



# ***Digital Storage Oscilloscope (DSO)***



## **Argomenti trattati**

### **Principio di funzionamento**

#### **Schema operativo (1)**

- Schema a blocchi
- Campionamento in tempo reale e tempo equivalente
- Gestione del processo di acquisizione e modalità di acquisizione

#### **Schema operativo (2)**

- *Post-trigger* e *pre-trigger*
- *Random sampling*



## DSO – principio di funzionamento

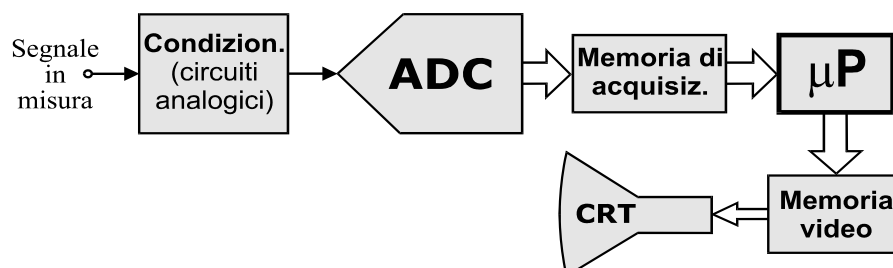
### Architettura tipica di uno strumento digitale

- Condizionamento del segnale analogico in misura
- Campionamento del segnale e conversione in forma numerica
- Memorizzazione
- Elaborazione dei campioni acquisiti
- Visualizzazione nel dominio del tempo



## DSO – principio di funzionamento

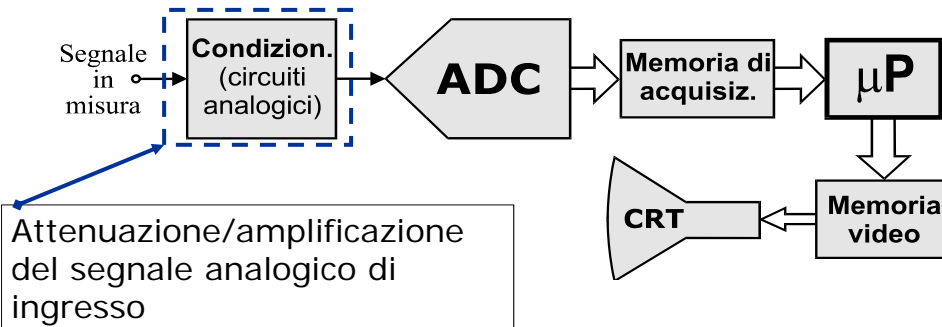
### *Serial-processing architecture*





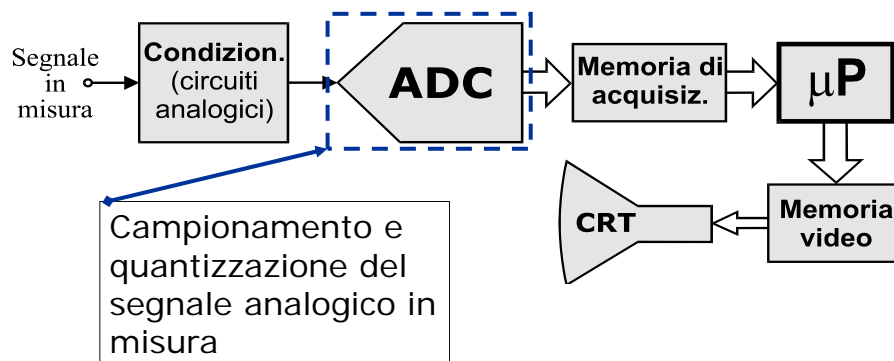
## DSO – principio di funzionamento

### *Serial-processing architecture*



## DSO – principio di funzionamento

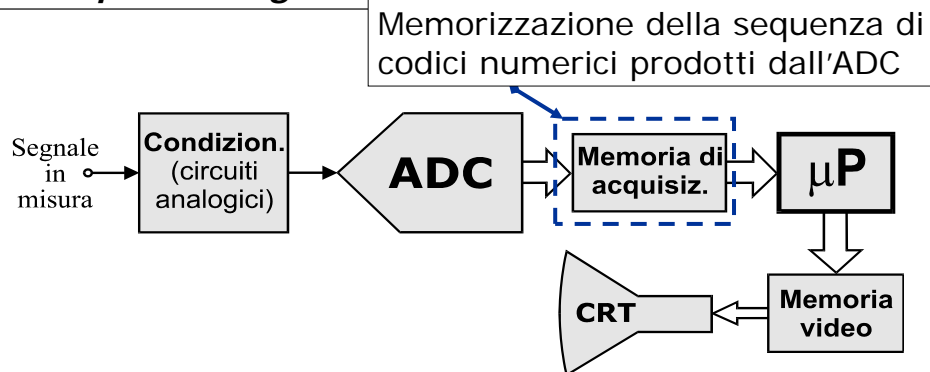
### *Serial-processing architecture*





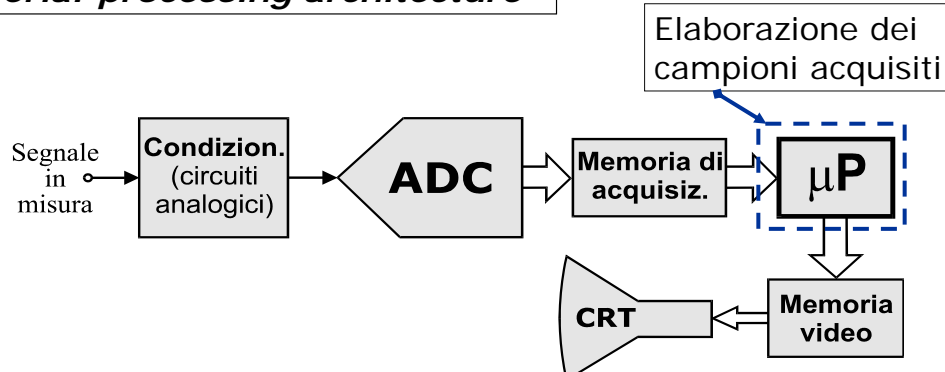
## DSO – principio di funzionamento

### *Serial-processing architecture*



## DSO – principio di funzionamento

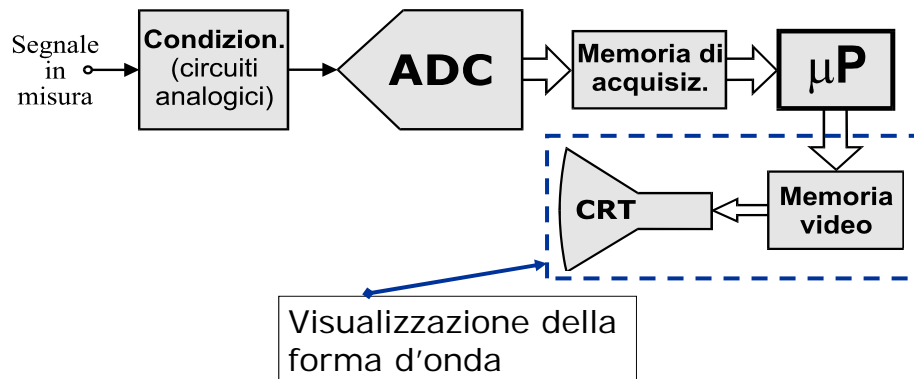
### *Serial-processing architecture*





## DSO – principio di funzionamento

### *Serial-processing architecture*



## DSO – principio di funzionamento

### *Serial-processing architecture*



L'oscilloscopio "osserva" il segnale di ingresso in alcuni intervalli temporali, ma è "cieco" durante altri.

La probabilità di perdere porzioni significative del segnale in misura decresce al crescere del **waveform capture rate**, parametro espresso in **waveform/s**.

