

Stages Invernali
29 Gennaio - 31 Maggio 2008

Caratterizzazione di dispositivi diagnostici per acceleratori di particelle

V. Bonanni – D.Muzi (I.T.I.S. Giovanni XXIII, Roma)
L. Zanni (I.T.I.S. G. Lattanzio, Roma)

Tutori: O. Coiro – D. Pellegrini
Divisione Acceleratori – Servizio SELCED

Prefazione

Lo stage e' rivolto a studenti del IV anno della Scuola Media Superiore e si propone di illustrare alcune applicazioni degli strumenti e delle tecniche di misura utilizzate nel progetto e nella gestione dei sistemi elettronici di diagnostica impiegati nell'acceleratore di particelle DAFNE, installato nei Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN.

Obiettivo finale e' la caratterizzazione di un monitor di posizione e di corrente del fascio di particelle attraverso l'utilizzo degli strumenti di misura normalmente impiegati per le attività svolte nel laboratorio di elettronica SELCED della Divisione Acceleratori.

Il programma prevede lezioni teoriche ed esercitazioni pratiche, sono descritti i vari principi di funzionamento di oscilloscopi analogici e digitali, generatori di segnali, spectrum analyzer e network analyzer con l'integrazione di esercitazioni appropriate svolte dagli stessi studenti per lo studio delle grandezze di interesse e delle tecniche di misura utilizzate per caratterizzare i dispositivi impiegati nella diagnostica degli acceleratori.

Vengono analizzate le metodiche sull'acquisizione dei dati, descritte le tecnologie sul principio di funzionamento di alcuni dispositivi utilizzati nell'acceleratore DAFNE con particolare riguardo allo studio dei materiali e della strumentazione utilizzata.

I Tutori

calendario incontri

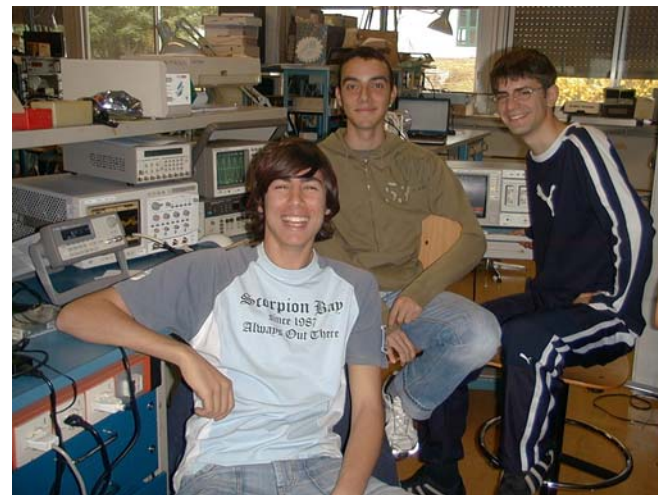
1° incontro	29 gennaio
2° incontro	20 febbraio
3° incontro	18 marzo
4° incontro	2 aprile
5° incontro	7 aprile
6° incontro	22 aprile
7° incontro	9 maggio
8° incontro	13 maggio
9° incontro	23 maggio

In questo stage invernale abbiamo studiato il funzionamento della strumentazione utilizzata in un tipico laboratorio di elettronica dell' INFN per l'acquisizione dei segnali della diagnostica per acceleratori di particelle.

Durante i vari incontri ci sono stati illustrati strumenti diversi come l'oscilloscopio digitale (gia' introdotto a scuola), generatori di impulsi, di segnali e il riflettometro; ci e' stata spiegata la loro composizione, le caratteristiche fondamentali e il loro funzionamento. Tutto questo attraverso esercitazioni e misure effettuate nel laboratorio di elettronica: abbiamo imparato come sia fondamentale effettuare collegamenti propri tra loro stessi ed il resto della strumentazione e ad individuare lo strumento piu' adatto ogni qual volta c'e' la necessita' di misurare segnali con caratteristiche e tipologie diverse.

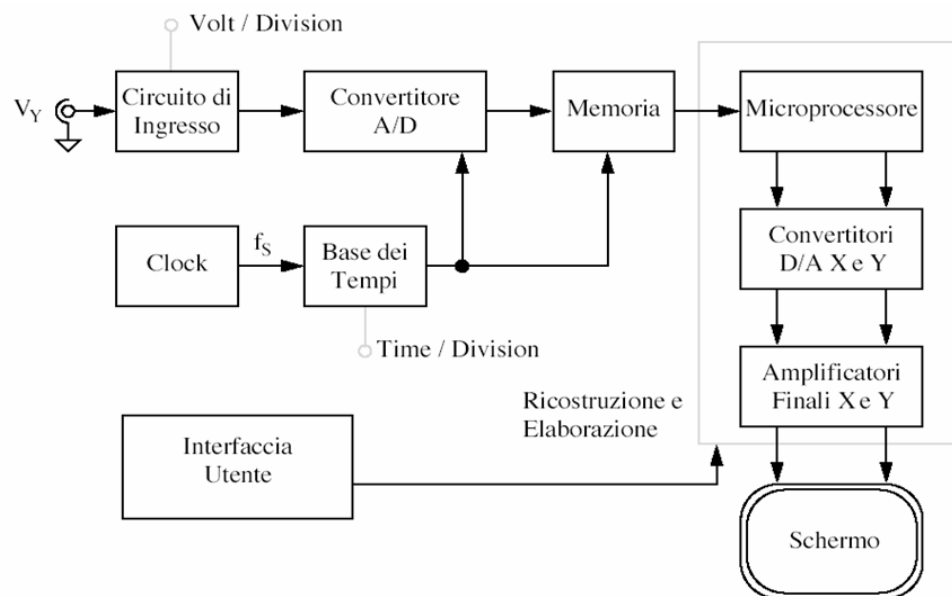
Questa esperienza, utilissima dal punto di vista delle conoscenze tecniche e professionali, e' servita, seppur da osservatori, anche come approccio al mondo del lavoro, sensibilmente diverso da quello della scuola che meglio conosciamo.

Ringraziamo l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e le nostre Scuole per l'opportunita' offertaci, incoraggiandoli a sostenere questa iniziativa e permettere nel futuro questo tipo di esperienza anche ad altri studenti.



* L' Oscilloscopio Digitale *

L' Oscilloscopio Digitale è uno strumento che permette di visualizzare l'andamento di un segnale elettrico in funzione del tempo. La grandezza visualizzata è la tensione anche se, introducendo un opportuno convertitore o trasduttore è possibile visualizzare ogni genere di grandezza.

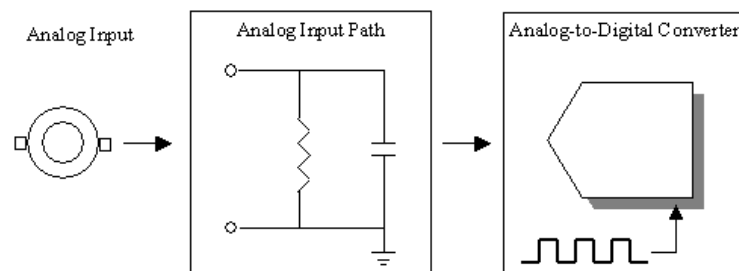


La peculiarità di un Oscilloscopio Digitale è il convertitore A/D che permette di disporre di un segnale digitale il quale, oltre ad essere visualizzato, può essere salvato in memoria ed eventualmente elaborato o analizzato.

