

Appunti di Misure Elettriche

Capitolo 6

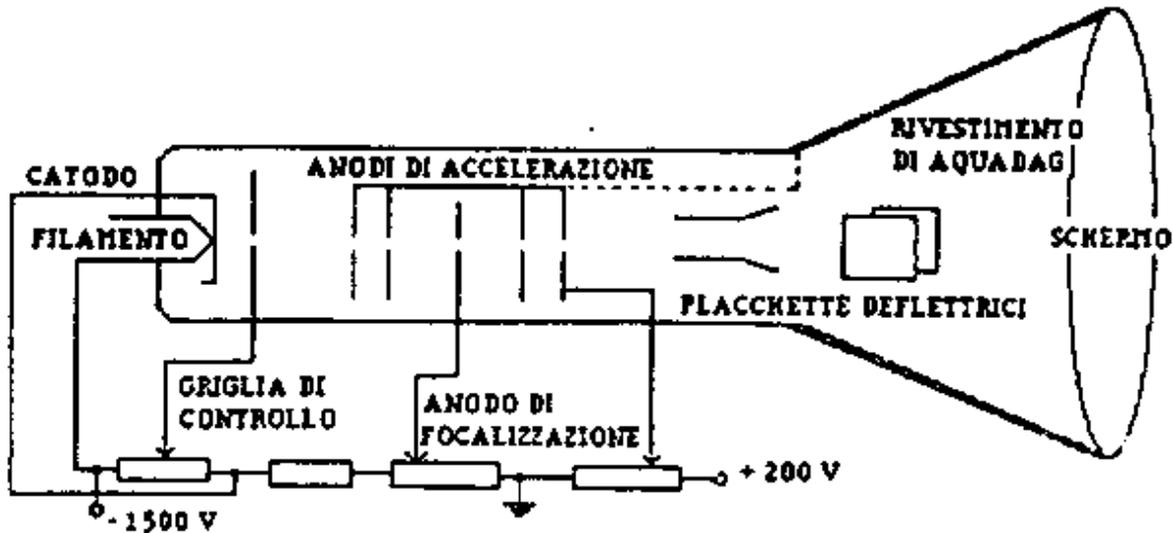
Oscilloscopio analogico (parte II)

Il tubo a raggi catodici	2
<i>Griglia di controllo</i>	3
Emissione termoelettronica	3
<i>Anodi di accelerazione e focalizzazione</i>	4
<i>Sistema di deflessione verticale ed orizzontale</i>	6
<i>Schermo</i>	6
Deflessione del fascio di elettroni	9
<i>Sensibilità di deflessione</i>	12
<i>Tensione variabile in ingresso</i>	14
<i>Deflessione elettrostatica e magnetica</i>	15
Sistema di deflessione verticale	16
<i>Selettore di ingresso (AC, DC, GND)</i>	16
<i>Attenuatore in ingresso</i>	16
<i>Sistema di amplificazione verticale</i>	17
<i>Linea di ritardo</i>	18
<i>Parametri del sistema di deflessione verticale</i>	18
Sistema di deflessione orizzontale	19
<i>Segnale a dente di sega</i>	20
<i>Generatore a dente di sega</i>	22
Funzioni aggiuntive del generatore della base tempi	24
Base dei tempi ritardata	25
Sistema di sincronizzazione	27
Sonde e sensori	32
<i>Divisore passivo di tensione</i>	33
<i>Sonde attive</i>	34
<i>Sonde a pinza</i>	34
Oscilloscopi a doppia traccia	34
<i>Visualizzazione alternata</i>	36
<i>Visualizzazione in modulazione</i>	37
<i>Operazioni sui canali</i>	38
<i>Oscilloscopi a doppio fascio</i>	38

IL TUBO A RAGGI CATODICI

Il CRT produce un **fascio di elettroni** accelerato ad alta velocità e focalizzato sullo **schermo fluorescente**, sul quale deve arrivare con energia cinetica sufficiente a consentire l'illuminazione di un piccolo punto.

La struttura interna molto semplificata e non in scala è la seguente:



I componenti principali sono:

- contenitore in vetro sotto vuoto;
- cannone elettronico;
- due coppie di placchette deflettrici;
- schermo fluorescente;
- sistema di partizione della tensione (compresa tra -1500 V e +200 V)

Il contenitore del tubo è **sotto vuoto** allo scopo di creare le minori resistenze possibili all'attraversamento del fascio di elettroni.

Il nome **cannone elettronico** viene attribuito al generatore del fascio di elettroni in virtù della analogia tra il moto del generico elettrone emesso dal catodo e la traiettoria di un proiettile sparato da un cannone.

I prossimi paragrafi sono dedicati allo studio dei singoli elementi evidenziati nello schema.

Griglia di controllo

Il **catodo** è di tipo *termoionico con riscaldamento indiretto* mediante un filamento attraverso da corrente elettrica.

Emissione termoelettronica

Nei metalli, gli elettroni si muovono in modo continuo e disordinato, migrando dalle orbite più esterne di un atomo a quelle di un altro. Gli elettroni che nel loro movimento lambiscono la superficie del metallo, già a temperatura ambiente, possono svincolarsi completamente dalla struttura atomica disperdendosi nell'aria circostante. L'atomo che ha perso un elettrone acquista una carica positiva (passa dalla condizione di atomo neutro allo stato di ione positivo) e quindi esercita sull'elettrone disperso una forza di attrazione. Un elettrone pertanto per poter abbandonare definitivamente il metallo deve possedere un'energia cinetica sufficiente a vincere questa forza di attrazione.

Nei **tubi a vuoto**, questa energia viene fornita agli elettroni riscaldando un particolare componente metallico, detto **catodo**, mediante il passaggio di un'opportuna corrente che può scorrere direttamente al suo interno (**riscaldamento diretto**) oppure in un filamento posto nelle vicinanze (**riscaldamento indiretto**).

I metalli principalmente utilizzati (tungsteno, tungsteno toriato, ossido di borio e ossido di stronzio) possono essere portati a temperature elevate senza pericolo di danneggiamento, fusione o sublimazione, in modo che forniscano un'emissione di elettroni proporzionale al quadrato della loro temperatura.

Poiché il movimento degli elettroni può essere modificato casualmente dalla presenza di molecole di gas, il catodo viene posto in un involucro sotto vuoto.

Il riscaldamento del catodo crea quindi un movimento di elettroni e la formazione di una carica spaziale negativa nelle vicinanze del catodo stesso, la quale a sua volta dà origine ad una forza che respinge gli elettroni emessi successivamente dal catodo. Si raggiunge così un equilibrio dinamico tra il movimento degli elettroni emessi e quello degli elettroni che ricadono sul catodo.

Se poniamo un elettrodo caricato positivamente, detto **anodo**, nelle vicinanze del catodo, gli elettroni emessi da quest'ultimo sono sottoposti ad una forza di attrazione esercitata dall'anodo: tutti gli elettroni che riescono ad acquistare un'energia sufficiente per staccarsi definitivamente dalla **zona catodica** cadono sull'anodo creando una **corrente anodica**.

Aumentando la tensione positiva dell'anodo, aumenta il flusso degli elettroni fino ad un valore massimo in cui tutti gli elettroni emessi vengono attirati dall'anodo e la carica spaziale risulta soppressa.

I tubi a vuoto sono classificati in base al numero di elettrodi che li compongono: due (diodo), tre (triodo), quattro (tetodo), cinque (pentodo).

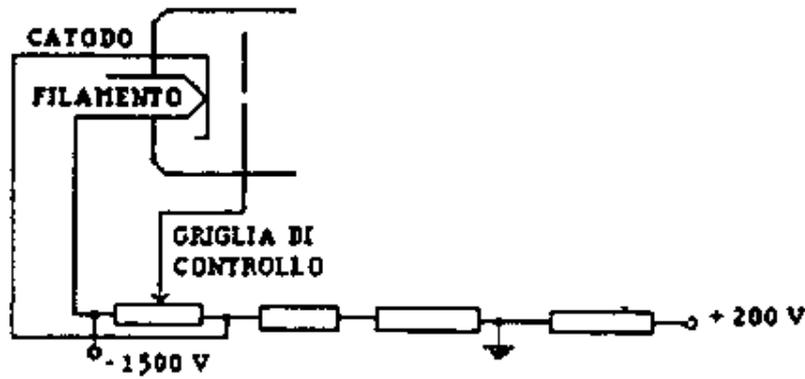
Illustriamo solo le caratteristiche del **triodo** che è stato il primo dispositivo elettronico che ha permesso di ottenere un'amplificazione dei segnali elettrici. Questo tubo a vuoto, come dice il suo stesso nome, dispone di tre elettrodi, denominati *catodo*, *anodo* e **griglia**.

Quest'ultima, il cui nome deriva dalla sua particolare conformazione (una rete di sottile filo conduttore), controlla il passaggio degli elettroni tra catodo e anodo grazie alla sua polarizzazione negativa, che, a seconda del valore che assume, determina il numero di elettroni che raggiungono l'anodo.

La caratteristica anodica del triodo è rappresentata da una famiglia di curve, ciascuna per ogni valore assunto dalla tensione di polarizzazione della griglia.

La funzione amplificatrice di un triodo consente di ottenere sull'anodo un segnale amplificato dalla tensione variabile applicata alla griglia.

Il catodo è ricoperto interamente da una **griglia di controllo**, dotata di un foro centrale attraverso il quale viene fatto passare il fascio di elettroni:

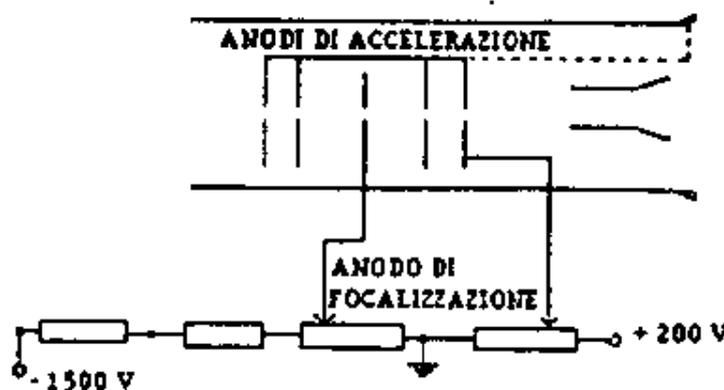


La funzione della griglia è duplice:

- in primo luogo, serve a regolare l'intensità del pennello elettronico: mentre il catodo si trova ad una tensione (negativa) superiore a 1500 V, la griglia si trova ad un potenziale (variabile) più basso; riducendo il potenziale negativo della griglia (cioè diminuendolo in valore assoluto), abbiamo una diminuzione della d.d.p. tra catodo e griglia, per cui aumentiamo il numero di elettroni che riescono a superare la griglia stessa e quindi aumentiamo l'intensità del pennello elettronico. Questa regolazione è effettuabile mediante la già citata manopola **INTENSITY** posta generalmente ai bordi (in basso o di lato) dello schermo;
- in secondo luogo, la griglia agisce anche come lente elettrostatica: infatti, gli elettroni che incidono su di essa con traiettorie diverse vengono da essa concentrati su un'unica traiettoria che termina in un punto dell'asse del tubo che prende il nome di **punto di incrocio** (crossover). Questo è il punto in cui si concentra il fascio che successivamente attraverserà il tubo; la sua posizione non è proprio fissa, ma varia leggermente al variare della tensione della griglia.

Anodi di accelerazione e focalizzazione

Subito dopo il punto di incrocio, c'è un sistema di anodi: ci sono diversi anodi di accelerazione e un unico anodo di focalizzazione.

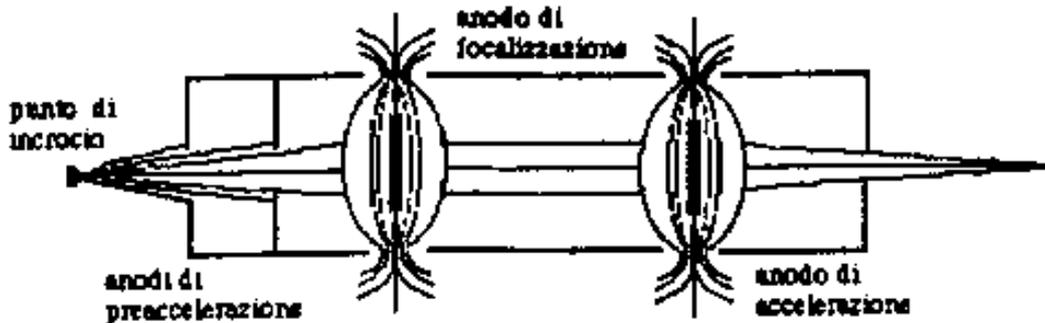


La funzione di questi anodi è duplice:

- in primo luogo, essi devono consentire la corretta focalizzazione del punto di incrocio e del punto di emissione luminosa sullo schermo;

- in secondo luogo, devono conferire al fascio una energia luminosa sufficiente alla visualizzazione nitida della traccia sullo schermo.

Generalmente, la struttura è costituita da 3 elementi: anodo di pre-accelerazione, anodo di focalizzazione e anodo di accelerazione. La figura seguente chiarisce il concetto:



In pratica, si vengono a creare due **lenti elettrostatiche**, la prima fornisce la **collimazione** del fascio (gli elettroni vi arrivano con traiettorie diverse e, per rifrazione, vi escono con traiettorie tutte parallele tra loro e con l'asse del tubo), mentre l'altra garantisce la **focalizzazione** (comportamento duale del precedente, in quanto le traiettorie entrano parallele e, sempre per rifrazione, escono convergenti in un unico punto, situato sullo schermo).

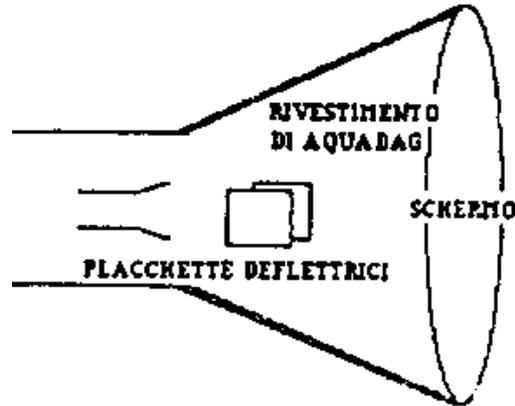
I tre anodi sono cilindrici e coassiali con l'asse del CRT. L'**anodo di pre-accelerazione** contiene diversi schermi a diaframma, necessari per la collimazione del fascio, che penetra da un piccolo foro sulla sinistra del cilindro. Inoltre, tale anodo si trova ad un potenziale (positivo) uguale a quello dell'**anodo di post-accelerazione**. L'anodo di focalizzazione è invece a potenziale più basso. Questa differenza di potenziale dà luogo a campi elettrici non uniformi tra gli elettrodi, come mostrato nell'ultima figura, dove sono evidenziate le linee equipotenziali curvate in modo da formare un sistema di doppie lenti concave.

La **lunghezza focale** del sistema di lenti può essere variata agendo sulla manopola **FOCUS**, che regola la tensione dell'anodo di focalizzazione: quanto più la tensione dell'anodo focalizzatore è negativa rispetto a quella degli anodi di accelerazione, tanto minore è la lunghezza focale.

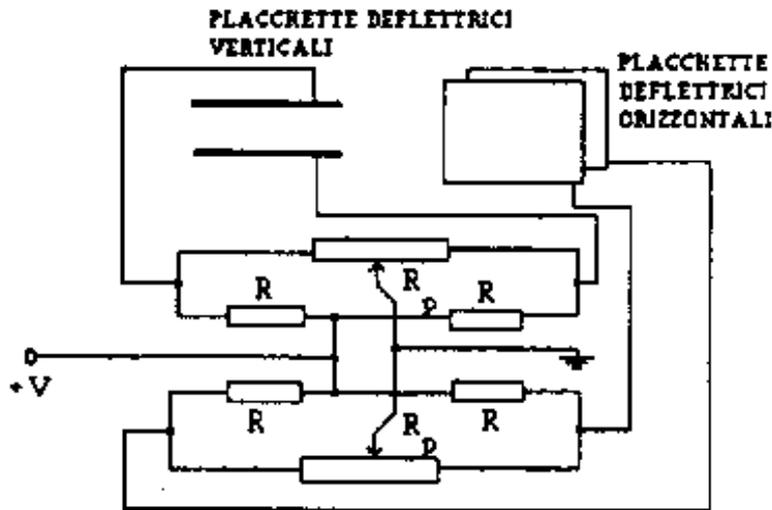
C'è però un problema legato al fatto che, per questioni di facilità realizzativa, lo schermo è piatto anziché sferico. Questo comporta che, focalizzando il fascio elettronico al centro, non avremo focalizzazione ai bordi e viceversa. Questo fenomeno prende il nome di **astigmatismo**. Vi si pone rimedio modificando la lunghezza focale in modo che la focalizzazione sia peggiore rispetto a prima, ma praticamente uniforme sullo schermo. In altre parole, anziché avere un *puntino* ben delineato al centro e un *cerchietto* ai bordi, si accetta di avere un *cerchietto* in tutte le posizioni, ma di dimensioni ridotte. In tal modo, si perde in termini di risoluzione, ma si guadagna in termini di uniformità di visualizzazione.