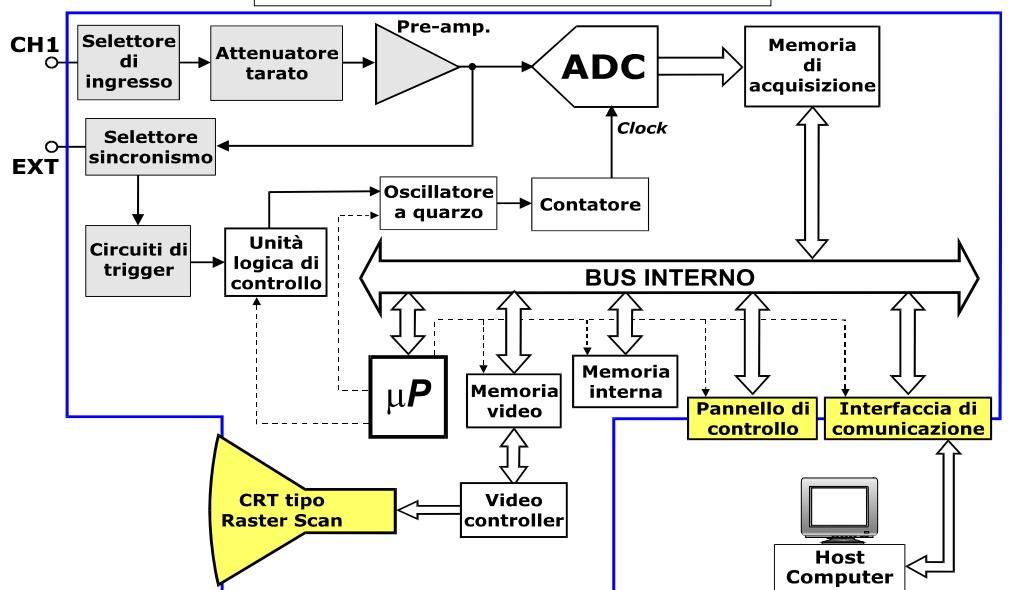


## DSO

### Schema operativo (1)

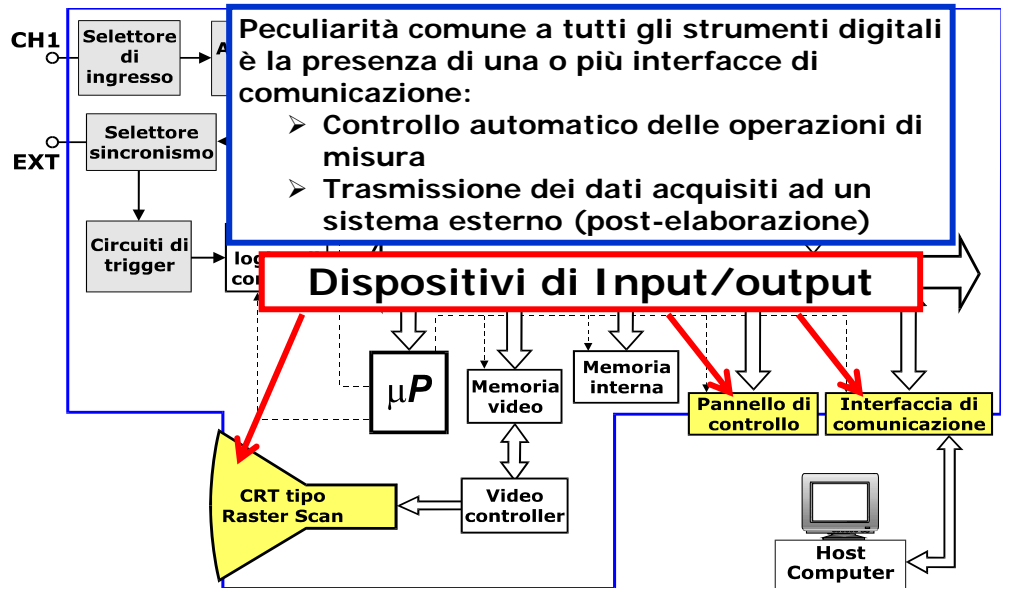


### DSO – schema operativo (1)

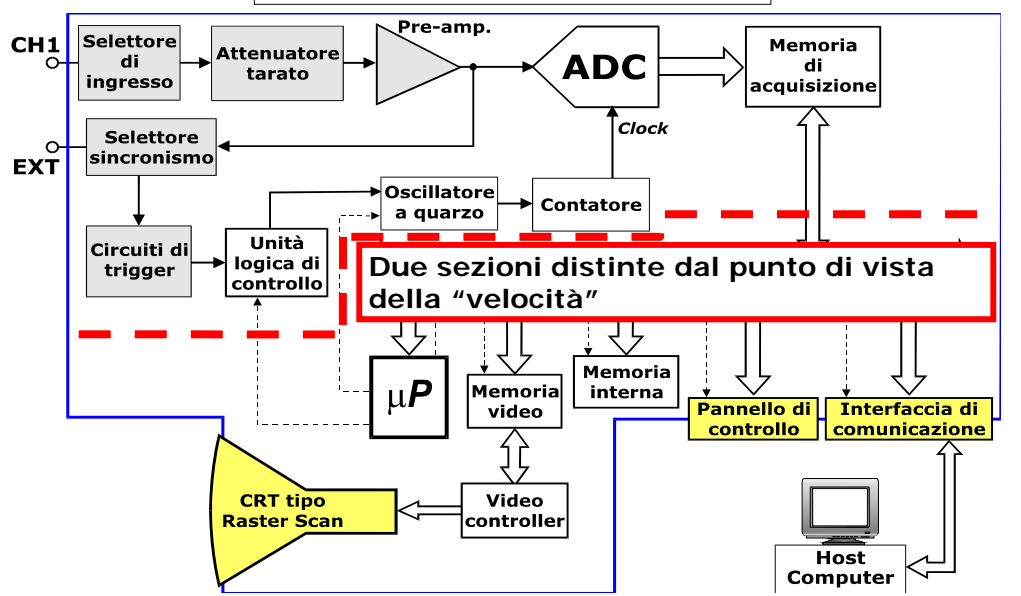




## DSO – schema operativo (1)

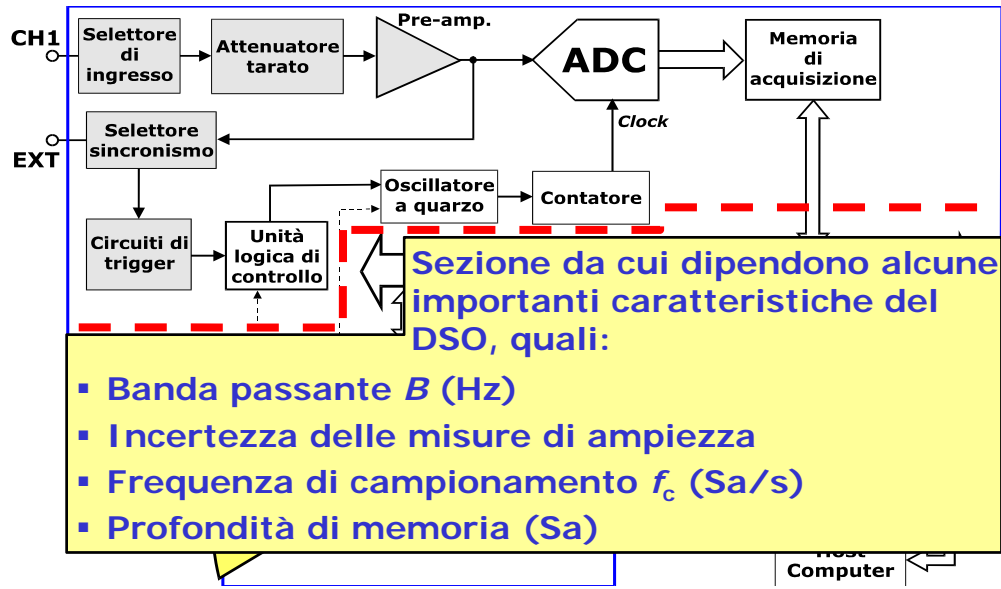


## DSO – schema operativo (1)

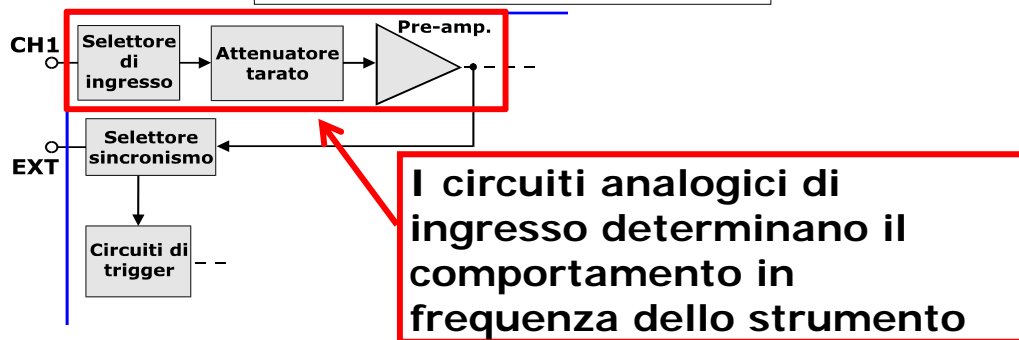




### DSO – schema operativo (1)



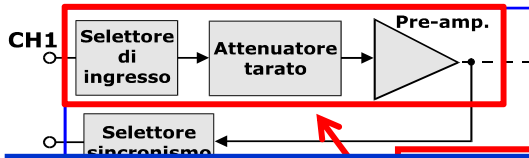
### DSO – schema operativo (1)







### DSO – schema operativo (1)



È fornita la banda passante  $B$  a  $-3$  dB, considerando lo strumento come un filtro passa-basso con frequenza di taglio superiore pari a  $B$ .

- ↳ L'ampiezza di un segnale sinusoidale con frequenza  $B$  è attenuata del 30%!!!
- ↳ Volendo ridurre l'effetto sull'ampiezza al 2% si applica la "regola del 5x", ossia:

$$B = 5 \cdot f_{\max}$$

dove  $f_{\max}$  è la più alta componente in frequenza del segnale in misura



### DSO – schema operativo (1)



La banda passante del DSO pone anche un limite alle misure di tempo di salita, secondo la relazione:

$$t_{so} = K / B$$

dove la costante  $K$  assume valori compresi tra 0.35 e 0.45 in base al tipo di risposta in frequenza del DSO.