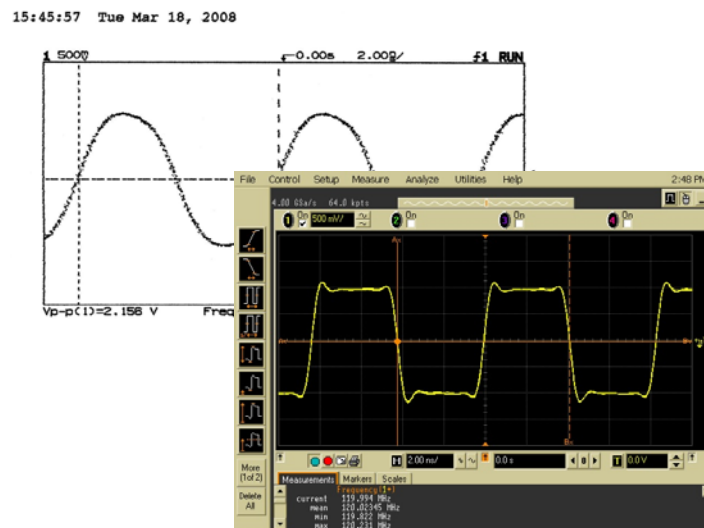
Il convertitore analogico-digitale del sistema di acquisizione dati campiona il segnale a intervalli di tempo determinati convertendo il segnale di tensione continuo in una serie di valori digitali chiamati punti di campionamento. Nella sezione orizzontale un segnale di clock determina quando il convertitore A/D prende un campione. La velocità di questo clock viene chiamata velocità di campionamento e viene indicata in campioni al secondo.

Circuito d'Ingresso e Banda Passante Analogica

La prima cosa che un segnale incontra, quando entra in un oscilloscopio, è il *circuito d'ingresso*. Esso adatta il livello del segnale d'ingresso a quello di lavoro dell'ADC in modo da ottimizzarne la conversione. Inoltre consente di avere un'alta impedenza d'ingresso compatibile con quella delle sonde passive o eventualmente di 50Ω tipica delle sonde attive e delle linee di trasmissione coassiali di uso più comune.

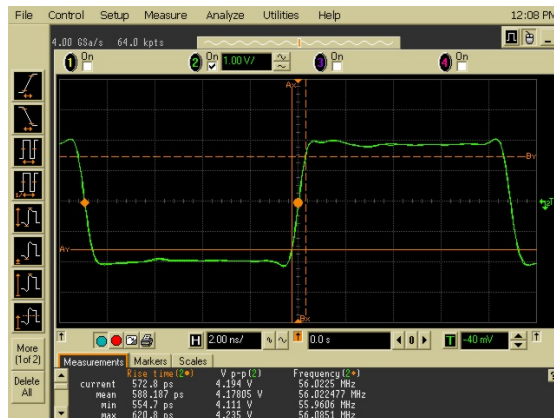
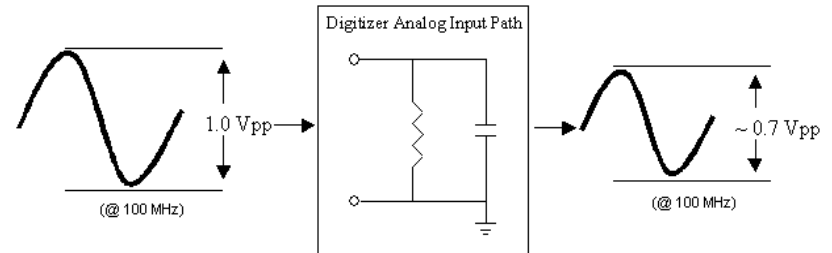
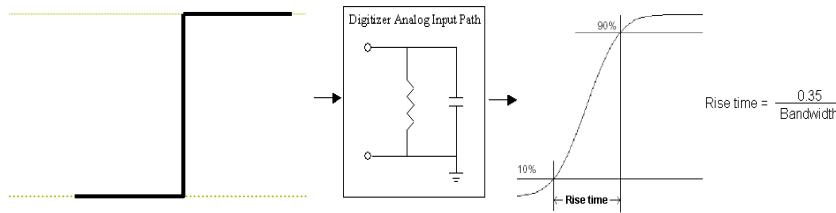


Tuttavia il circuito d'ingresso non ha una banda passante illimitata e ciò può tagliar via le componenti armoniche a più alta frequenza contenute in un segnale, fornendocene una visione distorta. E' quello che accade in questo esempio in cui osserviamo un' onda quadra a 120MHz rispettivamente con oscilloscopi aventi banda passante rispettivamente di 150MHz e 600 MHz.



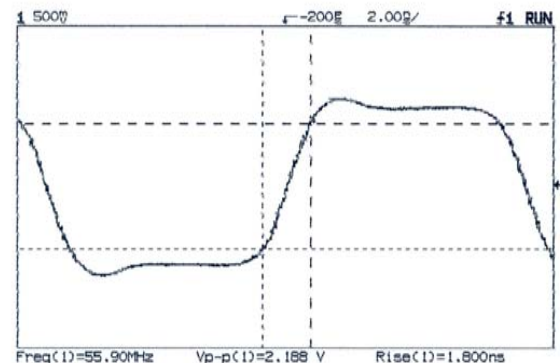
Il passo iniziale, nella scelta di un oscilloscopio quindi, è determinare la Larghezza di Banda richiesta per una particolare applicazione.

Inoltre una limitata larghezza di banda del circuito d'ingresso può ridurre l'ampiezza nella visualizzazione di un segnale e aumentare il *tempo di salita* nella visualizzazione di un gradino, come verificato negli esempi seguenti.



Oscilloscopio Agilent infinium

$$\text{Rise Time} = \frac{0,35}{600\text{MHz}} = 580\text{ps}$$

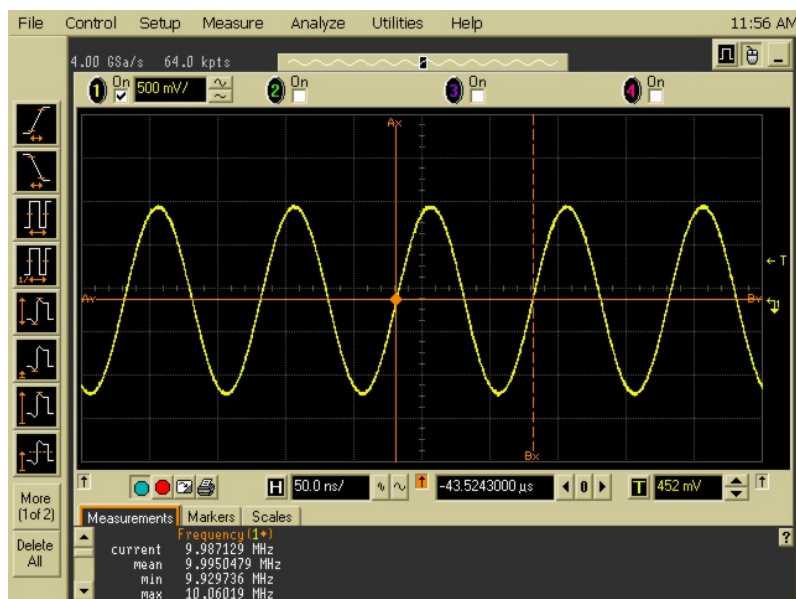
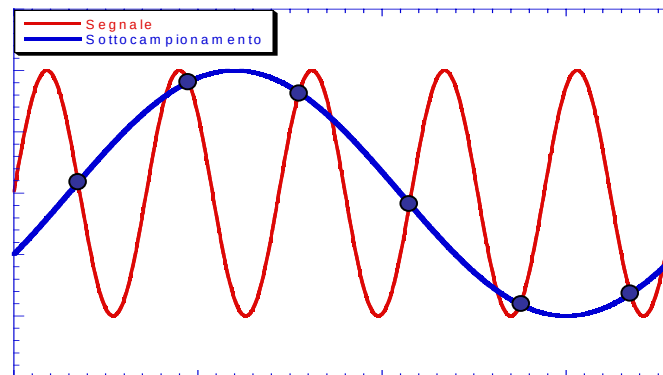


