

OSCILLOSCOPI DIGITALI

INTRODUZIONE

9.4 L'OSCILLOSCOPIO DIGITALE

L'evoluzione tecnologica, ed in particolare lo sviluppo di convertitori analogico-digitali, di memorie a semiconduttore e di microprocessori caratterizzati da una elevata velocità operativa, ha reso possibile l'introduzione di una nuova metodologia nella visualizzazione e misura dei segnali elettrici, diversa da quella su cui si fondano gli oscilloscopi analogici, rendendo così disponibile una nuova categoria di strumenti oscillografici, quella degli **oscilloscopi digitali** (o, in termini anglosassoni, *digital storage oscilloscope*, **DSO**).

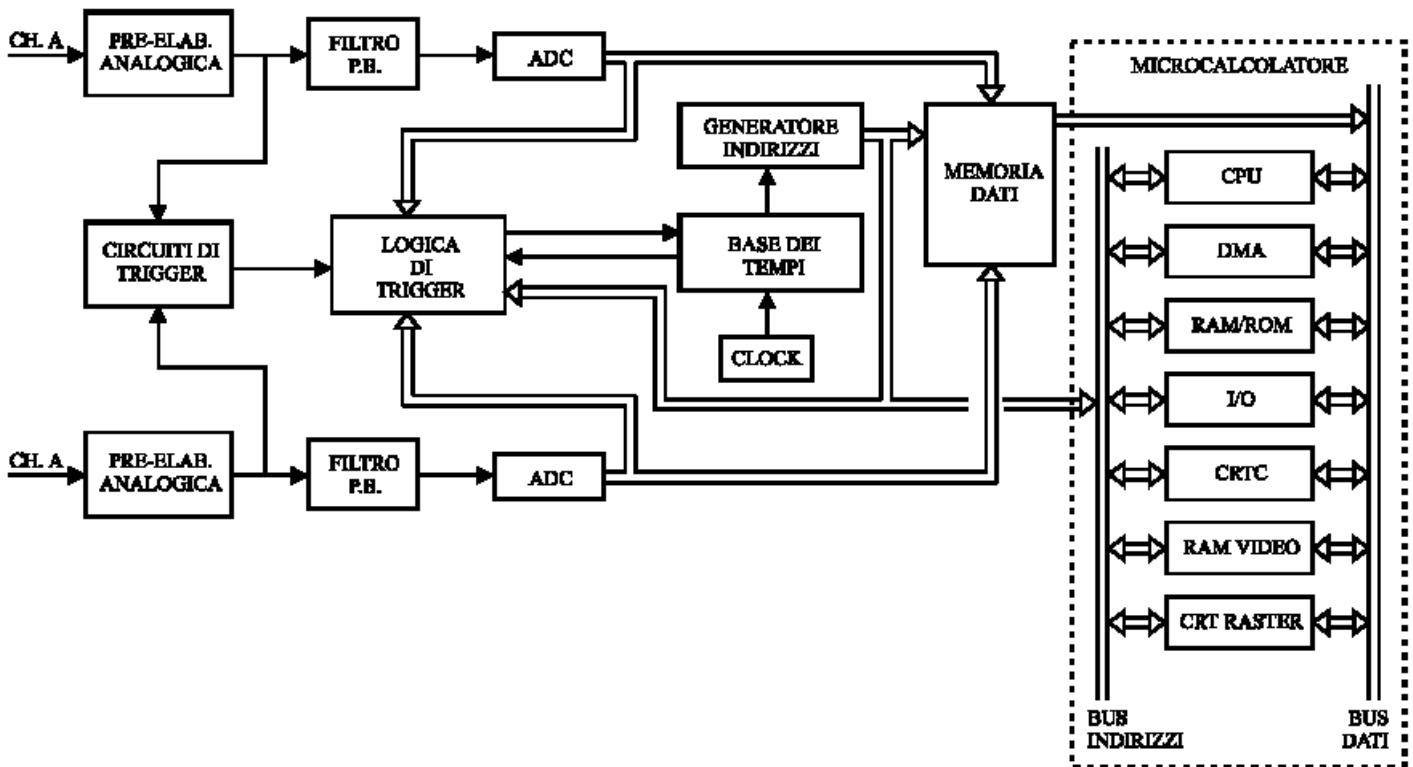
Il principio base di tutti di tutti gli oscilloscopi digitali è quello legato al campionamento e alla conversione del segnale che si intende visualizzare in una sequenza di campioni numerici, a cui fa seguito la memorizzazione dei campioni stessi ed una successiva elaborazione, che può essere anche molto complessa, che ha come scopo finale quello di ricostruire sullo schermo dello strumento l'andamento temporale del segnale originale a partire dai campioni acquisiti.

4 SEZIONI O FASI DI MISURA

quattro fasi principali nel processo di misura.

1. Il condizionamento analogico, il campionamento e la conversione in una sequenza numerica del segnale di misura.
2. La memorizzazione dei campioni.
3. L'elaborazione numerica, finalizzata alla ricostruzione dell'andamento temporale del segnale.
4. La visualizzazione su di un *display* del risultato della misura, che è rappresentato dall'oscillogramma del segnale.

SCHEMA A BLOCCHI



DISACCOPPIAMENTO TEMPORALE SEGNALE/VISUALIZZAZIONE

la separazione

temporale tra il processo di acquisizione dei campioni del segnale e quello di visualizzazione dell'oscillogramma del segnale. La possibilità di memorizzare i campioni consente infatti di "disaccoppiare" temporalmente questi due processi.

VISUALIZZAZIONE MEDIANTE *DISPLAY* DI TIPO *RASTER*

In pratica lo schermo può essere considerato come una matrice bidimensionale di *pixel*: attivando (ovvero accendendo) opportunamente alcuni di essi, è possibile visualizzare sullo schermo l'immagine desiderata.

MEMORIA RAM VIDEO

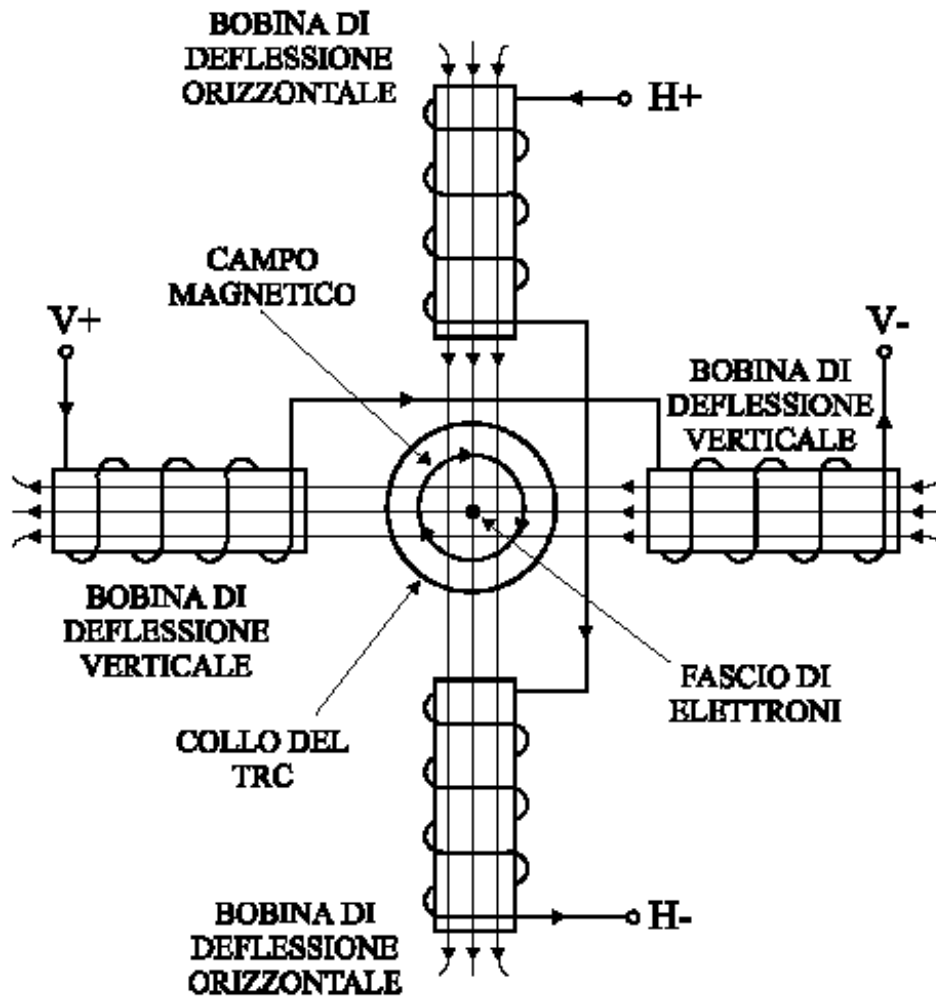
realizzazione di una "mappatura" dell'immagine da visualizzare sullo schermo in una memoria dedicata, detta **memoria video**.