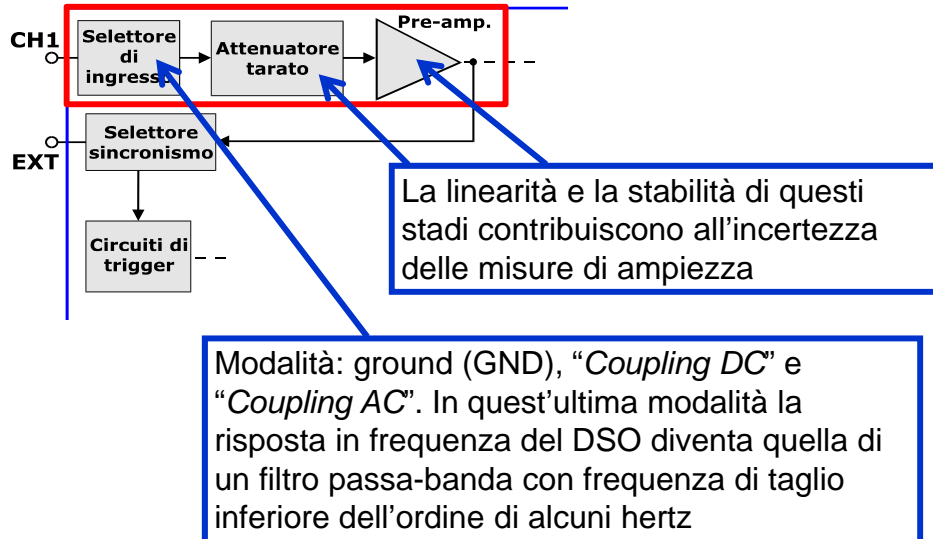
ESEMPIO

DSO con  $B = 500$  MHz ( $K = 0.35$ )

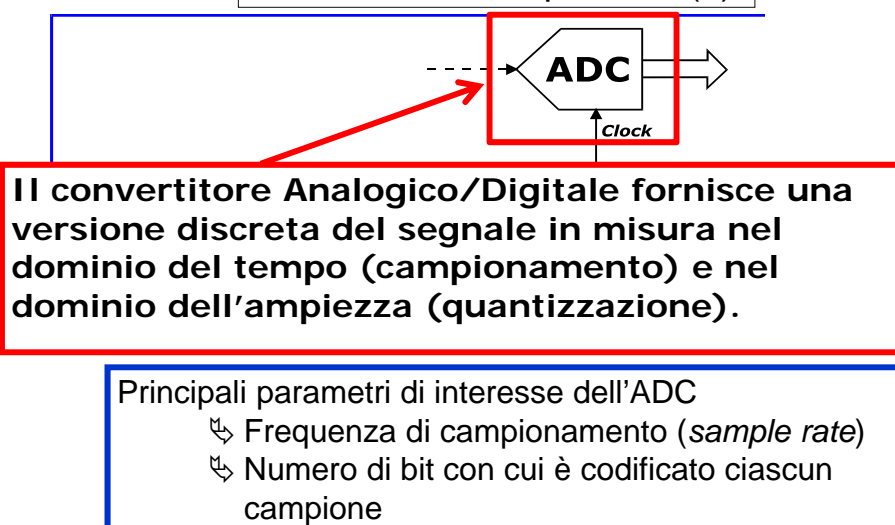
- ↳ Tempo di salita proprio del DSO = 0.7 ns



## DSO – schema operativo (1)

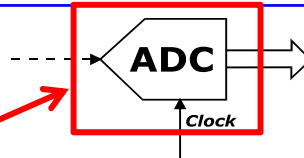


## DSO – schema operativo (1)





### DSO – schema operativo (1)

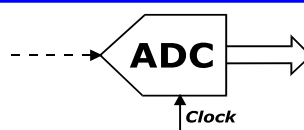


Nei DSO, l'ADC è solitamente di tipo flash (o parallelo)

- ↪ frequenza di campionamento massima  $f_{cmax}$  dell'ordine dei gigasample/s
- ↪ numero di bit non superiore a 12 (tipicamente  $N_b = 8$ )



### DSO – schema operativo (1)



ESEMPIO:  $f_{cmax} = 500 \text{ MSa/s}$ ;  $N_b = 8$ ;  $V_{FR} = 10 \text{ V}$

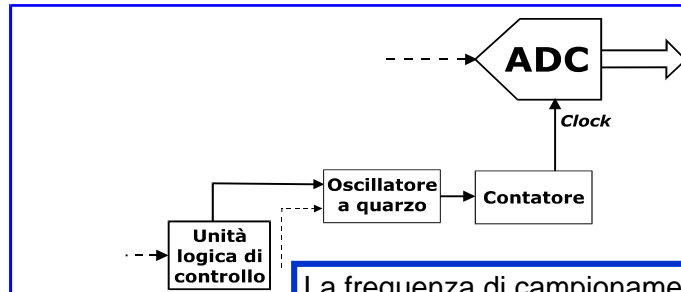
- ↪ Possono essere ricostruiti fedelmente segnali con contenuto in frequenza limitato a circa 200 MHz

$$\delta e_q = \frac{V_q}{2} = \frac{V_{FR}}{2^{N_b+1}} = \frac{10 \text{ V}}{2^9} \approx 0.02 \text{ V}$$

- ↪ Se  $V_{in} = 5 \text{ V}$ , l'incertezza relativa di quantizzazione è pari allo 0.4%



## DSO – schema operativo (1)

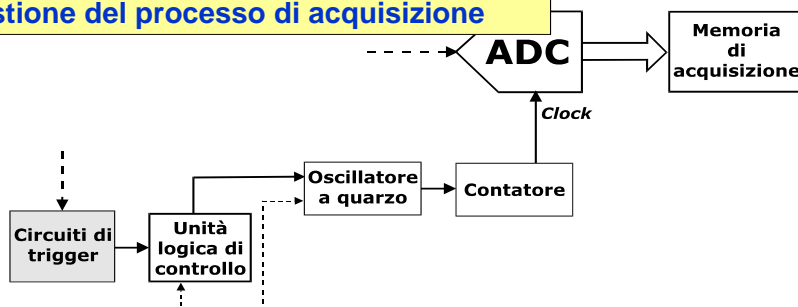


La frequenza di campionamento è impostata dall'operatore in modo indiretto, agendo sul comando time/div della sezione Base Tempi.  
↳ tipicamente si mantiene costante il numero di campioni impiegato per ricostruire la forma d'onda visualizzata sullo schermo.



## DSO – schema operativo (1)

### Gestione del processo di acquisizione

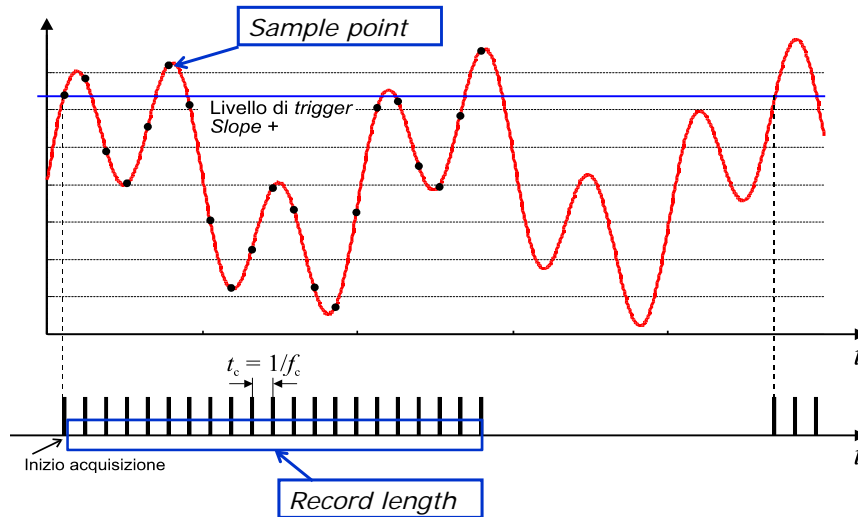


In corrispondenza dell'evento di *trigger* è avviata la fase di conversione A/D, con una frequenza di campionamento legata all'impostazione time/div e per una durata tale da ottenere il numero predefinito di campioni.



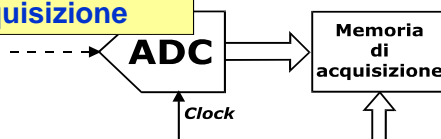
## DSO – schema operativo (1)

### Gestione del processo di acquisizione



## DSO – schema operativo (1)

### Gestione del processo di acquisizione



I campioni acquisiti (*sample points*) sono trasferiti alla memoria di acquisizione, che è organizzata come una coda FIFO (*First-In/First-out*).

Il ciclo di scrittura di ciascun campione deve avvenire in un tempo inferiore a  $t_c$

↳ se  $f_{cmax} = 1 \text{ GSa/s}$ , il ciclo di scrittura minimo è pari ad 1 ns

↳ costo elevato

Il ciclo di lettura può essere eseguito a velocità inferiore.



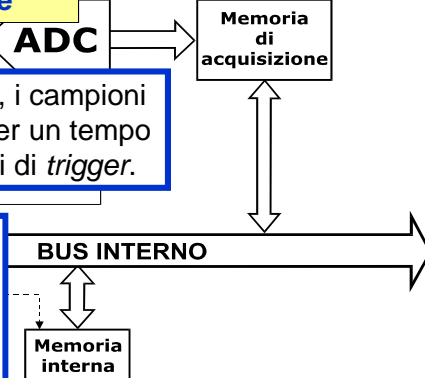
## DSO – schema operativo (1)

### Gestione del processo di acquisizione

Una volta trasferiti alla memoria interna, i campioni acquisiti possono essere “conservati” per un tempo indefinito se non si verificano altri eventi di *trigger*.

