

Oscilloscopio digitale

1 - Schema a blocchi e specifiche

L'oscilloscopio digitale (*Digitizing Oscilloscope*) è uno strumento, assai diffuso e versatile, che converte in forma numerica i segnali analogici applicati ai suoi ingressi, caricandoli quindi nella memoria del sistema, da cui vengono prelevati per le successive elaborazioni e per la visualizzazione su un monitor. Per tale motivo si parla anche di oscilloscopio digitale a memoria (*Digital Storage Oscilloscope, DSO*).

La memoria in effetti costituisce un elemento fondamentale dello strumento e consente l'implementazione di funzionalità non presenti nell'oscilloscopio analogico. Per esempio, la possibilità di memorizzare le forme d'onda è particolarmente utile quando si debbano visualizzare fenomeni molto lenti oppure eventi singoli (dove di norma sono carenti gli oscilloscopi analogici).

Inoltre, poiché i dati sono memorizzati, la loro visualizzazione e l'eventuale analisi possono avvenire in un tempo successivo. Pertanto in tale oscilloscopio i requisiti di banda per il sistema di visualizzazione sono molto meno stringenti di quanto avviene per l'oscilloscopio analogico. Vengono quindi impiegati tipicamente display con risoluzione VGA, spesso di tipo LCD, sui quali è possibile rappresentare non solo le forme d'onda dei segnali acquisiti, ma anche caratteri alfanumerici relativi ai parametri di impostazione delle acquisizioni (scala dell'asse dei tempi, scala dell'asse dei valori, livello di trigger, ecc.) e/o ai risultati delle misure. Il passaggio al mondo digitale consente infatti di effettuare in modo automatico diverse operazioni di misura (periodo, frequenza, valore medio, valore efficace, valore massimo, ecc.) e in molti casi di svolgere elaborazioni più complesse, come l'analisi in frequenza con la Trasformata Rapida di Fourier (FFT).

Il funzionamento dell'oscilloscopio digitale a memoria può essere ricondotto a quello di un sistema di acquisizione dati veloce. Il suo schema a blocchi è riportato in Fig.1.1, con riferimento a uno strumento a due canali (le realizzazioni commerciali hanno tipicamente due o quattro canali). Il segnale analogico, opportunamente condizionato da uno stadio di ingresso che ne realizza, per esempio, l'amplificazione o l'attenuazione, viene inviato al sistema di acquisizione, composto dal campionario *S&H* e dal convertitore *AD*.

Il processo di campionamento è gestito dalla base dei tempi, mentre la sezione di trigger consente di ottenere la sincronizzazione necessaria per una corretta visualizzazione del segnale acquisito. Il segnale digitalizzato viene memorizzato in una memoria *RAM*, dalla quale viene poi prelevato appunto per la successiva visualizzazione, oltre che per eventuali elaborazioni numeriche.

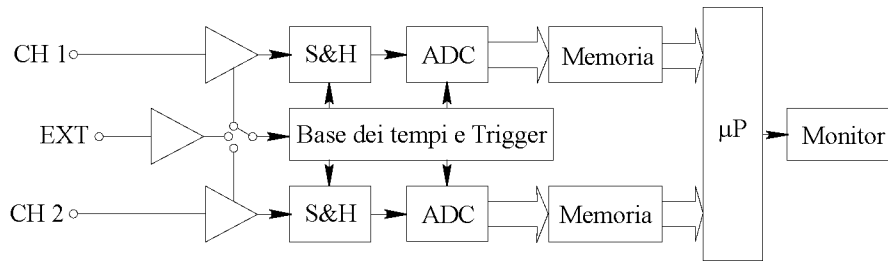


Fig.1.1 - Schema a blocchi dell'oscilloscopio digitale a due canali.

Velocità di campionamento e banda passante

La massima frequenza del segnale che può essere applicato all'oscilloscopio costituisce uno degli aspetti operativi più importanti nell'uso di questo strumento e dipende da due fattori fra loro indipendenti.