DISPOSITIVI DI *INPUT/OUTPUT* (I/O)

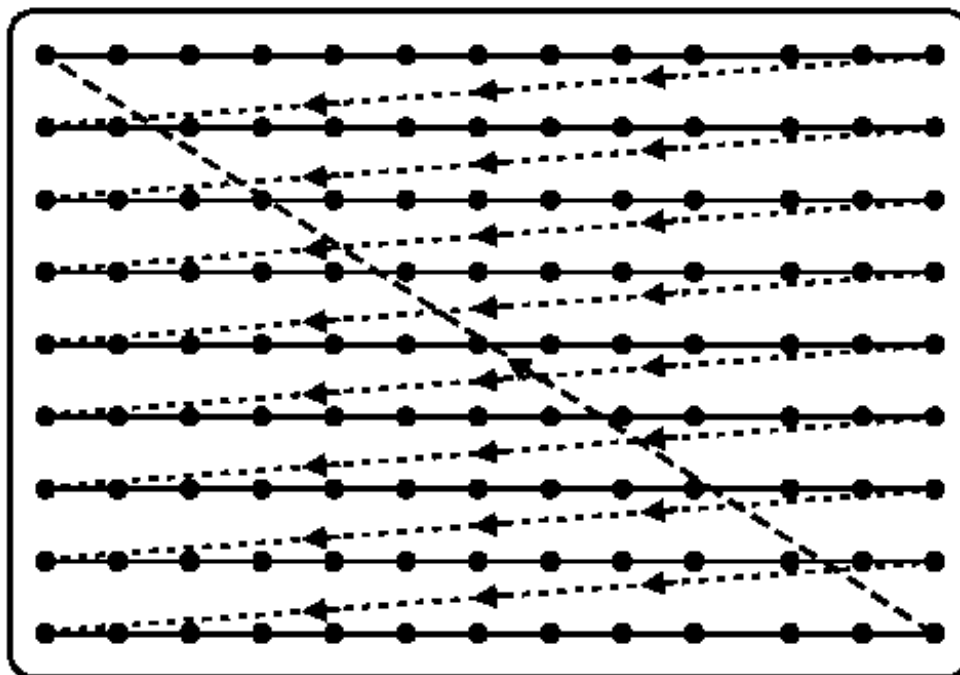
La possibilità di documentare facilmente la misura, trasferendo i dati dall'oscilloscopio ad una stampante o ad un plotter.

Oggi la traccia e tutte le informazioni di misura possono essere trasferite digitalmente verso l'esterno (memorie di massa, PC, rete locale o Internet), ad esempio con interfacce RS-232, GPIB, USB, TCP-IP, per successive elaborazioni o analisi dei dati.

DEFLESSIONE ELETTROMAGNETICA IN UN TRC DI TIPO RASTER



SCANSIONE DELLO SCHERMO PER LINEE E COLONNE



Questo modo di operare conferisce al *raster display* una importante proprietà: il tempo necessario per tracciare sullo schermo un'immagine è indipendente dalla complessità dell'immagine stessa.

RINFRESCO DEL QUADRO

Affinchè l'immagine sullo schermo appaia stabile e priva di "sfarfallamenti" all'occhio dell'operatore è necessario che il fascio di elettroni "rinfreschi" periodicamente l'immagine realizzata sullo schermo. Il periodo di rinfresco, detto anche **tempo di quadro**, deve essere convenientemente più piccolo di quello rappresentato dalla somma del tempo di persistenza dell'immagine sulla retina dell'occhio umano e quello di fosforescenza dei fosfori ⁽³⁾: valori normalmente adottati per il tempo di quadro sono compresi tra 20 ms e 10 ms.

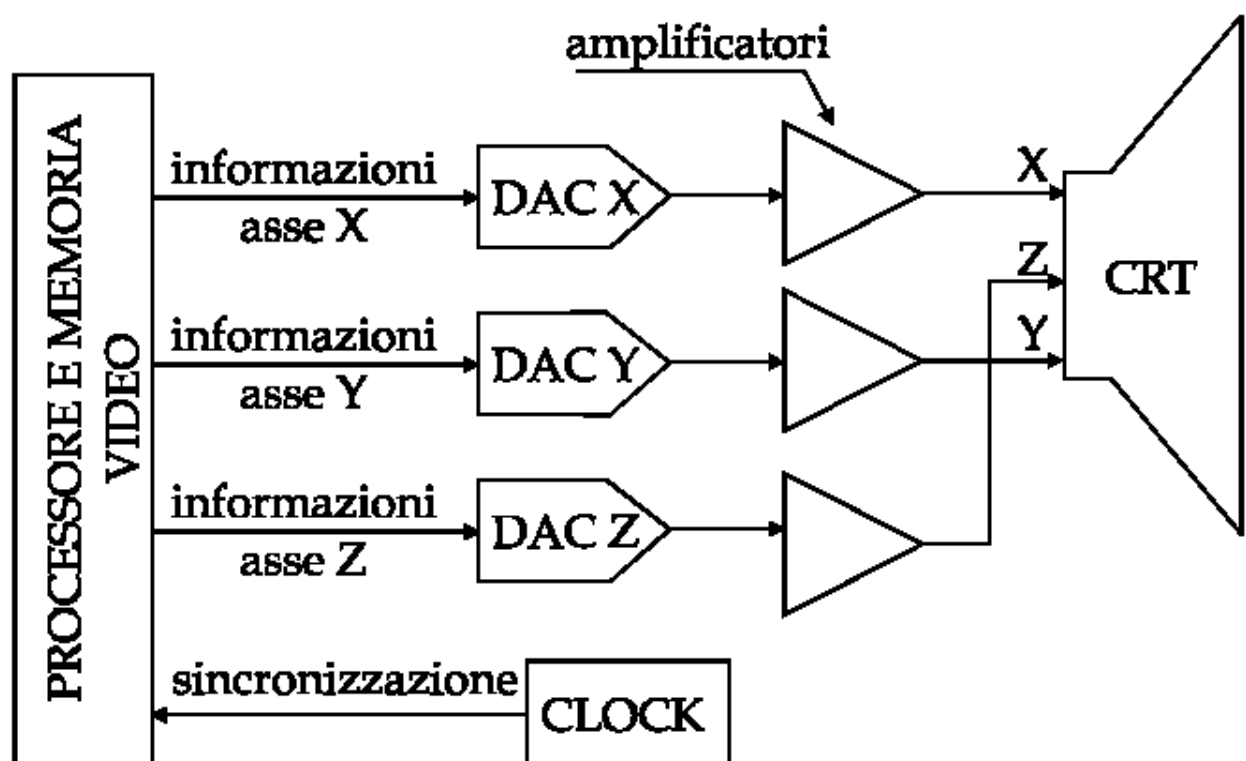
RISOLUZIONE DELLO SCHERMO

Per quanto riguarda la risoluzione dello schermo, valori tipici sono quelli dello standard **VGA**, caratterizzato da 640 righe orizzontali e 480 verticali, per complessivi 307200 *pixel*. Vi sono tuttavia oscilloscopi con *display* caratterizzati da risoluzioni più spinte (da 800 x 600 sino a 1024 x 1024 *pixel*).