Sistema di deflessione verticale ed orizzontale

Procedendo verso destra nel tubo, al di là degli anodi troviamo le placchette deflettrici, prima quelle verticali e poi quelle orizzontali:



Quando non è applicato alcun segnale in ingresso, è possibile indirizzare il fascio luminoso verso qualsiasi punto dello schermo, utilizzando due apposite manopole del pannello, denominate **y-position** ed **x-position**. Queste due manopole agiscono, in pratica, sui cursori di due potenziometri inseriti in un ponte di resistenze, che è fatto nel modo seguente:



Con i cursori in posizione centrale, i due ponti sono equilibrati, per cui non è presente alcun campo elettrico tra le due coppie di placchette: il fascio elettronico le attraversa senza subire deflessioni, per cui incide al centro dello schermo.

Se invece si variano le posizioni dei cursori, i due ponti si sbilanciano, per cui insorgono tra le placchette delle d.d.p. cui corrispondono dei campi elettrici di opportuna intensità; la presenza di tali campi deflette il fascio elettronico, per cui, operando su entrambi i cursori, è possibile spostare il puntino luminoso in qualsiasi posizione.

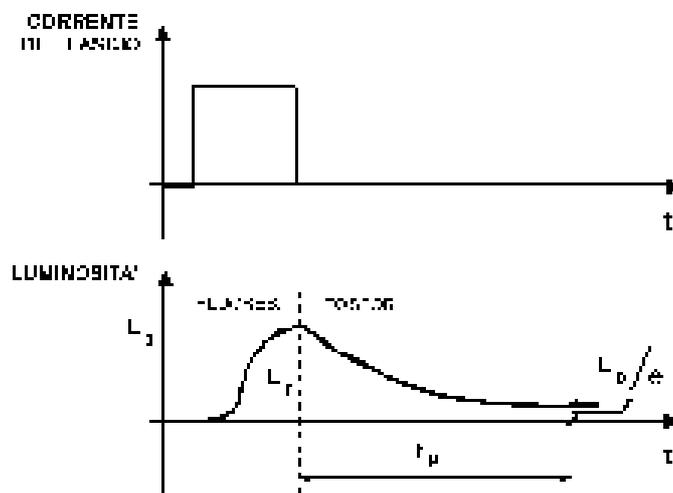
Schermo

Infine, dopo le placchette si incontra lo **schermo fluorescente**, sul quale sono depositate delle sostanze, dette **fosfori**, che assorbono l'energia cinetica degli elettroni incidenti e la convertono in

energia luminosa (cioè in energia nello spettro di frequenza del campo del *visibile*). La conversione avviene mediante due distinti fenomeni:

- la **fluorescenza**, ossia l'emissione di energia luminosa in corrispondenza del passaggio dell'atomo da un livello energetico più basso ad uno più alto, a seguito dell'incidenza del fascio elettronico;
- la **fosforescenza**, ossia l'emissione di energia luminosa anche quando l'atomo eccitato ritorna nel livello energetico iniziale. Quest'ultimo fenomeno ha una durata che prende il nome di **persistenza del fosforo**; una volta cessata l'eccitazione da parte del fascio di elettroni incidenti, la *persistenza* è definita come il tempo necessario affinché l'intensità dell'emissione luminosa scenda al 10% di quella iniziale.

Nella figura seguente sono riportati gli andamenti temporali del fascio incidente (di tipo impulsivo) e della corrispondente luminosità del fosforo che subisce tale incidenza:



Si nota che la massima emissione luminosa viene raggiunta proprio poco prima che cessi l'incidenza del fascio elettronico, dopodiché l'emissione decade progressivamente.

Esistono diversi materiali usati come fosfori, che vengono classificati in base alla persistenza ed al colore della fosforescenza e della fluorescenza. Questi materiali sono caratterizzati tramite la lettera P seguita da un numero, come indicato dalla seguente tabella:

Fosforo	Colore Fluoresc.	Colore Fosforesc.	Velocità di scrittura relativa (%)	Decadimento della lumin. al 0,1% (ms)	Osservazioni
P2	verde bluastrò	verde giallastro	40	120	
P7	blu	verde giallastro	75	1500	a doppio strato
P11	blu rossastro	blu rossastro	100	20	applicazioni fotografiche
P31	verde giallastro	verde giallastro	50	32	applicazioni generali

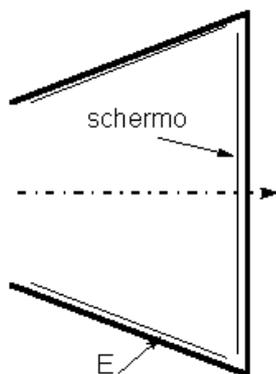
Nella maggior parte degli oscilloscopi, si usano **fosfori a media persistenza**, compresa da 100 μsec e 10ms.

Sottolineiamo che il rendimento di un fosforo, inteso come rapporto tra l'energia luminosa emessa e quella incidente, è molto basso, dell'ordine del 10%. Il motivo è che la maggior parte dell'energia viene trasformata in calore. Si pone allora un problema di smaltimento di tale calore, per evitare il surriscaldamento del fosforo: tale surriscaldamento, infatti, potrebbe comportare delle alterazioni permanenti dei fosfori, come degli annerimenti (detti volgarmente **bruciature**), specialmente quando il fascio bombarda per molto tempo lo stesso punto dello schermo. Lo smaltimento del calore viene effettuato predisponendo un sottilissimo **strato di alluminio** (di spessore anche inferiore ad $1\mu\text{m}$) prima dei fosfori: se la tensione di accelerazione degli elettroni è sufficientemente alta, lo strato non modifica apprezzabilmente l'incidenza del fascio sui fosfori, ma riflette verso l'esterno quella parte di luce che altrimenti si perderebbe verso l'interno del tubo. Questo garantisce la dissipazione del calore ed anche un miglioramento del rendimento dei fosfori.

Un altro parametro importante per un CRT è la cosiddetta **luminanza**, intesa come l'intensità di luce emessa dallo schermo: essa dipende, oltre che ovviamente dalle caratteristiche dei fosfori, anche dall'intensità del fascio, dall'energia con la quale gli elettroni incidono sullo schermo e dal tempo di permanenza del fascio su una data area del fosforo.

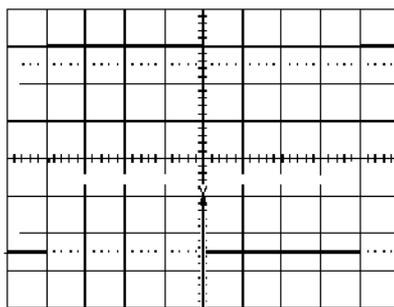
Invece, un altro problema da considerare è quello della cosiddetta **emissione secondaria**: in pratica, un certo numero di elettroni abbandona il fosforo e si accumula in vicinanza dello schermo, determinando un eccesso di carica negativa; allora, quando gli elettroni del fascio si avvicinano allo schermo, tendono ad essere respinti dal sudetto eccesso di carica negativa, determinando un peggioramento delle prestazioni (essenzialmente della luminanza).

Per evitare che lo schermo si carichi negativamente, si predispose un rivestimento di miscela conduttrice, dello spessore di $2\mu\text{m}$, detta **Aquadag**, sulle pareti del tubo in prossimità dello schermo:



Questo rivestimento si comporta come un elettrodo, in quanto attrae gli elettroni e, essendo collegato elettricamente all'anodo accelerante, chiude un circuito attraverso il quale gli elettroni stessi possono allontanarsi.

Per concludere, ricordiamo che sullo schermo è sovrapposto un **reticolo** con graduazione sugli assi sia orizzontale sia verticale:



Il reticolo, se posto sia all'interno sia all'esterno dello schermo, può dar luogo al noto **errore di parallasse**. Per questo motivo, negli oscilloscopi più recenti esso viene inciso all'interno del vetro su cui sono depositi i fosfori.

DEFLESSIONE DEL FASCIO DI ELETTRONI

Abbiamo detto prima che gli elettroni in uscita dalla griglia, prima di giungere alle placchette deflettrici verticali, sono soggetti ad un **campo elettrico di accelerazione**, diretto lungo l'asse del tubo (asse z), localizzato tra la griglia stessa e gli anodi di accelerazione. Per semplicità, supponiamo che:

- gli elettroni si muovano tutti lungo una sola direzione, ossia che il fascio sia estremamente sottile;
- le placchette deflettrici costituiscano le armature di un condensatore piano e parallele;
- gli elettroni entrino tra le placchette con velocità avente solo la componente longitudinale ($v=v_z$).

Indichiamo inoltre con V_a la cosiddetta **tensione anodica**, ossia la tensione presente tra anodo di accelerazione e griglia, e con l_c la lunghezza del cannone elettronico, misurata tra il catodo e la superficie estrema dell'anodo accelerante. Possiamo allora calcolare la forza agente sugli elettroni uscenti dal cannone:

$$F_e = q \cdot E = e \cdot E_z = e \cdot \frac{V_a}{l_c}$$

D'altra parte, ricordando che $F=ma$, abbiamo che

$$F_e = e \cdot \frac{V_a}{l_c} = m_e \cdot a_e \longrightarrow a_e = \frac{e}{m_e} \frac{V_a}{l_c}$$

dove ovviamente m_e , a_e ed e sono, rispettivamente, la massa, l'accelerazione e la carica dell'elettrone.

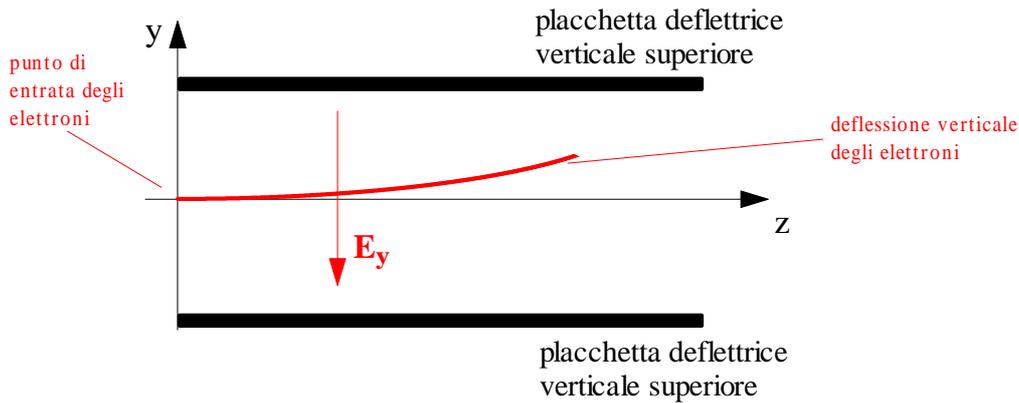
L'equazione ricavata ci dice subito che, per aumentare l'accelerazione del fascio, possiamo o aumentare la tensione anodica (il che significa disporre di un'altra tensione all'interno del CRT) oppure ridurre la lunghezza del cannone elettronico (ossia la lunghezza degli anodi di accelerazione e focalizzazione).

Se adesso vogliamo calcolare la velocità v_z con cui il generico elettrone arriva alle placchette verticali, ci basta applicare un bilancio energetico, tra l'energia cinetica accumulata durante l'accelerazione e l'energia elettrica in gioco (in eV):

$$\frac{1}{2} m_e v_z^2 = eV_a \longrightarrow v_z = \sqrt{\frac{2e}{m_e} V_a}$$

Anche in questo caso, come era ovvio che fosse, abbiamo una diretta proporzionalità con la tensione anodica.

Adesso consideriamo quello che accade tra le placchette deflettrici verticali:



Supponiamo che tra di esse sia applicata una tensione V_y continua e costante. A queste tensione corrisponde ovviamente un campo elettrico E_y , anch'esso continuo e costante, diretto lungo l'asse y trasversale all'asse del CRT. Essendo questo campo perpendicolare all'asse z, esso non varia la velocità delle particelle lungo l'asse z, per cui la componente z di tale velocità rimane invariata e possiamo scrivere che

$$v_z = \frac{z}{t} \longrightarrow t = \frac{z}{v_z} = \frac{z}{\sqrt{\frac{2e}{m_e} V_a}} = z \cdot \sqrt{\frac{m_e}{2eV_a}}$$

Al contrario, il campo E_y imprime agli elettroni una forza e quindi una accelerazione a_y diretta lungo l'asse y: con gli stessi discorsi di prima, scriviamo che

$$F_y = e \cdot E_y = e \cdot \frac{V_y}{d} = m_e \cdot a_y \longrightarrow a_y = \frac{e}{m_e} \frac{V_y}{d}$$

dove ovviamente d è la distanza tra le placchette verticali.

Il corrispondente moto è di tipo *uniformemente accelerato* (o **parabolico**), per cui gli elettroni si spostano, lungo l'asse y, di una quantità data da

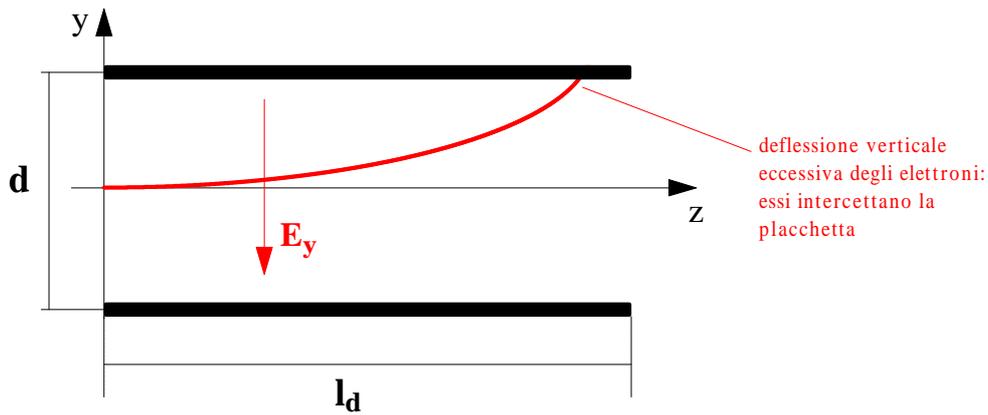
$$y = \frac{1}{2} a_y t^2 = \frac{1}{2} \frac{e}{m_e} \frac{V_y}{d} t^2$$

Sostituendo adesso l'espressione di t ricavata prima, abbiamo che

$$y = \frac{1}{2} \frac{e}{m_e} \frac{V_y}{d} \cdot z^2 \cdot \frac{m_e}{2eV_a} = \frac{1}{4} \frac{z^2}{d} \frac{V_y}{V_a}$$

La deflessione degli elettroni (che, per le polarità della tensione e del conseguente campo, avviene nel verso positivo dell'asse y quando $V_y > 0$ e in verso opposto quando $V_y < 0$) è dunque proporzionale a V_y ed inversamente proporzionale a V_a .