Il primo limite è stabilito dal rispetto del teorema del campionamento, con riferimento al quale la massima frequenza del segnale applicabile all'oscilloscopio digitale non deve essere superiore a un limite teorico pari a metà della velocità di campionamento (si veda in proposito il capitolo dedicato all'analisi in frequenza dei segnali campionati). Nella pratica si considera accettabile un range di frequenze ancora più ridotto. Per esempio si richiede che la velocità di campionamento sia da 2,5 a 4 volte la frequenza massima del segnale in ingresso. L'oscilloscopio digitale, come quello analogico, privilegia le specifiche di velocità rispetto all'accuratezza. Pertanto si impiegano prevalentemente convertitori *flash* a 8-9 bit, con velocità di campionamento che possono andare da poche centinaia di megasample al secondo (MSa/s) fino ad alcune decine di gigasample al secondo (GSa/s).

Il secondo limite è imposto dalla banda passante analogica dei circuiti d'ingresso, comprese le sonde, e dunque dalla funzione di trasferimento complessiva degli stadi analogici in ingresso. Questo valore normalmente è compreso tra le decine di megahertz e i gigahertz.

Si può osservare come la differente natura dei due fenomeni sopra richiamati venga evidenziata anche dal fatto che i limiti di banda ad essi relativi, sebbene siano uguali dal punto di vista dimensionale (in entrambi i casi si tratta dell'inverso di un intervallo di tempo), vengono normalmente espressi con unità di misura diverse: campioni al secondo per il primo e hertz per il secondo.

In definitiva, la banda passante effettivamente utilizzabile è la più piccola tra quella imposta dal teorema del campionamento e quella derivante dal comportamento dei circuiti analogici. Entrambe queste caratteristiche dovranno quindi essere valutate per stabilire se un dato oscilloscopio è adatto per una determinata applicazione.

Memoria

La dimensione della memoria è un'altra caratteristica molto importante per valutare la qualità di uno strumento. Infatti una memoria estesa consente di visualizzare una porzione di segnale più lunga, a parità di frequenza di campionamento. In alternativa, a parità di tempo di osservazione, una memoria più estesa consente di usare una maggiore frequenza di campionamento. A titolo di esempio, se un oscilloscopio digitale presenta una massima frequenza di campionamento pari a $f_c = 1$ GSa/s e una memoria capace di contenere $N = 10000$ punti, la massima velocità del convertitore può essere sfruttata solo per intervalli di osservazione non superiori a $N/f_c = 10^4/10^9 = 10^{-5}$ s, cioè 10 μ s, mentre per acquisire intervalli di durata maggiore si dovrà ridurre la frequenza di campionamento.

Tipicamente la dimensione della memoria varia da poche migliaia di punti ad alcune centinaia di milioni di punti.

La memoria è di tipo *FIFO* (First In First Out) ed è costantemente mantenuta piena, eliminando ad ogni nuovo campionamento il dato più vecchio per far posto all'ultimo. Per questo la memoria è detta anche *buffer* circolare.

Trigger

La rappresentazione della forma d'onda sullo schermo dipende invece dal verificarsi della condizione di trigger. Il significato del trigger è in fondo simile a quello dell'oscilloscopio analogico, ma il funzionamento è assai differente. Infatti, mentre nello strumento analogico l'evento di trigger attiva lo *sweep* del fascio elettronico, in quello digitale esso stabilisce quando il sistema di elaborazione deve prelevare il contenuto della memoria per la sua visualizzazione e quindi assume il significato di punto al quale ancorare la rappresentazione visiva del segnale sul monitor.

