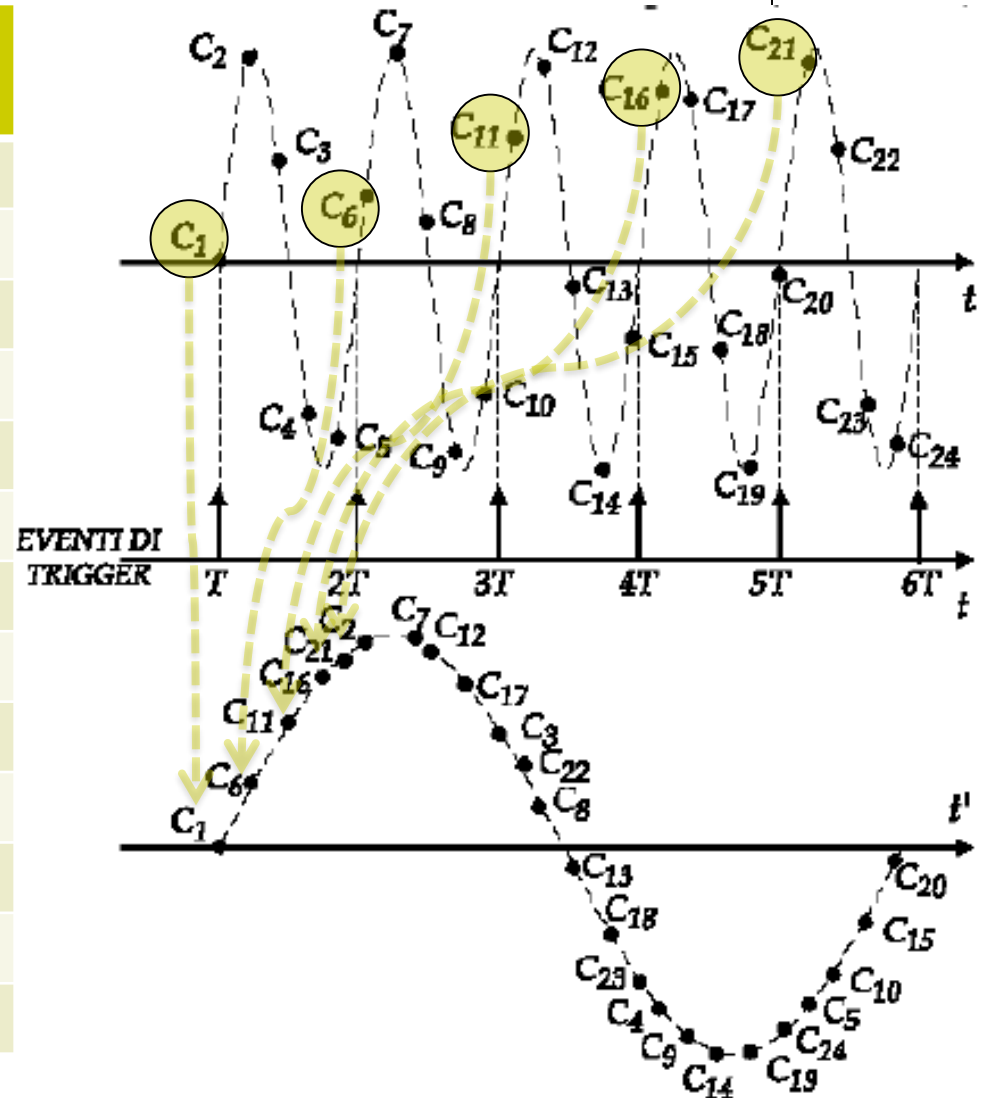


# L'Oscilloscopio Digitale:

## campionamento casuale in tempo equivalente



Campione	$\Delta t_i$ /ns	Valore /mV
$C_1$	0.0	0
$C_2$	2.4	95
$C_3$	3.7	50
$C_4$	6.2	...
$C_5$	8.0	...
$C_6$	1.0 (dopo 2T)	...
$C_7$	2.5 (dopo 2T)	...
$C_8$	3.8 (dopo 2T)	...
$C_9$	7.0 (dopo 2T)	...
...		
$C_{16}$	2.2 (dopo 4T)	....
...		
$C_{21}$	2.3 (dopo 5T)	...



# L'Oscilloscopio Digitale:

## campionamento casuale in tempo equivalente



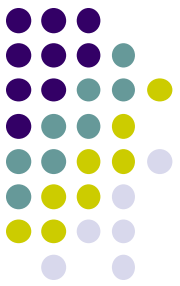
- Una unità di elaborazione avrà il compito del riordino temporale e assegnazione della posizione sullo schermo del campione  $C_i$
- La risoluzione del tempo di misura dell'intervallo di tempo  $\Delta t_i$  è di alcune decine di ps

# L'Oscilloscopio Digitale: aliasing



- Nello scegliere la sensibilità della base tempi la frequenza di campionamento è determinata automaticamente dal microprocessore
- La frequenza di campionamento non sempre è indicata sullo schermo
- Dal manuale è possibile ricavarla conoscendo il numero di punti per divisione rappresentati sullo schermo

# L'Oscilloscopio Digitale: aliasing



- Esempio: oscilloscopio TDS 210

- 250 punti per divisione
- Sensibilità orizz. Impostata di  $2.5\mu\text{s}/\text{div}$
- Frequenza di campionamento corrispondente:

$$2.5\mu\text{s}/250\text{punti} = 10\text{ns}/\text{punto}$$

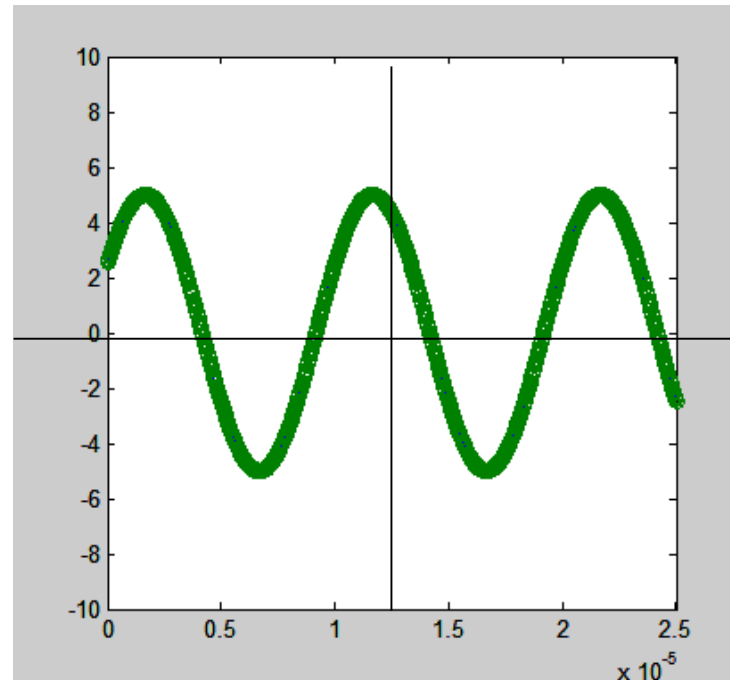
$$\text{ovvero } f_c = 100\text{MHz}$$



# L'Oscilloscopio Digitale: aliasing



- Supponiamo di campionare a 100MHz (2.5 $\mu$ s/div) una sinusoide a 100kHz (periodo di 10 $\mu$ s/div): ottengo 1000 punti a periodo (segnale ottimamente visualizzato)
- 2V/div  $\rightarrow$  A=5V
- 2.5 $\mu$ s/div
- Trigger Level 2.5V
- Slope +