Si presenta subito un problema legato a questa deflessione, schematizzato nella figura seguente:



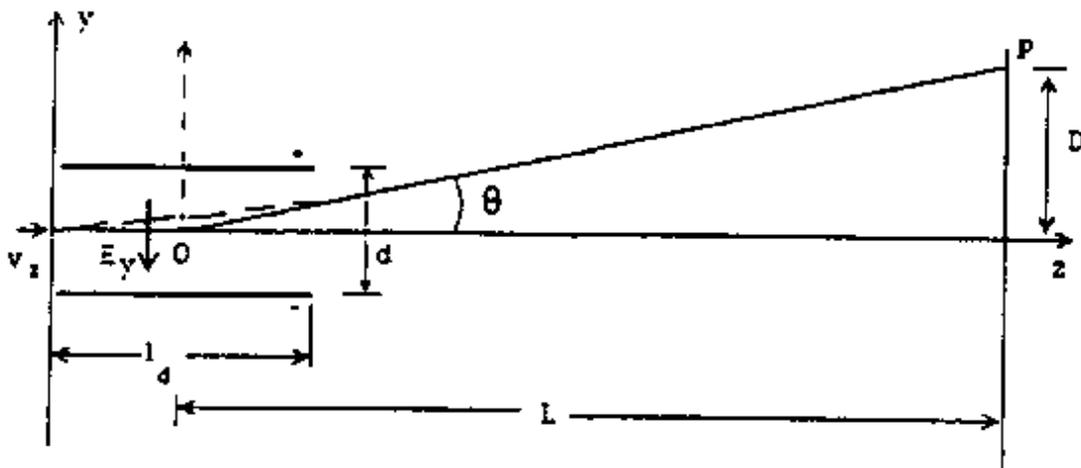
Infatti, la deflessione verticale può essere tale da far incidere il fascio di elettroni su una delle due placchette (a seconda della polarità della tensione), il che impedirebbe l'arrivo allo schermo se non per fenomeni di riflessione. Quindi, bisogna impedire il verificarsi di questa condizione. Lo si può fare facilmente: indichiamo con l_d la lunghezza longitudinale (cioè lungo z) delle placchette deflettrici verticali e supponiamo che il fascio di elettroni entri nella zona centrale delle placchette, come riportato in figura; affinché il fascio non intercetti le placchette, in corrispondenza di $z=l_d$ (stiamo supponendo che il riferimento sia preso all'inizio delle placchette) deve risultare $y < d/2$ anche in presenza della massima tensione $V_{y,max}$ applicata, cioè si deve avere una deflessione inferiore alla semidistanza tra le placchette. Applicando quindi la relazione $y = \frac{1}{4} \frac{z^2}{d} \frac{V_y}{V_a}$, deve

risultare

$$\frac{1}{4} \frac{l_d^2}{d} \frac{V_{y,max}}{V_a} < \frac{d}{2} \longrightarrow \boxed{\frac{l_d}{d} < \sqrt{2} \frac{V_a}{V_{y,max}}}$$

Questa relazione, dunque, pone un vincolo al rapporto tra le dimensioni delle placchette deflettrici verticali, quando sia fissata la massima tensione applicabile tra di esse.

Abbiamo detto che, in base alla relazione $y = \frac{1}{2} \frac{e}{m_e} \frac{V_y}{d} t^2$, il moto degli elettroni tra le placchette è parabolico. Quando però gli elettroni escono dalla zona delle placchette, la forza di deflessione verticale scompare, per cui il moto prosegue lungo una linea retta che terminerà nel punto P indicato nella figura seguente:



Come si nota dalla figura, il punto P si trova ad una distanza D dall'asse del tubo. Per individuare tale distanza (che rappresenta la **deflessione verticale** del nostro fascio), ci è sufficiente osservare che l'angolo θ è legato alla lunghezza l_d delle placchette verticali dalla relazione

$$\tan \theta = \frac{V_y}{2dV_a} l_d$$

Abbiamo qui tenuto conto del fatto che $\tan \theta$ è la pendenza della parabola nel punto $z=l_d$ e coincide con la pendenza della retta che individua P. Tale retta incontra inoltre l'asse z in un punto O che dista dal bordo destro delle placchette deflettrici verticali di una quantità pari a

$$x_0 = \frac{y|_{z=l_d}}{\tan \theta} = \frac{\frac{1}{4} \frac{l_d^2}{d} \frac{V_y}{V_a}}{\frac{V_y}{2dV_a} l_d} = \frac{l_d}{2}$$

In base a questo risultato, il punto O si trova al centro delle placchette deflettrici: indicata allora con L la distanza del punto O dello schermo fluorescente (sul quale si trova P), abbiamo banalmente che

$$D = L \cdot \tan \theta = L \frac{V_y}{2dV_a} l_d$$

Questa è la relazione fondamentale sul funzionamento del CRT (e quindi dell'intero oscilloscopio): essa mostra infatti che *la posizione verticale del punto P sullo schermo (cioè la deflessione verticale del fascio) è direttamente proporzionale alla tensione applicata tra le placchette deflettrici verticali:*

$$D = \frac{L \cdot l_d}{2dV_a} V_y$$

Dato che V_y è proporzionale al segnale di misura, secondo quanto vedremo più avanti, possiamo dedurre che l'oscilloscopio è un **dispositivo voltmetrico ad indicazione lineare**.

Il coefficiente di proporzionalità è dunque $\frac{L \cdot l_d}{2dV_a}$, per cui la deflessione verticale dipende dalle dimensioni del tubo a raggi catodici e dalla tensione anodica acceleratrice.

Sensibilità di deflessione

Si definisce **sensibilità di deflessione** (simbolo : S_y) dell'oscilloscopio il rapporto tra la deflessione D e la tensione che l'ha provocata: avendo trovato prima che $D = \frac{L \cdot l_d}{2dV_a} V_y$, deduciamo che tale sensibilità vale

$$S_y = \frac{D}{V_y} = \frac{l_d}{2d} \frac{L}{V_a}$$

Il reciproco di questa quantità prende il nome di **fattore di deflessione** (simbolo G_Y):

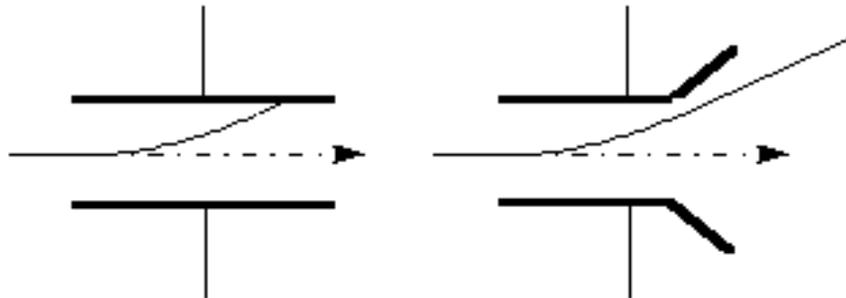
$$G_y = \frac{1}{S_y} = \frac{2d}{l_d} \frac{V_a}{L}$$

Evidentemente, mentre S_Y si misura in **mm/V**, G_Y si misura in **V/mm**.

Il nostro oscilloscopio sarà tanto migliore quanto più alta risulta la sensibilità di deflessione. Allora, in base alla definizione appena data, è evidente che S_Y cresce se aumentiamo la lunghezza L oppure riduciamo la tensione V_a oppure ancora se aumentiamo il rapporto l_d/d . Su quest'ultimo, però, abbiamo il vincolo visto prima, in base

al quale il valore limite è $\sqrt{2 \frac{V_a}{V_{y,max}}}$: dato che, per aumentare S_Y , siamo interessati a ridurre V_a , è

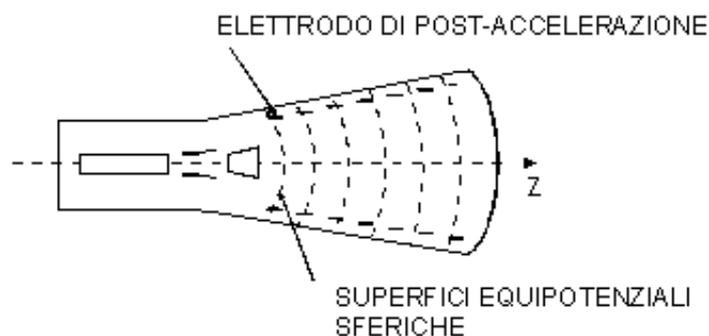
evidente che il limite su l_d/d diventa sempre più basso. Allora, la prima cosa che si fa è quella di aumentare fittiziamente il rapporto l_d/d : diciamo *fittiziamente* in quanto si tratta sostanzialmente di usare delle placchette verticali che, anziché essere rettilinee, sono leggermente divergenti. La figura seguente mostra il concetto:



Aumento fittizio del rapporto l_d/d : rispetto alla figura di sinistra, quella di destra presenta la leggera divergenza delle placchette

Le dimensioni verticali (d) e longitudinali (l_d) non cambiano, ma le placchette sono leggermente divergenti, in modo che, pur diminuendo leggermente la tensione anodica, non si abbia comunque "intersezione" tra fascio elettronico e placchette (che invece si avrebbe con le placchette perfettamente rettilinee).

In effetti, non possiamo però ridurre eccessivamente la tensione anodica, in quanto questo ridurrebbe l'intensità luminosa della traccia sullo schermo. Allora, spesso si effettua tale riduzione, ma allo stesso tempo si realizzano degli **anodi di post-accelerazione** dopo le placchette verticali:

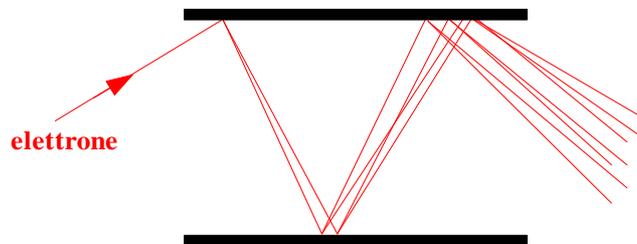


Anodo di post-accelerazione realizzato tramite una successione di anodi a potenziale crescente

Una semplice realizzazione dell'anodo di post-accelerazione consiste in un **monoelettrodo** sistemato nella parte conica del tubo. Più efficace è invece la soluzione proposta in figura, in cui il monoelettrodo è stato separato in una **successione di elettrodi** a potenziale via via crescente man mano che ci si sposta verso lo schermo.

Nei più recenti CRT, l'anodo di post-accelerazione è invece costituito da una **griglia semisferica**, a potenziale positivo (dell'ordine di 2kV), posta tra le placchette e lo schermo; in aggiunta a questo, il rivestimento di Aquadag di cui si è parlato in precedenza viene sostituito da un rivestimento di materiale conduttore portato ad altissimo potenziale positivo (circa 20 kV).

Riguardo l'uso di questa griglia semisferica, bisogna però tener conto, nella progettazione, che essa cattura inevitabilmente un certo numero di elettroni, il che determina una riduzione dell'intensità luminosa. Allora, per conservare una buona intensità luminosa, si sfrutta il cosiddetto **effetto di moltiplicazione** degli elettroni: si predispongono, nelle immediate vicinanze dello schermo, una piastra a potenziale elevato, in cui sono stati praticati numerosissimi **forellini**; quando il fascio di elettroni penetra in tali fori, rimbalza sulle loro pareti ed ogni "rimbalzo" genera, per il fenomeno dell'emissione secondaria, un aumento del numero di elettroni e quindi anche della luminosità della traccia. La figura seguente mostra, molto schematicamente, cosa succede per il generico elettrone che penetra in uno dei forellini:



Con questi accorgimenti, per valori di D dell'ordine di 10 cm, si ottengono valori di sensibilità compresi tra **1 mm/V** e **0.1 mm/V**.

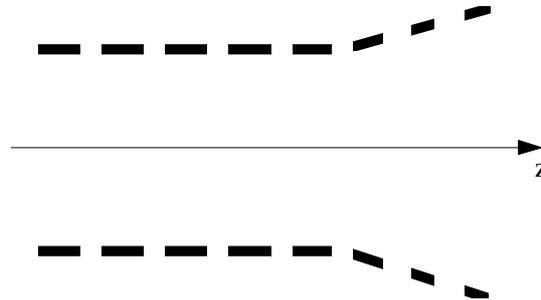
Tensione variabile in ingresso

Tutti i discorsi precedenti sono stati fatti con l'ipotesi di fondo che la tensione V_y applicata alle placchette deflettrici verticali fosse continua e costante. Essendo questa tensione proporzionale al segnale di misura applicato in ingresso, nella maggior parte dei casi si tratterà di una tensione $v_y(t)$ variabile nel tempo. Ad essa, perciò, corrisponderà una variazione temporale della traiettoria degli elettroni e quindi della loro deflessione nel CRT. Allora, affinché i discorsi fatti continuino ad esse validi, deve essere verificata una condizione di fondo: il tempo di transito degli elettroni tra le placchette deve essere molto più piccolo rispetto al periodo della tensione applicata; sotto questa ipotesi, infatti, possiamo ritenere che la deflessione degli elettroni sia costante (anche se diversa di volta in volta) ad ogni passaggio attraverso le placchette, per cui possiamo considerare la **situazione quasi statica** e quindi possiamo continuare a ritenere valida la precedente trattazione.

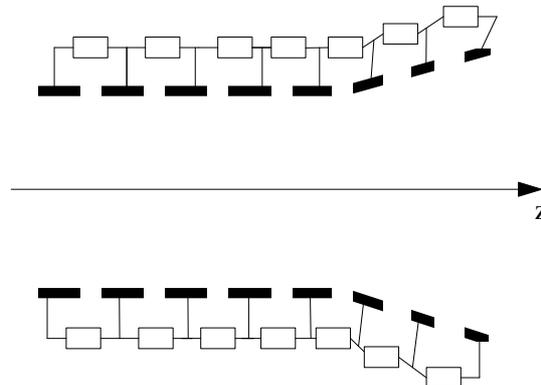
Questa limitazione sul tempo di transito si traduce evidentemente su una limitazione sulla rapidità di variazione dei segnali in ingresso e quindi sull'ampiezza di banda di tali segnali.

Dobbiamo dunque rendere piccolo il tempo di transito degli elettroni attraverso le placchette verticali, in modo da aumentare l'**ampiezza di banda dell'oscilloscopio**, intesa appunto come massima frequenza dei segnali applicabili all'ingresso. In linea di massima è ovvio che dovremmo avere placchette molto corte (l_d piccolo) ed elettroni molto veloci (V_a elevata). Il problema è che, all'aumentare della velocità del fascio, diventa sempre più difficile la sua deflessione (si parla di **fascio duro**), con una conseguente riduzione di sensibilità.

Allora, negli oscilloscopi ad ampia banda (anche fino ad 1 GHz), si preferisce ridurre il tempo di transito agendo sulla lunghezza delle placchette deflettrici; in particolare, invece di avere un'unica coppia di placchette, se ne opera una suddivisione, in modo da realizzare una successione di placchette più piccole:



Così facendo, però, per ottenere lo stesso effetto di deflessione che si otterrebbe con un'unica coppia di placchette, si rende necessario alimentare le coppie di placchette non con la stessa tensione, ma con una tensione via via ritardata man mano che si prosegue verso destra; si procede allora applicando la tensione di deflessione alla prima coppia di placchette a sinistra e poi si usano delle linee di ritardo (sono semplici pezzi di cavo coassiale) tra le coppie successive:



Queste linee di ritardo fanno in modo che la tensione applicata alla prima coppia di placchette a sinistra passi alle successive con la stessa velocità di avanzamento del fascio di elettroni, con il vantaggio quindi di ridurre il tempo di transito del fascio tra ogni coppia di **sub-placchette**.

Deflessione elettrostatica e magnetica

Le ultime considerazioni da fare, riguardo il CRT di un oscilloscopio analogico, riguarda il perchè della scelta della **deflessione elettrostatica**. Infatti, un'altra possibilità per deflettere il fascio elettronico sarebbe quella della **deflessione magnetica**, che è usata quasi sempre negli *oscilloscopi digitali* e nei *televisioni*; la deflessione magnetica presenta numerosi vantaggi, ma ha anche un fondamentale difetto, quello di imporre una ridotta ampiezza di banda (non oltre i 10 kHz): infatti, per creare il campo magnetico di deflessione si usano induttori attraversati da corrente elettrica proporzionale al segnale di misura; per ridurre la costante di tempo di risposta dell'induttore, in modo da seguire segnali anche ad elevata frequenza, sarebbe necessario ridurre il numero di spire, ma, contemporaneamente, aumentare la potenza ed è proprio questo elevato consumo di potenza a sconsigliare l'uso della deflessione magnetica.