REQUISITI DI BANDA PASSANTE

Senza entrare nei dettagli della valutazione della banda passante, merita osservare che in questo tipo di tubo la completa deflessione orizzontale avviene in un tempo ($20/480 \text{ ms} = 41.67 \mu\text{s}$) che è almeno di tre ordini di grandezza superiore a quella limite di un buon CRT per oscilloscopio analogico per alte frequenze.

CONVERTITORI DAC E AMPLIFICATORI X-Y-Z

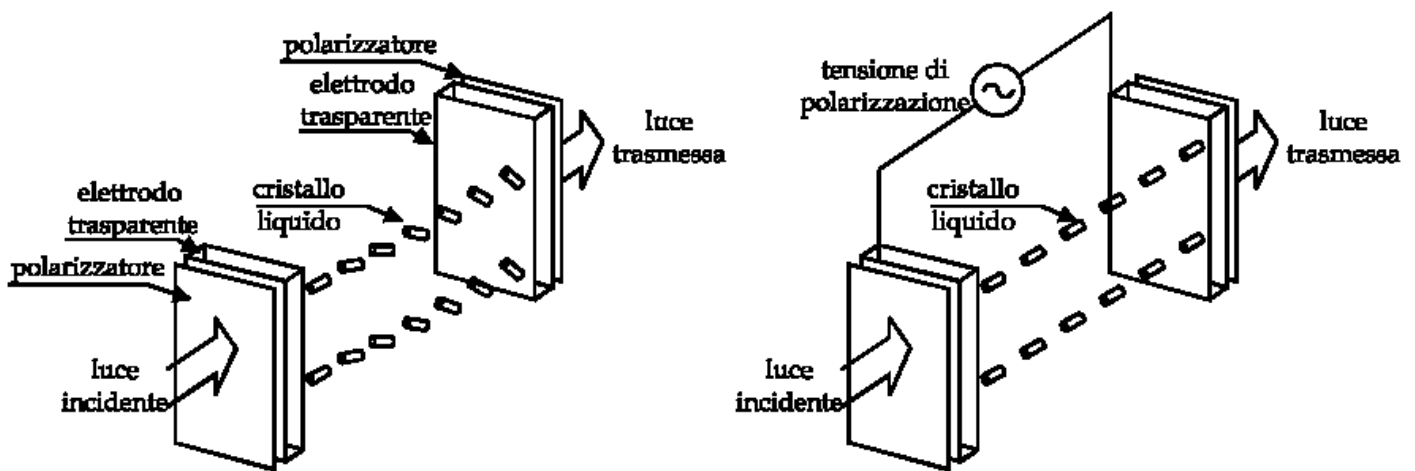


DISPLAY A SCHERMO PIATTO (FPD)

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. Caratteristica comune di questi *display*, indicati in generale con il termine **FPD** (*Flat Panel Display*), è la loro ridotta profondità rispetto alle altre due dimensioni del dispositivo e l'intrinseca organizzazione dello schermo in celle elementari (*pixel*).

Alla famiglia dei FPD appartengono *display* realizzati con diverse tecnologie: **LED** (*Light Emitting Diode*), **LCD** (*Liquid Crystal Display*), **elettroluminescenza**, *etc.*. Poiché quelli attualmente più utilizzati nei DSO

VISUALIZZATORE A CRISTALLI LIQUIDI (LCD)



La più recente evoluzione della tecnica di comando è rappresentata dagli LCD di tipo **TFT** (*Thin Film Transistor*), che integra nella cella elementare anche il transistor per l'accensione o lo spegnimento del *pixel*.

La più recente evoluzione della tecnica di comando è rappresentata dagli LCD di tipo **TFT** (*Thin Film Transistor*), che integra nella cella elementare anche il transistor per l'accensione o lo spegnimento del *pixel*. Questo tipo di tecnologia, detta di tipo a **matrice attiva**, permette, impiegando opportuni filtri, di realizzare anche *display* a colori ad elevata risoluzione e dimensioni di schermo (VGA e 10 pollici di diagonale per i DSO sino a 1280 x 1024 *pixel* e 20 pollici di diagonale per altri impieghi).

SEZIONE ANALOGICA D'INGRESSO

La sezione analogica di un DSO ricalca, nella sua struttura di principio, quella di un oscilloscopio analogico.

Eseguire un operazione di filtraggio di tipo passa basso, per evitare l'insorgere di problemi di *aliasing* ⁽¹⁰⁾.

¹⁰ Non sempre questa funzione è presente all'interno di un DSO, in quanto essa può essere incompatibile con la modalità di campionamento in tempo equivalente.

SEZIONE DI CONVERSIONE A/D E ACQUISIZIONE DATI

In Fig. 9.4.6 è rappresentato lo schema base di questa struttura, caratterizzata, dal punto di vista delle prestazioni, dai seguenti parametri:

1. la risoluzione del convertitore analogico-digitale,
2. la massima frequenza di campionamento e conversione,
3. la capacità (o profondità) massima della memoria, intesa come numero massimo di campioni memorizzabili in essa.