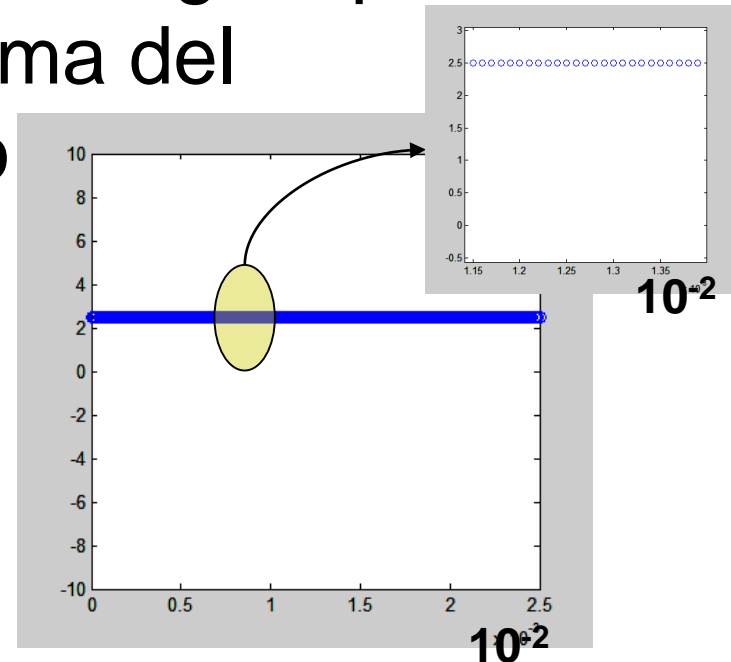
# L'Oscilloscopio Digitale: aliasing



- Supponiamo ora di avere l'oscilloscopio impostato con una sensibilità orizzontale di 2.5ms/div corrispondente ad una frequenza di campionamento di 100kHz: ottengo 1 punto a periodo, non rispetto il teorema del campionamento e visualizzo una tensione costante:

$$5 \cdot \sin(2\pi \cdot 100\text{kHz} \cdot n \cdot T_c + \pi/6)$$

dove  $T_c = 10\mu\text{s}$



# L'Oscilloscopio Digitale: aliasing



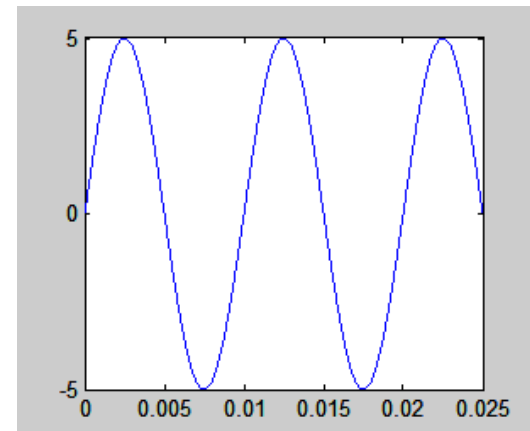
- Supponiamo ora di avere l'oscilloscopio impostato con una sensibilità orizzontale di 2.5ms/div corrispondente ad una frequenza di campionamento di 100kHz, supponiamo che il segnale sia di 100.1kHz:

$$5 * \sin(2\pi * (100 + 0.1) \text{kHz} * k * T_c) \quad \text{dove } T_c = 10\mu\text{s}$$

si ottiene

$$\dots 0 + 5 * \sin(2\pi * 0.1 \text{kHz} * k * T_c)$$

$$\sin(a \pm b) = \sin(a)\cos(b) \pm \cos(a)\sin(b)$$



# L'Oscilloscopio Digitale: aliasing



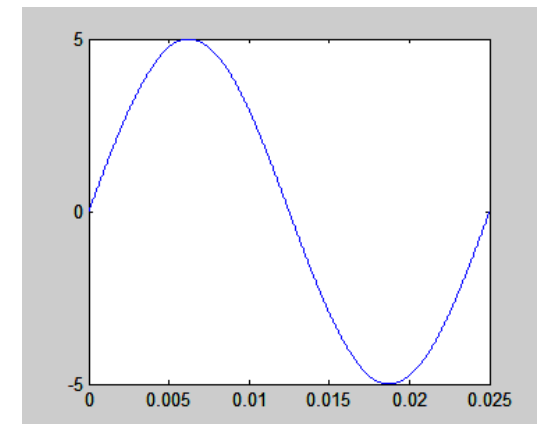
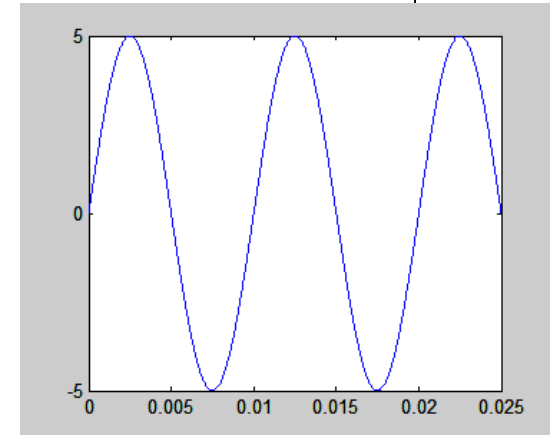
- Se non si conosce la frequenza del segnale c'è il rischio che, impostando “a caso” la velocità di scansione orizzontale, si vedano curve a frequenze non corrette
- Per un corretto utilizzo del DSO occorre avere qualche informazione in più sul segnale da misurare



# L'Oscilloscopio Digitale: aliasing



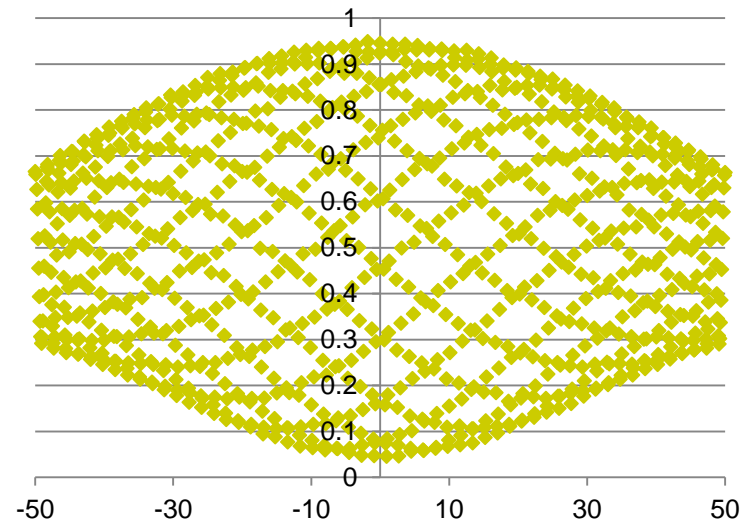
- A volte, per capire se si è in situazione di aliasing, è sufficiente provare due diverse sensibilità della base tempi
- Nell'esempio precedente:
  - Con 2.5ms/div ottengo un alias a 100Hz
  - Con 1ms/div mi ottengo un alias a 40Hz (provare con le formule  $\sin(a+b)=\dots$ )
- In tal caso si è in presenza di aliasing e provo con sensibilità della base tempi via via crescente
  - (fino ad arrivare, per esempio, a  $100\mu\text{s}/\text{div} \rightarrow T_c=400\text{ns} \rightarrow f_c=2.5\text{MHz}$ )



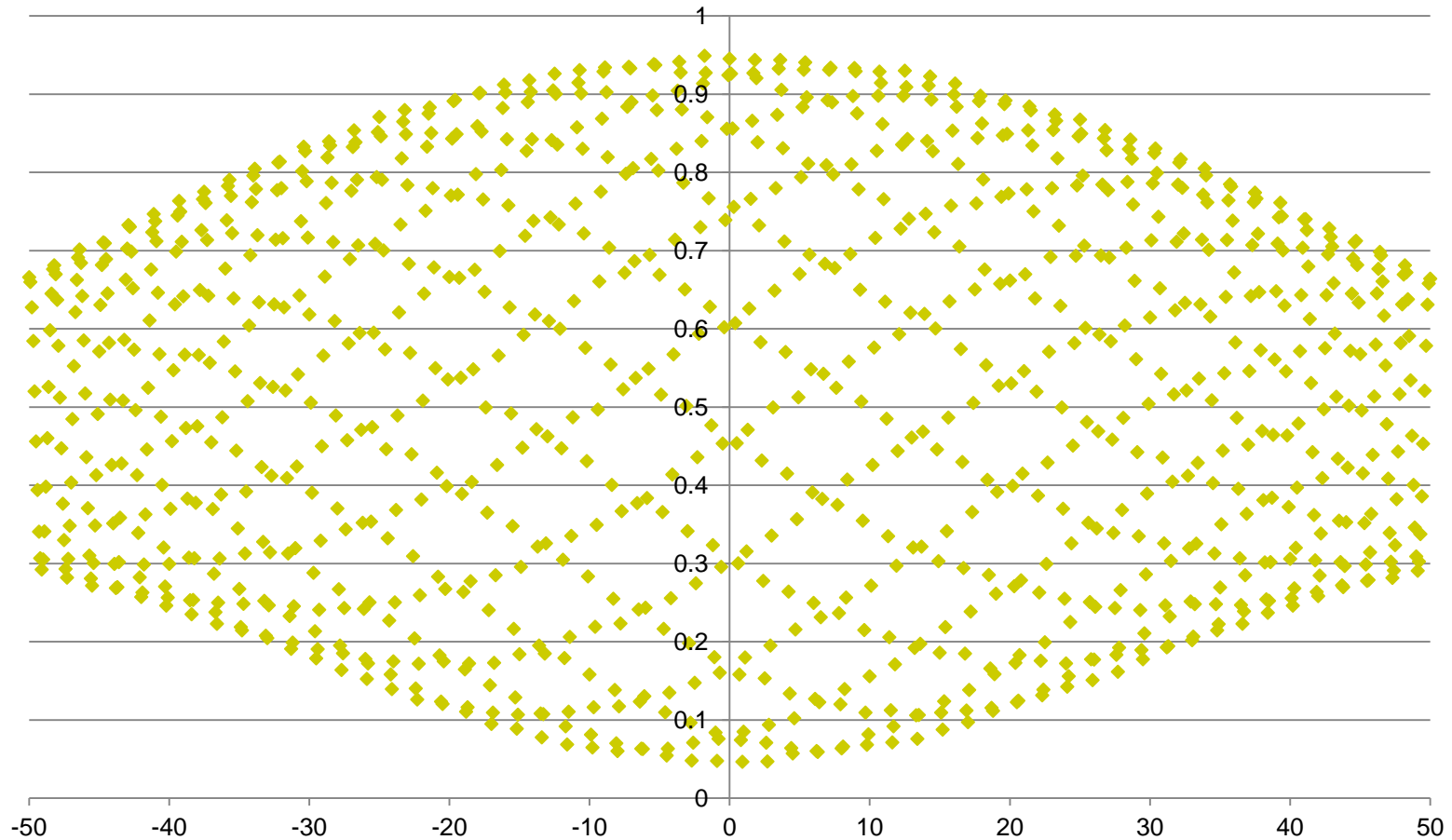
# L'Oscilloscopio Digitale: alias percettivo