Oscilloscopio HP 54602B

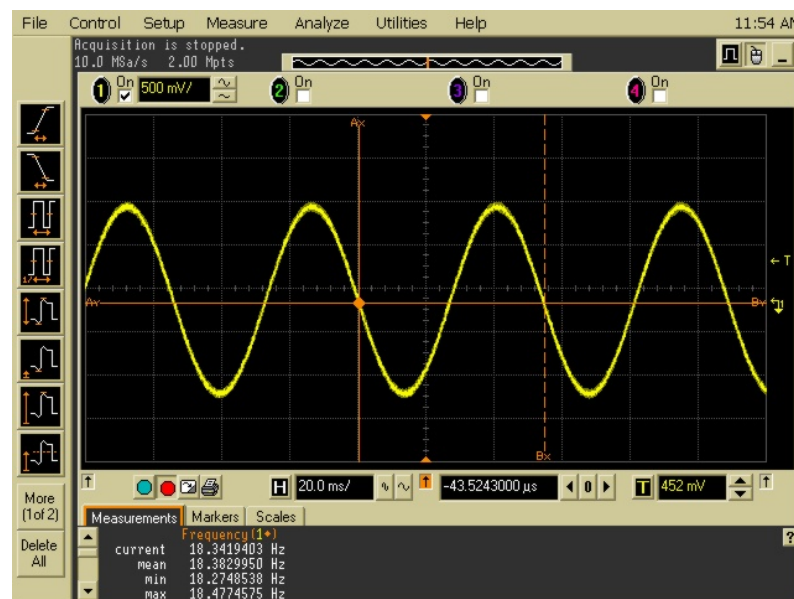
$$\text{Rise Time} = \frac{0,35}{180\text{MHz}} = 1,8\text{ns}$$

Il Teorema di Shannon – Nyquist

Il Teorema di Shannon – Nyquist afferma che, per non perdere informazioni, il processo di campionamento deve avvenire ad una frequenza almeno doppia rispetto a quella più alta contenuta nel segnale da convertire. Se ciò non avviene si rischia di sottocampionare il segnale.



Segnale corretto

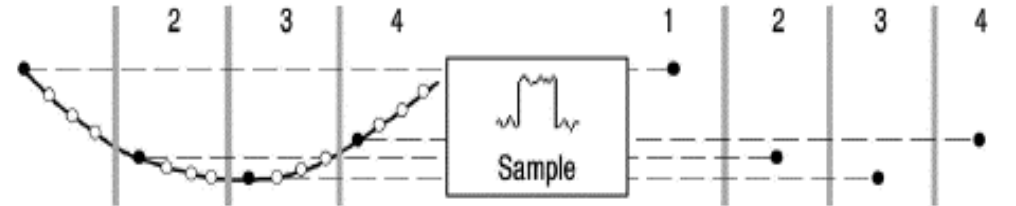


Segnale sottocampionato

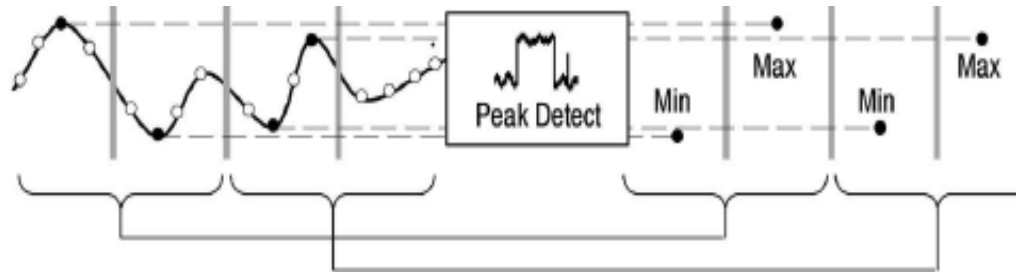
Modalità di Acquisizione

La modalità di acquisizione gestisce l'immagazzinamento dei dati in memoria. Come spesso accade, i dati campionati sono in quantità superiore a quelli che possono essere memorizzati e comunque visualizzati. Occorre quindi farne una selezione.

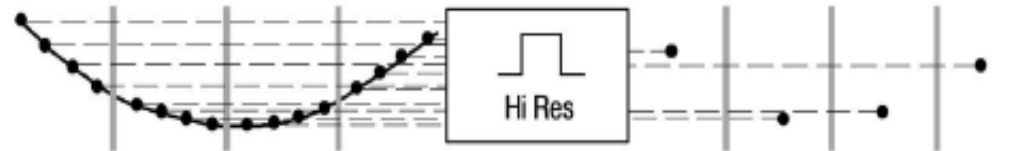
La modalità **Sample** (Campione) trattiene un punto campionato da ogni intervallo di acquisizione.



La modalità **Peak Detect** (Individuazione picco) utilizza il campione più alto e quello più basso contenuti in due intervalli di acquisizione consecutivi.



La modalità **Hi Res** (Alta risoluzione) calcola la media di tutti i campioni per ogni intervallo di acquisizione.



$$\text{intervallo di acquisizione} = \frac{\text{durata di registrazione}}{\text{numero di punti in registrazione}}$$

La “**durata di registrazione**” coincide con l'intervallo di tempo visualizzato sulla scala orizzontale dello schermo ed è determinata dalla Base dei Tempi.

Il “**numero di punti in registrazione**” è il numero di punti che può essere contenuto in memoria.

L’ “**intervallo di acquisizione**” è quell'intervallo di tempo per il quale, tra i punti campionati provenienti dall'ADC, dobbiamo scegliere e salvare in memoria soltanto uno di essi.

Real Time Sampling

Campionamento in tempo reale con Interpolazione

Il metodo standard di campionamento in un oscilloscopio digitale è il campionamento in tempo reale: l'oscilloscopio cattura e riunisce un sufficiente numero di punti per ricostruire il segnale. Questo tipo di campionamento è l'unico utilizzabile per analizzare segnali transitori o non ripetitivi..

Gli oscilloscopi utilizzano la interpolazione per poter visualizzare segnali che sono troppo veloci rispetto alla velocità di campionamento.

Esistono due tipi di interpolazione:

Lineare: I punti di campionamento vengono uniti con una linea retta.

Sinusoidale: Connette i punti di campionamento con una curva secondo un processo matematico. Di questa forma i punti intermedi si calcolano per riempire gli spazi tra i punti reali di campionamento. Usando questo sistema è possibile visualizzare segnali con grande accuratezza anche disponendo di un limitato numero di punti di campionamento.

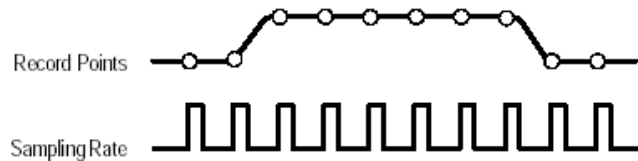
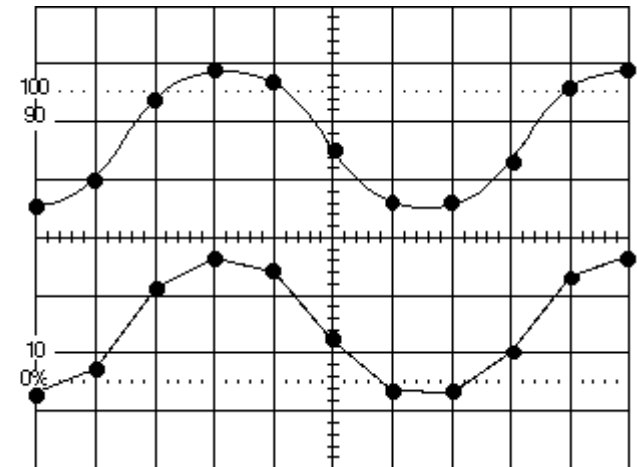