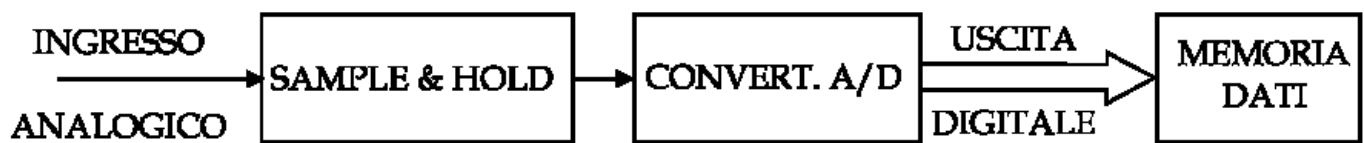
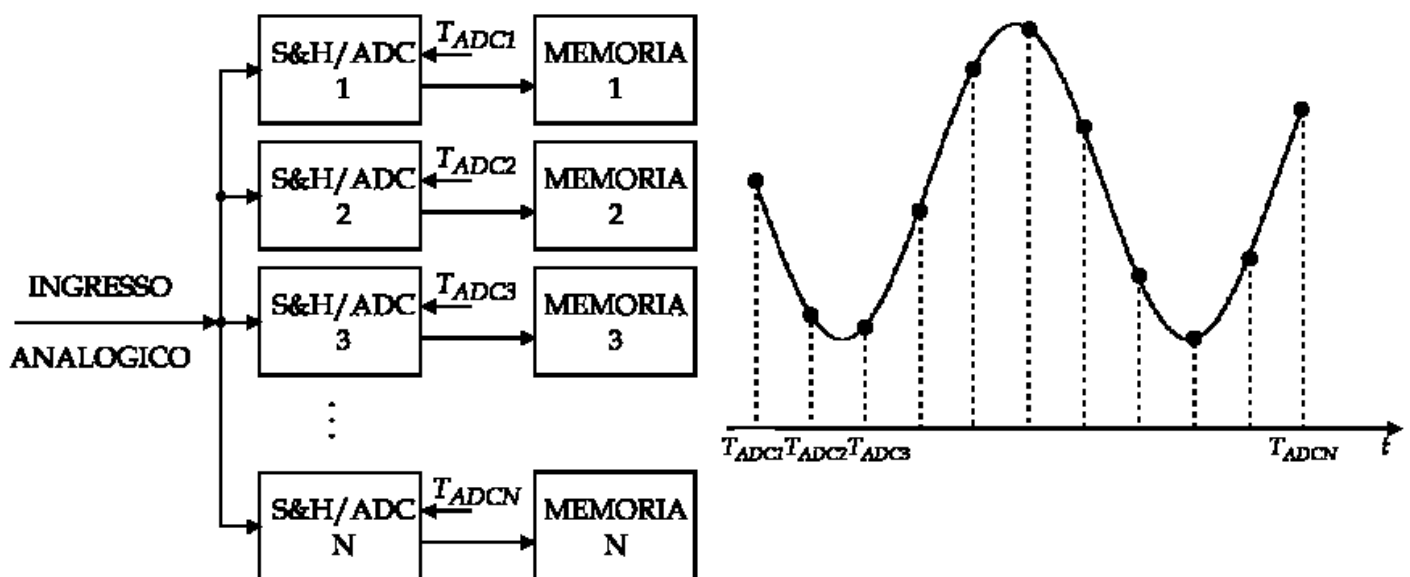
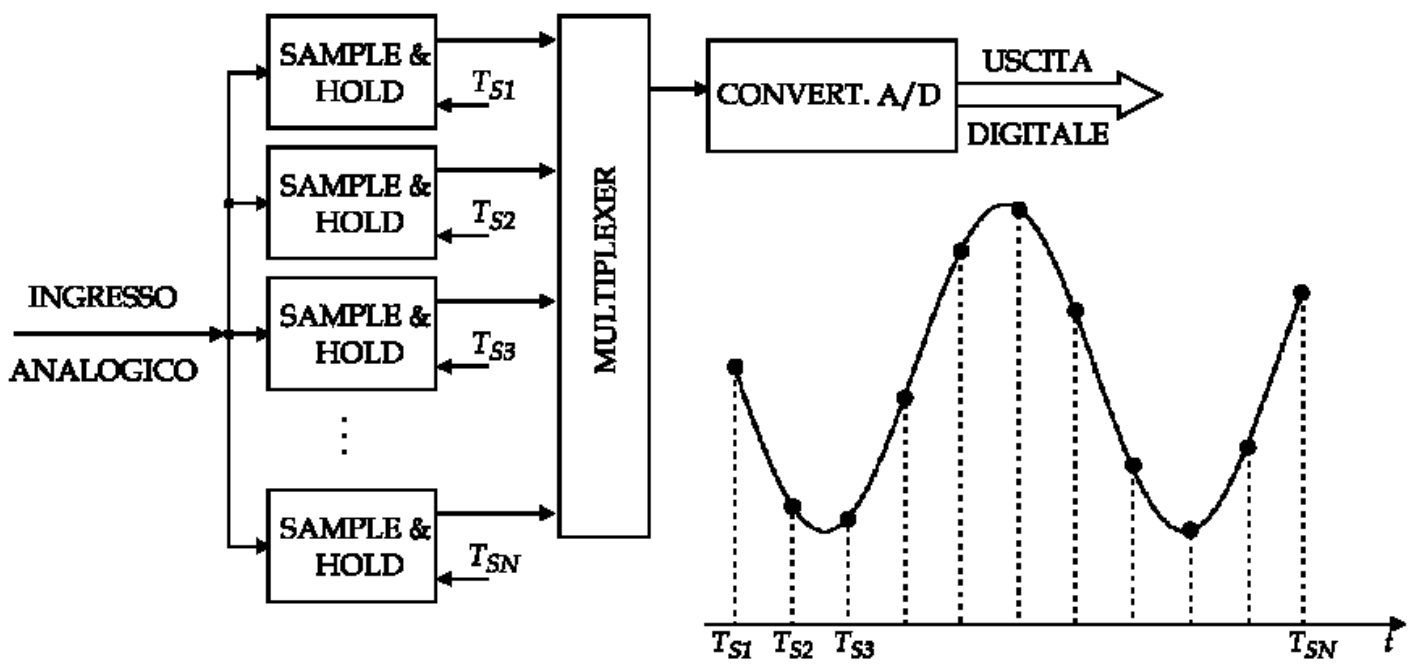


Figura 9.4.6 Struttura a blocchi della sezione di campionamento, conversione e memorizzazione dei campioni.

CAMPIONAMENTO E CONVERSIONE E MULTICONVERTITORE



STRUTTURA CON SINGOLO CONVERTITORE A/D IN *MULTIPLEXING*

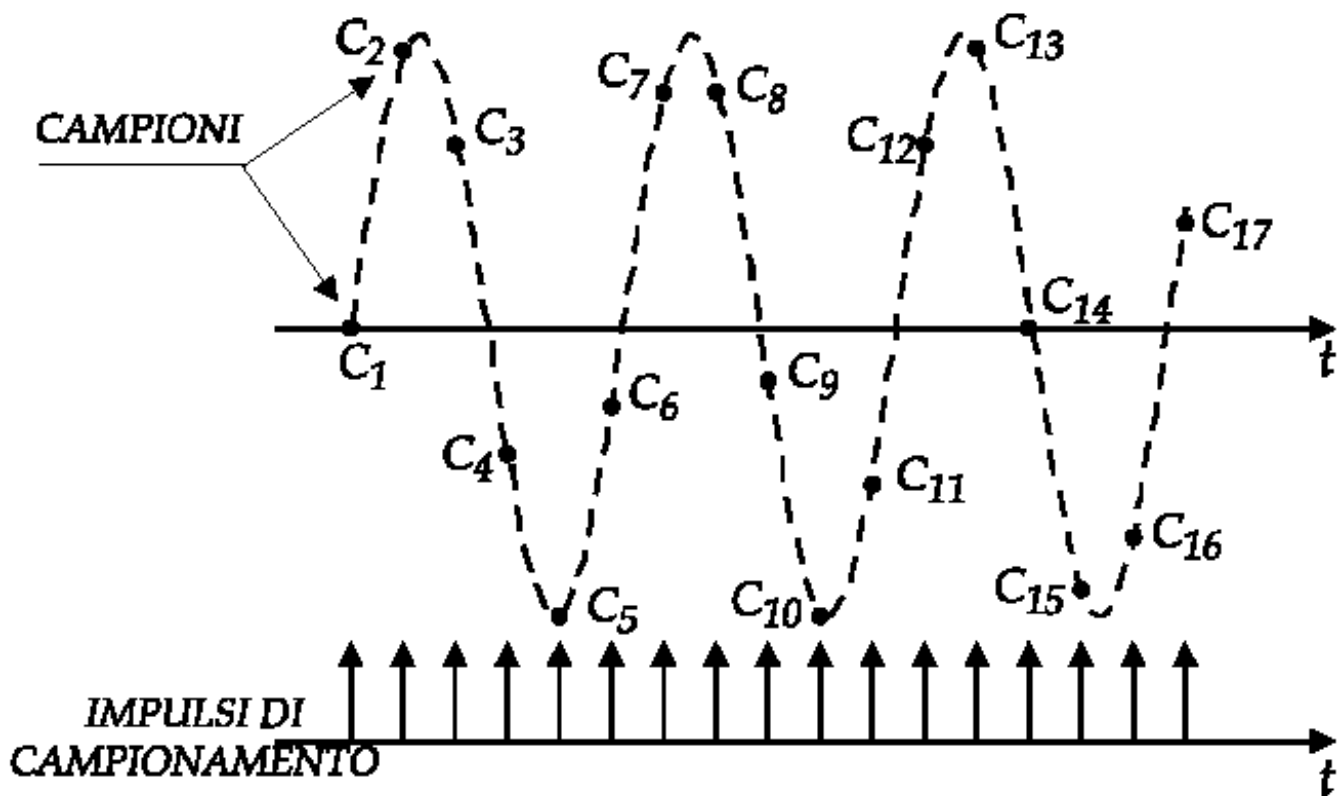


MODALITA' DI CAMPIONAMENTO

Il campionamento dei segnali può avvenire, in un DSO, attraverso tre differenti modalità:

1. campionamento in tempo reale (o *single shot*),
2. campionamento sequenziale in tempo equivalente,
3. campionamento casuale in tempo equivalente.

Mentre la prima modalità di campionamento assume una validità generale, le ultime due modalità sono applicabili solamente alla classe dei segnali ripetitivi o periodici.