In sostanza, per una data successione di campioni memorizzati, si tratta di ricercare e marcare il campione che corrisponde a un evento di trigger. Questa caratteristica consente, prelevando le opportune porzioni di dati dalla memoria, di avere informazioni sul segnale non solo con riferimento a ciò che accade dopo il verificarsi dell'evento di trigger, ma anche per gli istanti che lo precedono (*pretrigger*). In pratica si possono verificare tre situazioni:

- se al verificarsi dell'evento di trigger il contenuto della memoria viene immediatamente visualizzato sullo schermo, la forma d'onda rappresentata sarà costituita dagli *N* campioni acquisiti prima dell'evento di trigger stesso;
- se al verificarsi dell'evento di trigger l'acquisizione continua per un certo numero di campioni prima che il contenuto della memoria venga prelevato dal sistema di elaborazione, sullo schermo si rappresenterà un porzione di segnale acquisita prima del trigger e una successiva all'evento;
- se, dopo il verificarsi dell'evento di trigger, l'acquisizione continua fino a riempire nuovamente tutta la memoria prima che il contenuto di questa venga visualizzato, la porzione di segnale rappresentata sarà tutta successiva al trigger, così come accade negli oscilloscopi analogici.

Tipicamente la percentuale di *pretrigger* è impostabile dall'operatore e spesso il valore di default è pari al 50 %, in modo che l'istante in cui si verifica l'evento di trigger sia posizionato al centro dell'asse orizzontale.

Il vantaggio offerto da questa funzionalità è evidente quando interessa sapere cosa è accaduto immediatamente prima dell'evento di trigger. Un esempio può essere il caso in cui si voglia analizzare un fenomeno di guasto in un circuito e a tale evento è stato associato il segnale di trigger.

La sezione di trigger di un oscilloscopio digitale può inoltre essere ben più sofisticata di quella dell'oscilloscopio analogico. Infatti, oltre alla classica possibilità di far scattare il trigger quando il segnale da visualizzare passa attraverso uno specifico livello (*trigger level*) con una specificata pendenza (*trigger slope*), possono essere impostati modi di funzionamento diversi, legati, per esempio, alla durata di un certo evento o al verificarsi di più condizioni contemporaneamente.

Come nel caso analogico, il trigger può essere interno o esterno: nel primo caso l'evento di trigger è stabilito dal segnale stesso che si desidera visualizzare (CH1 o CH2), nel secondo caso è determinato appunto da un segnale esterno (EXT).

Visualizzazione

Come detto precedentemente, il sistema di visualizzazione di un oscilloscopio digitale è solitamente costituito da un display con risoluzione VGA (680x480 pixel), sul quale vengono generalmente rappresentati 500 punti per ogni forma d'onda. Tipicamente questi sono contigui e costituiscono una porzione del segnale acquisito, la cui durata complessiva dipende dalla dimensione della memoria. L'operatore può, attraverso un'apposita manopola, spostare questa "finestra" all'interno dell'intervallo di osservazione complessivo.

Quando il numero di campioni disponibili all'interno della finestra selezionata è superiore a 500, il sistema opera una decimazione dei campioni. Questa operazione può comportare una perdita di informazione, che tuttavia è limitata alla sola visualizzazione del segnale, dal momento che tutte le informazioni memorizzate nei campioni acquisiti non vengono alterate.

Quando, viceversa, il numero di campioni disponibili per rappresentare la porzione di forma d'onda desiderata è inferiore ai 500 punti visualizzabili, occorre ricostruire graficamente il segnale, raccordando opportunamente i campioni. Il modo più semplice di ricostruire il segnale è quello di raccordare i punti campionati con dei segmenti. Questo sistema può essere accettabile se i campioni visualizzati sullo schermo sono abbastanza fitti da evitare che venga percepito dall'utilizzatore l'effetto di una linea spezzata. Quando il numero di campioni visualizzato è basso, il semplice raccordo con segmenti rettilinei può determinare una riproduzione non soddisfacente del segnale. Per la ricostruzione del segnale può allora essere impiegata un'interpolazione dei campioni presenti sullo schermo per mezzo delle funzioni $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$. Tale tecnica di ricostruzione è ideale per segnali sinusoidali, ma può risultare inadeguata per segnali impulsivi, per i quali può essere preferibile la ricostruzione di tipo lineare precedentemente illustrata. Solitamente l'operatore ha la possibilità di scegliere il filtro di ricostruzione più opportuno.