Figure 3-13: Real-Time Sampling

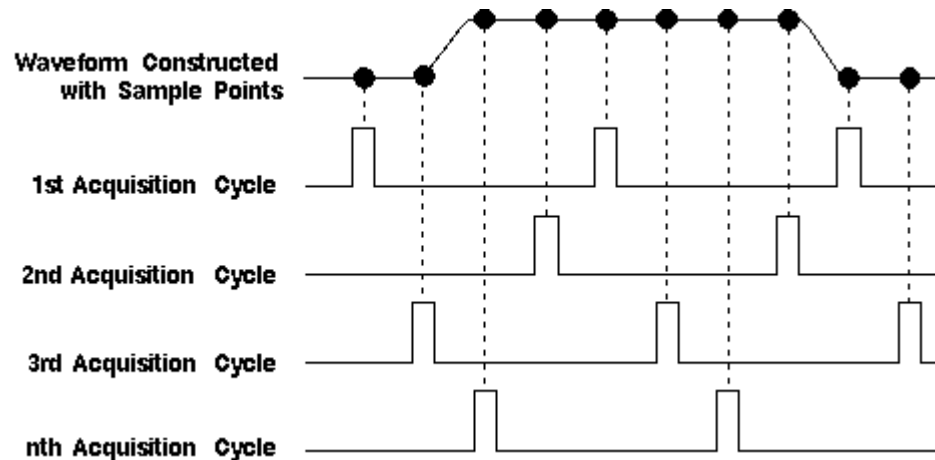
Sine Wave Reproduced
using Sine Interpolation

Sine Wave Reproduced
using Linear Interpolation



Equivalent Time Sampling

Alcuni oscilloscopi digitali utilizzano questo tipo di campionamento. Vengono impiegati per lo studio e la visualizzazione di segnali aventi frequenze molto elevate a condizione che presentino forme costanti nel tempo. Si tratta di ricostruire un segnale ripetitivo catturando una piccola parte del segnale in ogni periodo. Questi strumenti provvedono a campionare tratti di segnale da analizzare, presi in periodi successivi, in modo da poter ricostruire fedelmente il segnale ad una frequenza inferiore di quella reale e quindi poterlo visualizzare mediante un normale sistema a CRT.

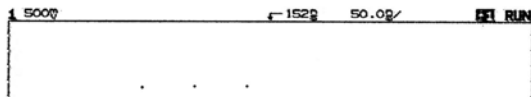


(Esercitazioni) Real time e Equivalent Time

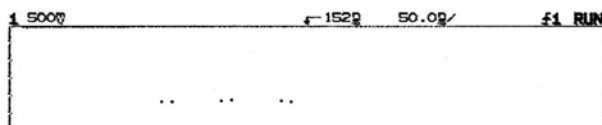
- Nella modalità Real Time l'oscilloscopio immagazzina in memoria in un'unica acquisizione tutti i punti necessari per rappresentare la forma d'onda.

Ciò è utile per segnali non ripetitivi ma limita la velocità di acquisizione a quella dell'ADC (come si vede dall'esempio a lato in cui l'oscilloscopio non riesce ad acquisire punti più vicini di 50ns).