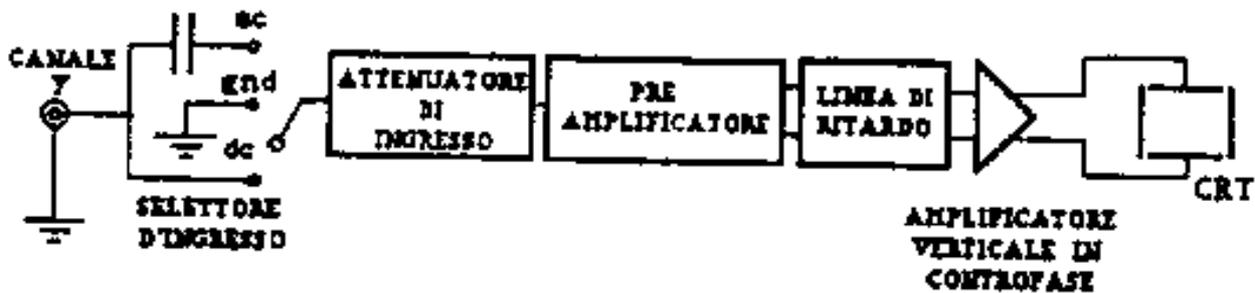
In effetti, a fronte di questo difetto, la deflessione magnetica presenta numerosi vantaggi rispetto a quella elettrostatica:

- consente un maggiore angolo di deflessione del fascio;
- non richiede forti accelerazioni del fascio elettronico, pur assicurando ottima luminosità;
- presenta migliore sensibilità e migliore risoluzione;
- consente a parità di area dello schermo, una riduzione della lunghezza del tubo e quindi delle dimensioni dello strumento (non c'è più il famoso vincolo sul rapporto l_d/d , in quanto mancano del tutto le placchette deflettrici);
- presenta costi di realizzazione decisamente bassi.

SISTEMA DI DEFLESSIONE VERTICALE

Nel precedente paragrafo ci siamo occupati dei meccanismi (e relative equazioni) con cui avviene la deflessione verticale del fascio elettronico, ossia la deflessione di tale fascio proporzionale, in ciascun istante, al segnale di misura (canale Y). Adesso vogliamo esaminare altri aspetti del **sistema di deflessione verticale**.

Possiamo allora fare subito uno schema a blocchi del suddetto sistema:



In questo schema a blocchi sono indicati i principali componenti che ci interessano, di cui diamo adesso una dettagliata descrizione.

Selettore di ingresso (AC, DC, GND)

In primo luogo, notiamo un **selettore di ingresso**, del quale si è già parlato in precedenza: si tratta di un commutatore a tre posizioni, che consente di scegliere il tipo **accoppiamento (AC o DC)** tra il segnale di misura e lo strumento (in particolare l'*attenuatore*, di cui parleremo tra poco); c'è anche l'opzione **GND** che, tramite la visualizzazione di una traccia orizzontale corrispondente al potenziale di terra (0V), consente di verificare dove sia posizionato sullo schermo il **livello di riferimento**.

Attenuatore in ingresso

A valle del selettore di ingresso, c'è l'**attenuatore in ingresso**, che ha lo scopo fondamentale di adattare i livelli delle tensioni in ingresso al sistema di **amplificazione verticale**. Come è noto, un attenuatore può essere realizzato in vario modo: quello più semplice consiste in un partitore resistivo, ma si possono anche usare una catena in serie di componenti RC parallelo oppure

amplificatori a guadagno variabile oppure anche una catena di diodi PIN (usati negli oscilloscopi con banda molto ampia).

L'attenuazione introdotta da questo dispositivo è quella regolata dalla manopola **VOLT/div** sul pannello frontale dell'oscilloscopio: essa consente di selezionare il miglior rapporto tensione/divisioni in dipendenza del livello di tensione del segnale di misura.

Come sappiamo, uno strumento di misura è tanto migliore quanto maggiore è la sua linearità di risposta nei confronti del segnale in ingresso. Da qui scaturisce che l'attenuazione introdotta dall'attenuatore debba essere il più possibile costante con la frequenza. Per ottenere questo, sono necessari i cosiddetti **attenuatori compensati**.

Inoltre, è anche necessario che l'impedenza di ingresso dell'oscilloscopio non vari con la posizione del commutatore, per cui la tensione di misura viene applicata a tutto il partitore e poi si usa un opportuno selettore per prelevare tutta o parte di questa tensione.

Per garantire le migliori prestazioni del successivo **pre-amplificatore**, si fa anche in modo che l'impedenza di uscita dell'attenuatore sia sempre molto bassa, in modo che la gran parte della tensione in uscita dall'attenuatore contribuisca al pilotaggio del pre-amplificatore (che sarà evidentemente un FET, cioè con elevata impedenza di ingresso).

Tornando al problema della compensazione (cioè del mantenimento di una attenuazione costante in frequenza), dobbiamo dire che i partitori resistivi, essendo più difficili da compensare, sono poco usati. Decisamente più usati sono i circuiti RC; per farne una analisi di massima, possiamo indicare con R_t e C_t , rispettivamente, la resistenza e la capacità totali dell'attenuatore; per ottenere la compensazione, si può verificare che, in ogni posizione del commutatore, deve essere verificata la condizione

$$R_t C_t = R_a C_a$$

dove abbiamo indicato con R_a e C_a , rispettivamente, la resistenza e la capacità della parte selezionata del partitore.

Così come abbiamo visto a proposito della regolazione della sonda compensata, anche per la compensazione dell'attenuatore si usa un'onda quadra posta in ingresso allo strumento e si ruota il commutatore fin quando la visualizzazione della forma d'onda risulta la migliore approssimazione possibile dell'onda quadra stessa.

Sistema di amplificazione verticale

Il **sistema di amplificazione verticale** è quello che caratterizza la sensibilità dello strumento. A tal proposito, dobbiamo ricordarci che, per un qualsiasi amplificatore elettronico, il prodotto tra l'ampiezza di banda ed il guadagno è costante: questo comporta che una sensibilità elevata si possa avere solo su una banda piccola e viceversa. Tra l'altro, ricordiamo anche che gli amplificatori a larga banda (cioè con frequenza di taglio superiore elevata, dell'ordine di 10 Mhz) aventi anche un guadagno elevato hanno grossi problemi di stabilità, per cui è necessario aumentarne i costi al fine di usare opportuni sistemi di controllo.

In alcuni oscilloscopi di basso costo, si utilizzano amplificatori con accoppiamento solo in corrente alternata, che quindi sono insensibili alla componente continua in ingresso; per includere tale componente continua, i costi e la complessità aumentano, per i noti problemi di *deriva*, ma aumentano anche le applicazioni (è possibile ad esempio visualizzare senza distorsioni i treni di impulsi a bassa frequenza).

Un problema di notevole importanza è quello per cui il segnale di ingresso è generalmente sbilanciato, nel senso che presenta sia componenti di modo comune sia componenti di modo differenziale; se si vuole aumentare la linearità di deflessione del fascio nel CRT, è necessario bilanciare il segnale e questo compito è proprio del **preamplificatore**. Quest'ultimo è allora

generalmente costituito da due stadi in cascata: il primo stadio è un inseguitore di tensione a FET, avente elevata impedenza di ingresso e media impedenza di uscita), accoppiato direttamente ad uno stadio inseguitore di emettitore (cioè un inseguitore di tensione a BJT), il quale essenzialmente adatta la media impedenza di uscita del FET alla bassa impedenza di ingresso del successivo **amplificatore ad inversione di fase**; quest'ultimo è un amplificatore differenziale ad elevato CMRR, in modo da sopprimere al meglio possibile il segnale di modo comune.

Questo **amplificatore verticale** è in **controfase** in quanto consente di applicare alle due placchette verticali due tensioni uguali ma di polarità opposte; questo consente di migliorare la linearità di deflessione del CRT.

Per ottimizzare le prestazioni dell'amplificatore verticale (ottima linearità, notevole stabilità, ampia banda passante e cioè piccoli tempi di salita), si usa una forte reazione negativa.

Linea di ritardo

Tra il preamplificatore e l'amplificatore in controfase è presente una **linea di ritardo**, necessaria per la **sincronizzazione** con il sistema di deflessione orizzontale: come già accennato in precedenza, la linea di ritardo fa in modo che il segnale di misura venga applicato sulle placchette deflettrici verticali solo dopo che il *sistema di scatto* abbia comandato il generatore della *base dei tempi* e che l'uscita di quest'ultima, a sua volta, sia stata amplificata dall'*amplificatore orizzontale*. In tal modo, quindi, i due segnali sui due sistemi di placchette vengono applicati contemporaneamente, mentre, in assenza della linea di ritardo, il segnale sul sistema di deflessione orizzontale interverrebbe dopo quello sul sistema di deflessione verticale.

La linea introduce dunque un ritardo almeno pari al tempo che intercorre tra il comando del sistema di scatto e l'applicazione del segnale proveniente dalla base dei tempi sulle placchette deflettrici orizzontali. Questo tempo è dell'ordine di **100 nsec**.

Dal punto di vista della realizzazione pratica, la linea di ritardo può essere semplicemente un **pezzo di cavo coassiale** con elevata induttanza per unità di lunghezza. Inoltre, dato che la linea è interposta tra due amplificatori, è importante accordarla con essi in base alla sua impedenza caratteristica. Non solo, ma, al fine di ottenere un ottimo comportamento dinamico della linea, sono previsti una serie di condensatori finemente variabili, il cui valore viene regolato in sede di taratura dello strumento.

Parametri del sistema di deflessione verticale

I parametri che caratterizzano un oscilloscopio dipendono strettamente dal sistema di deflessione verticale. Essi sono essenzialmente la *sensibilità verticale*, l'*ampiezza di banda* ed il *tempo di salita*.

La **sensibilità verticale** si ricava dal minimo fattore di deflessione G_Y indicato sul pannello (in corrispondenza della manopola VOLT/div collegata all'attenuatore verticale). Facciamo un esempio, supponendo che il minimo valore indicato per G_Y sia 2 mV/div. Generalmente, ogni divisione tracciata sullo schermo è di **10 mm**, per cui la sensibilità è

$$S = \frac{d_{\text{div}}}{G_{Y,\text{min}}} = \frac{10 \left(\frac{\text{mm}}{\text{div}} \right)}{2 \left(\frac{\text{mV}}{\text{div}} \right)} = 5 \left(\frac{\text{mm}}{\text{mV}} \right) = 5000 \left(\frac{\text{mm}}{\text{V}} \right)$$

In generale, segnaliamo che la dimensioni d_{div} della generica divisione oscillano tra 0.75 cm e 1.3 cm.

Per quanto riguarda l'**ampiezza di banda**, per gli amplificatori che comprendono anche la continua essa è convenzionalmente definita come la *frequenza di taglio superiore*, ossia la frequenza alla quale il valore della tensione di uscita scende 3dB al di sotto del valore a frequenza nulla.

Quando abbiamo a che fare con un oscilloscopio ad alta frequenza (tipicamente usato per misure impulsive), dobbiamo invece far riferimento al **tempo di salita**, che è un parametro tipicamente alla risposta temporale, ad un gradino in ingresso, per un sistema del primo ordine: infatti, per un sistema del primo ordine, sappiamo che l'ampiezza di banda B_w ed il tempo di salita t_s sono legati dalla nota relazione

$$B_w \text{ (MHz)} = \frac{0.35}{t_s \text{ (\mu sec)}}$$

Ad esempio, un oscilloscopio con tempo di salita di 5 nsec presenta evidentemente una ampiezza di banda di 70 MHz (oscilloscopio ad alta frequenza).

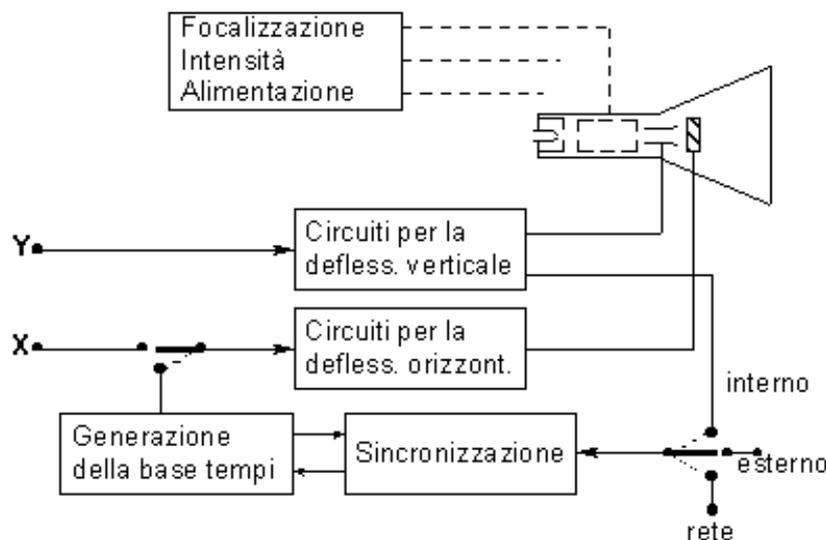
Il tempo di salita t_s non nullo dell'oscilloscopio comporta evidentemente un errore (sistematico) nella valutazione, ad esempio, del tempo di salita t_{eff} di un segnale. E' possibile allora correggere tale errore tramite la seguente relazione:

$$t_{eff} = \sqrt{t_m^2 - t_s^2}$$

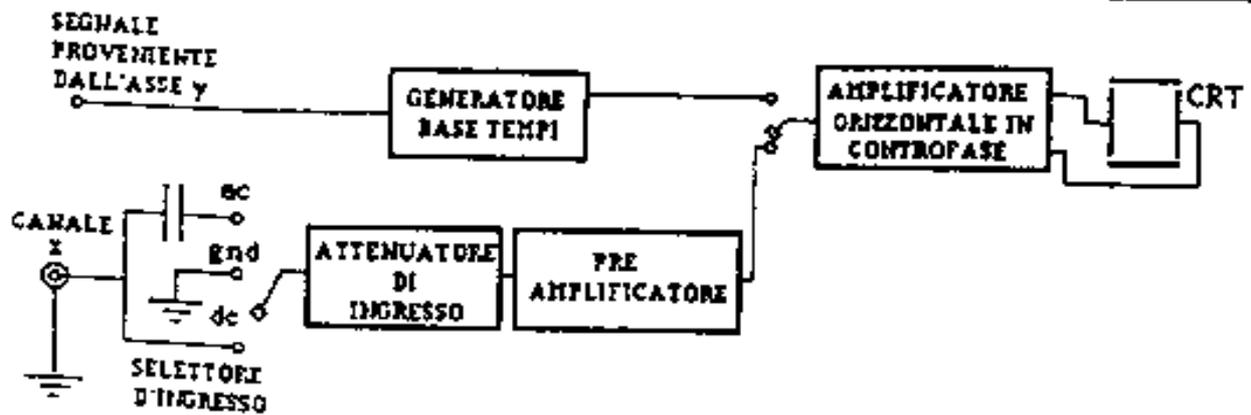
dove t_m è il tempo di salita del segnale che misuriamo in base alla visualizzazione sullo schermo. Questa relazione mostra chiaramente che l'errore (e quindi l'entità della correzione) aumenta all'aumentare del tempo di salita dell'oscilloscopio.

SISTEMA DI DEFLESSIONE ORIZZONTALE

Abbiamo in precedenza osservato che un oscilloscopio può funzionare sia in modo XY sia in modo normale (cioè *in base tempi*), secondo il seguente schema a blocchi (già proposto in precedenza):



Il **sistema di deflessione orizzontale** consente dunque di scegliere, tramite l'opportuno commutatore posto sul pannello dello strumento, il modo di funzionamento desiderato. Nella figura seguente è mostrato lo schema semplificato del sistema di deflessione orizzontale:



Notiamo subito la presenza del **commutatore** in ingresso all'**amplificatore orizzontale** (anch'esso in controfase come quello verticale): tale commutatore permette di scegliere se pilotare l'amplificatore tramite il segnale fornito dalla base tempi (modo normale) oppure quello prelevato (dopo opportuno condizionamento) dall'esterno tramite il **canale X** (modo XY).

Quando l'oscilloscopio funziona in **modo XY**, ossia sostanzialmente come **diagrammatore**, il segnale di ingresso viene applicato al *canale X*, che riproduce quasi fedelmente il *canale Y* visto in precedenza: notiamo infatti la presenza del selettore per l'accoppiamento (AC, DC o GRD), l'attenuatore ed il preamplificatore, ossia lo stesso **sistema di condizionamento** visto per il canale Y.

Quando l'oscilloscopio funziona in **modo normale**, invece, cioè per la visualizzazione di una forma d'onda variabile nel tempo, il sistema di deflessione orizzontale deve essere collegato al **generatore della base dei tempi**.