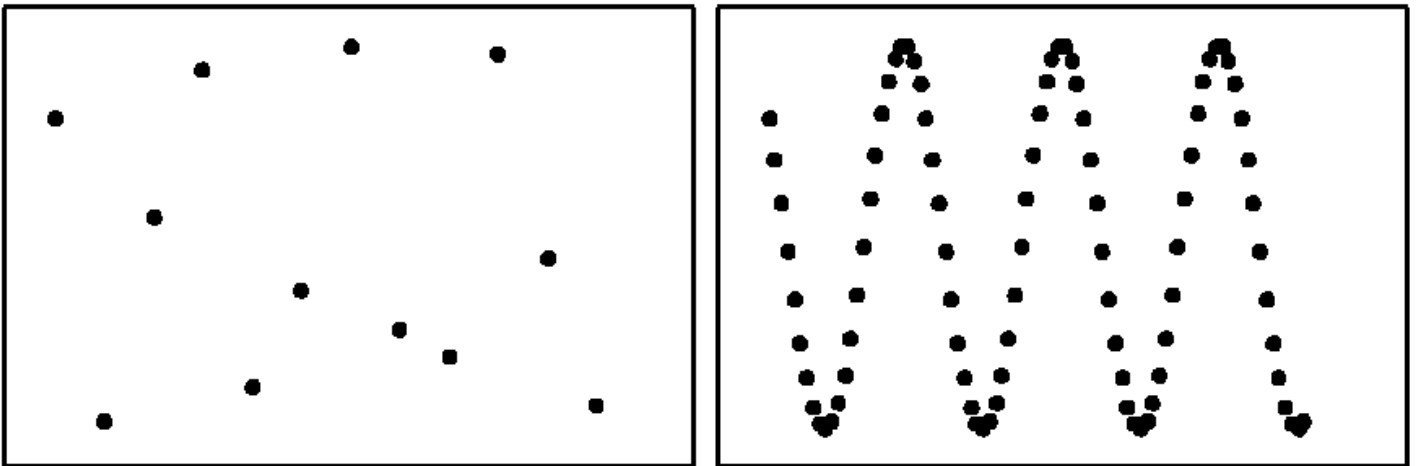


E' importante osservare che, per la correttezza della misura, ad una modalità di campionamento di questo tipo è richiesto di soddisfare il **teorema del campionamento**, ovvero che la frequenza di campionamento risulti maggiore del doppio della frequenza massima del segnale.

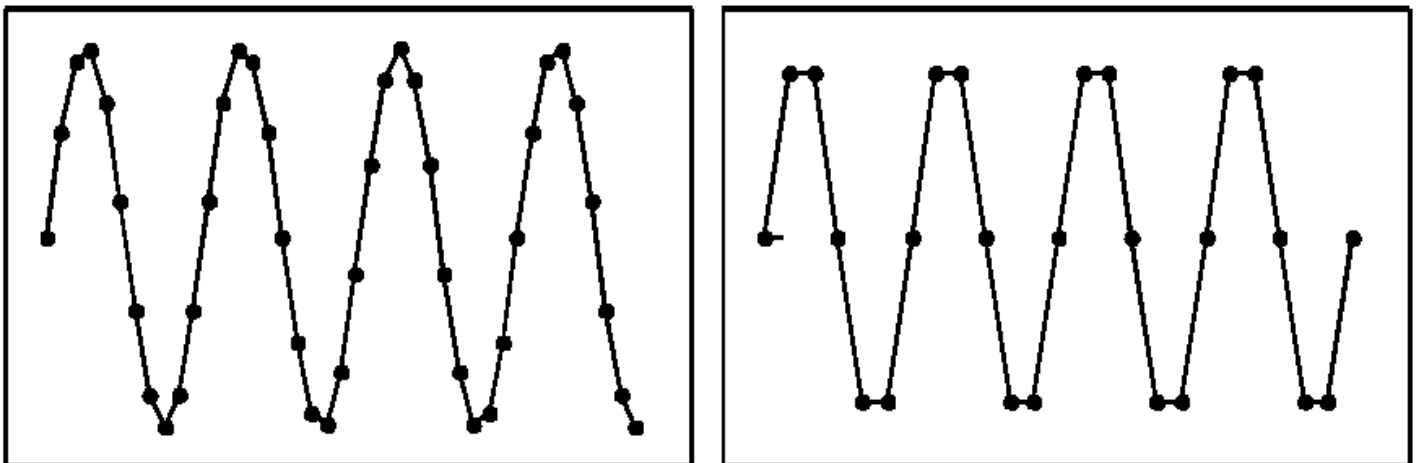
Affinchè l'occhio possa riconoscere distintamente il profilo della forma d'onda è necessario che il numero di campioni acquisiti per periodo risulti sufficientemente elevato per non creare ambiguità nella ricostruzione della forma d'onda stessa. Nel caso di un segnale sinusoidale, un valore che viene convenzionalmente riconosciuto adeguato è quello di almeno 25 punti per periodo.

ALIASING PERCETTIVO E INTERPOLATORI

Anche rispettando il teorema di Shannon, con “pochi” punti per periodo la forma d’onda può non essere riconosciuta.



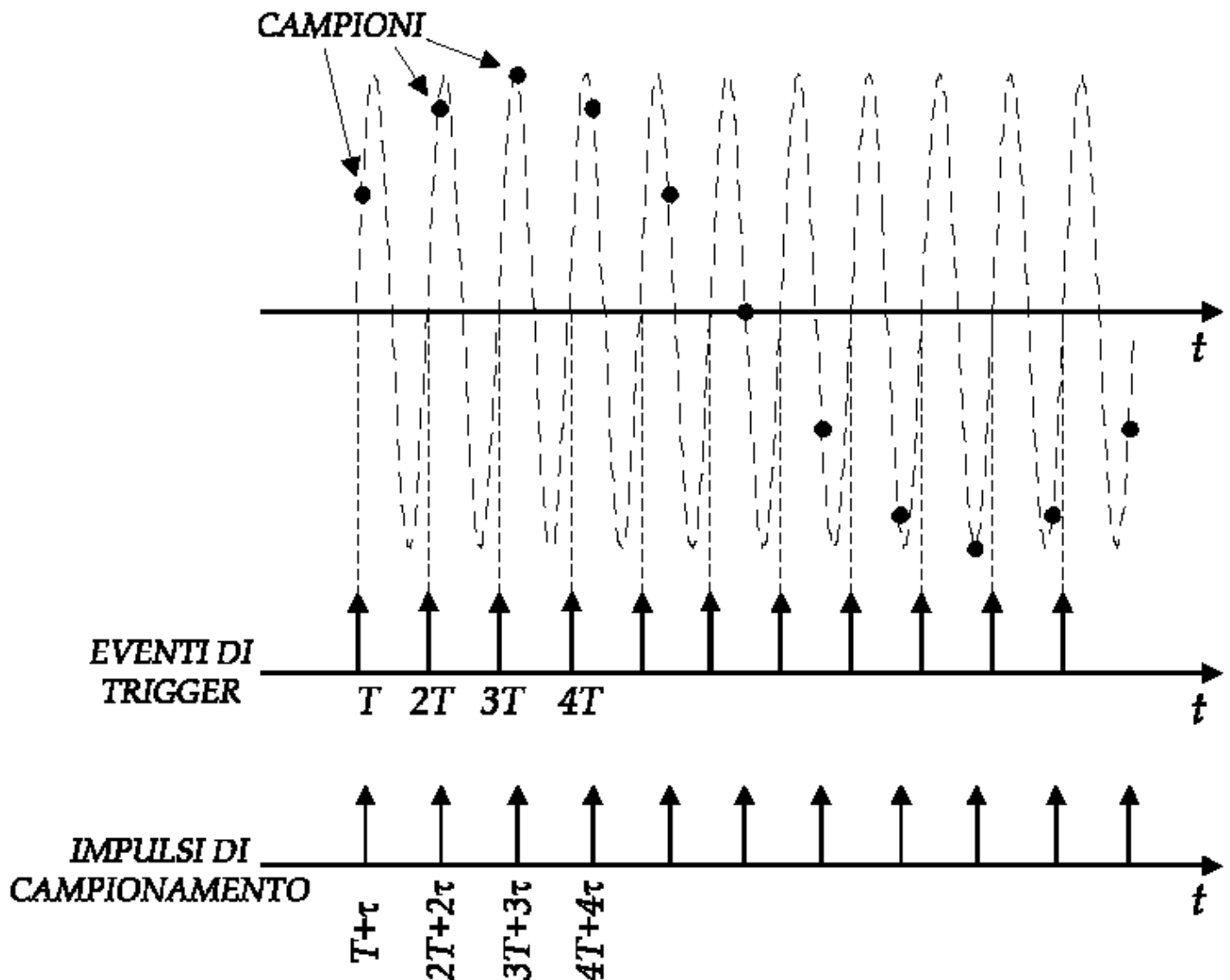
Nei DSO sono in generale disponibili diversi tipi di interpolatori. Il più semplice tra essi è l’interpolatore lineare, che consente di ridurre a circa 10 i punti per periodo di sinusoide che vengono considerati accettabili per identificare una sinusoide (Fig.9.4.11). Ovviamente, scendendo sotto questo valore, anche l’interpolatore lineare potrebbe condurre ad un’errata interpretazione del tipo di segnale visualizzato