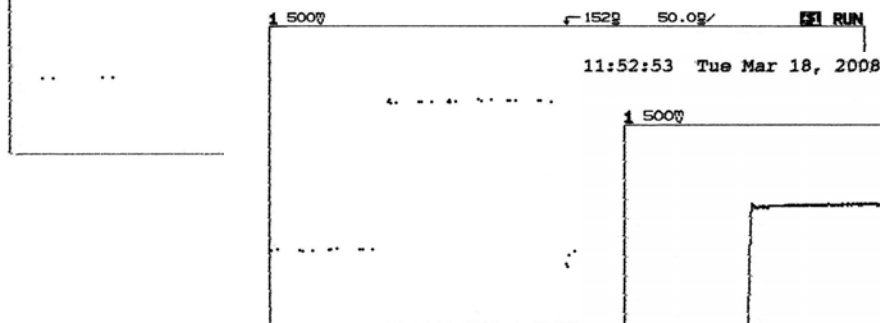
11:37:06 Tue Mar 18, 2008



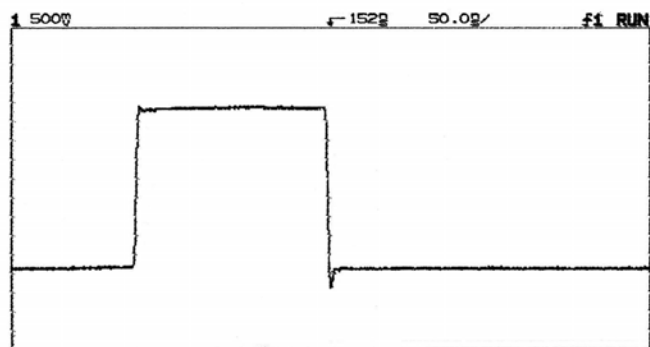
11:38:03 Tue Mar 18, 2008



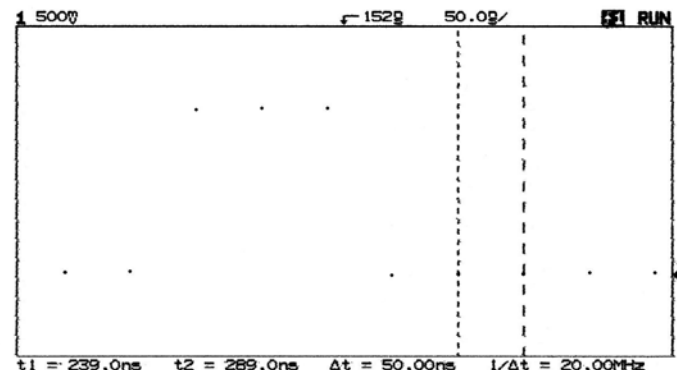
11:51:58 Tue Mar 18, 2008



11:52:53 Tue Mar 18, 2008



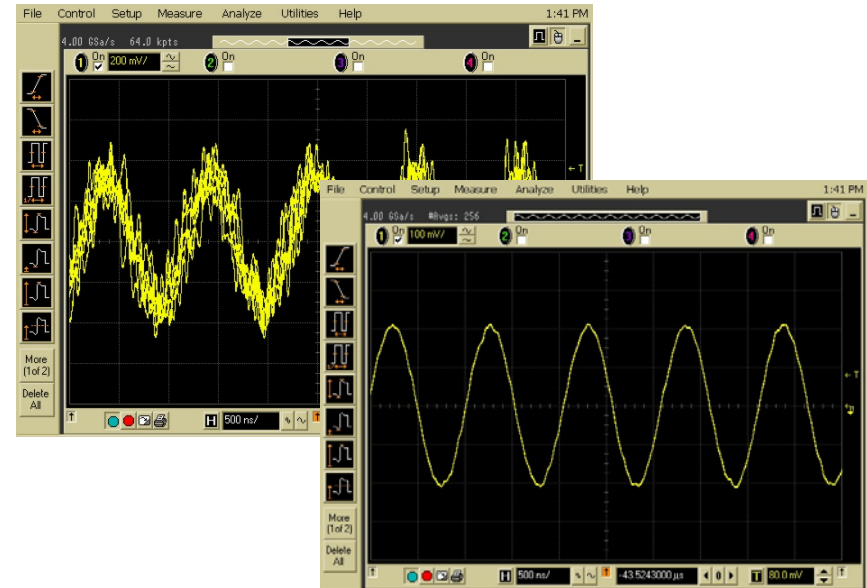
11:33:55 Tue Mar 18, 2008



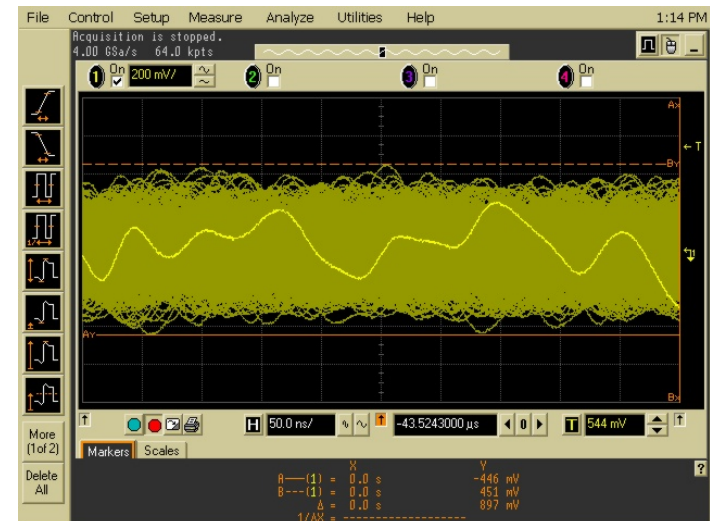
- La modalità Equivalent Time è utilizzata per forme d'onda ripetitive. Con questo metodo l'oscilloscopio aggiunge ai punti memorizzati nella prima acquisizione quelli delle acquisizioni successive raggiungendo così, virtualmente, una velocità di acquisizione più elevata.

Average e Persistenza infinita

Nella modalità average (media) l'oscilloscopio calcola il valor medio, per ogni punto di registrazione, nel corso di più acquisizioni. Questa modalità è utile, ad esempio per estrarre un segnale dal rumore di fondo.



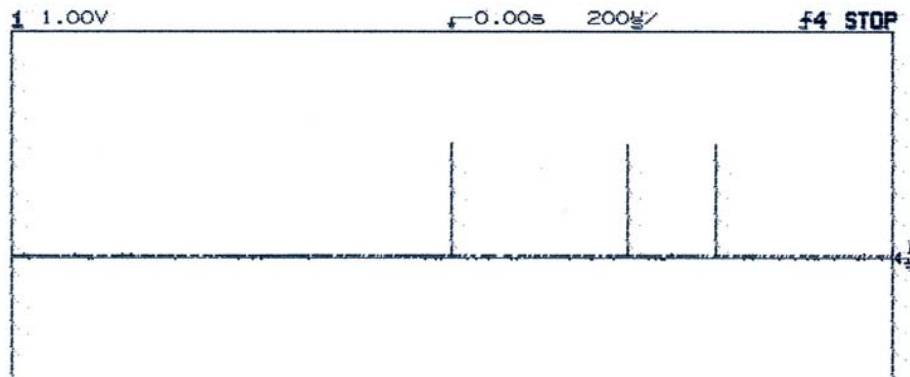
Nella modalità persistenza infinita l'oscilloscopio sovrappone sullo schermo il risultato di più acquisizioni. Questa modalità è utile, ad esempio per valutare l'ampiezza massima di un segnale non ripetitivo (nel nostro caso rumore bianco).



Modalità Peak Detect

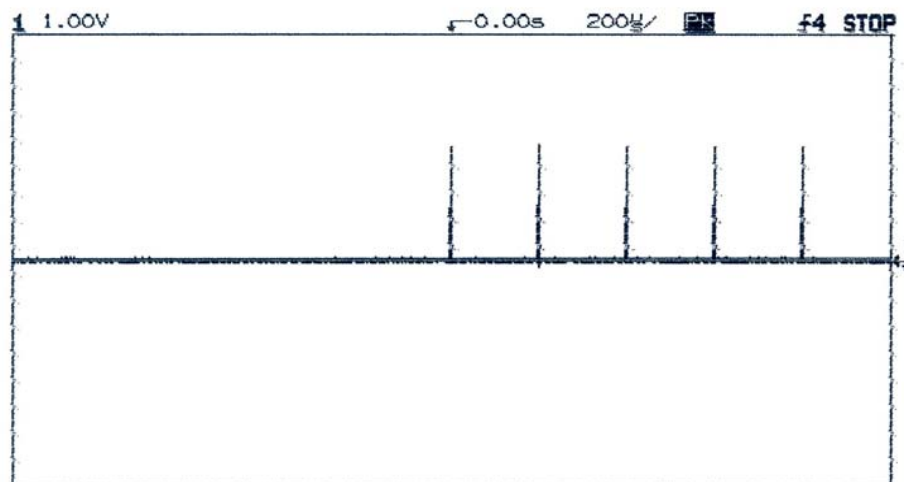
In questo esempio si vede come nella modalità Peak Detect si riesca a visualizzare correttamente un treno di 5 impulsi da 200ns su una durata di registrazione di 2ms.

11:32:14 Mon Apr 7, 2008



Sample

11:34:09 Mon Apr 7, 2008



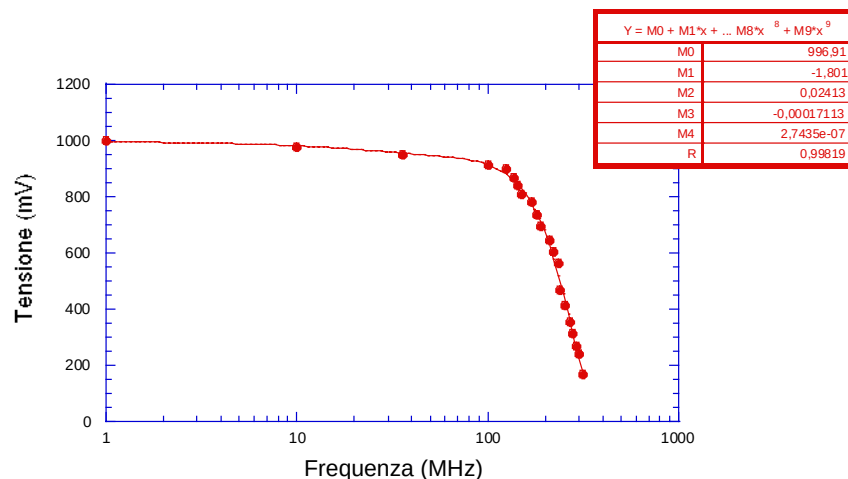
Peak_Detect

Rilevazione della banda passante analogica

La banda passante analogica è definita come l'intervallo di frequenze all'interno del quale l'ampiezza del segnale visualizzato si riduce al 70.7% del segnale applicato per un'onda sinusoidale (- 3 dB su scala logaritmica), in pratica ci dice quale gamma di frequenze l'oscilloscopio misura esattamente senza arrecare distorsioni al segnale d'ingresso.

f (MHz)	V (mV)
1	1000
10	978
36	950
100	916
124	901
138	870
143	840
150	810
170	780
180	735
190	695
210	645
220	603
235	563
239	467
255	415
270	357
280	315
290	270
300	243
315	170

Banda passante oscilloscopio HP 54602B

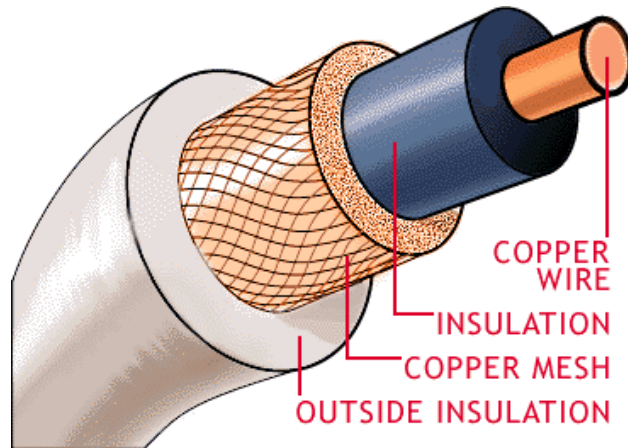


Il grafico rappresenta l'attenuazione che subisce il segnale al variare della frequenza.