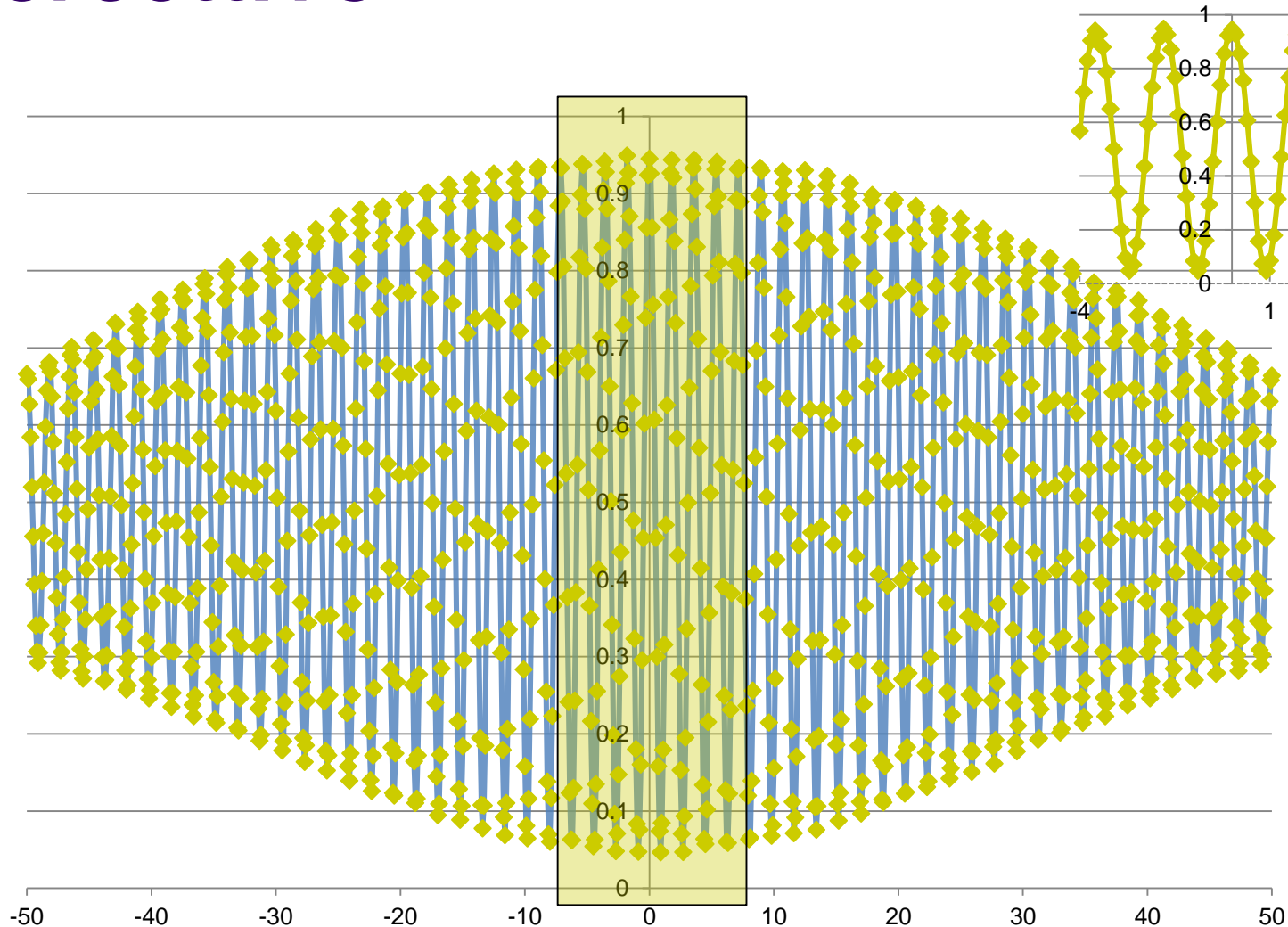
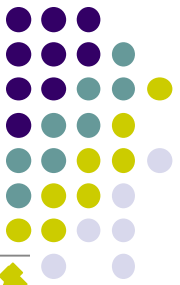
- A volte, si può avere un problema di aliasing in corrispondenza di corretta rappresentazione del segnale sullo schermo ma erronea valutazione del segnale da parte dell'operatore: alias percettivo!



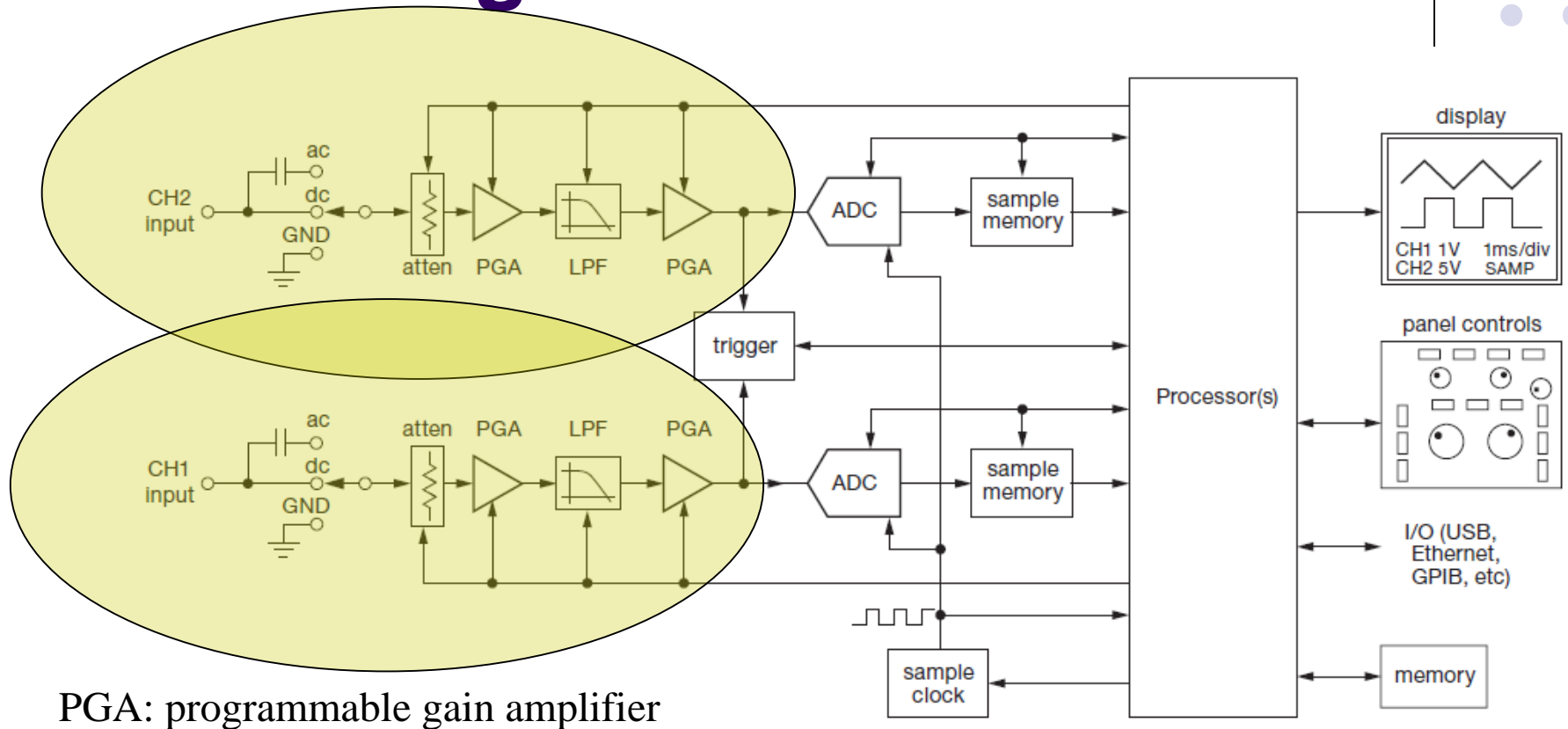
# L'Oscilloscopio Digitale: alias percettivo