Lo stato dell’arte negli algoritmi di interpolazione presenti nei DSO è senza dubbio rappresentato dall’interpolatore di tipo $\text{sinc}(x)/x$, basato sulla **teoria di Shannon**. Con questo tipo di interpolatore, il numero di punti per periodo necessari per ricostruire una sinusoide scende a 2.5 ⁽¹⁴⁾, e quindi la banda teorica ⁽¹⁵⁾ dello strumento risulta pari a 4/10 della massima frequenza di campionamento del convertitore analogico-digitale.

CAMPIONAMENTO SEQUENZIALE IN TEMPO EQUIVALENTE

Si prendono i diversi campioni all'interno di periodi differenti (con una distanza temporale successivamente incrementata). 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

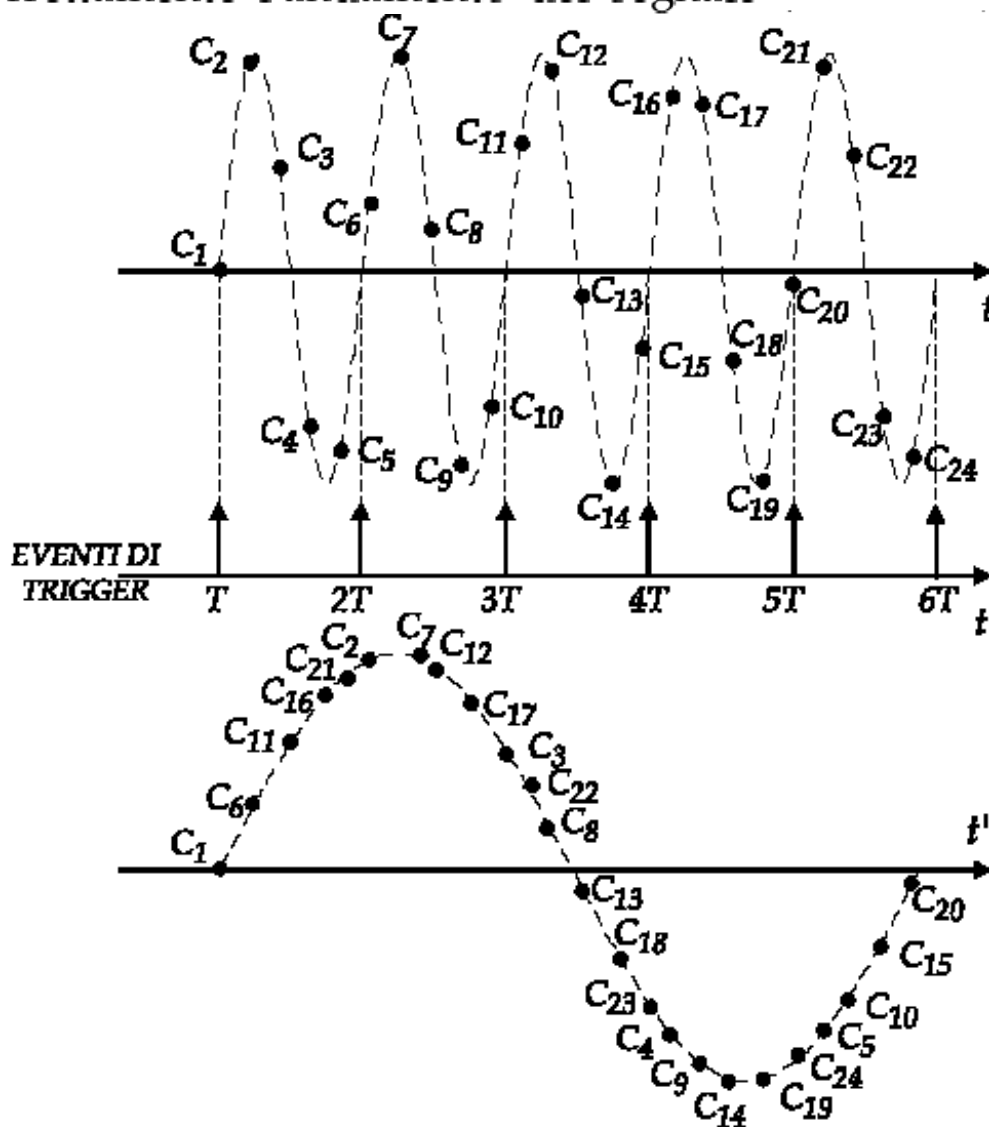


Infatti, per la ripetitività, di periodo T , del segnale $s(t)$, i campioni prelevati agli istanti di tempo τ e $\tau + kT$ (con k intero) risultano uguali: ciò significa che, anziché adottare la frequenza di campionamento $f_s = \frac{1}{\tau}$, si può convenientemente adottarne la frequenza $1+k(T/\tau)$ volte inferiore: $\hat{f}_s = \frac{1}{kT + \tau}$.

Allo stato dell'arte attuale, con questa modalità di campionamento si possono raggiungere risoluzioni temporali di 1 ps per campione e si possono visualizzare segnali con banda fino a 50 GHz.

CAMPIONAMENTO CASUALE IN TEMPO EQUIVALENTE

In questo caso, i campioni vengono prelevati dal segnale in modo casuale, sia prima sia dopo ogni evento di *trigger*. L'intervallo di tempo tra ciascun evento di *trigger* e il successivo campione deve essere misurato in modo da poter correttamente ordinare sul *display*, mediante una elaborazione dedicata, i campioni acquisiti, in modo da ricostruire correttamente 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 temporalmente da anteporre a quelli acquisiti in precedenti cicli di *trigger*

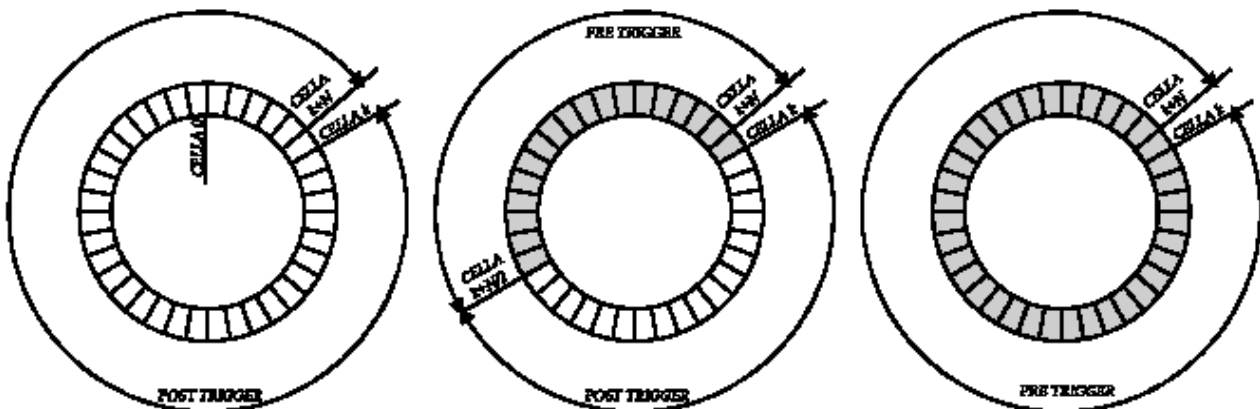
MODALITA' DI TRIGGER AVANZATE

mentre nell'oscilloscopio analogico la sincronizzazione avviene attraverso l'individuazione di un livello (e di una pendenza) particolare del segnale dal quale prende origine la rappresentazione della traccia, nel caso dell'oscilloscopio digitale le condizioni di sincronizzazione sono in generale molto più varie e complesse.