Mediante un generatore di segnale (HP 8656B) abbiamo applicato all'ingresso di un oscilloscopio digitale (HP 54602B) un segnale sinusoidale di ampiezza costante pari a 1V e frequenza iniziale 1 MHz. All'aumentare della frequenza si nota che l'ampiezza del segnale visualizzato resta pressoché costante fino a un determinato valore di frequenza frequenza di taglio (frequenza in corrispondenza della quale il segnale visualizzato risulta il 70% in ampiezza di quello in ingresso). Superato questo valore, l'ampiezza del segnale ha un andamento decrescente tendente a 0. La frequenza di taglio dell'oscilloscopio preso in esame risulta, da queste misure, essere circa 180 MHz (150 MHz è quella dichiarata dal costruttore).

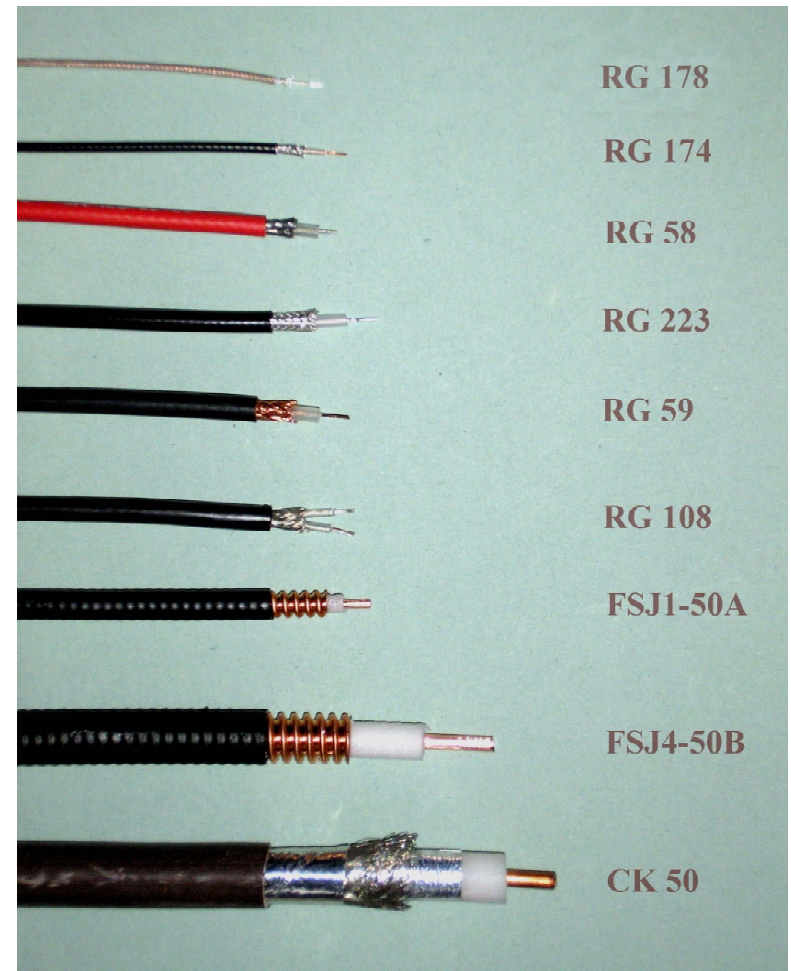
* Il trasporto del segnale *

Per la trasmissione da breve distanza di impulsi elettrici si usano cavi coassiali.



Un cavo coassiale è una struttura cilindrica flessibile, il cui diametro è dell'ordine del centimetro o meno, formata da un filo interno conduttore, di solito di rame, coassiale con un cilindro tubolare esterno anch'esso metallico, costituito di solito da una calza di sottili fili di rame, essendo lo spazio fra i due conduttori riempito di un dielettrico omogeneo flessibile, usualmente realizzato con materiale plastico.

I cavi utilizzati in RF hanno una impedenza caratteristica di 50 Ohm e dovrebbero essere caratterizzati da un'attenuazione ridotta e da un notevole grado di schermatura.



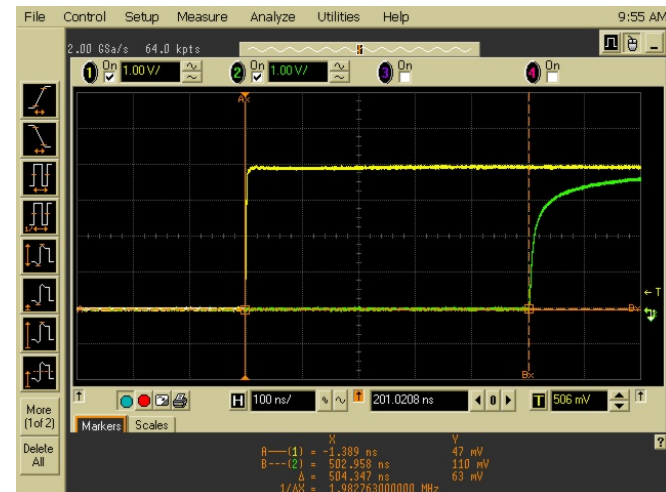
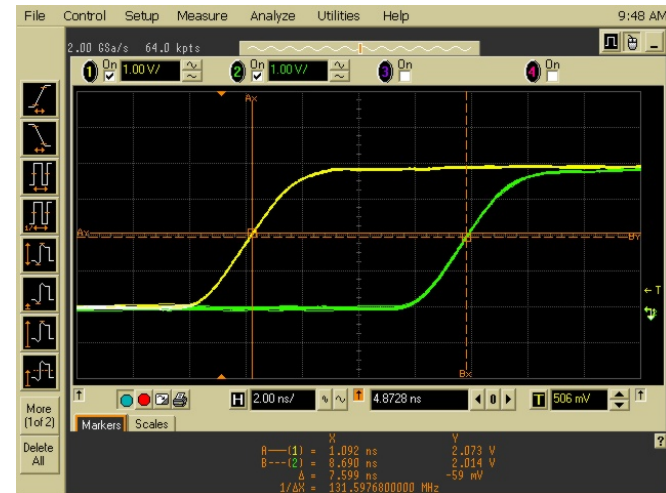
Misura del ritardo e della distorsione introdotti da un cavo coassiale su un segnale a gradino

Abbiamo misurato la lunghezza di due cavi coassiali RG223 attraverso il ritardo da essi introdotto su un segnale a gradino.

$$\text{lunghezza cavo 1} = \frac{\text{ritardo introdotto dal cavo 1}}{\text{ritardo/m}} = \frac{7,599 [\text{ns}]}{5 [\text{ns/m}]} \cong 1,52 \text{m}$$

$$\text{lunghezza cavo 2} = \frac{\text{ritardo introdotto dal cavo 2}}{\text{ritardo/m}} = \frac{504,35 [\text{ns}]}{5 [\text{ns/m}]} \cong 100,87 \text{m}$$