2 – Modalità di campionamento

Campionamento in tempo reale

Il campionamento in tempo reale (*real time sampling*) è la forma più intuitiva ed è quella utilizzata nella quasi totalità degli oscilloscopi digitali. I campioni vengono acquisiti in forma sequenziale a intervalli di tempo uniformemente spaziatosi (Fig.2.1) e la visualizzazione è legata all'evento di trigger.

Questa tecnica consente di operare altrettanto bene sia con segnali ripetitivi che con segnali di durata finita o eventi singoli (*single-shot event*).

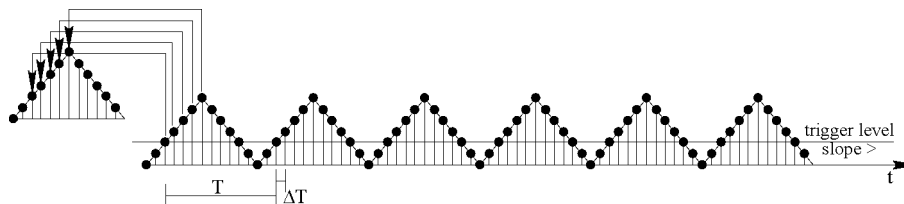


Fig.2.1 - Esempio di campionamento in tempo reale.

Se il segnale in ingresso è ripetitivo, l'evento di trigger attiverà l'inizio della rappresentazione visiva sempre nello stesso punto della forma d'onda e le successive acquisizioni, dopo ogni evento di trigger, consentiranno di aggiornare l'immagine sul monitor, determinando la riproduzione di una forma d'onda stabile.

Se si analizza l'evento singolo, viceversa, l'acquisizione verrà arrestata dopo il primo evento di trigger. I dati acquisiti, caricati in una memoria digitale, potranno essere visualizzati per tutto il tempo necessario, anche quando l'evento si è concluso.

Come detto, la banda passante effettivamente utilizzabile in queste condizioni operative è la più piccola tra quella imposta da teorema del campionamento (essendo $f_c = 1/\Delta T$ la frequenza di campionamento) e quella derivante dal comportamento dei circuiti analogici.

Campionamento in tempo equivalente

Oltre al campionamento in tempo reale, in alcuni casi si possono adottare modalità di campionamento in tempo equivalente (*equivalent time sampling*). Questa è una tecnica che può presentare dei vantaggi, ma introduce anche delle limitazioni. Infatti è applicabile solo a segnali strettamente ripetitivi e richiede una base dei tempi estremamente stabile.

In sostanza, la porzione di forma d'onda mostrata nel monitor non viene ricostruita prelevando i campioni in successione, nell'arco dell'intervallo visualizzato, bensì viene costruita analizzando più intervalli, sfruttando appunto la periodicità del segnale e la stabilità del trigger.

Esistono due modalità di campionamento in tempo equivalente: sequenziale e casuale.

Campionamento in tempo equivalente sequenziale

In Fig.2.2 è presentato un esempio di campionamento in tempo equivalente di tipo *sequenziale*. Al verificarsi del primo evento di trigger si preleva il primo campione. Al secondo evento di trigger si attende per un tempo esattamente controllato ΔT prima di prelevare il secondo campione.

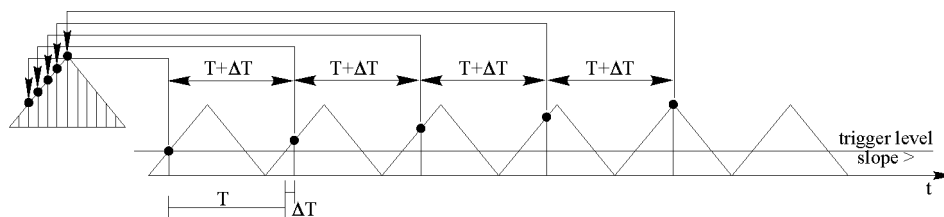


Fig.2.2 - Esempio di campionamento in tempo equivalente (sequenziale).