# L'Oscilloscopio Digitale: alias percettivo



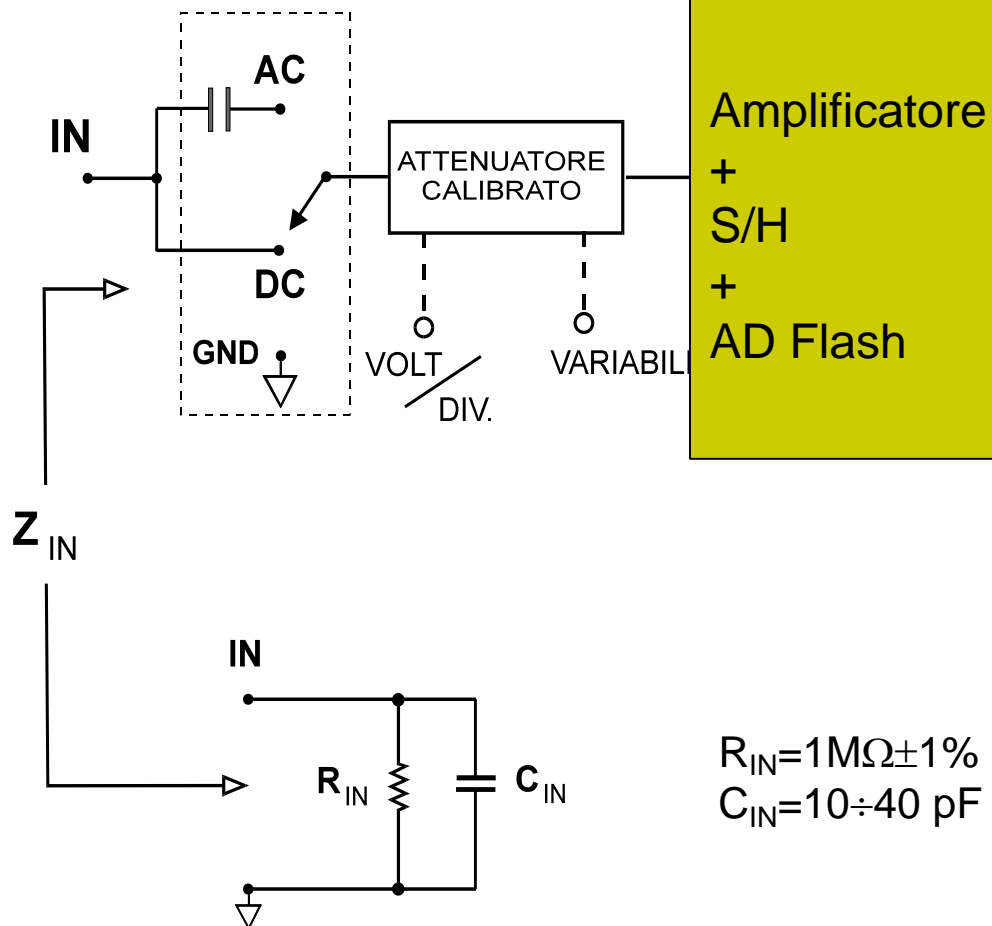
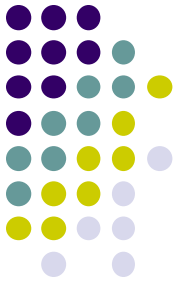
# Canale ingresso



PGA: programmable gain amplifier

(from: P. Horowitz, W. Hill, *The art of electronics*, CUP, 2015)

# Canale ingresso

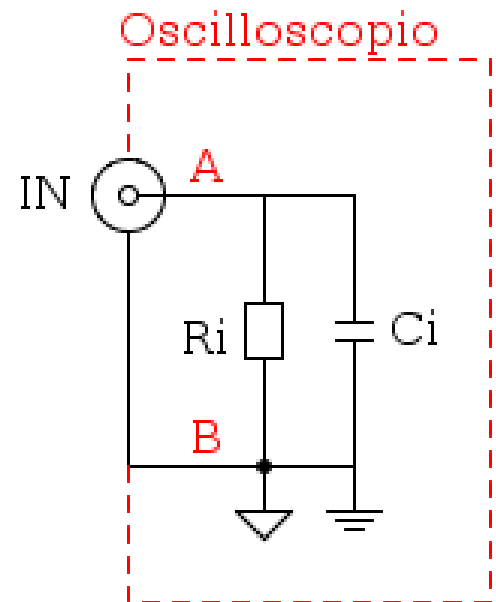


# L' Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo

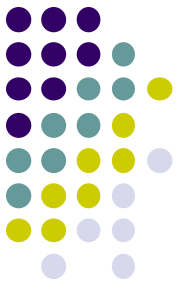


- In generale il circuito di ingresso di un oscilloscopio (sia analogico che digitale) presenta una impedenza di ingresso costituita da:

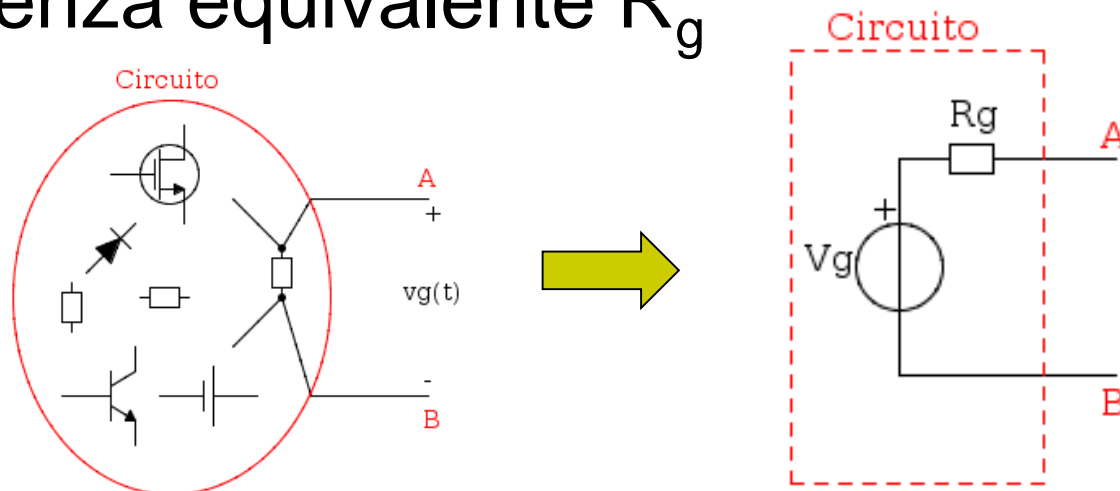
- Una resistenza di  $1\text{M}\Omega$
- Una capacità di qualche decina di pF



# L' Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo



- In generale un qualunque circuito lineare, per quanto complesso esso sia, può essere ricondotto ad un circuito equivalente costituito da un generatore equivalente  $V_g$  ed una resistenza equivalente  $R_g$