Lo schermo del DSO può quindi essere aggiornato continuamente, anche nel caso di segnali non ripetitivi

↳ La capacità di visualizzare segnali transitori è una delle principali peculiarità di un DSO



## DSO – schema operativo (1)

### Gestione del processo di acquisizione

L'acquisizione di segnali transitori deve essere eseguita rispettando il teorema del campionamento, ma ...

- nel caso di segnali ripetitivi, è possibile “procurarsi” i campioni necessari a ricostruire la forma d'onda dalle successive ripetizioni del segnale.

Nel primo caso si parla di

**campionamento in tempo reale**

mentre per segnali ripetitivi si può operare mediante il

**campionamento in tempo equivalente**



## DSO – schema operativo (1)

### Campionamento in tempo equivalente

Lo schema analizzato permette di operare secondo la tecnica del **campionamento sequenziale**:

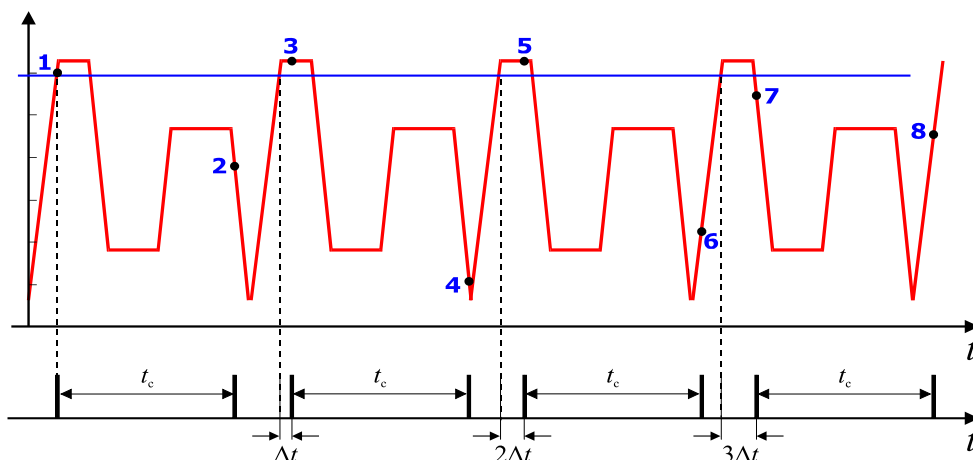
- ✓ ogni volta che si verifica l'evento di *trigger*, l'acquisizione è avviata dopo un ritardo crescente ( $0, \Delta t, 2 \Delta t, 3 \Delta t, \dots$ )
- ✓ una volta acquisito un numero di campioni corrispondenti al *record length*, si procede a ordinarli sull'asse dei tempi (è nota la loro posizione rispetto all'evento di *trigger*)

Questa tecnica garantisce di prelevare campioni diversi ad ogni evento di *trigger*.



## DSO – schema operativo (1)

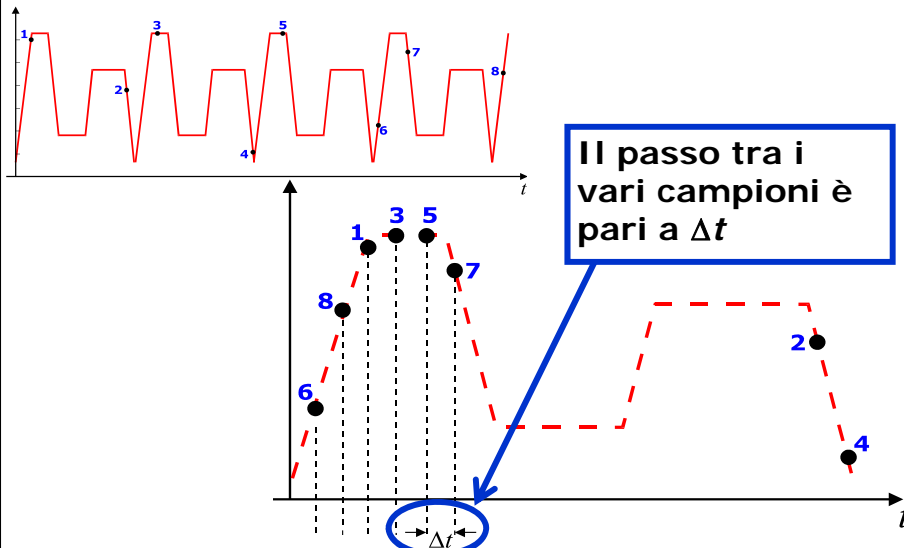
### Campionamento in tempo equivalente





## DSO – schema operativo (1)

### Campionamento in tempo equivalente



## DSO – schema operativo (1)

### Campionamento in tempo equivalente

Operando secondo la tecnica del campionamento sequenziale, si ottiene una frequenza di campionamento equivalente:

$$f_{c \text{ eq}} = \frac{1}{\Delta t} > f_c$$

- ✓ Per questo motivo, la banda  $B$  dei circuiti di ingresso è solitamente superiore ad  $f_c/2$  (limite imposto dal teorema del campionamento)

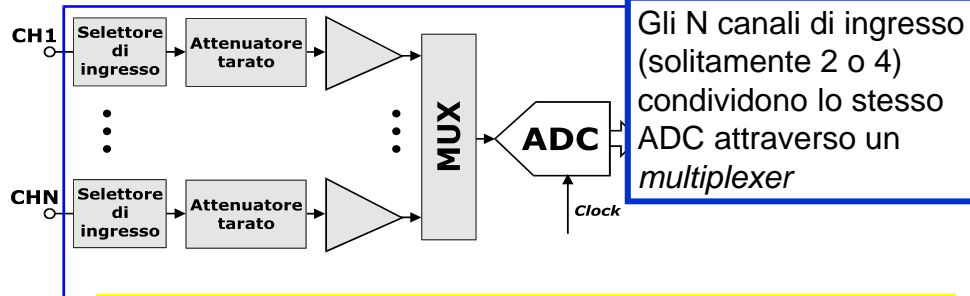
L'inconveniente di questa tecnica (adatta solo a segnali ripetitivi) è l'elevata durata del processo di acquisizione





## DSO – schema operativo (1)

### DSO multicanale – soluzione a basso costo

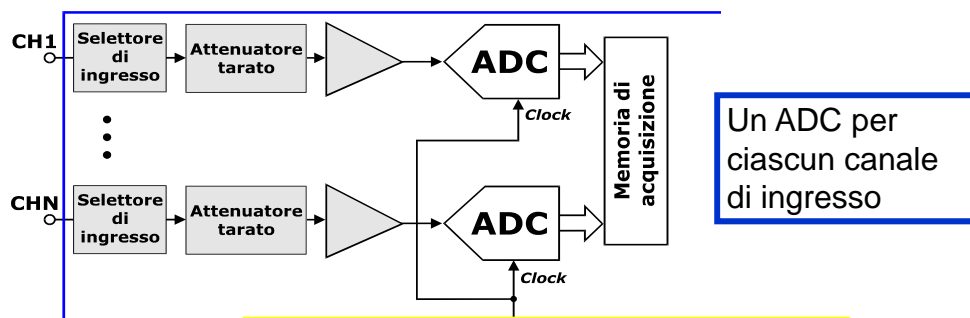


- ☹ Ciascun canale è campionato alla frequenza  $f_c/N$ 
  - ↳ In realtà si campiona ad una frequenza inferiore per problemi di *settling time*
- ☹ I campioni dei vari canali non sono simultanei



## DSO – schema operativo (1)

### DSO multicanale – soluzione ad alte prestazioni



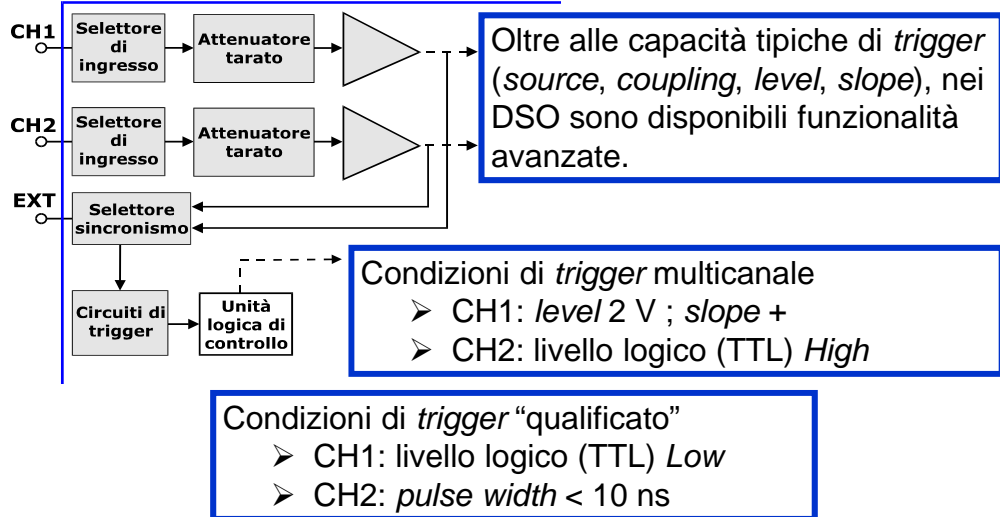
Evita gli inconvenienti della soluzione precedente, ma ...