In ogni caso, il segnale che deve pilotare le placchette deflettrici orizzontali proviene dall'**amplificatore orizzontale**. Le specifiche su questo amplificatore non sono così stringenti come quelle sull'amplificatore verticale: infatti, quest'ultimo deve necessariamente poter amplificare fedelmente segnali anche di piccola ampiezza e spesso ad alta frequenza e con rapidi tempi di salita; al contrario, *l'amplificatore orizzontale viene progettato essenzialmente per riprodurre fedelmente il segnale proveniente dal generatore della base dei tempi, che è un dente di sega non ampiezza non molto piccola e tempi di salita non molto ridotti.*

Non essendoci problemi legati all'ampiezza di banda di questo amplificatore, se ne può tranquillamente aumentare il guadagno rispetto all'amplificatore verticale, in modo da aumentare la sensibilità del sistema di deflessione orizzontale; tra l'altro, questo aumento di guadagno (e quindi di sensibilità) si rende necessario per compensare la diminuzione della **sensibilità di deflessione orizzontale** dovuta al fatto che le placchette deflettrici orizzontali sono poste più vicine allo schermo rispetto a quelle verticali (le quali sono più lontane, come abbiamo visto, proprio per aumentare la sensibilità di deflessione verticale).

Notiamo inoltre che, così come l'amplificatore verticale, anche quello orizzontale è in **controfase** per migliorare la linearità di deflessione del fascio.

Segnale a dente di sega

E' intuitivo che, per avere una riproduzione fedele di una forma d'onda variabile nel tempo, è necessario che il fascio di elettroni venga deflesso orizzontalmente, da sinistra e destra dello schermo, a velocità costante e che poi esso possa tornare rapidamente indietro per ripartire con una nuova scansione. *Così come abbiamo visto per la deflessione verticale, anche quella orizzontale è linearmente variabile con la tensione*

applicata alle placchette deflettrici. Nel caso della deflessione verticale, avevamo trovato che essa era regolata dalla legge $D = \frac{L \cdot l_d}{2dV_a} V_y$; analogamente, per la deflessione orizzontale possiamo scrivere che

$$D_x = k_x \cdot V_x$$

dove V_x è la tensione applicata alle placchette orizzontali e k_x una opportuna costante di proporzionalità (legata alle dimensioni ed alla distanza mutua delle placchette nonché alla tensione anodica V_a).

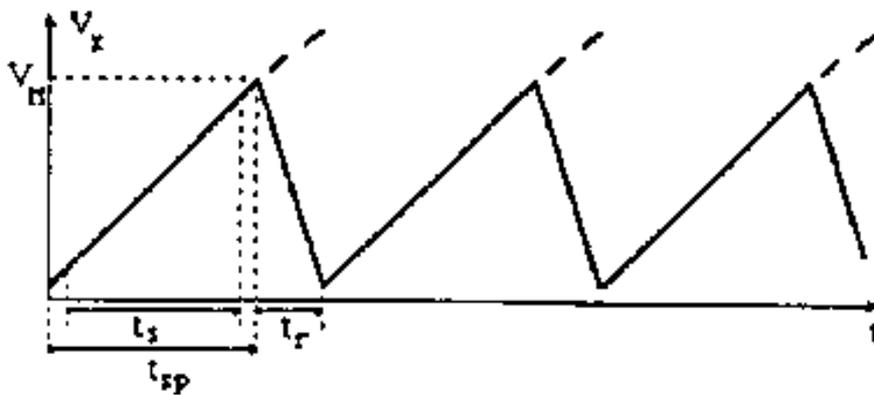
Se deriviamo rispetto a t quella relazione, otteniamo la velocità del fascio lungo l'asse orizzontale:

$$v_x = \frac{dD_x}{dt} = k_x \frac{dV_x}{dt}$$

Affinchè questa velocità sia costante, è necessario che risulti $\frac{dV_x}{dt} = \text{cost}$, ossia è necessaria una variazione lineare con il tempo della tensione applicata tra le placchette.

Quando il fascio ha raggiunto l'estremità destra dello schermo, la tensione V_x deve decrescere rapidamente a zero, in modo che il fascio ritorni all'estremità sinistra e possa incominciare un'altra escursione. In tal modo, si avrà una riproduzione ripetuta della forma d'onda applicata all'asse y .

Tutte queste considerazioni spiegano dunque per quale motivo il segnale di tensione V_x deve assumere il tipico andamento a **dente di sega**:



La rampa di questo segnale determina, tramite la propria pendenza, la velocità dell'escursione del fascio lungo l'asse x dello schermo e quindi la taratura in tempo dell'oscilloscopio.

Come mostrato in figura, il segnale a dente di sega è caratterizzato da alcuni tempi caratteristici:

- **tempo di salita** (simbolo: t_s): tempo necessario perchè la rampa passi dal 10% al 90% del valore di picco V_M ;
- **tempo di spazzolamento** (simbolo: t_{sp}): tempo necessario affinchè V_x passi dal valore minimo al valore massimo;
- **tempo di ritraccia** (simbolo: t_r): tempo necessario affinchè V_x passi dal valore massimo al valore minimo.

Durante il tempo di ritraccia, il fascio elettronico torna rapidamente a sinistra dello schermo. Per evitare che sullo schermo compaia una **immagine di ritraccia**, che non fornirebbe alcuna informazione utile, si possono usare tre strade:

- la prima è quella di usare un amplificatore di spegnimento, pilotato sempre dal generatore della base dei tempi;
- la seconda è quella invece di interdire la griglia di controllo del cannone elettronico, portandola ad un potenziale tanto negativo da impedire il passaggio di elettroni
- la terza è infine quella di interdire l'anodo di pre-accelerazione, aumentandone la tensione positiva ad un valore tale da attirare ed assorbire completamente il fascio di elettroni.

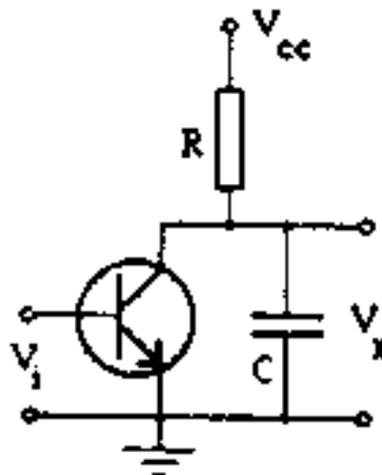
In ogni caso, il risultato è che, durante il tempo di ritraccia, non c'è alcun fascio di elettroni incidente sullo schermo.

Possiamo dunque riepilogare le principali funzioni della base tempi:

- essa genera il segnale a dente di sega V_x ;
- riporta il pennello dal margine destro al margine sinistro;
- interdice il pennello durante il ritardo (*impulso di unblanking*);
- attende l'arrivo del nuovo impulso di trigger.

Generatore a dente di sega

Vediamo adesso come realizzare il **generatore a dente di sega**. Ci sono diversi modi. Uno molto semplice, ancora usato negli oscilloscopi più economici, è quello di sfruttare le curve di carica e scarica di un circuito RC, che sono abbastanza lineari almeno nella parte iniziale. Nella figura seguente è riportato un semplice circuito a transistor che sfrutta questo meccanismo:



In questo circuito, il transistor non ha funzioni di amplificazione, ma di interruttore elettronico:

- fin quando la tensione V_i sulla base del transistor è nulla, il transistor stesso è interdetto, per cui il condensatore tende a caricarsi alla tensione V_{cc} tramite la resistenza R ; abbiamo perciò

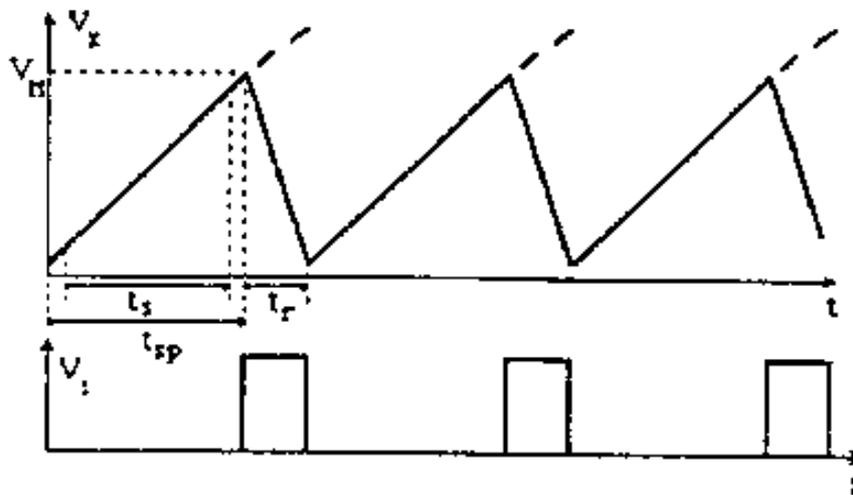
un banale circuito RC alimentato in continua, per cui sappiamo che, supponendo il condensatore inizialmente scarico, la legge di carica è del tipo esponenziale:

$$V_x = V_{cc}(1 - e^{-t/RC})$$

- il processo di carica termina quando la tensione V_x raggiunge il valore massimo desiderato, indicato in precedenza con V_M ; per terminare la carica, basta applicare un impulso sulla base del transistor, in modo da polarizzarlo e portarlo in saturazione; in questa condizione, esso presenta una resistenza R_{CE} tra collettore ed emettitore e quindi il condensatore può scaricarsi attraverso questa resistenza, con legge ancora esponenziale:

$$V_x = V_M e^{-t/R_{CE}C}$$

Ripetendo questo ciclo, cioè ponendo sulla base del transistor un treno di impulsi di ampiezza, durata e periodo opportuni, si può sfruttare la quasi-linearità delle leggi di carica e scarica nei rispettivi tratti iniziali:



In particolare, tale linearità è tanto maggiore quanto più piccola è la tensione massima V_M che il dente di sega deve raggiungere: ad esempio, per quanto riguarda la legge di carica, è sufficiente che V_M non superi il 10% del valore V_{cc} dell'alimentazione.

Se invece si vuole ottenere una linearità decisamente maggiore per la rampa, si usano generatori a corrente costante per carica il condensatore. Infatti, ci basta considerare la relazione di lato del condensatore, scritta nella forma

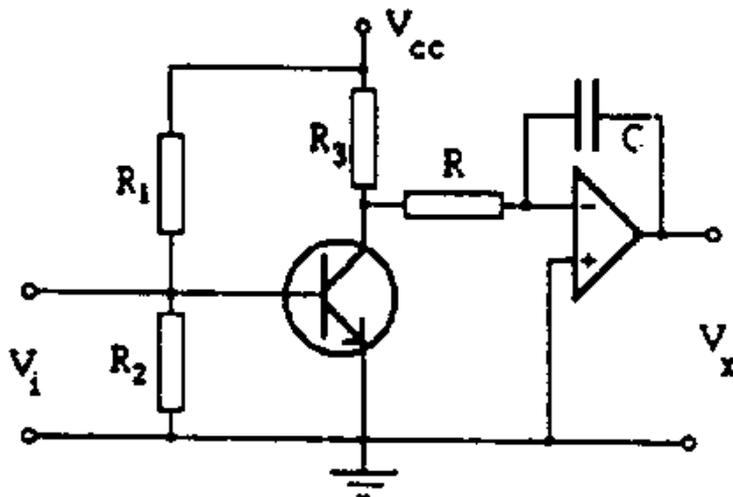
$$V_x = \frac{1}{C} \int_0^t I(t) dt$$

dove ovviamente si suppone il condensatore inizialmente scarico. Se la corrente attraverso l'elemento è costante, da quella relazione ricaviamo che

$$V_x = \frac{1}{C} \int_0^t I dt = \frac{1}{C} \cdot I \cdot t$$

ossia appunto una tensione linearmente crescente col tempo.

Il circuito usato per ottenere questo andamento della tensione V_x è il cosiddetto **integratore di Miller**, riportato nella figura seguente:



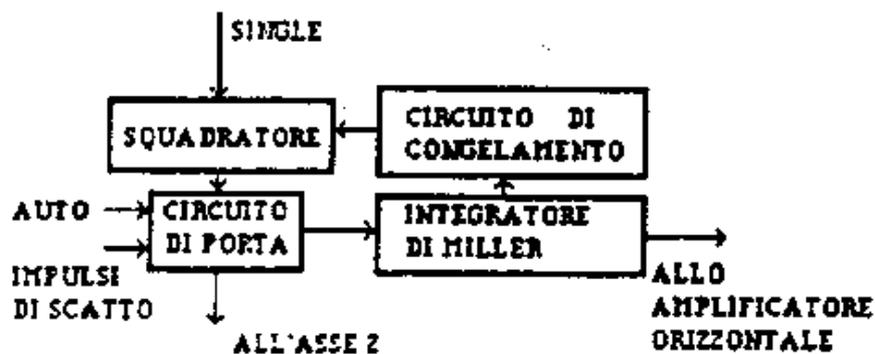
Ancora una volta, il transistor funge da interruttore elettronico; esso comanda l'inizio e la fine dell'intervallo di integrazione, tramite il segnale V_i applicato sulla sua base: quando il transistor è interdetto, abbiamo una corrente che dall'alimentazione si porta in ingresso all'integratore tramite il resistore R_3 ; quindi, *la tensione di alimentazione consente la carica del condensatore C, il quale si carica a corrente praticamente costante* (si ricordi che, in prima approssimazione, un op-amp non assorbe corrente in ingresso, per cui la corrente proveniente dall'alimentazione scorre direttamente in C). Con questo, mettiamo in pratica ciò che prima abbiamo scritto in formule.

Per quanto riguarda la variazione delle frequenze del dente di sega (e quindi la taratura in tempo dell'asse x dell'oscilloscopio), basta variare o la capacità C oppure la resistenza del circuito RC di carica del condensatore. A questo scopo, è predisposta la manopola **TIME/div** posta sul pannello dello strumento.

Il grande pregio dell'integratore di Miller sta nella sua flessibilità: infatti, è possibile scegliere in vario modo sia C sia R_3 , così da poter ottenere, con lo stesso generatore, forme d'onda a dente di sega in un ampio spettro di frequenza.

Funzioni aggiuntive del generatore della base tempi

Inserendo l'integratore di Miller in un circuito più complesso, possiamo ottenere alcune funzioni aggiuntive per il generatore della base tempi. Consideriamo allora il seguente schema a blocchi:



La tensione V_x per pilotare l'amplificatore orizzontale (e quindi le placchette di deflessione orizzontale) proviene sempre dall'integratore di Miller, al quale però sono connessi due nuovi blocchi:

- il **circuito di porta**, al quale giungono impulsi di scatto che, come si vedrà nel prossimo paragrafo, servono per la sincronizzazione;
- il **circuito di congelamento**.

E' inoltre presente un blocco denominato **squadratore**. Vediamo allora le caratteristiche di questi blocchi.

In primo luogo, notiamo un comando, per il circuito di porta, denominato **AUTO**: tramite questo comando, è possibile ottenere, dall'integratore di Miller, un dente di sega anche in assenza di segnali applicati in ingresso all'oscilloscopio¹. Quindi, selezionando, tramite un commutatore sul pannello, la posizione AUTO, otteniamo una traccia orizzontale sullo schermo (in assenza di segnale applicato), il che ci consente, come è noto, di definire il livello di tensione sul reticolo del CRT.

Per quanto riguarda il *circuito di congelamento*, il funzionamento è il seguente: quando abbiamo l'apposito selettore sul pannello nella posizione **NORMAL**, il circuito di porta ha il compito di far giungere gli impulsi di comando all'integratore di Miller, con una ben definita temporizzazione; allora, il **circuito di congelamento** (*hold off*) ha il semplice compito di ritardare l'arrivo dell'impulso di scatto all'integratore di Miller finché non si siano ripristinate le sue condizioni iniziali e l'integratore sia pronto a ripartire.

Lo **squadratore** ha invece semplicemente il compito di rendere i segnali provenienti dal circuito di congelamento adatti a pilotare il circuito di porta.

Segnaliamo inoltre che il circuito di porta ha altre due funzioni, esplicate entrambe tramite impulsi inviati all'**asse z**:

- in primo luogo, esso serve ad interdire il cannone elettronico durante i tempi di ritraccia e di congelamento;
- in secondo luogo, tramite il comando **SINGLE**, è possibile inviare un solo impulso di scatto all'integratore di Miller, in modo da visualizzare in modo permanente un solo tratto del segnale sotto misura (cioè una sola *fotografia*); il circuito di porta non lascia dunque passare altri impulsi fin quando l'operatore non lo desideri.