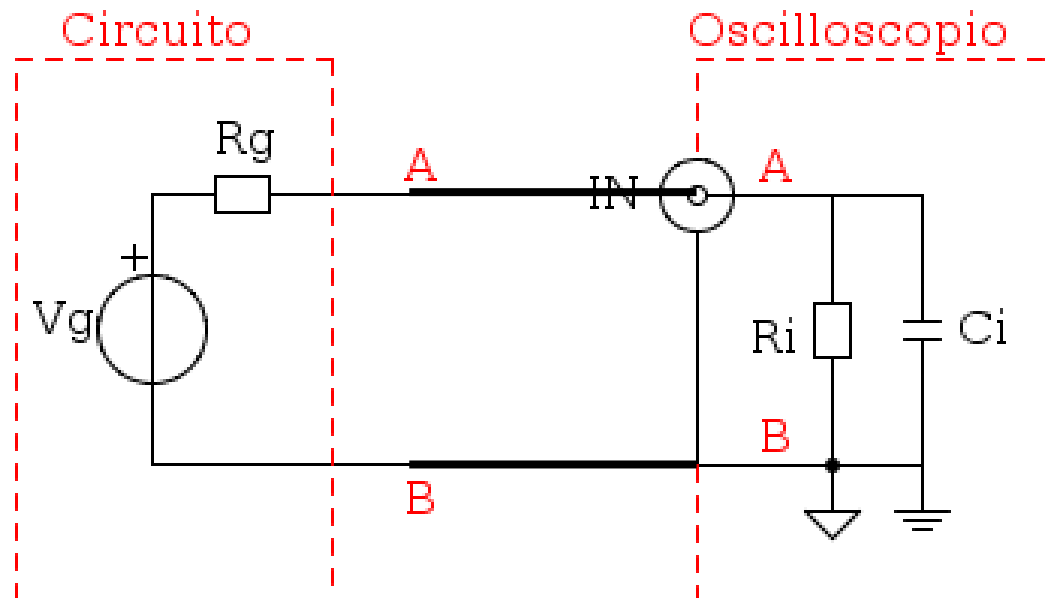




# L' Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo



- Supponiamo di collegare il generico circuito all'oscilloscopio per mezzo di un cavo di lunghezza nulla o tale per cui la capacità del cavo sia trascurabile



# L' Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo



- Frequenza di taglio del filtro passa passo corrispondente:

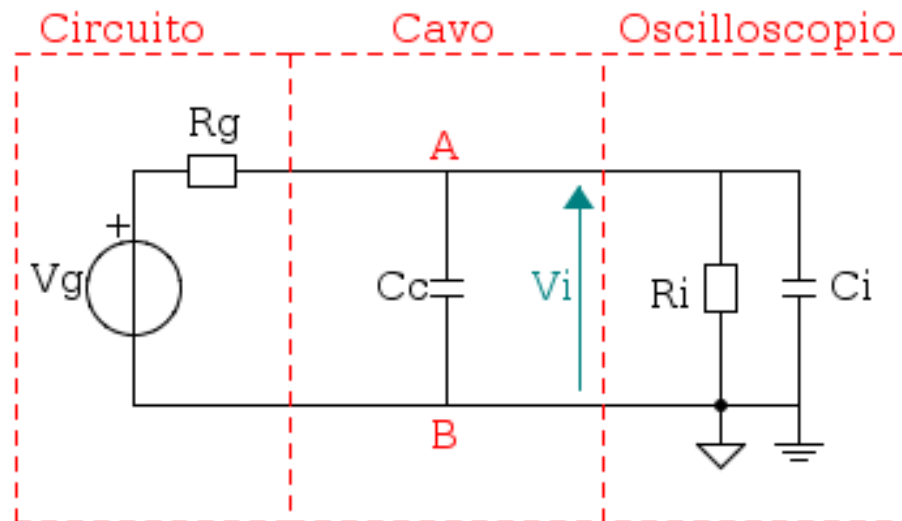
$$f_p = \frac{1}{2\pi R_p C_i} \quad \text{dove} \quad R_p = \frac{R_g \cdot R_i}{R_g + R_i}$$

- Casi particolari (con  $C_i=20\text{pF}$ )
  - $R_g=50\Omega \rightarrow$  polo a 160MHz
  - $R_g=600\Omega \rightarrow$  polo a 13MHz

# L' Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo



- In realtà il cavo di collegamento è tipicamente un coassiale con capacità, per unità di lunghezza, pari a 80-100pF/m e quindi il circuito equivalente presenterà una frequenza di taglio sarà ancora più bassa a causa di  $C_c$



# L'Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo

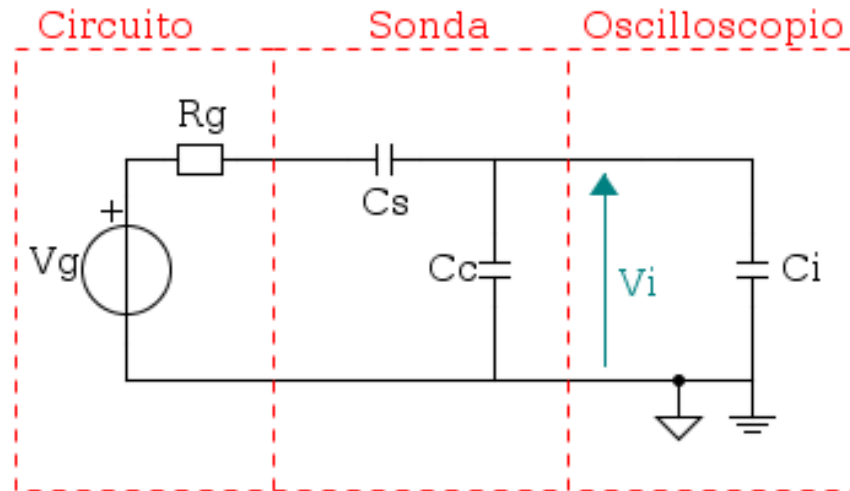


- Il collegamento con uno strumento per mezzo di un cavo limita la banda a causa della capacità stessa del cavo
- La riduzione dovuta al parallelo di  $R_i$  e  $R_g$  è in realtà dovuta solo ed esclusivamente a  $R_g$
- Per ridurre la capacità totale (somma di  $C_i$  e  $C_c$ ) come possiamo fare?

# L'Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo



- Se inserisco un condensatore  $C_s$  fra cavo e circuito sotto misura?

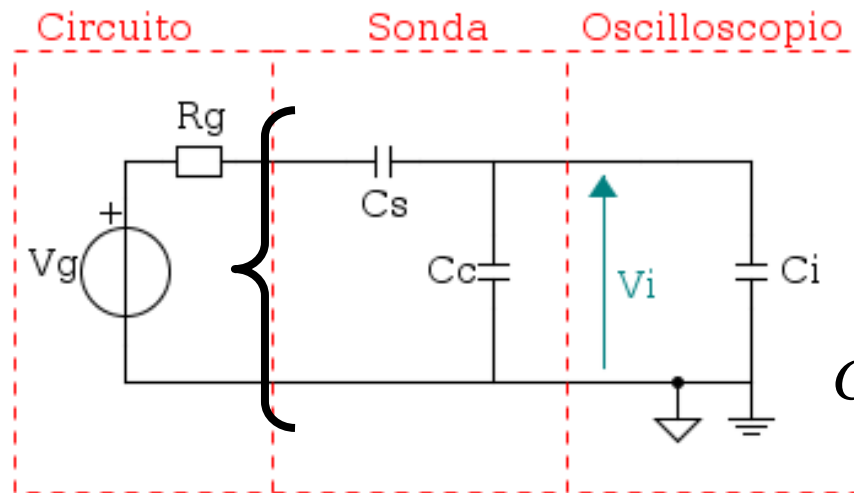


- Il circuito equivalente in figura non tiene più conto di  $R_i$  in quanto tipicamente  $R_i \gg R_g$

# L'Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo



- Ai capi di “ $C_c + C_i$ ” e  $C_s$  cosa ho?