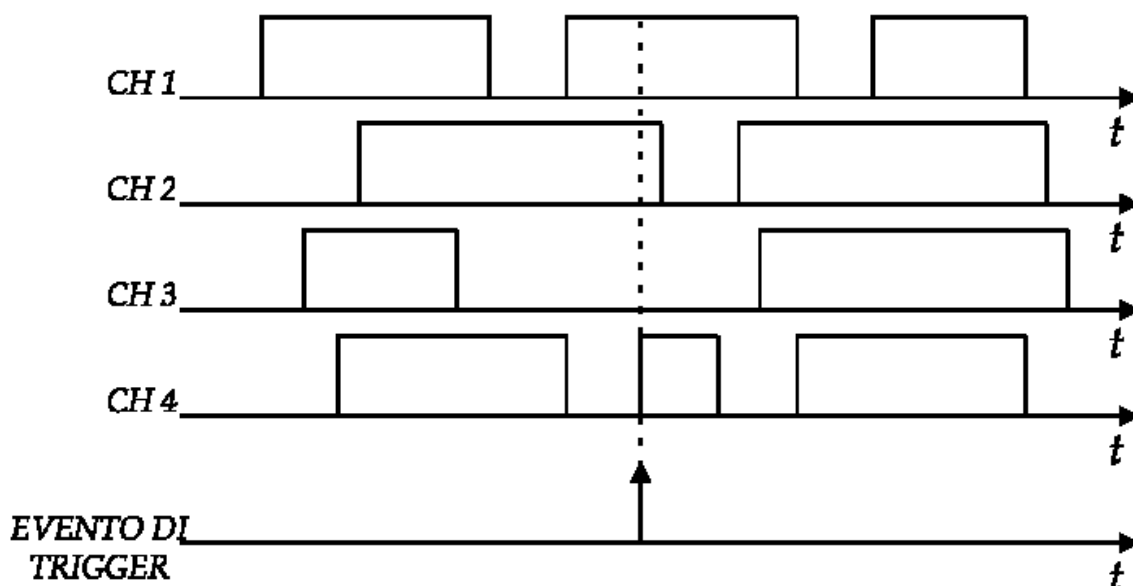
PRE-TRIGGER E MEMORIA CIRCOLARE

Nei DSO è presente la funzionalità di *pre-trigger*, che consente di visualizzare sullo schermo l'andamento del segnale non solo dopo il verificarsi dell'evento di *trigger*, ma anche prima di esso.

Si può schematizzare il processo di *pre-triggering* attraverso la rappresentazione della memoria dati mediante un *buffer* circolare, avente una capacità di M celle di memoria. Durante il processo di campionamento e conversione, queste M celle ⁽²⁰⁾ vengono riempite in modo contiguo. Al verificarsi dell'evento di *trigger*, l'unità elaborativa del DSO "contrassegna" il campione acquisito in quell'istante: in questo modo è possibile individuare i campioni che precedono l'evento di *trigger* da quelli che lo seguono.



TRIGGER BOOLEANO E FUNZIONALITA' DI "LOGICA"



RISOLUZIONE VERTICALE

Per un convertitore a 8 bit, i possibili livelli teorici di rappresentazione dell'informazione sono 256, a cui corrisponde una risoluzione teorica relativa di 0.39% del fondo scala.

Per un assegnato valore del coefficiente di deflessione verticale, il campo dei possibili valori di ampiezza ammessi viene a coincidere, nella rappresentazione sullo schermo, con quello compreso tra le due linee orizzontali estreme del reticolo. Per esempio, supponendo di avere impostato un coefficiente di deflessione verticale di 10 mV/div e che vi siano complessivamente 8 divisioni, la massima escursione picco-picco del segnale visualizzabile è 80 mV, a cui corrisponde una risoluzione di circa 0.3 mV (considerando 256 livelli di quantizzazione).

E' evidente che questa risoluzione ha maggiore o minore 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 analogico-digitale (eccitando quindi quasi tutti i livelli del quantizzatore), oppure presenti un'ampiezza molto inferiore a quella del fondo scala.

Nel DSO la possibilità di impostare variazioni fini, ma in condizione di taratura, sia del coefficiente di deflessione verticale, sia dell'*offset* introdotto dal comando di *vertical position* consente però di meglio operare, rispetto all'oscilloscopio analogico, nella direzione di ottenere un minore effetto della quantizzazione ⁽³¹⁾.

³¹ Ad esempio, si supponga di voler misurare l'ampiezza di picco positivo e negativo di un segnale sinusoidale di ampiezza di picco pari a 0.3 V a cui è sovrapposta una tensione costante di 0.2 V. Si supponga anche che la frequenza del segnale sia di 25 Hz. Per questo tipo di misura, utilizzando un oscilloscopio analogico, dotato di un reticolo del *display* formato da 8 divisioni verticali, la migliore rappresentazione, in condizioni di taratura dello strumento, si ottiene selezionando il coefficiente di deflessione verticale pari a 0.2 V/div, a cui corrisponde una estensione della traccia del segnale pari a 2.5 divisioni per il picco positivo e 0.5 divisioni per quello negativo. Scegliendo il coefficiente di deflessione immediatamente minore, che è quello pari a 0.1 V/div, si avrebbe una rappresentazione della traccia che, nella direzione dei valori positivi, uscirebbe in parte dal campo utile dello schermo. Mediante un DSO è invece possibile, a pari numero di divisioni del reticolo, impostare un valore di offset negativo pari a 0.2 V e un coefficiente di deflessione verticale intermedio tra 0.1 e 0.2 V/div, il cui valore è però noto e mantiene in taratura lo strumento, per poter espandere la rappresentazione del segnale su tutte le 8 divisioni verticali.

In particolare, vi sono condizioni di lavoro del DSO in cui il numero di *bit* effettivi può essere superiore a quello dei *bit* reali. E' questo il caso delle modalità di acquisizioni indicate con il termine di **media** (*average*) e **alta risoluzione** (*high resolution* o *box car averaging*).

RISOLUZIONE ORIZZONTALE

La principale limitazione della risoluzione temporale negli oscilloscopi digitali è legata alla frequenza di campionamento. Nella modalità *single shot* la miglior risoluzione temporale del DSO coincide con il minimo periodo di campionamento del convertitore analogico-digitale. Poiché il valore del periodo di campionamento dipende dalla scelta del coefficiente di tempo scelto per la taratura dell'asse orizzontale, la risoluzione temporale può variare in funzione della configurazione dello strumento.

Nella modalità di campionamento sequenziale in tempo equivalente, la risoluzione temporale è limitata dalla precisione con cui è possibile controllare la generazione del ritardo τ (paragrafo 9.4.7.2) con cui si comanda il campionamento del segnale a partire dall'evento di *trigger*. Nella modalità di campionamento casuale in tempo equivalente la risoluzione è invece legata all'accuratezza con cui lo strumento effettua la misura dell'intervallo di tempo compreso tra l'istante di campionamento e quello dell'evento di *trigger* (paragrafo 9.4.7.3).