- ☹ Costi elevati



## DSO – schema operativo (1)

### DSO multicanale – capacità di trigger

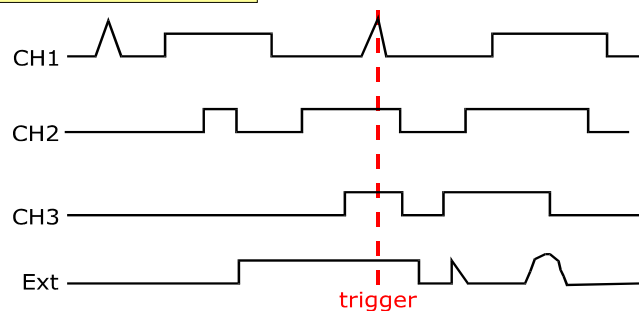


## DSO – schema operativo (1)

### DSO multicanale – capacità di trigger

#### ESEMPIO

Condizione di trigger  
CH1: **H** per  $t < 10$  ns  
CH2: **X**  
CH3: **H**  
External: **X**

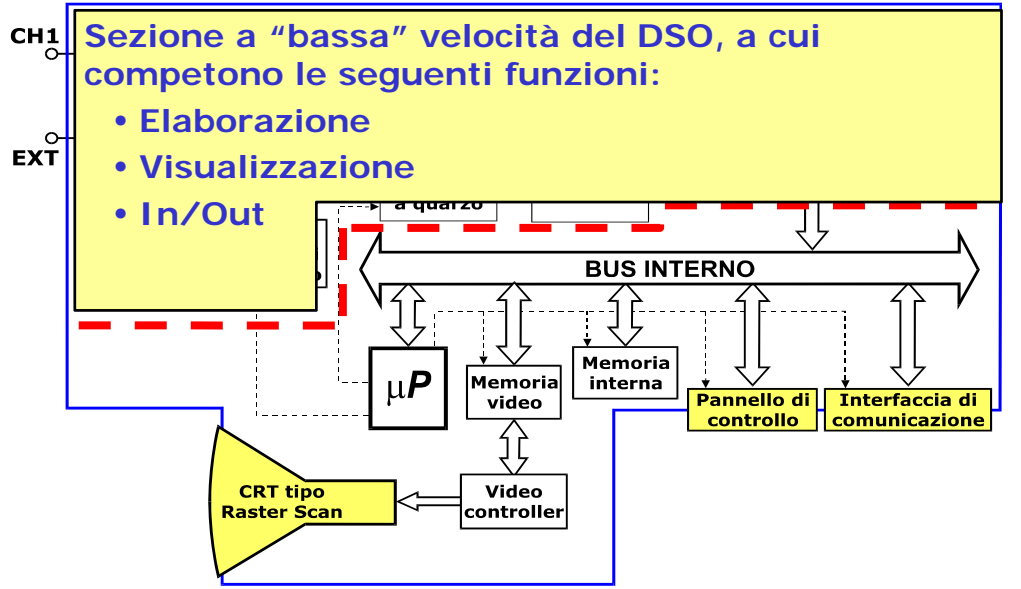


#### NOTA

Lo schema finora analizzato permette di visualizzare esclusivamente porzioni di segnale successive all'evento di trigger (**post-trigger**).



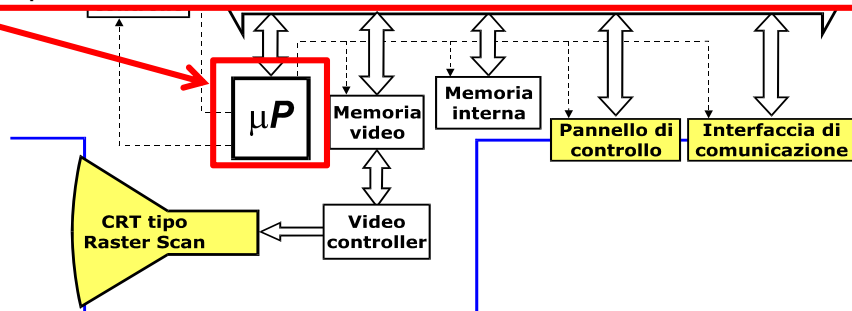
## DSO – schema operativo (1)



## DSO – schema operativo (1)

**Il micro-processore gestisce il funzionamento dell'intero sistema ed esegue l'elaborazione dei campioni**

- ↳ L'evoluzione dei DSO ha portato all'impiego di più  $\mu P$ , ciascuno dedicato ad una specifica funzione (acquisizione, elaborazione, visualizzazione, ...)

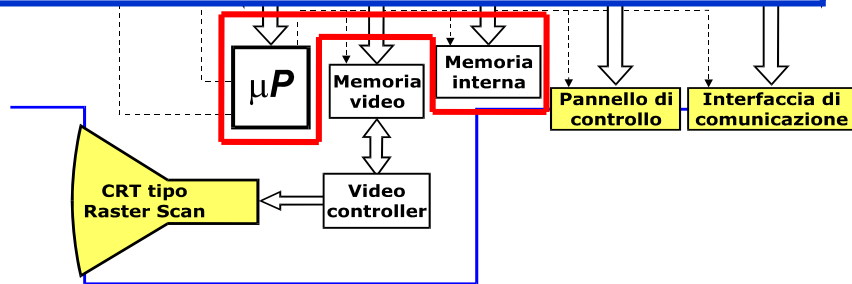




## DSO – schema operativo (1)

I campioni acquisiti e trasferiti nella memoria interna possono essere soggetti a diversi algoritmi di elaborazione:

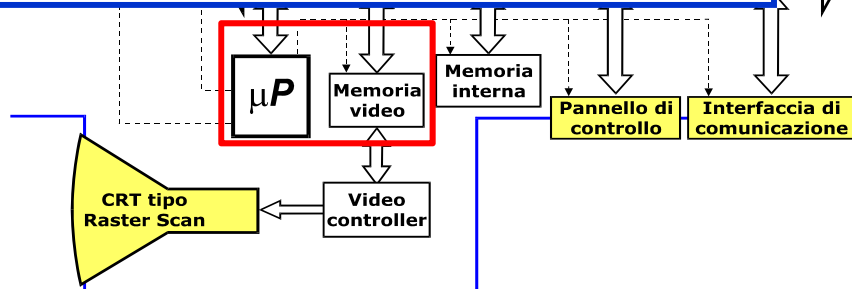
- ↪ ricostruzione del segnale di ingresso (interpolazione)
- ↪ stima di parametri di ampiezza ( $V_{pp}$ ,  $V_{mean}$ ,  $V_{rms}$ , ...) e di tempo ( $T$ ,  $f$ ,  $PW$ ,  $t_s$ , ...)
- ↪ analisi spettrale (DFT)



## DSO – schema operativo (1)

I dati di uscita dell'algoritmo di interpolazione (*dots*, *linear*, *sync*), ossia i punti dell'oscillogramma, sono trasferiti alla memoria video, le cui celle sono organizzate come una matrice HxL:

- ↪ le celle della memoria video sono associate agli HxL pixel in cui è suddiviso lo schermo del tubo a raggi catodici (CRT)



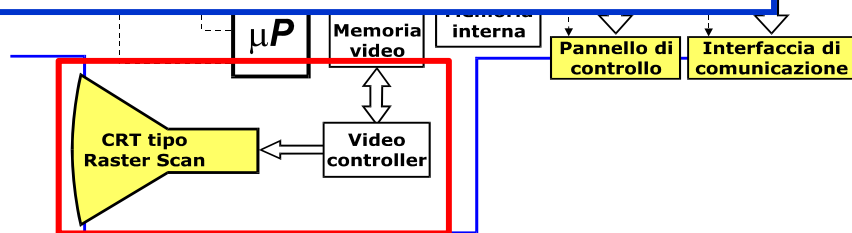


## DSO – schema operativo (1)

### Visualizzazione dell'oscillogramma

Il CRT è comunemente del tipo a deflessione magnetica ed impiega una scansione di tipo *raster scan*, come quella impiegata nei monitor dei PC:

- ⇒ i segnali generati dal *video controller* ed inviati alle placchette di deflessione orizzontale e verticale del CRT, permettono al pennello elettronico l'intera scansione dello schermo



## DSO – schema operativo (1)

### Visualizzazione dell'oscillogramma



La scansione dello schermo è eseguita contemporaneamente alla scansione della memoria video

- ⇒ Il contenuto di ciascuna cella della memoria video indica lo stato del *pixel* corrispondente



## DSO – schema operativo (1)

### Modalità di acquisizione

In un DSO è possibile controllare il modo in cui sono creati i punti dell'oscillogramma (*waveform points*) a partire dai campioni presenti all'uscita dell'ADC (*sample points*).