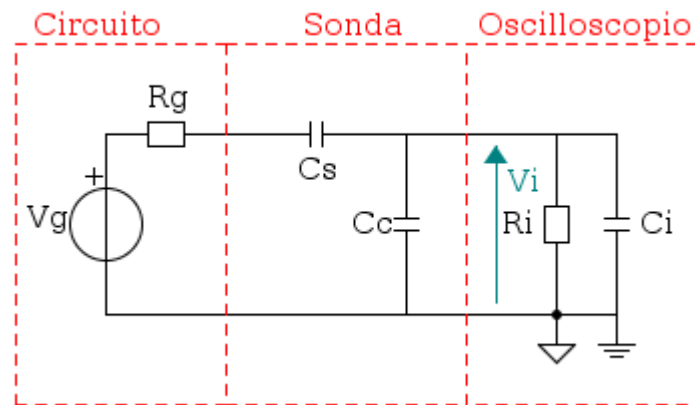
$$C_{eq} = \frac{C_s (C_c + C_i)}{C_s + C_c + C_i} \ll C_c + C_i \quad !!!$$

- Esempio:  
 $C_c + C_i = 90\text{pF}$ , se  $C_s = 10\text{pF} \rightarrow C_{eq} = 9\text{pF}$

# L'Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo



- Considerando ora anche  $R_i$  il circuito ottenuto è il seguente

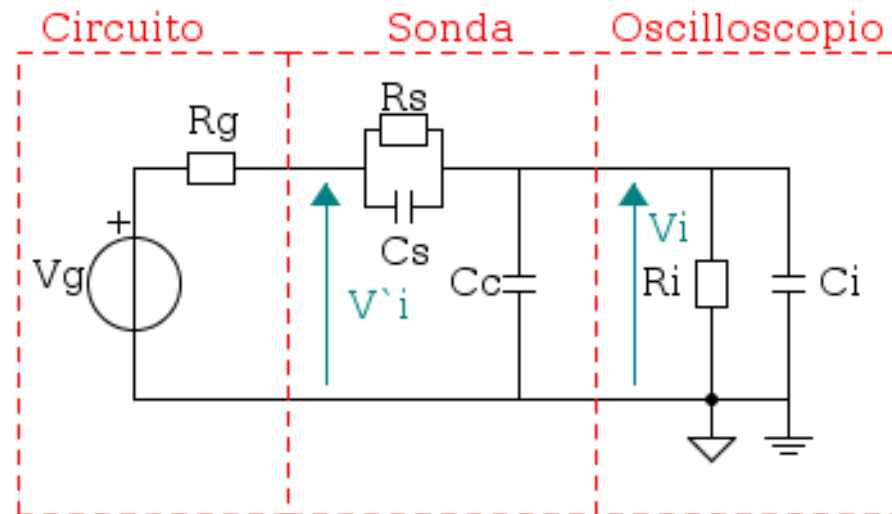


- Attenzione!!! La componente continua non è misurabile!!!

# L'Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo



- In parallelo a  $C_s$  inserisco una resistenza  $R_s$

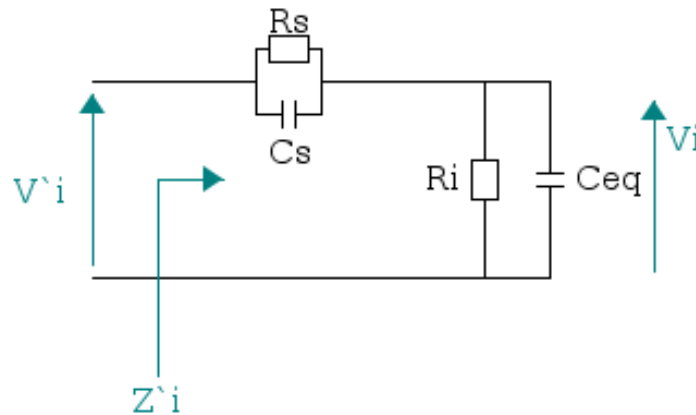




# L'Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo



- In parallelo a  $C_s$  inserisco una resistenza  $R_s$  formando un partitore resistivo-capacitivo



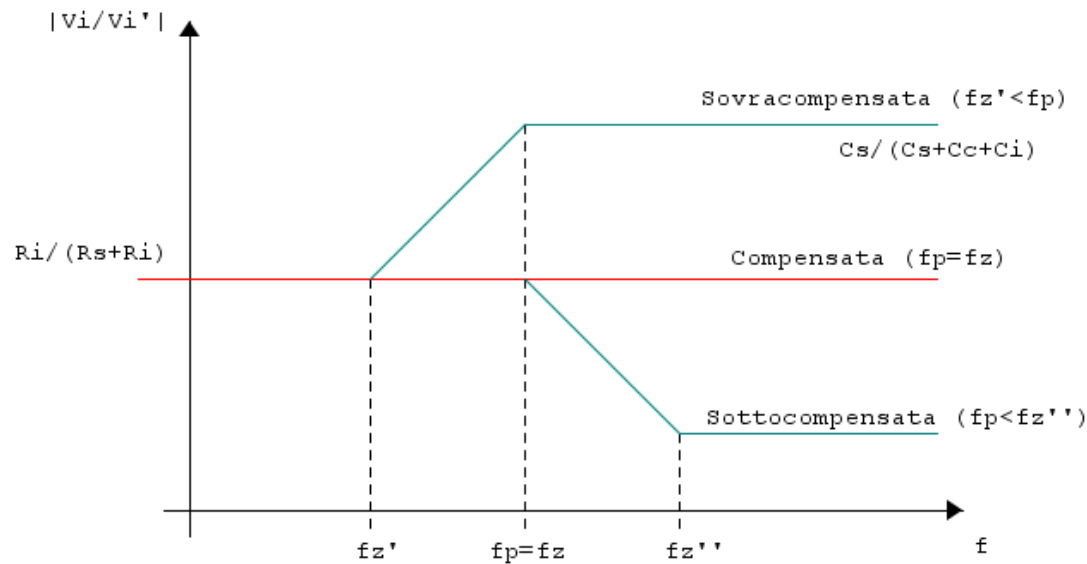
- Polo @  $1/(2\pi(R_s//R_i)(C_s+C_i))$
- Zero @  $1/(2\pi R_s C_s)$

# L'Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo



- Dal momento che ho un polo ed uno zero allora

- $f_p < f_z$
- $f_p > f_z$
- $f_p = f_z$  ovvero  $R_s C_s = R_i C_i$



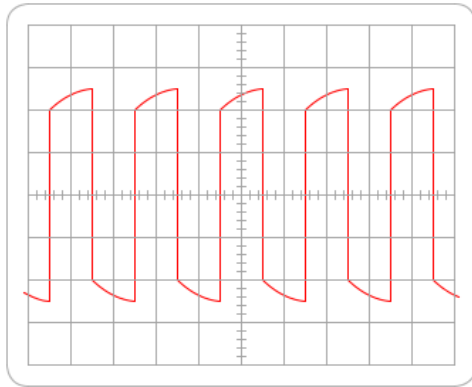
# L'Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo



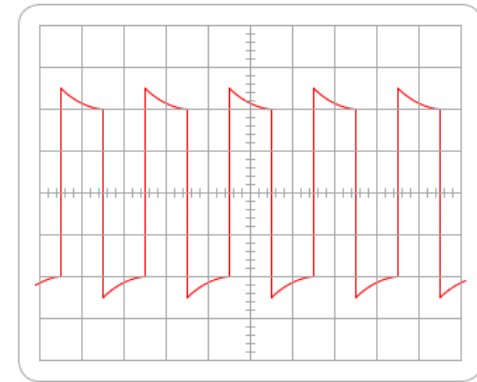
- Esiste un trimmer sulla sonda per effettuare la compensazione



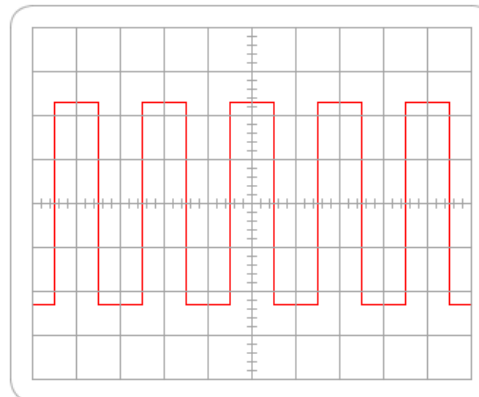
# L'Oscilloscopio digitale: la sonda ed il suo utilizzo