Base dei tempi ritardata

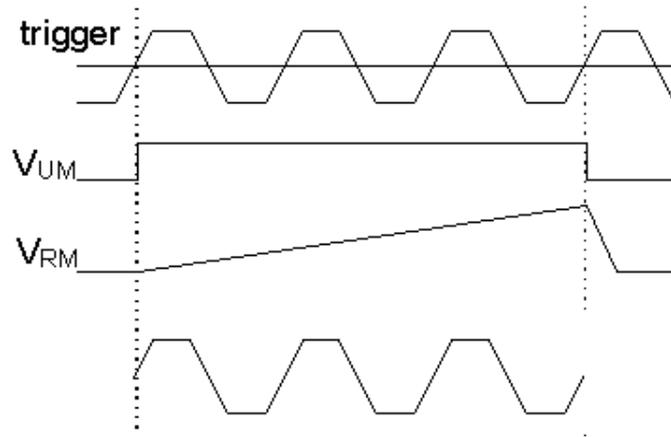
In alcuni oscilloscopi è presente, oltre che la base dei tempi tradizionale, la cosiddetta **base dei tempi ritardata**: *essa ha sostanzialmente il compito di consentire la visualizzazione (con maggiore dettaglio) di una sola parte del segnale già visibile sullo schermo.*

Per ottenere questa funzione, si procede nel modo seguente: il segnale V_x in uscita dall'integratore di Miller non viene inviato direttamente all'amplificatore orizzontale, ma ad un nuovo *blocco base tempi*, aventi un generatore a rampa di pendenza maggiore rispetto a quella del generatore principale; in tal modo, si ha una espansione dell'asse temporale, che permette una visualizzazione su tutto lo schermo di una porzione ridotta del segnale sul canale Y.

Esiste un apposito **selettore di funzioni** sul pannello dello strumento:

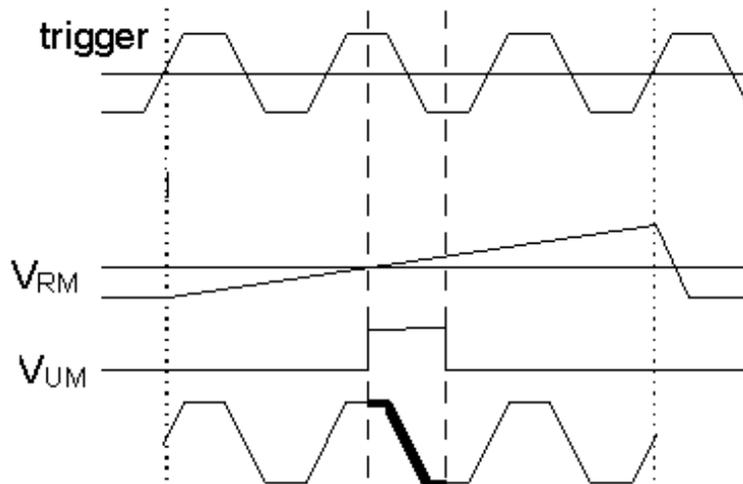
- quando il selettore è **OFF**, allora la base tempi ritardata è disattivata, per cui funziona quella tradizionale; la figura seguente mostra la situazione:

¹ In pratica, il comando AUTO modifica il circuito di porta trasformandolo in un oscillatore astabile.



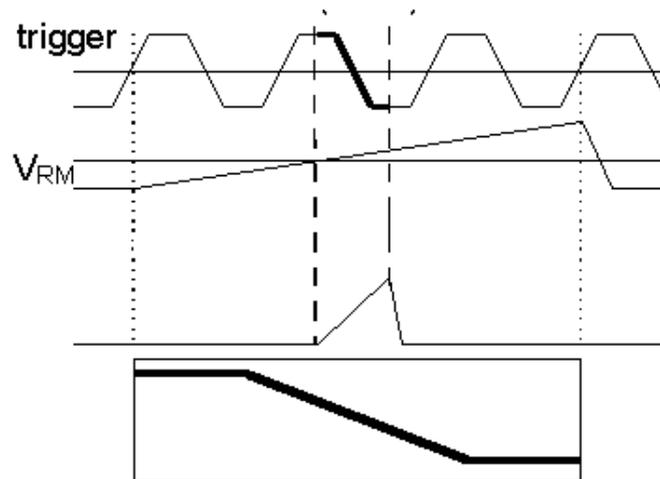
In alto c'è il segnale sotto misura; V_{UM} è il segnale proveniente dalla base dei tempi ritardata, mentre V_{RM} è quello proveniente dalla base dei tempi tradizionale; il segnale in basso è quello che vediamo sullo schermo;

- quando il selettore è su **MAIN**, risultano attivate entrambe le base tempi, ma la rampa per lo spazzolamento proviene dal generatore principale; questo serve semplicemente ad intensificare la traccia sullo schermo relativamente ad una sola porzione del segnale, quella corrispondente alla base tempi ritardata:



Agendo sulle manopole **livello** (level) e **pendenza** (slope) relative alla base tempi ritardata, è possibile scegliere il punto iniziale e la durata della porzione intensificata;

- quando il selettore è in posizione **DELAY**, la base tempi principale è attiva ma serve solo a pilotare quella ritardata, che genera lo spazzolamento dello schermo; si tratta sostanzialmente del funzionamento classico con la base tempi ritardata, tramite il quale cioè visualizzare solo una porzione del segnale rispetto a quella visualizzabile con la base tempi tradizionale:



Si noti che, rispetto al funzionamento con il commutatore su **MAIN**, la rampa della base tempi ritardata è molto più ripida, visto che in questo caso è necessario visualizzare solo la porzione di interesse del segnale, mentre prima tale porzione andava solo evidenziata

- infine, quando il selettore è su **MIXED**, è possibile visualizzare il segnale tramite la base tempi tradizionale nella parte iniziale dello schermo e tramite la base tempi ritardata nella parte finale; in tal modo, risulta evidenziata la porzione di maggiore interesse del segnale. E' ovvio che, con questa scelta, l'asse orizzontale ha una taratura non uniforme: il rapporto **TIME/div** nel primo tratto (base tempi tradizionale) è maggiore rispetto al rapporto **TIME/div** nel secondo tratto (base tempi ritardata). Una tipica applicazione di questa visualizzazione si ha nell'esame di un treno periodico di impulsi, quando si vuol studiare con maggiore dettaglio il singolo impulso.

SISTEMA DI SINCRONIZZAZIONE

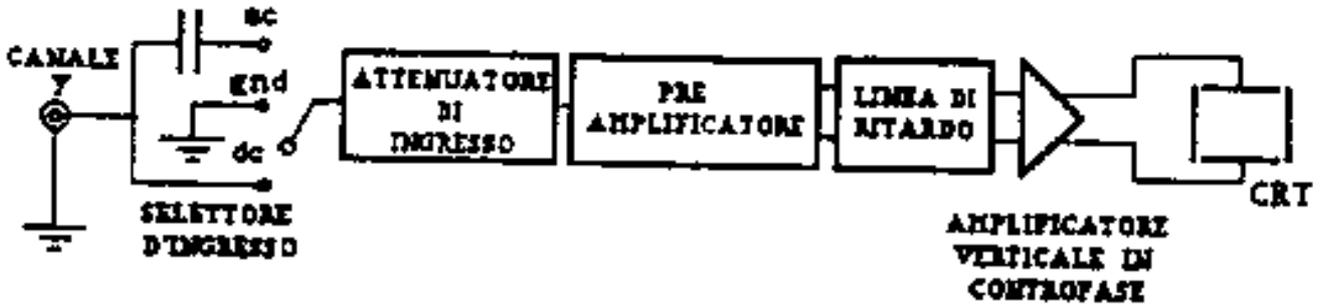
Affinchè si possa seguire, sullo schermo dell'oscilloscopio, l'andamento temporale di una **forma d'onda periodica**, il fascio di elettroni deve ritracciarla ripetitivamente, in modo che essa occupi sempre la stessa posizione sullo schermo². Sotto questa condizione, la traccia apparirà stazionaria, purchè ovviamente la **frequenza di ripetizione** (cioè la frequenza con cui la traccia viene ridisegnata) sia superiore a quella di persistenza dell'immagine sulla retina.

Quindi, per avere una immagine stabile, è indispensabile avere una sincronizzazione tra i segnali applicati alle placchette deflettrici verticali ed orizzontali. A questo serve il **sistema di sincronizzazione**, il quale determina l'istante di inizio di ciascuna rampa.

Queste considerazioni valgono evidentemente se il segnale sotto misura è periodico; nonostante questo, è possibile comunque utilizzare l'oscilloscopio per l'analisi di **segnali transitori**: la differenza sostanziale è che, per questi segnali, non ci interessa esaminare continuamente l'andamento temporale, ma solo l'andamento in una data porzione di tempo, quella appunto di interesse. In altre parole, anzichè avere spazzolamenti ripetuti dello schermo, avremo un unico spazzolamento, avviato nell'istante di interesse. Ovviamente, se si vogliono condurre delle misure (ad esempio per il tempo di salita di un segnale a rampa), sorge il problema per cui la traccia, una volta tracciata, dura solo per il tempo di persistenza dei fosfori e poi scompare; in questi casi, è necessario ricorrere ad **oscilloscopi a memoria** oppure a **sistemi fotografici**.

² Stiamo ovviamente considerando il funzionamento dell'oscilloscopio in modo normale, cioè con la deflessione orizzontale comandata dalla base tempi.

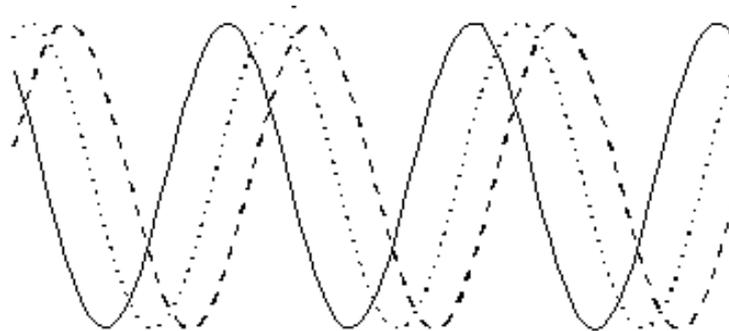
Per la visualizzazione dei segnali transitori è inoltre critico il ruolo della linea di ritardo posta nel sistema di deflessione verticale, a monte dell'amplificatore verticale in controfase:



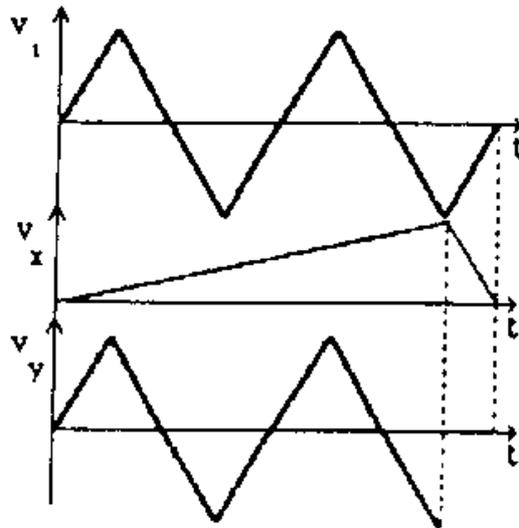
Schema a blocchi (riportato anche in precedenza) del sistema di deflessione verticale

Il problema è nel ritardo presente tra l'istante di sincronizzazione (cioè quello in corrispondenza del quale si vuole iniziare la visualizzazione) e l'inizio effettivo del fronte di salita della rampa: se la linea di ritardo non ritardasse l'arrivo del segnale Y alle placchette verticali, perderemmo la visualizzazione del tratto iniziale del segnale, cosa che talvolta può essere inaccettabile.

Torniamo adesso al caso dei segnali periodici. Come già detto in precedenza, per avere una traccia stabile sullo schermo, è necessario che il segnale in ingresso sia periodico e che la sua frequenza sia uguale o multipla intera della frequenza del dente di sega che determina lo spazzolamento orizzontale; se così non fosse, ad ogni spazzolata si otterrebbe una traccia diversa dalla precedente e quindi la visualizzazione sarebbe inutile. Nella figura seguente, è ad esempio riportato quello che succede quando il segnale sotto misura è una sinusoide la cui frequenza non abbia alcun relazione armonica con la frequenza del dente di sega:

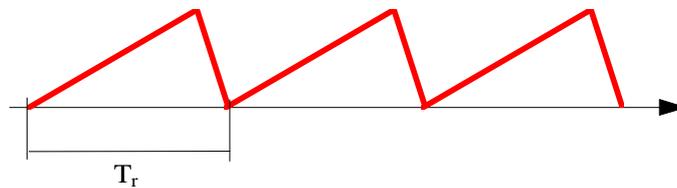


Per comprendere ancora meglio il concetto, conviene far riferimento, come nella figura seguente, al caso in cui il segnale di misura V_i è un'onda triangolare con periodo T_S :

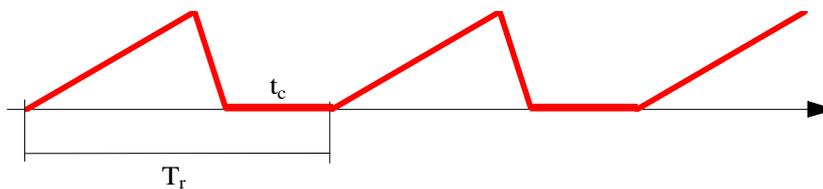


Il diagramma superiore mostra il segnale sotto misura così come si presenta all'ingresso dello strumento; il diagramma intermedia mostra la rampa per la deflessione verticale; il diagramma inferiore mostra il segnale visualizzato stabilmente sullo schermo.

Indichiamo con T_r il **periodo del dente di sega** (il suo reciproco è quindi la frequenza del dente di sega): in prima approssimazione, T_r è da intendersi come la somma del **tempo di spazzolamento** e del **tempo di ritraccia**. Questo però vale solo se consideriamo un segnale V_x che sia una banale successione di fronti di salita e di discesa:



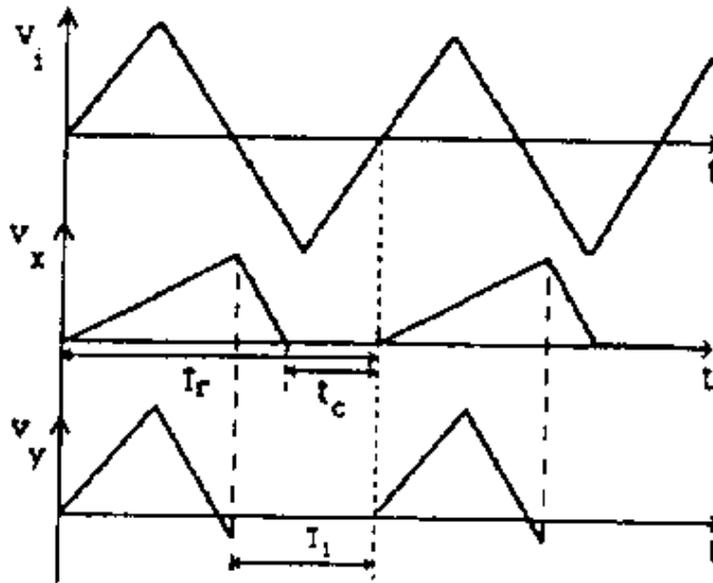
In realtà, abbiamo visto prima che, per permettere una ottimizzazione del sistema di sincronizzazione, bisogna prevedere anche un **tempo di congelamento** (t_c), compreso tra la fine di un fronte di discesa e l'inizio del successivo fronte di salita, in cui V_x è nullo:



Quindi, scriviamo che

$$T_r = t_{SP} + t_r + t_c$$

Con questa posizione, è evidente che la situazione per cui la traccia sullo schermo è stabile non è più quella dell'ultima figura, ma la seguente:



Abbiamo evidentemente un **tempo di interdizione** $T_i = t_r + t_c$ del fascio elettronico. Allora, è possibile vedere visualizzato sullo schermo un numero intero di periodi del segnale di misura solo se T_i è pari proprio a T_s oppure ad un suo multiplo.