Tale intervallo ΔT è quello che competerebbe al campionamento in *real time*, ma che, essendo troppo breve, non può essere sostenuto continuamente dal sistema di campionamento e conversione AD.

Pertanto, al verificarsi di ogni evento di trigger il ritardo viene incrementato ($2\Delta T$, $3\Delta T$, ecc.) in modo che risulti correttamente campionata tutta la porzione di segnale che si desidera visualizzare. Naturalmente la ricostruzione avverrà con il contributo di campioni prelevati in molte porzioni successive del segnale.

In Fig.2.2 la distanza tra un evento di trigger e il successivo è stata assunta, per semplicità, pari al periodo T del segnale, ma nella realtà essa potrà essere costituita da un numero molto elevato di periodi.

In sostanza, se il segnale è ripetitivo, è possibile visualizzare la forma d'onda anche prelevando i campioni ad una velocità più bassa. Il vantaggio di tale metodo è che si possono impiegare convertitori AD e memorie caratterizzati da velocità operative molto più basse, o reciprocamente visualizzare segnali molto più veloci. Infatti la frequenza di campionamento equivalente risulta $f_{c,eq} = 1/\Delta T$, dove il valore minimo per ΔT non è imposto dalla velocità del

sistema di acquisizione (che è invece chiamato a lavorare con periodo di campionamento $T+\Delta T \gg \Delta T$, e quindi con una frequenza di campionamento $f_c = 1/(T+\Delta T) \ll f_{c,eq}$), bensì dalla stabilità della base dei tempi o da fenomeni di *jitter*.

Più spesso in queste condizioni di funzionamento sono i circuiti analogici di ingresso a imporre il limite di frequenza.

La ricostruzione della forma d'onda avviene prelevando i dati dalla memoria e disponendo i punti direttamente sullo schermo, se questi sono sufficientemente numerosi, altrimenti elaborando preliminarmente i dati con opportuni algoritmi.

Campionamento in tempo equivalente casuale

Nel caso del campionamento in tempo equivalente di tipo *casuale* il trigger non svolge direttamente il suo compito. I campioni sono presi a intervalli regolari, dettati normalmente dalla massima velocità di campionamento possibile, in modo non correlato con l'evento di trigger. Si otterranno così campioni precedenti e seguenti l'evento di trigger (Fig.2.3).

Tuttavia viene misurato il tempo che intercorre fra il generico campione e l'evento di trigger più vicino. Questo tempo viene associato al campione per la successiva visualizzazione del segnale sullo schermo.

In tal modo è possibile per il microprocessore del sistema ricostruire una sequenza ordinata di campioni, in funzione degli intervalli temporali che li separano dal trigger, e rappresentare sul monitor la forma d'onda corretta.

Con questo modo di procedere si ha il vantaggio di poter visualizzare anche le fasi di *pretrigger*, funzionalità non disponibile col campionamento equivalente di tipo sequenziale.

I limiti in frequenza dipendono anche in questo caso dalla stabilità del clock, dal *jitter* e dalla banda passante analogica.

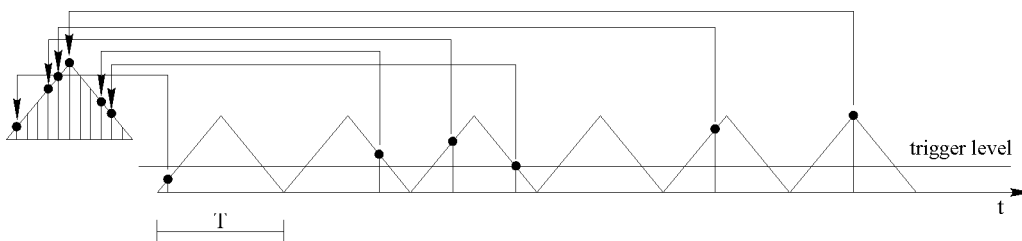


Fig.2.3 - Esempio di campionamento in tempo equivalente (casuale).