Sottocompensata



Sovracompensata

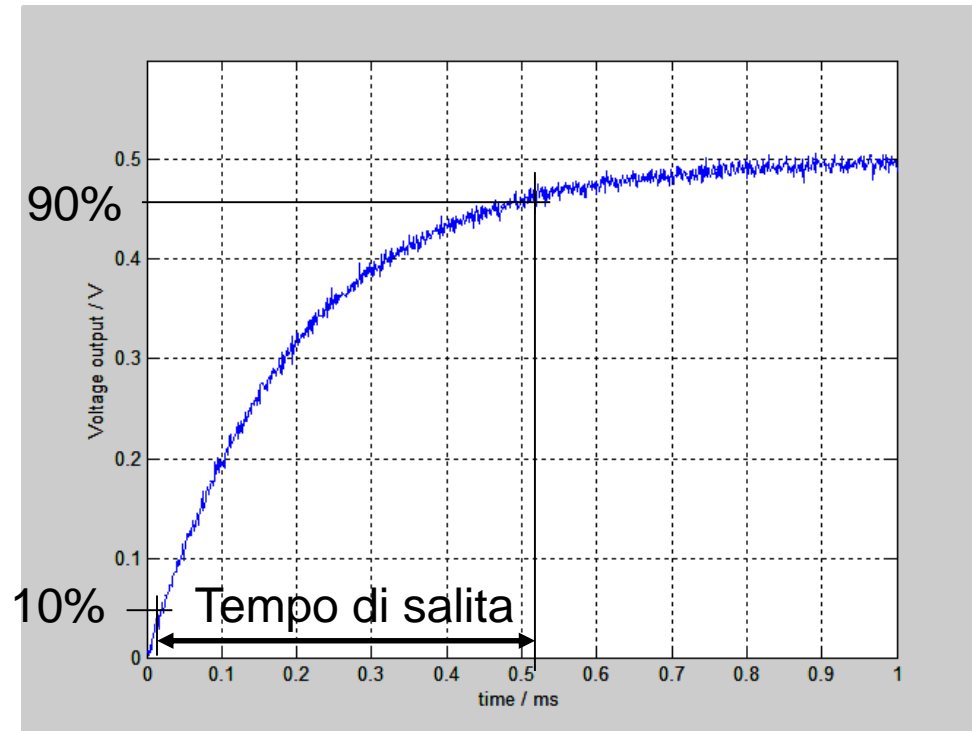


Compensata correttamente

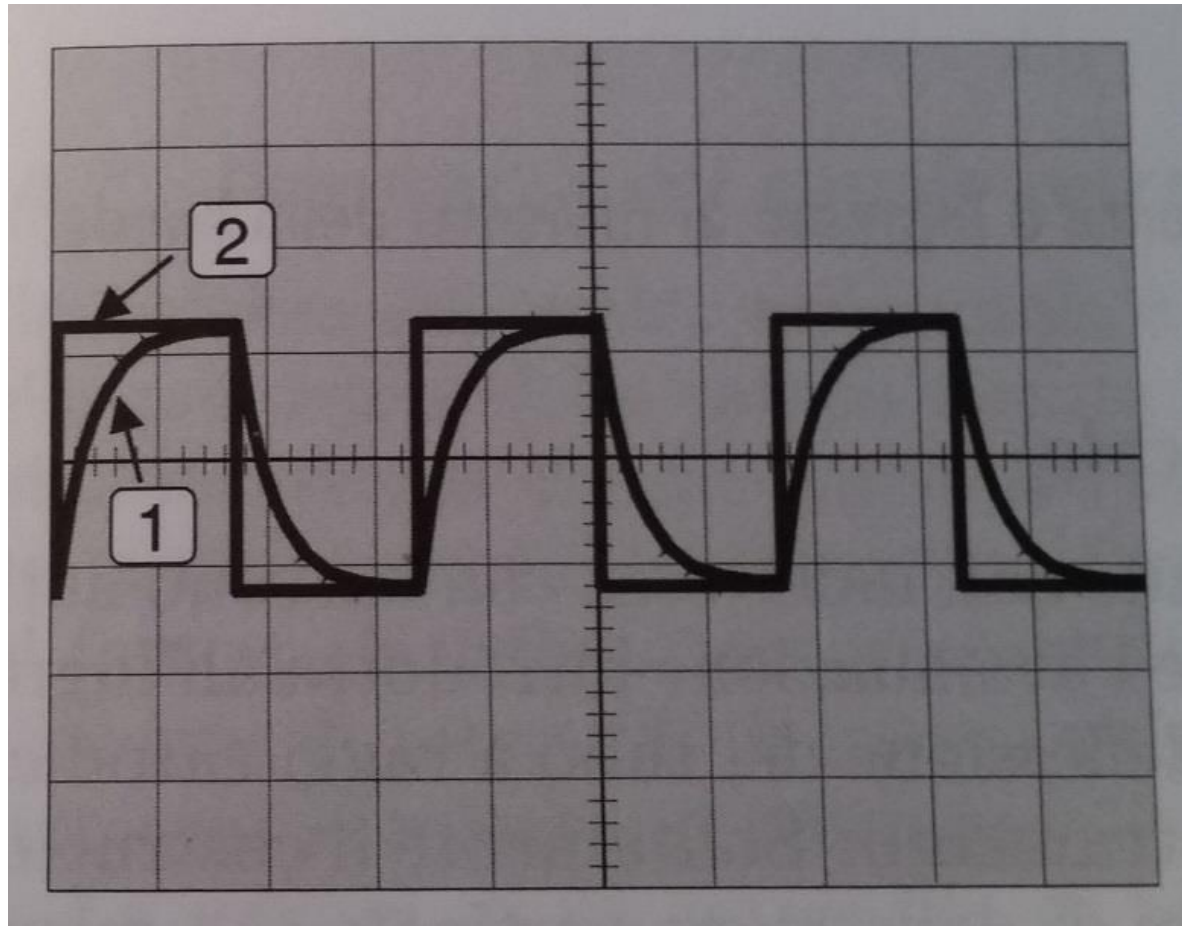
# L'Oscilloscopio digitale: legame tra banda e tempo di salita



- Definizione di tempo di salita:



# L'Oscilloscopio analogico: risposta di un filtro passa basso



# L'Oscilloscopio analogico: legame tra banda e tempo di salita



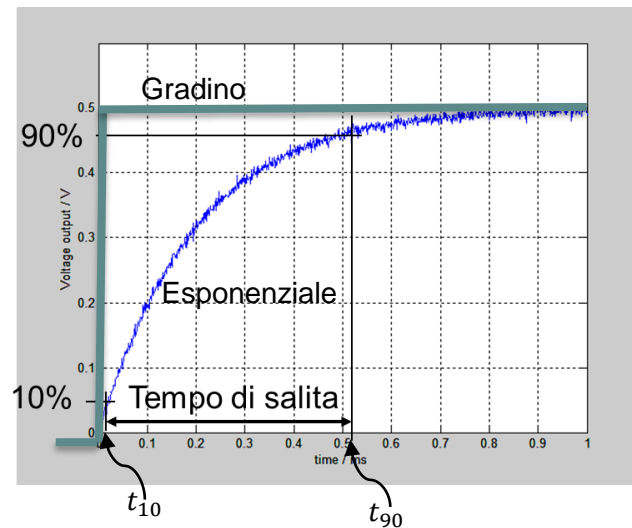
- In un filtro passa basso (tipo RC) esiste una relazione “semplice” fra banda del filtro e tempo di salita (v. dim.):

$$B \cdot t_s = 0.35$$

- Inoltre vale la relazione (no dim.):

$$t_{visualizzato}^2 = t_{s\_segn}^2 + t_{s\_osc}^2$$

# Dimostrazione



$$V_{out}(t) = V_M(1 - e^{-t/\tau})$$

$$V_{out}(t_{10}) = 0.1 V_M = V_M(1 - e^{-t_{10}/\tau}) \rightarrow e^{-t_{10}/\tau} = 0.9$$

$$V_{out}(t_{90}) = 0.9 V_M = V_M(1 - e^{-t_{90}/\tau}) \rightarrow e^{-t_{90}/\tau} = 0.1$$

$$\frac{t_{10}}{\tau} = \ln(0.9) , \quad \frac{t_{90}}{\tau} = \ln(0.1)$$

$$\text{tempo di salita (definizione)} = t_{90} - t_{10} = t_s = \tau(\ln(0.1) - \ln(0.9)) = 2.2\tau$$

$$t_s = 2.2\tau = 2.2RC = 2.2 \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{0.35}{B}$$

$$B \cdot t_s = 0.35$$





# L'Oscilloscopio digitale: legame tra banda e tempo di salita



- Negli oscilloscopi digitali in generale la relazione “banda per tempo di salita” vale

$$B \cdot t_s = 0.35 \div 0.5$$

- Questa relazione varia a seconda dell'oscilloscopio utilizzato (consultare il manuale del DSO utilizzato)