Modalità più comuni:

- ✓ *Sample mode*
- ✓ *Average mode*
- ✓ *Peak detect mode*
- ✓ *Envelop mode*
- ✓ *High-resolution mode*



## DSO – schema operativo (1)

### Modalità di acquisizione

#### **Sample mode**

È la modalità più semplice, che prevede la “costruzione” dei *waveform points* a partire da *sample points* ottenuti con un periodo di campionamento  $t_c$  pari al periodo dei punti dell'oscillogramma (*waveform interval*  $t_w$ )

$$t_c = t_w = \frac{1}{f_w} = \frac{D_t}{N_w} = \frac{(\text{Time/div}) \cdot 10}{N_w}$$

dove  $N_w$  è il numero di *waveform points* visualizzati sullo schermo



## DSO – schema operativo (1)

### Modalità di acquisizione

#### **Sample mode**

Esempio:

Time/div = 0.1 ms/div  $\Rightarrow D_t = 1$  ms

$N_w = 500$

$$\Rightarrow t_w = \frac{1 \text{ ms}}{500} = 2 \mu\text{s} \Rightarrow f_w = 500 \text{ kSa/s}$$

La frequenza di campionamento dell'ADC sarà quindi impostata a 500 kSa/s



## DSO – schema operativo (1)

### Modalità di acquisizione

#### **Average mode**

- La frequenza di campionamento dell'ADC è fissata come nella modalità **sample**, quindi  $t_c = t_w$
- L'oscillogramma è costruito mediando i *waveform points* di acquisizioni successive
  - ↳ Riduzione del rumore senza perdita di banda passante
  - ↳ Applicabile nel caso di segnali ripetitivi



## DSO – schema operativo (1)

### Modalità di acquisizione

#### Peak-detect mode

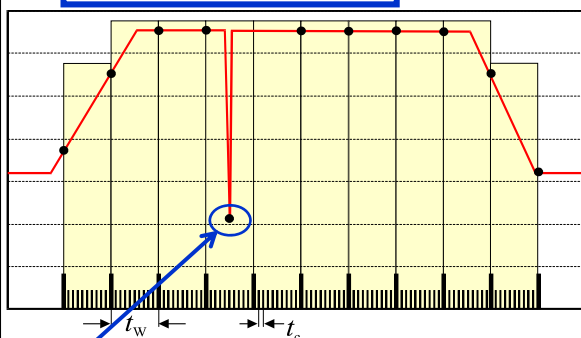
- La frequenza di campionamento dell'ADC è mantenuta al massimo valore possibile indipendentemente dall'impostazione time/div, quindi  $t_c < t_w$
- I *waveform points* sono costituiti dal minimo e dal massimo valore dei *sample points* acquisiti durante due *waveform interval*  $t_w$ 
  - Questa modalità incrementa notevolmente la probabilità di “catturare” impulsi brevi anche quando si acquisisce un intervallo di tempo elevato



## DSO – schema operativo (1)

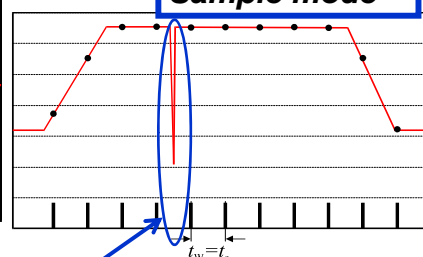
### Modalità di acquisizione

#### Peak-detect mode



Glitch catturato come minimo *sample-point* in due *waveform intervals* adiacenti

#### Sample mode



Bassa probabilità di catturare il *glitch* nella modalità *sample*





## DSO – schema operativo (1)

### Modalità di acquisizione

#### **Envelop mode**

- Modalità simile al *peak-detect mode*, per cui  $t_c < t_w$
- I minimi ed i massimi *waveform points* di acquisizioni successive sono utilizzati per costruire un oscillogramma che mostra gli involucri minimo e massimo del segnale in misura



## DSO – schema operativo (1)

### Modalità di acquisizione

#### **High-resolution mode**

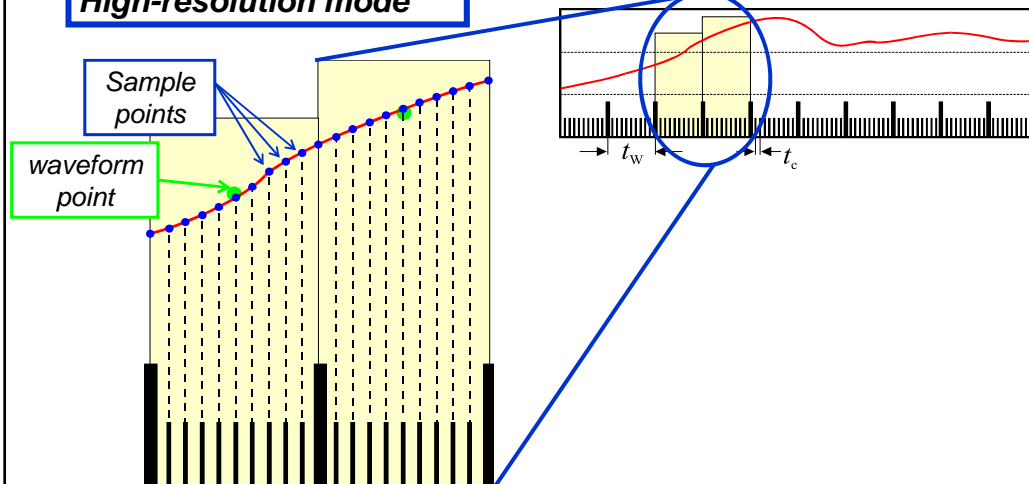
- Modalità simile al *peak-detect mode*, per cui  $t_c < t_w$
- Ciascun *waveform point* è ottenuto come valor medio dei *sample points* corrispondenti ad un *waveform interval*  $t_w$ 
  - ↳ Questa modalità permette di ridurre il rumore e migliorare la risoluzione nel caso di segnali con variazioni lente rispetto alla frequenza di campionamento



## DSO – schema operativo (1)

### Modalità di acquisizione

#### High-resolution mode

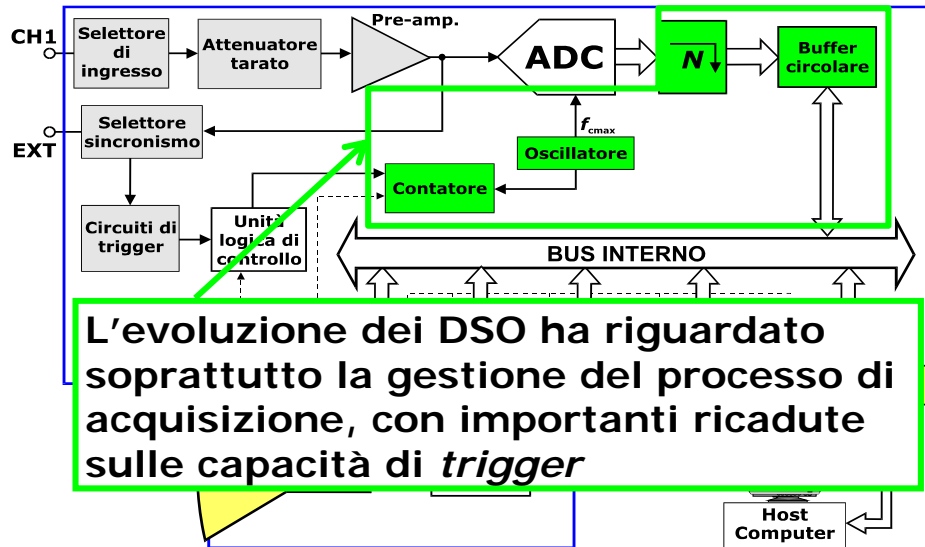


## DSO

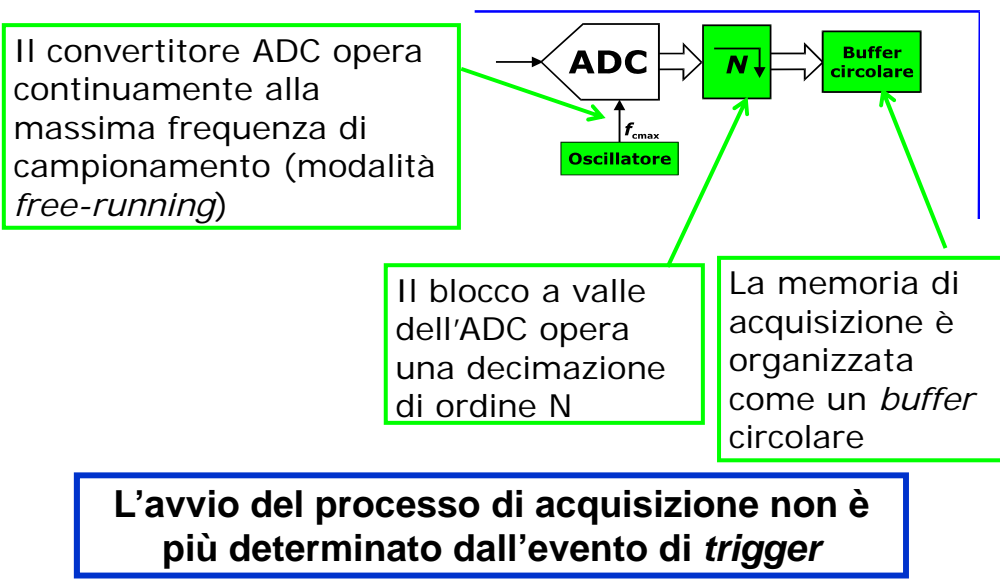
### Schema operativo (2)



## DSO – schema operativo (2)

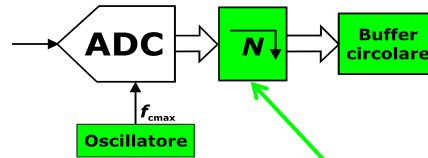


## DSO – schema operativo (2)





## DSO – schema operativo (2)



Il blocco decimatore permette di ridurre il numero di *sample points* impiegati dall'algoritmo di interpolazione nel caso di segnale sovracampionato

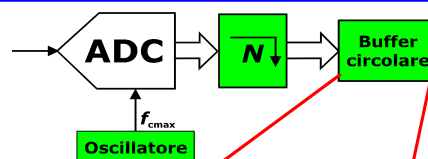
### Esempio

$f_{cmax} = 1 \text{ GSa/s}$ ; campionamento di un segnale periodico con  $f = 1 \text{ kHz}$   
Time/div = 0.1 ms/div, che corrisponde a  $D_t = 1 \text{ ms}$

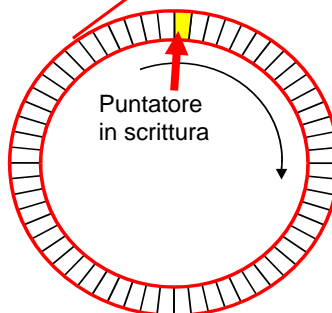
↳ Numero di *sample points*: 1 MSa!!!