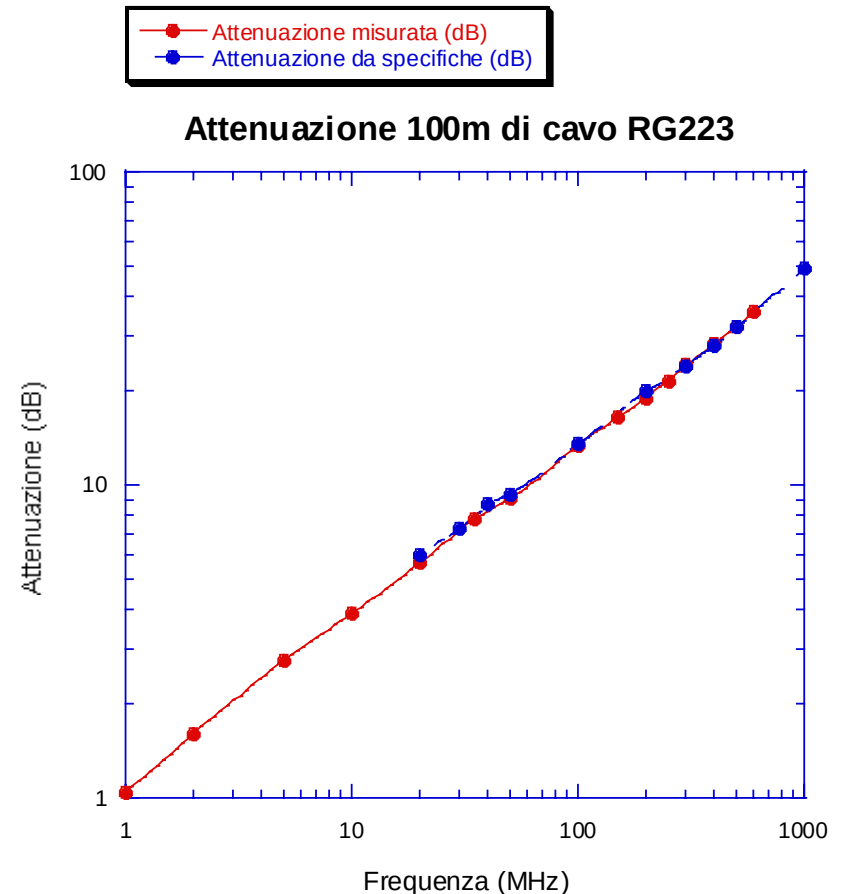
In questo esempio si nota anche la distorsione (integrazione) introdotta dal cavo sul segnale.



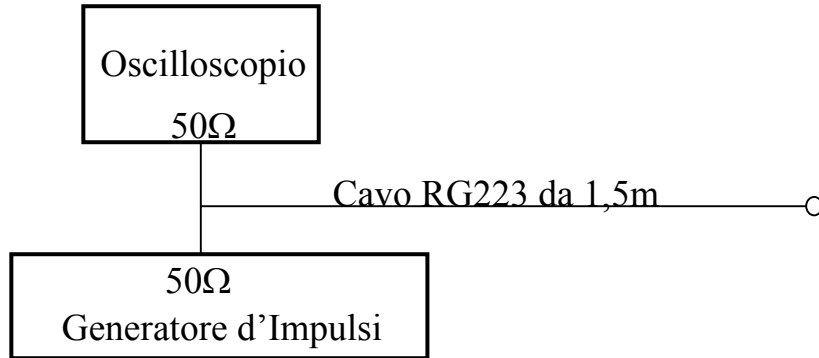
Misura dell' attenuazione di un cavo coassiale

Mediante il generatore di impulsi sinusoidali abbiamo misurato l'attenuazione di un cavo coassiale RG223, lungo 100m, al variare della frequenza e l'abbiamo confrontata con le specifiche fornite dal costruttore. Dalla tabella si conclude che l'attenuazione aumenta con la frequenza.

Frequenza (MHz)	Attenuazione (dBm)
1	10.462
2	16.021
5	27.593
10	38.995
20	56.291
35	78.479
50	90.485
100	13.478
150	16.437
200	19.039
250	21.584
300	24.144
400	28.177
500	32.103
600	35.941

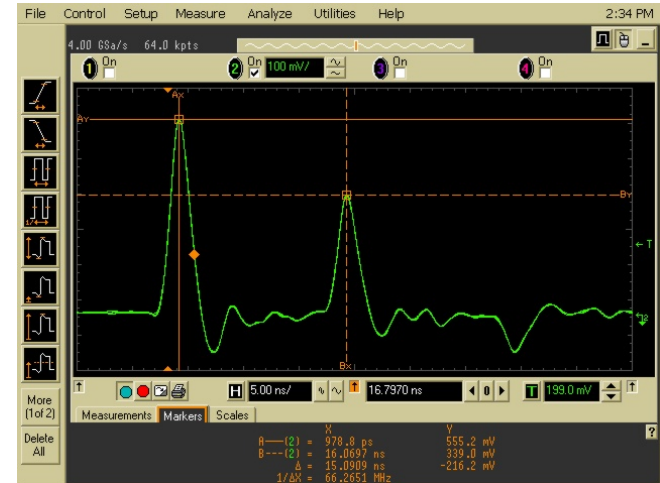


Misura della lunghezza di un cavo coassiale



Per calcolare la lunghezza di un cavo coassiale misuriamo il ritardo (Δt) tra il segnale incidente e quello riflesso:

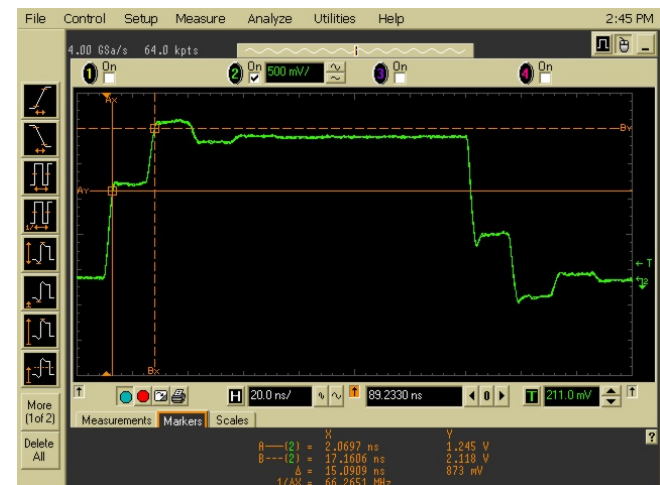
$$l = \frac{\Delta t \times v_p \times c}{2} = \frac{15 \cdot 10^{-9} \times 0,66 \times 3 \cdot 10^8}{2} = 1,5 \text{ m}$$



Riflessione di un impulso applicato al cavo non terminato



Riflessione di un impulso applicato al cavo terminato in corto circuito



Riflessione di un gradino applicato al cavo non terminato

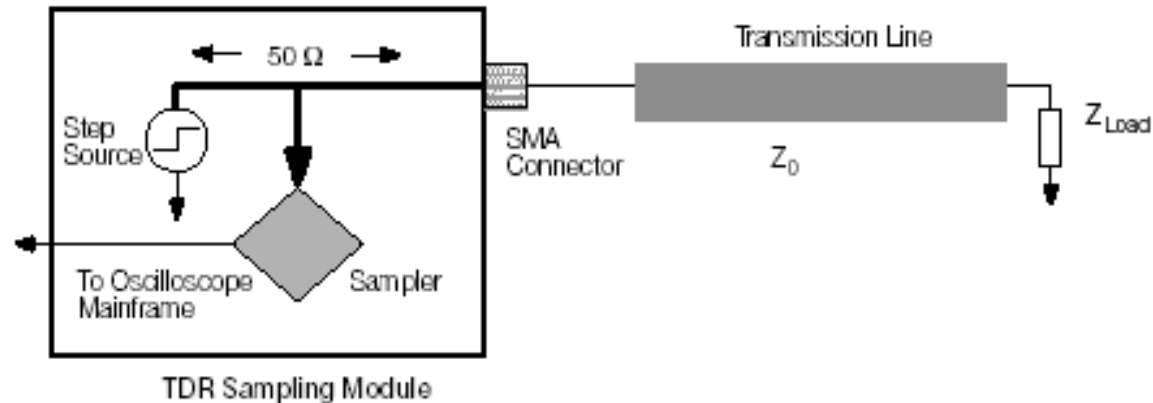
* TDR (Time Domain Reflectometer) *

La Riflettometria nel Dominio del Tempo (TDR) è una tecnica di misura, utilizzata nell'analisi delle reti elettriche, basata sullo studio dei segnali riflessi.