Quando si abbia l'uguaglianza delle frequenze del segnale da visualizzare e del dente di sega, avremo sullo schermo solo parte di un periodo, come mostrato nella figura. Se invece la suddetta condizione non fosse verificata, allora l'immagine non sarebbe stazionaria, ma risulterebbe in movimento (scorre sullo schermo); in particolare:

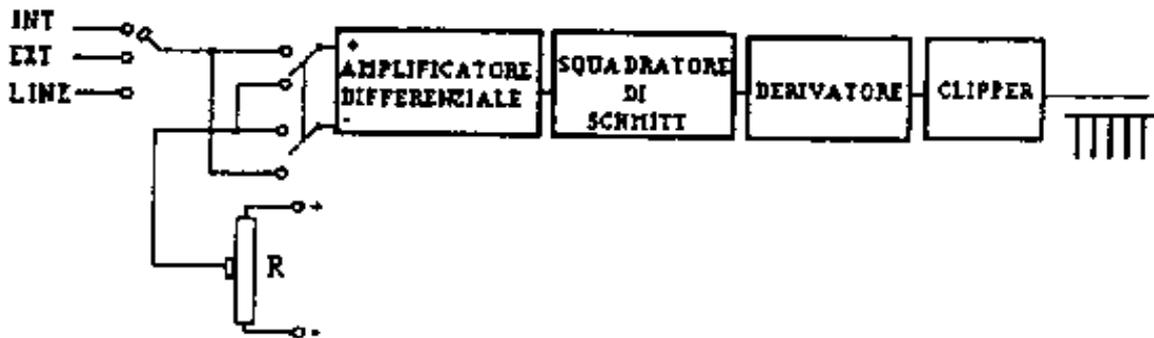
- se $T_r < T_s$, l'immagine scorre verso destra, per cui bisogna aumentare T_r , ruotando in senso orario la manopola **TIME/div**;
- viceversa, se $T_r > T_s$, l'immagine scorre verso sinistra, per cui bisogna diminuire T_r , ruotando in senso antiorario la manopola **TIME/div**.

A questo punto, siamo in grado di identificare le principali caratteristiche del sistema di sincronizzazione:

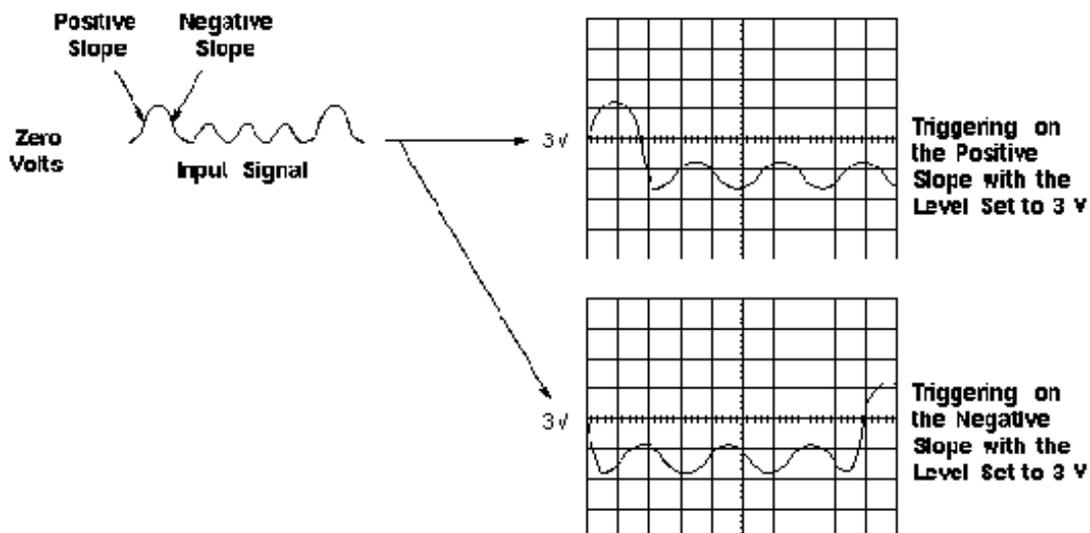
- in primo luogo, dobbiamo avere un legame tra il segnale sotto misura ed il circuito di sincronizzazione, il che si ottiene, come si è visto in precedenza, *derivando* il segnale sul canale Y prima che esso giunga alla linea di ritardo che precede l'amplificatore verticale;
- dal *segnale così derivato* si possono ottenere informazioni sia sulla ampiezza sia sulla pendenza del segnale di ingresso: in particolare, per quanto riguarda la pendenza, basta valutarne il segno (positiva o negativa), mentre la determinazione dell'ampiezza deve essere più precisa; in ogni caso, deve essere possibile individuare in modo quasi univoco un punto qualunque del segnale di ingresso, in modo da poter consentire l'inizio di ciascuna rampa sempre in corrispondenza del punto individuato;
- il segnale derivato, quindi, andrà a pilotare il **circuito di scatto** (o **di trigger**), il quale, mediante un segnale impulsivo, determinerà l'innesco della rampa nel generatore della base dei tempi³.

³ Ad ogni modo, ricordiamo che il trigger può essere sia interno (cioè proveniente dal canale Y come appena descritto) sia esterno (cioè proveniente da un segnale appositamente applicato in ingresso allo strumento) sia di linea (cioè proveniente da un segnale alla frequenza della linea di alimentazione). Tra l'altro, segnaliamo anche che, con la scelta del trigger interno (commutatore in

La figura seguente mostra un semplice schema a blocchi del **circuito di scatto** che pilota il generatore della base tempi:



Notiamo subito, sulla sinistra, il commutatore per la scelta del tipo di trigger (interno, esterno o di linea), posizionato proprio sul trigger interno. Immediatamente a valle del commutatore, c'è un **amplificatore differenziale**: esso fornisce in uscita un segnale ottenuto dalla differenza tra quello proveniente dal canale Y (nel caso di trigger interno) ed una tensione continua regolabile dal pannello mediante la manopola **trigger level**; si tratta cioè del livello di tensione in ingresso in corrispondenza del quale vogliamo che parte la sincronizzazione:

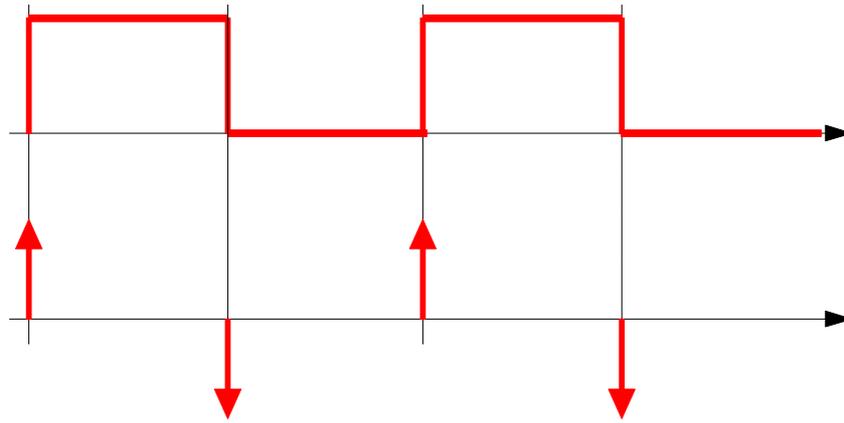


In pratica, la suddetta manopola contribuisce a traslare (in alto o in basso rispetto ad un riferimento fisso e continua) la componente alternata del segnale in uscita dall'amplificatore.

Inoltre, in ingresso all'amplificatore differenziale è predisposto un ulteriore commutatore che consente, invertendo i morsetti di ingresso, di invertire la pendenza del segnale di uscita rispetto a quello di ingresso. Questo consente di regolare la pendenza (**trigger slope**) del segnale di misura sulla quale regolare l'istante di sincronizzazione.

Il segnale in uscita dall'amplificatore pilota un dispositivo **squadratore**, ad esempio un circuito di Schmitt. Questo segnale è utile in quanto il successivo derivatore produce, in risposta, una successione di impulsi alternativamente positivi e negativi:

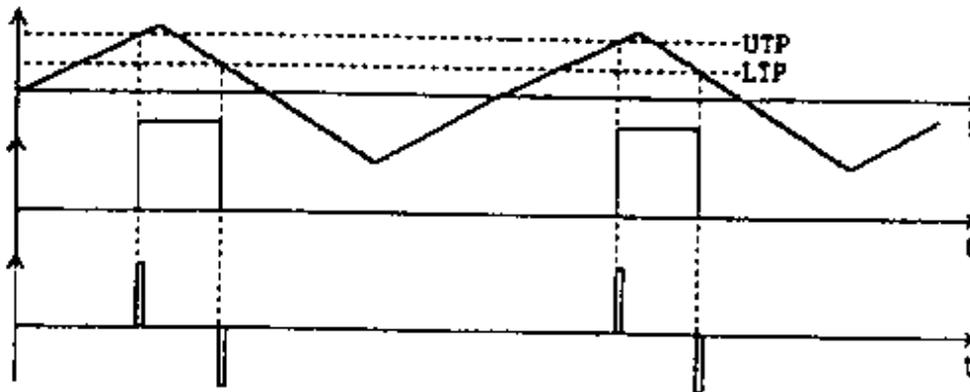
posizione INT), il segnale derivato viene inviato ad un amplificatore, che ha anche la funzione di isolare i sistemi di deflessione verticale ed orizzontale.



Abbiamo dunque due impulsi, uno positivo ed uno negativo, per ogni periodo dell'onda squadrata. Il successivo circuito **clipper** elimina gli impulsi positivi, lasciando solo quelli negativi.

Con questo funzionamento, per ogni periodo del segnale di misura e quando questo ha assunto uno stesso valore ben determinato e con pendenza ben determinata (fissati dalla scelta del *trigger level* e del *trigger slope*), il circuito di sincronizzazione fornisce un impulso negativo che va ad innescare la rampa che dà luogo alla deflessione orizzontale.

Per comprendere bene questi concetti, si consideri una forma d'onda di misura di tipo triangolare; la figura seguente mostra la posizione degli impulsi in uscita dallo squadratore e dal successivo derivatore, il quale ha sostanzialmente il compito di ridurre la durata degli impulsi:

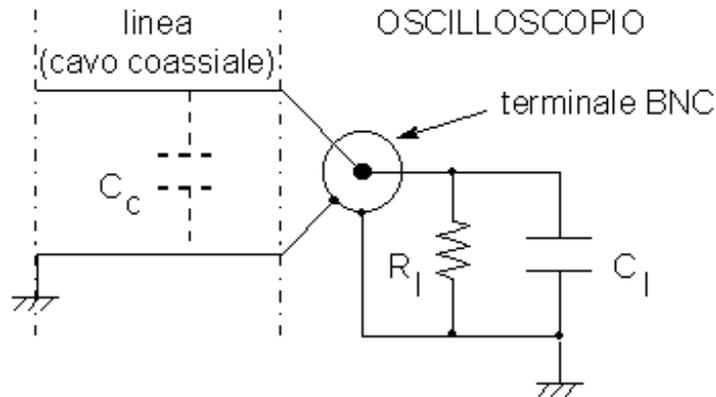


In figura, si è indicato con **UTP** il punto superiore di scatto (*Upper Trigger Point*), cioè quello in cui parte il fronte di salita in uscita dallo squadratore (ed il corrispondente impulso positivo dal derivatore) e con **LTP** il punto inferiore di scatto (*Lower Trigger Point*), in cui parte il fronte di discesa in uscita dallo squadratore (ed il corrispondente impulso negativo dal derivatore).

Spesso, sul circuito di congelamento del generatore base tempi è disponibile un comando per variare il tempo di congelamento t_c : questo serve spesso a facilitare una sincronizzazione altrimenti molto più complessa. In condizioni normali, il comando per il tempo t_c dovrebbe essere settato su **MIN**, ossia appunto per un minimo valore di t_c .

SONDE E SENSORI

Come già osservato in precedenza, per applicare il segnale ai diversi canali dell'oscilloscopio si utilizzano generalmente connettori **BNC**, che consentono di misurare la tensione applicata rispetto al potenziale comune dell'oscilloscopio, che generalmente è posto al potenziale di terra (*grounded*):

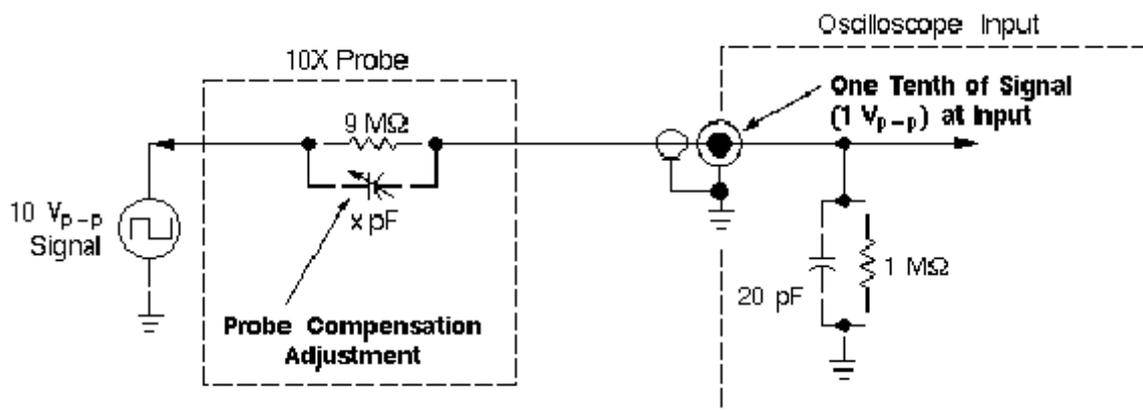


Sappiamo bene che, per non avere alcuna distorsione sul segnale da visualizzare, dobbiamo garantire l'adattamento tra la sorgente del segnale stesso e l'oscilloscopio. A questo scopo, lo strumento è sempre corredato da una serie di **sonde**, ciascuna con proprie caratteristiche, da scegliere di caso in caso.

Oltre alle sonde, di cui parleremo tra un attimo in modo dettagliato, ci sono anche particolari **sensori**, che consentono di estendere l'uso dello strumento anche a grandezze non elettriche: tali sensori convertono sostanzialmente le grandezze da misurare in segnali elettrici ad essi proporzionali e quindi visualizzabili sull'oscilloscopio; nel far questo, ovviamente, i sensori non alterano (se non in maniera minima, dati gli inevitabili *effetti di carico*) le grandezze da misurare e, allo stesso tempo, non alterano nemmeno le prestazioni dell'oscilloscopio, essendo state progettate specificamente per esso.

Divisore passivo di tensione

La sonda più semplice e più diffusa è senz'altro il cosiddetto **divisore passivo di tensione**:



Ne esistono due versioni:

- **versione non attenuante** (caratterizzata dalla sigla **1X**): si tratta di un pezzo di cavo coassiale, di una certa lunghezza, avente ad un estremo un *connettore BNC* (per il collegamento all'oscilloscopio) e all'altro estremo un *terminale a punta*. Con indica la denominazione, questa sonda non introduce alcuna attenuazione sul segnale sotto misura; allo stesso tempo, però, essa presenta una capacità parassita che va a porsi in parallelo all'attenuatore del sistema di deflessione, per cui è opportuno usare questa sonda solo a basse frequenze, in modo da non

esaltare gli effetti di tale capacità; se si lavora a frequenze più alte, invece, dato l'effetto passa-basso introdotto appunto dalla capacità, si corre il rischio di distorcere il segnale sotto misura;

- **sonde compensate** (indicate con la siglia **10X**): queste sonde sono decisamente necessarie quando si compiono misure in un più ampio campo di frequenza; esse, come già detto in precedenza, attenuano il segnale sotto misura di un fattore 10, ma, a prezzo di tale attenuazione, riducono l'effetto della capacità in parallelo alla resistenza di ingresso dell'oscilloscopio, garantendo un migliore comportamento dinamico da parte dello strumento (ossia una maggiore "prontezza" nel seguire segnali in ingresso variabili velocemente).

Sonde attive

Al contrario delle sonde passive descritte nel precedente paragrafo, esistono anche delle sonde attive, che consentono una pre-amplificazione del segnale sotto misura. Queste sonde hanno al loro interno diodi e transistor e risultano perciò molto più costose delle sonde passive; a fronte di questo maggior costo, però, esse estendono molto le capacità di misura dello strumento.

Le sonde attive hanno una impedenza di ingresso $z=R+jX$ molto elevata (il che consente di ridurre al minimo gli effetti di carico sul circuito sotto misura): la parte resistiva R è dell'ordine delle decine di $M\Omega$, mentre è presente una componente capacitiva dell'ordine di qualche pF.