## DSO – schema operativo (2)



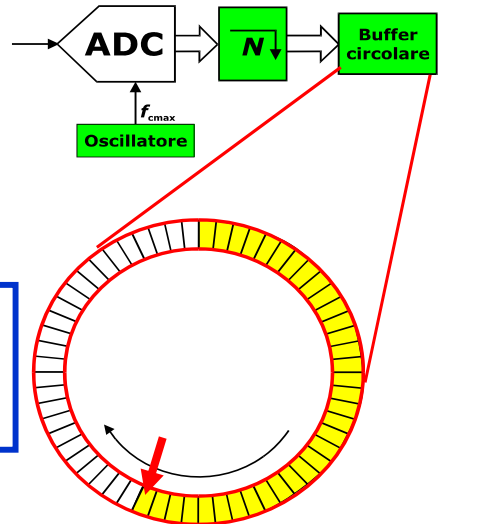
Il puntatore in scrittura avanza alla velocità dell'ADC (ridotta eventualmente del fattore di decimazione  $N$ )





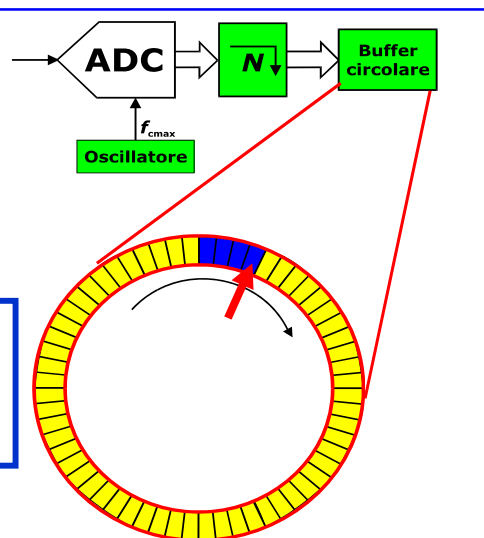
## DSO – schema operativo (2)

Il puntatore in scrittura avanza alla velocità dell'ADC (ridotta eventualmente del fattore di decimazione  $N$ )



## DSO – schema operativo (2)

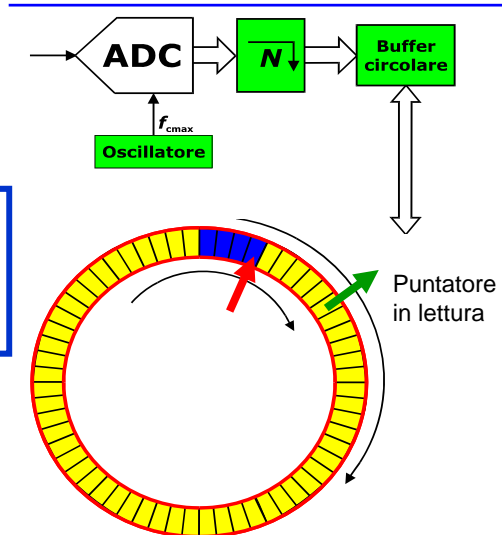
Il puntatore in scrittura avanza alla velocità dell'ADC (ridotta eventualmente del fattore di decimazione  $N$ )





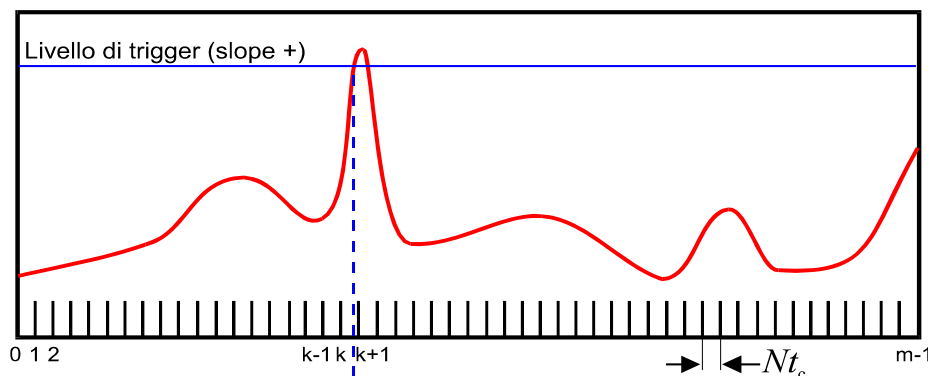
## DSO – schema operativo (2)

Il puntatore in lettura scandisce la porzione di memoria di acquisizione che è trasferita alla memoria interna



## DSO – schema operativo (2)

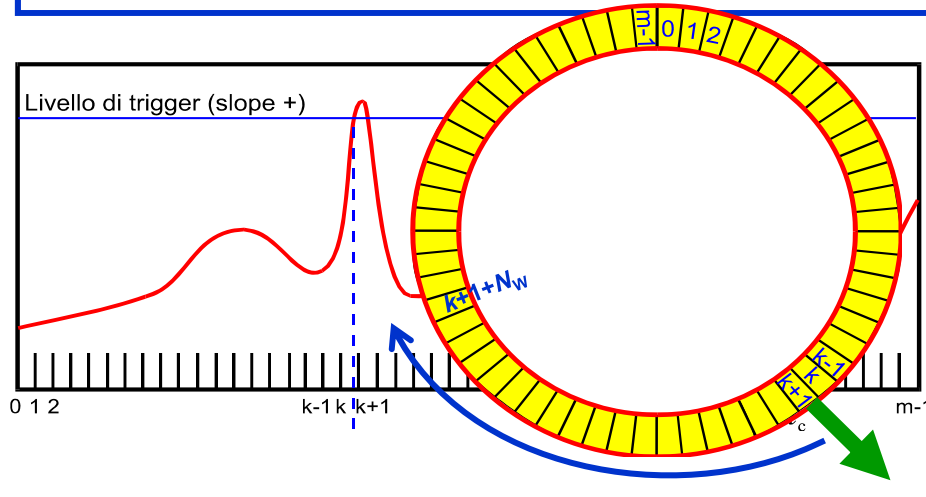
L'evento di *trigger* determina l'avvio del ciclo di lettura del *buffer circolare*





## DSO – schema operativo (2)

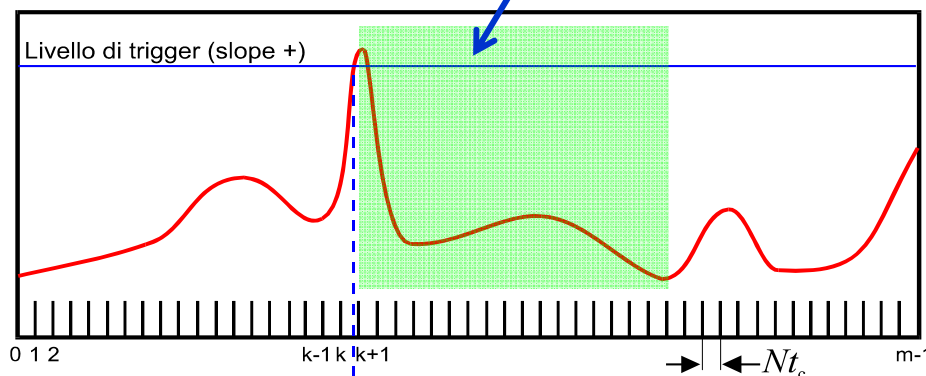
L'evento di *trigger* determina l'avvio del ciclo di lettura del *buffer circolare*



## DSO – schema operativo (2)

Porzione di segnale visualizzato sullo schermo del DSO

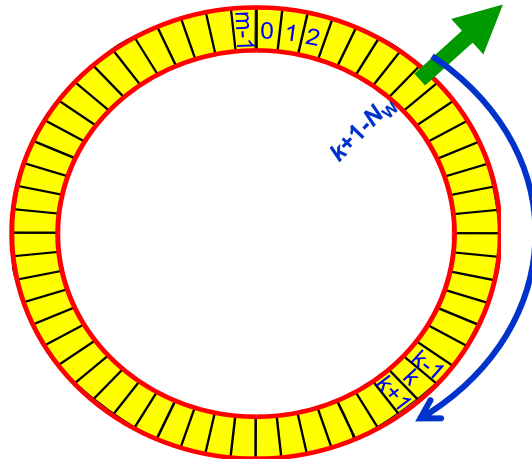
*post-trigger*





## DSO – schema operativo (2)

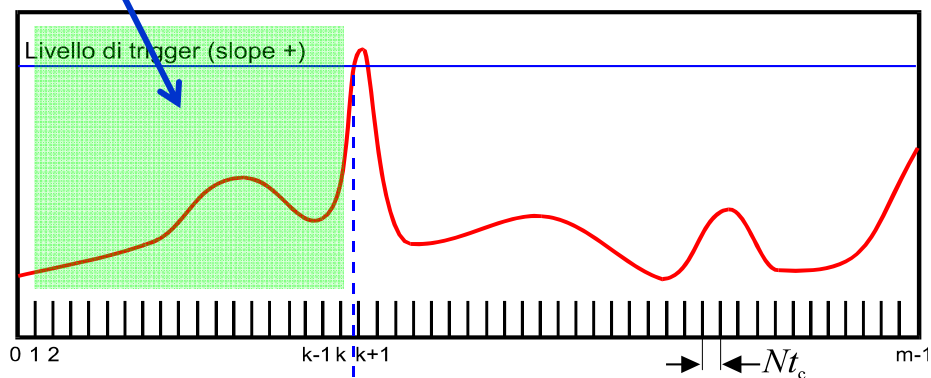
La memoria di acquisizione contiene anche i *sample points* che precedono l'evento di *trigger*, che possono essere trasferiti alla memoria interna posizionando opportunamente il puntatore in lettura