Poiché per queste misure l'oscilloscopio utilizza un contatore elettronico dotato di interpolatore fine (Cap. 8), la risoluzione orizzontale è superiore a quella strettamente legata alla frequenza di campionamento. Attualmente negli oscilloscopi si dispone di interpolatori con un potere risolutivo otto volte superiore a quello legato al periodo di campionamento.

Per quanto riguarda l'accuratezza della taratura della base dei tempi, vi è da osservare che essa risulta notevolmente più elevata di quella degli oscilloscopi analogici. Ciò è legato al fatto che il generatore della base dei tempi è costituito fondamentalmente, in questo caso, da un oscillatore quarzato e da un divisore programmabile, che vanno ad operare sulla frequenza di campionamento del convertitore analogico-numerico. Ne segue che l'accuratezza della taratura dell'asse temporale viene a dipendere fortemente dall'accuratezza e dalla stabilità dell'oscillatore al quarzo impiegato: sono ottenibili valori di incertezza relativa sulle misure di intervallo di tempo ottenibili mediante DSO ampiamente inferiori a una parte su 10^4 .

INTERFACCE I/O E ALTRE FUNZIONALITÀ DIGITALI

Tutti i DSO sono dotati di dispositivi di interfaccia con il calcolatore elettronico: in questo modo possono essere controllati a distanza e/o inseriti in un sistema automatico di misura, in unione ad altri strumenti dotati di interfaccia con il calcolatore.

Non solamente i risultati di misura possono essere salvati, ma anche le configurazioni dei comandi adottate (*set-up*). Ciò risulta particolarmente utile quando si debbano ripetere cicli di misure differenti, con diverse configurazione dei parametri dell'oscilloscopio: in questo caso è sufficiente richiamare per ogni misura la configurazione corretta, attraverso l'attivazione di un solo comando.

Un'altra funzione particolarmente utile è quella solitamente indicata con il termine *autoset*, che abilita, attraverso l'attivazione del corrispondente comando, la ricerca, da parte dello strumento, della migliore configurazione dei parametri di misura (sensibilità verticale, coefficiente di tempo della base dei tempi, ecc.) e la successiva predisposizione, in modo da agevolare l'operatore.

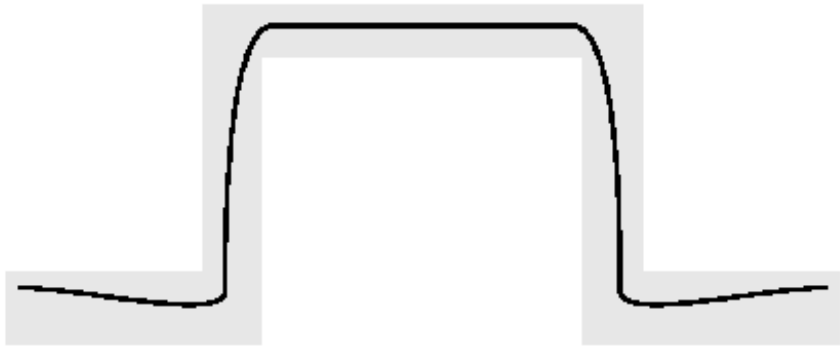
agevola la misura, attraverso la presenza di **cursori** (*markers*) ⁽³⁶⁾ di ampiezza e tempo, comandabili dall'operatore e dalla possibilità di leggere direttamente sul display la misura della differenza di tensione o la misura di intervallo di tempo.

³⁶ Con principio di funzionamento ben diverso ovviamente da quello dei *markers* negli oscilloscopi analogici.

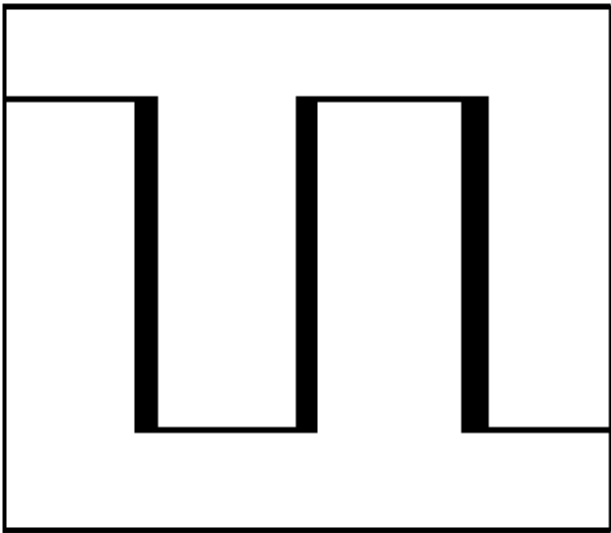
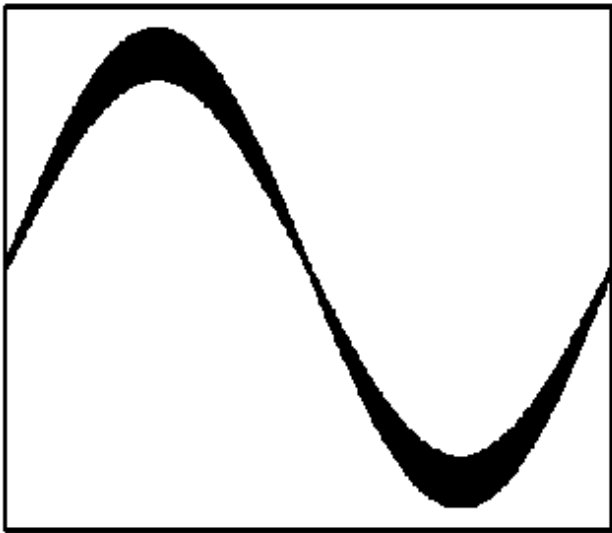
Dotazione comune a quasi tutti i DSO è rappresentata da un insieme di misure standard sui segnali, quali quelle di ampiezza (in valore medio, efficace, di picco, di picco-picco, ecc) e in tempo (frequenza, periodo, intervallo di tempo, tempo di salita, *duty-cycle*, ecc).

Analisi semplici o più complesse (spettro FFT, misura di THD, *time-jitter*, analisi statistica del segnale, *etc.*) dei dati di misura, ma in ogni caso "automatizzate".

CONTROLLO DI CONFORMITA' CON MASCHERA PRESTABILITA



PERSISTENZA INFINITA



VANTAGGI DEGLI OSCILLOSCOPI DIGITALI

- In generale, una maggiore banda passante.
- La capacità di memorizzare più segnali per lunghi intervalli di tempo.
- La capacità di visualizzare in modo stabile anche segnali a bassa ed a bassissima frequenza: la memoria digitale consente infatti di mantenere stabile l'immagine sullo schermo, per un tempo indefinito, senza problemi di "sfarfallamento".
- La capacità di catturare e memorizzare eventi di tipo *single-shot*.
- La disponibilità di modalità di *trigger* anche molto complesse, che rendono l'oscilloscopio digitale particolarmente adatto per le misure nell'ambito dei sistemi digitali, per la ricerca e l'analisi di guasti e malfunzionamenti casuali delle apparecchiature, ecc.
- La capacità di visualizzare l'andamento nel tempo dei segnali anche in intervalli di tempo che precedono l'evento di *trigger*.
- La capacità di effettuare, in forma diretta ed automatica, misure sul segnale nel dominio del tempo, quali misure di ampiezza, frequenza, sfasamento, *etc.*
- La possibilità di documentare facilmente la misura, trasferendo i dati dall'oscilloscopio ad una stampante o ad un plotter.
- La possibilità di interfacciare l'oscilloscopio digitale ad un calcolatore esterno, in modo da inserirlo in ambienti di misura o di test automatizzati.
- La capacità di effettuare test di autocalibrazione ed autodiagnosi.