Esse possono anche funzionare da attenuatori passivi, ad esempio nei rapporti 10/1 e 100/1.

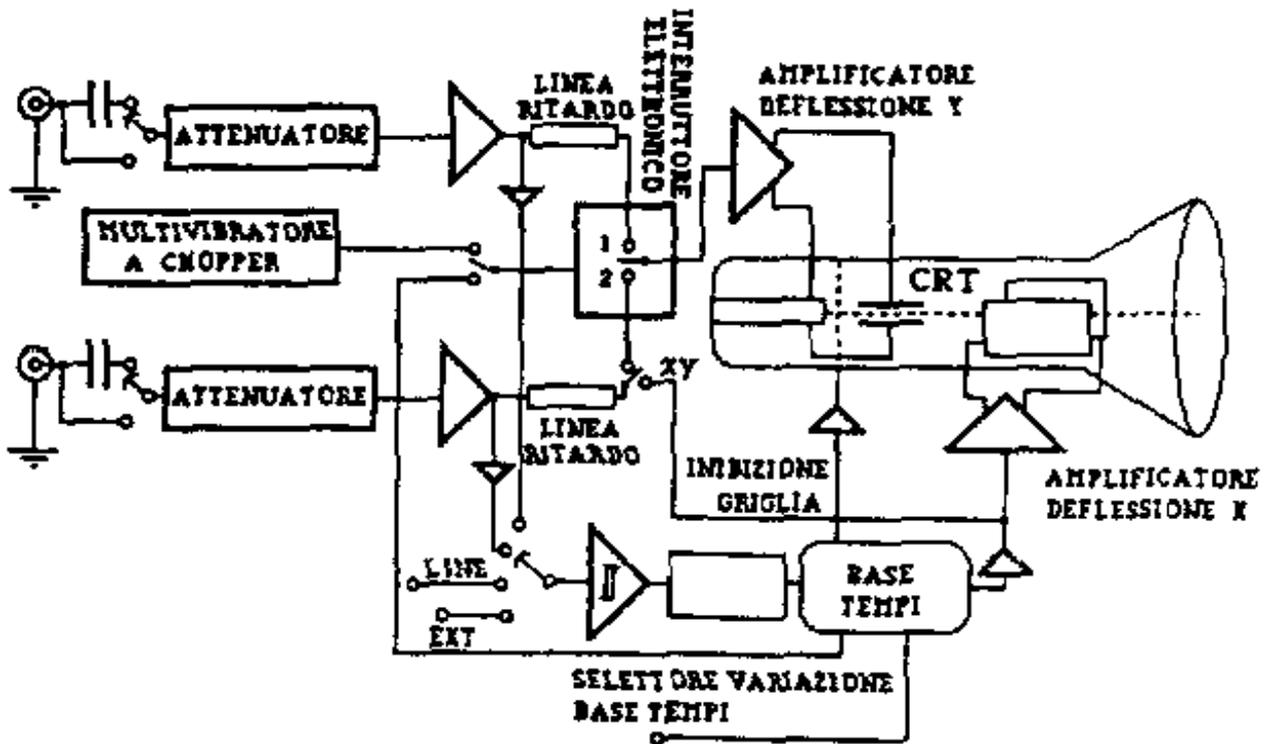
Sonde a pinza

Abbiamo osservato in precedenza che l'oscilloscopio è un tipico dispositivo voltmetrico (lineare), in quanto è predisposto per la misura di tensioni elettriche. quando, però, si vogliono misurare delle correnti, sono disponibili le cosiddette **sonde a pinza**, costituite da un trasformatore di corrente a nucleo separato e mobile. Queste sonde funzionano però solo in regime alternato; volendo invece includere anche la componente continua, sono disponibili **pinze con sensori ad effetto Hall**: in pratica, la pinza va prima aperta e poi bisogna chiuderla in modo che contenga al suo interno il conduttore percorso dalla corrente che si vuole misurare.

OSCILLOSCOPI A DOPPIA TRACCIA

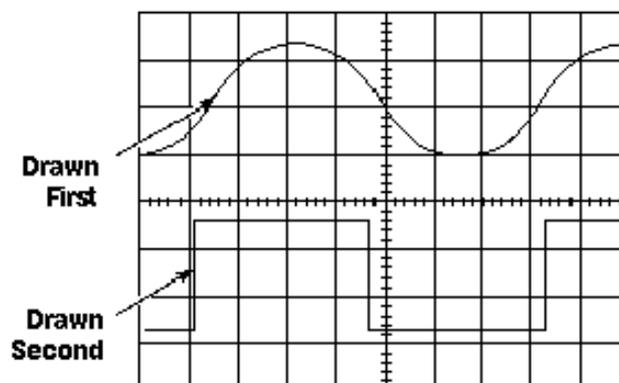
Gli attuali oscilloscopi, nella versione più diffusa, sono quelli cosiddetti **a doppia traccia**: essi dispongono di un solo cannone elettronico, come visto fino ad ora, ma anche di un **interruttore elettronico** che permette di collegare alternativamente, all'amplificatore verticale principale, i diversi canali di ingresso, allo scopo di seguire sullo schermo gli andamenti di segnali distinti.

La figura seguente mostra uno schema a blocchi generale di un oscilloscopio a doppia traccia:



Si nota subito che lo strumento presenta due canali assolutamente identici, che possono essere collegati all'amplificatore verticale principale tramite il suddetto interruttore elettronico. Quest'ultimo può funzionare sostanzialmente in 3 modi:

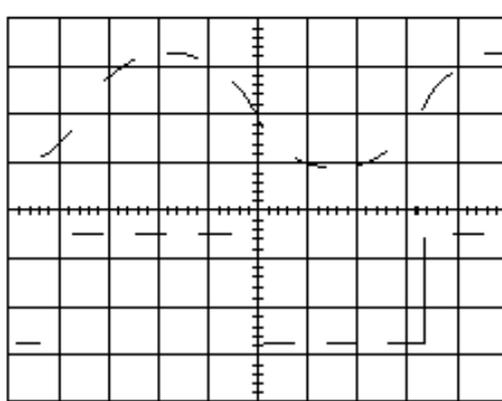
- nel modo più semplice, esso collega un unico canale, per cui vediamo sullo schermo solo la traccia relativa a tale canale;
- nel modo **ALTERNATE**, esso collega alternativamente i due canali ed è pilotato dal generatore della base tempi: in questo modo di funzionamento, le placchette di deflessione verticale sono pilotate, in sequenza, dal segnale proveniente dal canale A per un tempo di spazzolamento del dente di sega e dal segnale sul canale B per il successivo dente di sega; in tal modo, ad ogni scansione dello schermo sarà tracciato il diagramma continuo di un solo segnale:



Alternate Mode: Channel 1 and Channel 2 drawn alternately

- nel modo **CHOPPED** (*modulazione*), infine, l'interruttore collega ancora alternativamente i due canali, ma è pilotato da un multivibratore a chopper; in questo caso, all'interno della

singola rampa di spazzolamento, le placchette verticali vengono pilotate alternativamente dai segnali sui due canali:



Chop Mode: Segments of Channel 1 and Channel 2 drawn alternately

Visualizzazione alternata

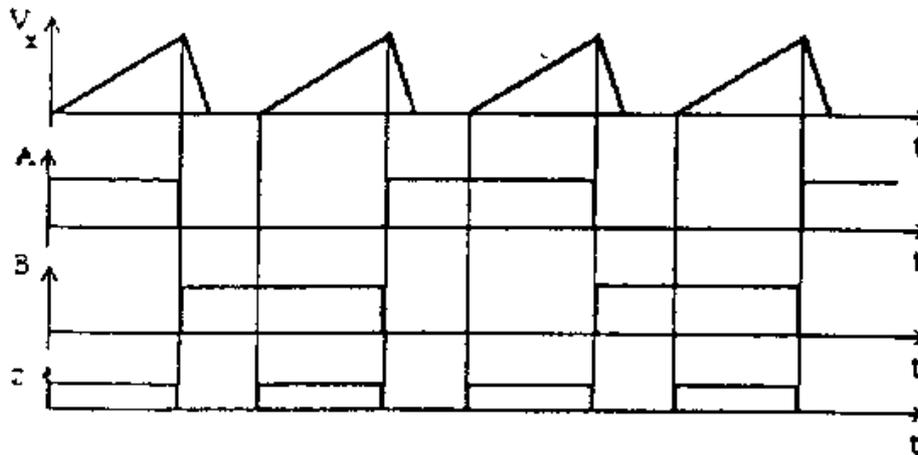
La visualizzazione in ALTERNATE viene usata tipicamente per la visualizzazione dei segnali ad alta frequenza, in quanto per segnali a bassa frequenza si manifestano sullo schermo fenomeni di tremolio e di lampi di luce: il motivo è che la traccia di un segnale sullo schermo dovrebbe permanere per un tempo superiore a quello consentito dalla normale persistenza dei fosfori.

E' molto importante il problema della sincronizzazione nel funzionamento in ALTERNATE:

- in primo luogo, è evidente che la velocità dell'interruttore elettronico è sincronizzata con la frequenza della rampa;
- in secondo luogo, per quanto riguarda il circuito di trigger (che, ricordiamo, ha il compito di far partire le varie rampe di spazzolamento in successione), esso potrebbe essere comandato alternativamente dai segnali provenienti dai due canali A e B, ma in questo caso risulterebbe difficile il rispetto della relazione di fase tra loro; al contrario, per assicurare il rispetto della relazione di fase dei due segnali, il circuito di scatto deve essere comandato da un solo segnale⁴: ovviamente, in questo caso il sincronismo è assicurato per entrambi i segnali solo se sono isofrequenziali o comunque in rapporto interno e costante tra le frequenze.

Nella figura seguente sono riportati i tempi di attivazione nel funzionamento in alternata dei due canali (A e B) e del cannone elettronico (z), in funzione dei tempi che caratterizzano il dente di sega (V_x):

⁴ Ricordiamo che la commutazione del segnale che comanda il sistema di sincronizzazione avviene leggermente in anticipo rispetto a quella dell'interruttore elettronico, durante il tempo di congelamento (cioè tra la fine di una rampa e l'inizio della successiva).



Si nota quanto segue:

- durante la prima rampa viene riportato sullo schermo l'andamento del segnale sul canale A;
- successivamente, il pennello elettronico viene interdetto fino all'inizio della successiva rampa, durante la quale viene diagrammato il segnale sul canale B;
- il ciclo si ripete poi periodicamente.

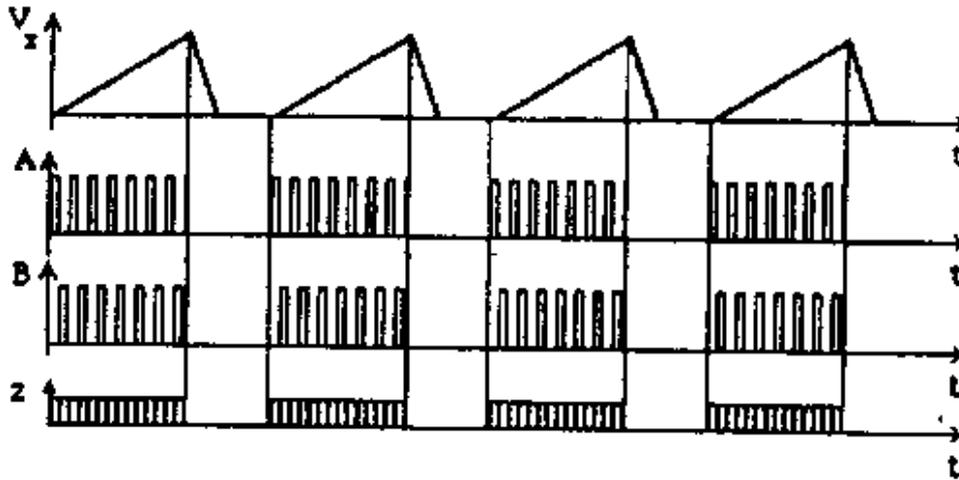
Visualizzazione in modulazione

Nel funzionamento in modulazione (CHOPPED), l'interruttore elettronico è pilotato da un cosiddetto **oscillatore a chopper**: quest'ultimo permette la commutazione sui due canali ad una frequenza (f_C), dell'ordine di diverse centinaia di kHz, del tutto indipendente dalla frequenza del generatore della base tempi. Quindi, in questo modo di funzionamento, noi vediamo sullo schermo i due segnali, ciascuno per un tempo pari ad $1/f_C$.

E' evidente che il valore di f_C influisce sulla visualizzazione: se f_C è molto più grande della frequenza di spazzolamento (f_{sp}), il numero di "segmentini" riservati a ciascun segnale è molto elevato e quindi vediamo una traccia pressoché continua sullo schermo; al contrario, se f_C è confrontabile con la frequenza di spazzolamento, allora il numero di "segmentini" diminuisce e la visualizzazione appare discontinua; in questo caso, è preferibile ricorrere alla visualizzazione in alternata.

Per quanto riguarda gli impulsi di sincronismo, anche in questo caso sono ottenuti dal segnale proveniente da un solo canale: questo, come detto prima, garantisce la relazione di fase, ma non il sincronismo su entrambi i canali.

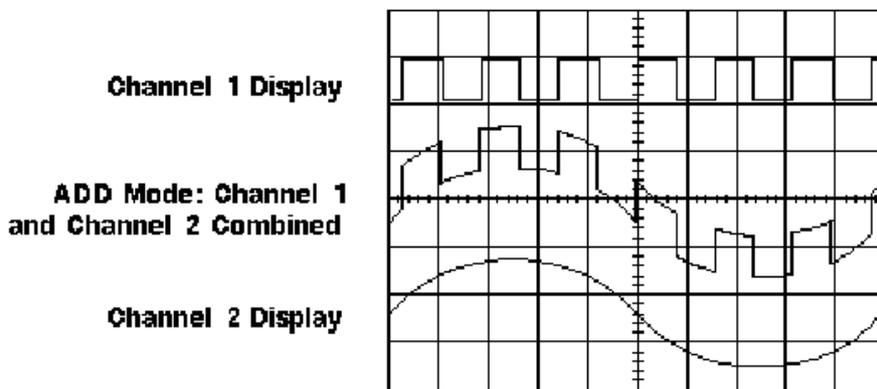
Un altro aspetto importante è quello di impedire che il pennello elettronico illumini lo schermo nel passaggio da un segnale all'altro; è necessario perciò interdire il pennello elettronico durante il tempo di transizione da un canale all'altro. questo è ben evidenziato nella figura seguente, dove riportiamo ancora una volta i tempi di attivazione nel funzionamento dei due canali (A e B) e del cannone elettronico (z), in funzione dei tempi che caratterizzano il dente di sega (V_x):



Operazioni sui canali

Spesso, un oscilloscopio a doppia traccia permette di visualizzare un segnale che sia una opportuna combinazione dei due segnali in ingresso; sono infatti disponibili un circuito sommatore e degli interruttori per l'inversione della polarità dei segnali, il che significa che, oltre ai canali A e B (visualizzati singolarmente oppure in alternata oppure in modulazione), è possibile anche visualizzare i canali A+B, A-B, B-A e -A-B.

Nella figura seguente è per esempio mostrata la forma d'onda ottenuta come somma o differenza di due canali, sui quali sono applicati un'onda quadra (canale 1) ed una senoide (canale 2):



Oscilloscopi a doppio fascio

Esiste un altro tipo di oscilloscopi, detti **a doppio fascio**, nei quali è possibile visualizzare due distinti segnali sullo schermo: questi oscilloscopi hanno uno schema simile a quello visto per gli oscilloscopi a doppia traccia, con la differenza che manca l'interruttore elettronico e, al contempo, sono presenti due sistemi di deflessione verticale (ciascuno composto dall'amplificatore verticale in controfase, da due placchette deflettrici verticali e dal proprio cannone elettronico). Il vantaggio di questa soluzione realizzativa è quello di poter visualizzare contemporaneamente segnali di natura anche molto diversa, ad esempio due sinusoidi a frequenza molto diversa (cosa che non è possibile fare negli oscilloscopi a doppia traccia); lo svantaggio è ovviamente nel corso e nelle dimensioni decisamente maggiori.

Autore: **SANDRO PETRIZZELLI** (e-mail: sandry@iol.it; url: <http://users.iol.it/sandry>)