## DSO – schema operativo (2)

Porzione di segnale visualizzato sullo schermo del DSO

**pre-trigger**



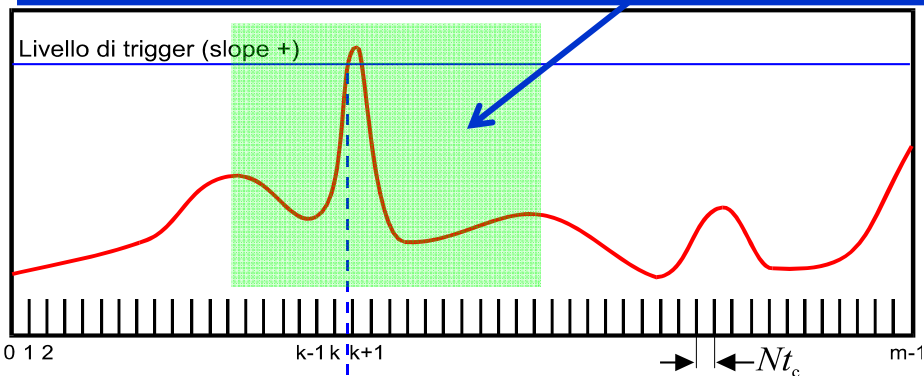




## DSO – schema operativo (2)

È possibile posizionare il puntatore in lettura a cavallo dell'evento di *trigger*, ottenendo la visualizzazione di una porzione di segnale antecedente e una porzione seguente l'evento di *trigger*

↪ **pre/post-trigger**



## DSO – schema operativo (2)

### Campionamento in tempo equivalente

La modalità *free-running* dell'ADC impedisce l'impiego della tecnica del campionamento sequenziale

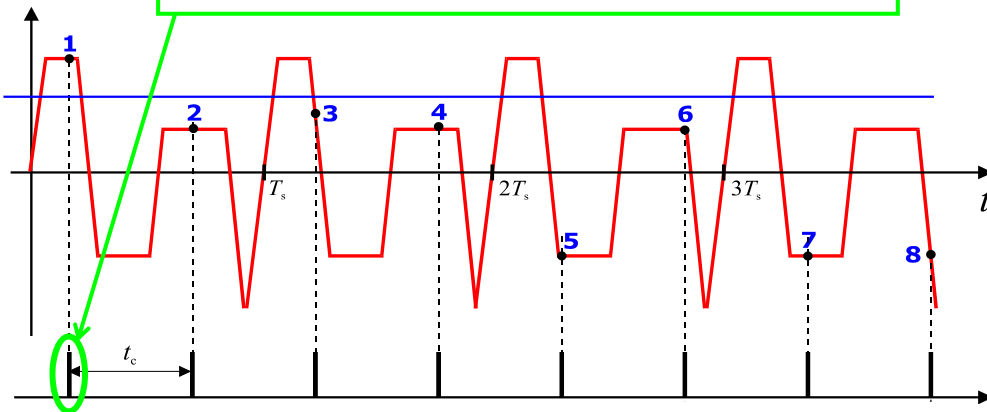
↪ In questo caso, per segnali in misura ripetitivi, si adotta la tecnica del campionamento casuale (**random sampling**)



## DSO – schema operativo (2)

### Campionamento in tempo equivalente – *random sampling*

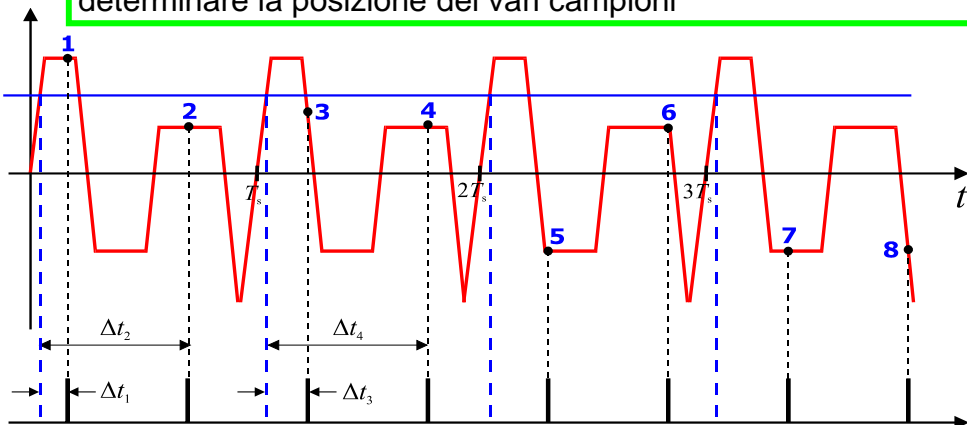
Gli impulsi di campionamento sono asincroni rispetto all'evento di *trigger*



## DSO – schema operativo (2)

### Campionamento in tempo equivalente – *random sampling*

L'evento di *trigger* è utilizzato come riferimento temporale per determinare la posizione dei vari campioni





## DSO – schema operativo (2)

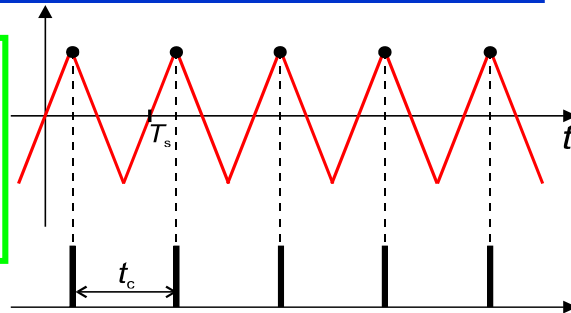
### Campionamento in tempo equivalente – *random sampling*

A differenza del campionamento sequenziale, la tecnica *random sampling* **non** garantisce l'acquisizione di campioni diversi dalle varie ripetizioni del segnale

- ⇒ Se il rapporto  $T_s/t_c$  è un numero razionale, si acquisiscono sempre gli stessi campioni

Situazione limite:  $T_s = t_c$

- ⇒ Si acquisisce sempre lo stesso campione
- ⇒ Il segnale in misura è ricostruito come una tensione continua

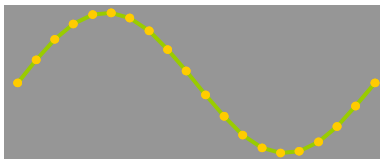


## DSO – problemi di configurazione

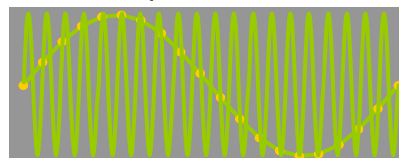
La catena di misura degli oscilloscopi digitali **NON** include un filtro anti-aliasing

- ⇒ Possibili fenomeni di aliasing nel caso di configurazione non corretta
- ⇒ Oscillogramma con caratteristiche diverse dal segnale in misura

Sembra un segnale corretto...



... ma in verità è un segnale sottocampionato





## DSO – problemi di configurazione

Frequenza di campionamento impostata indirettamente attraverso la scelta del fattore di taratura orizzontale  $K_x$  (s/div)

- Durata complessiva asse tempi  $D_t = 10 \cdot K_x$  (s)
- Il DSO impiega  $N_w$  punti per disegnare l'oscillogramma sullo schermo
  - ↳ Frequenza di campionamento impostata al valore  $f_c = N_w / D_t$



## DSO – problemi di configurazione

Esempio

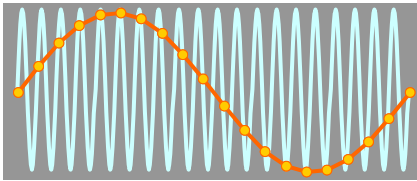
- Segnale di ingresso con forma d'onda sinusoidale e frequenza  $f_0 = 5$  kHz
- Impostazione operatore:  $K_x = 10$  ms/div
  - ↳  $D_t = 100$  ms
- DSO caratterizzato da  $N_w = 500$ 
  - ↳  $f_c = \frac{N_w}{D_t} = \frac{500}{0.1 \text{ s}} = 5 \text{ kSa/s}$
  - ↳ teorema del campionamento non rispettato



## DSO – problemi di configurazione

Problemi di aliasing possono essere evidenziati osservando forme d'onda non congruenti al variare della configurazione della base tempi

Configurazione 1



Configurazione 2