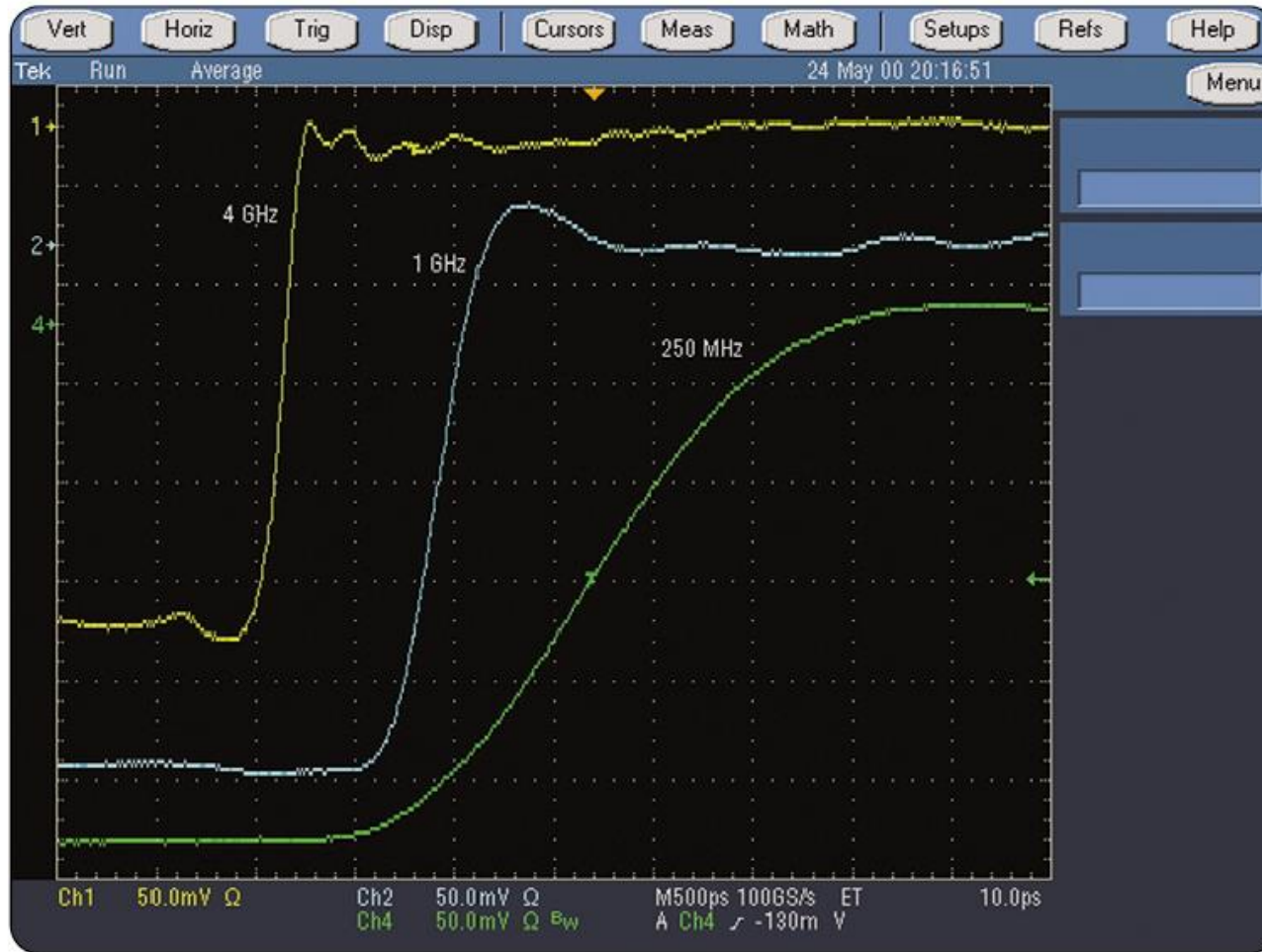
# L'Oscilloscopio digitale: legame tra banda e tempo di salita



- Il tempo di salita visualizzato, al quadrato, è pari alla somma dei quadrati del tempo di salita del segnale e dell'oscilloscopio
- Esempio (utilizzo  $B \cdot t_s = 0.35$ )
  - Generatore di segnale con banda 30MHz  $\rightarrow t_{\text{salita}} = 11.6\text{ns}$
  - Oscilloscopio analogico di banda 60MHz  $\rightarrow t_{\text{salita}} = 5.8\text{ns}$
  - Tempo di salita  $t_{\text{sv}}$  visualizzato sullo schermo  $\rightarrow 13.0\text{ns}$

$$t_{\text{sv}} = ((11.6\text{ns})^2 + (5.8\text{ns})^2)^{1/2} = 13\text{ns}$$

# L'Oscilloscopio digitale: legame tra banda e tempo di salita



From: <https://www.tek.com/>

# Canale di ingresso: approfondimenti



- Differenza fra DC ed AC
- Definizioni: duty cycle

- Valor Medio

$$V_{medio} = \frac{1}{T} \int_T V(t) dt$$

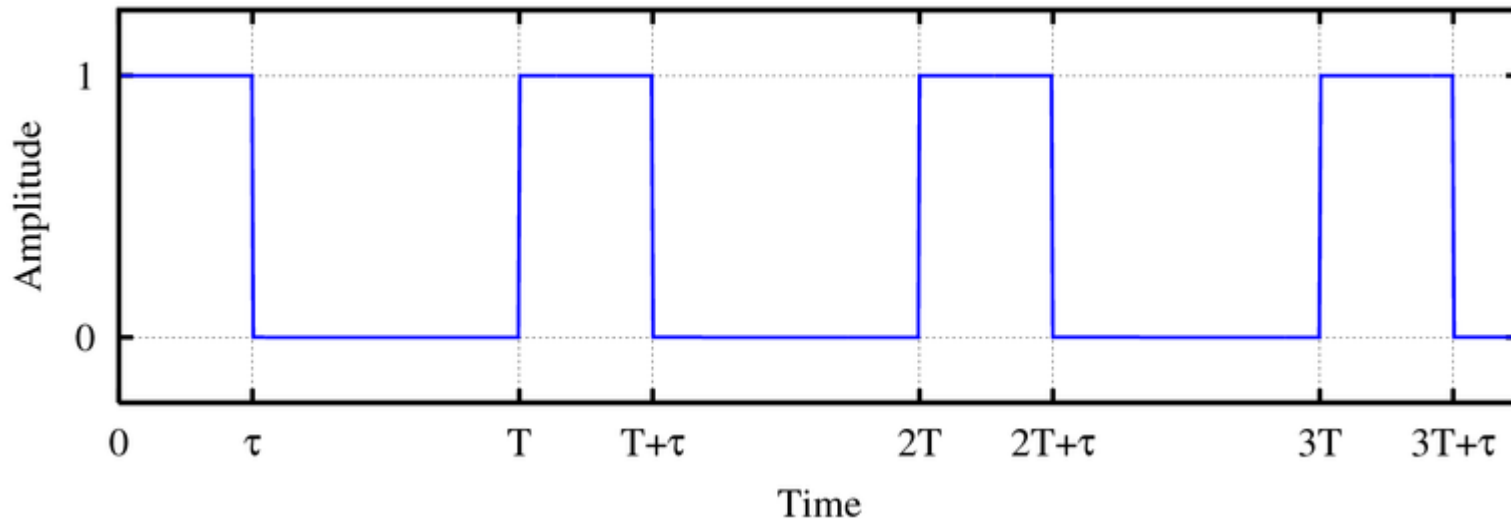
- Valore efficace

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T [V(t)]^2 dt}$$



# Definizione di duty cycle

- Rapporto tra la durata del segnale “alto” ed il periodo totale del segnale
- $D = \tau / T$





# Esercizio

- Un segnale a forma quadra (duty cycle del 20%, valore picco-picco 5V, valor medio nullo, frequenza di 1kHz) è collegato al canale di ingresso di un oscilloscopio. Con il valore di 0V posizionato in centro allo schermo, rappresentare il segnale scegliendo opportunamente l'impostazione dell'oscilloscopio. Cosa avviene nel passare da modalità DC ad AC?



# Esercizio

- Un segnale a forma quadra (duty cycle del 20%, **valore picco-picco 5V**, **valor medio nullo**, frequenza di 1kHz) è collegato al canale di ingresso di un oscilloscopio. Con il valore di 0V posizionato in centro allo schermo, rappresentare il segnale scegliendo opportunamente l'impostazione dell'oscilloscopio. Cosa avviene nel passare da modalità DC ad AC?

$$V_{pp}=V_1-V_2=5V \text{ \& } V_m=0 \rightarrow 1/T(V_1 \cdot 0.2T + V_2 \cdot 0.8T)=0$$
$$V_1=-4V_2 \rightarrow -4V_2-V_2=5V \rightarrow V_2=-1V \text{ e quindi } V_1=4V$$