Il principio è analogo a quello adoperato dal radar di un aereo per localizzare un oggetto identificandone distanza, direzione, velocità e verso, o dal sonar di un sommergibile tramite il quale esso riesce ad avere una visione dettagliata del fondale marino.

Un gradino di tensione viene inviato, attraverso un cavo coassiale di impedenza nota, al carico o alla linea da analizzare.

L'analisi del segnale riflesso ci permette di dedurre la natura del carico (resistiva, induttiva o capacitiva) o la lunghezza della linea ed eventualmente localizzare con precisione ogni sua discontinuità.



► *Figure 1. Block diagram of TDR circuit*

Strumenti Utilizzati



Tektronix 118001 A

Oscilloscopio digitale usato come Riflettometro.

Specifiche:

- 4 canali;
- impedenza $50 \pm 0.5 \text{ Ohm}$;
- larghezza di banda 20 GHz;
- rise time 17.5 ps;
- massimo segnale d'ingresso $\pm 3 \text{ V}$;
- ampiezza massima d'uscita $\pm 250 \text{ mV}$;
- frequenza massima di ripetizione 100 KHz.

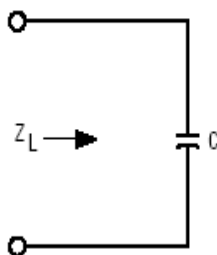
$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0}$$

Il TDR misura il coefficiente di riflessione, definito come rapporto tra tensione riflessa e tensione incidente: da esso ricava Z_l .

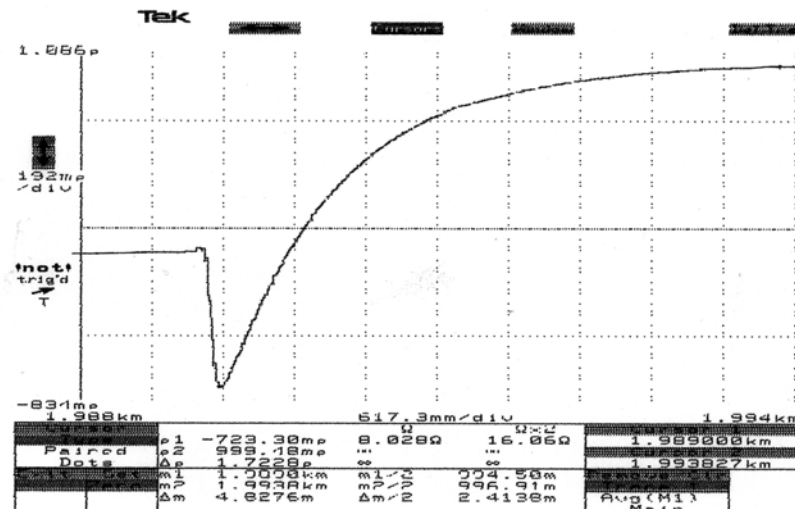
Carico capacitivo ($C=100\text{pF}$)

Inizialmente il condensatore, essendo scarico, si comporta come un **cortocircuito**.

Man mano che il condensatore si carica, diminuisce la corrente che lo attraversa e il suo comportamento si avvicina sempre di più a quello di un circuito aperto.



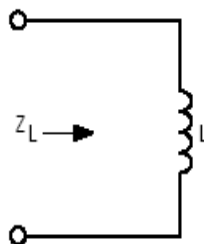
11801A DIGITAL SAMPLING OSCILLOSCOPE
date: 22-APR-08 time: 14:46:06



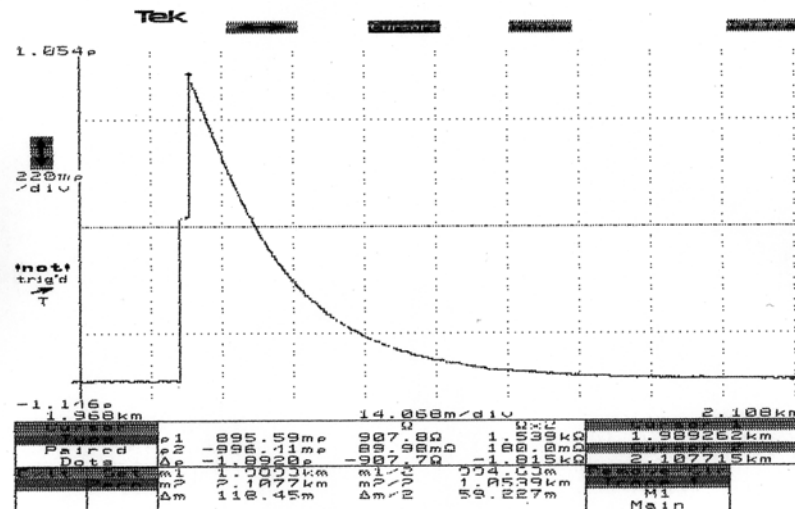
Carico induttivo ($L=6.2\mu\text{H}$)

L'induttanza **inizialmente** si oppone alla variazione di corrente comportandosi come un **circuito aperto**.

Poi pian piano si lascia attraversare sempre più dalla corrente fino a comportarsi come un cortocircuito.



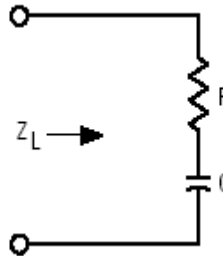
11801A DIGITAL SAMPLING OSCILLOSCOPE
date: 22-APR-08 time: 14:34:01



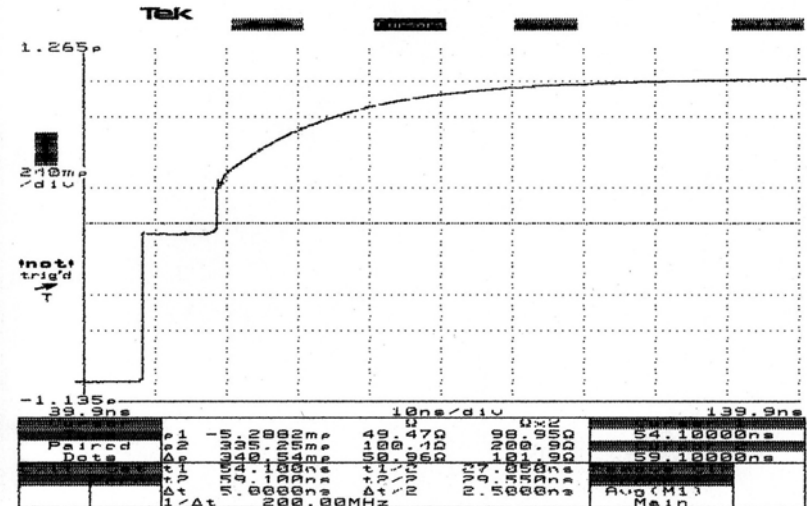
Carico ohmico-capacitivo (R=100 Ω C=100pF)

Inizialmente il condensatore si comporta come un cortocircuito per cui si misura solo la resistenza da $100\ \Omega$.

Man mano che il condensatore si carica si comporta sempre di più come un circuito aperto.

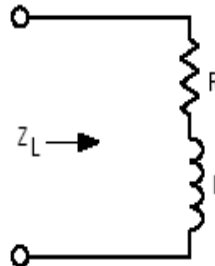


11801A DIGITAL SAMPLING OSCILLOSCOPE
date: 9-MAY-08 time: 11:28:39

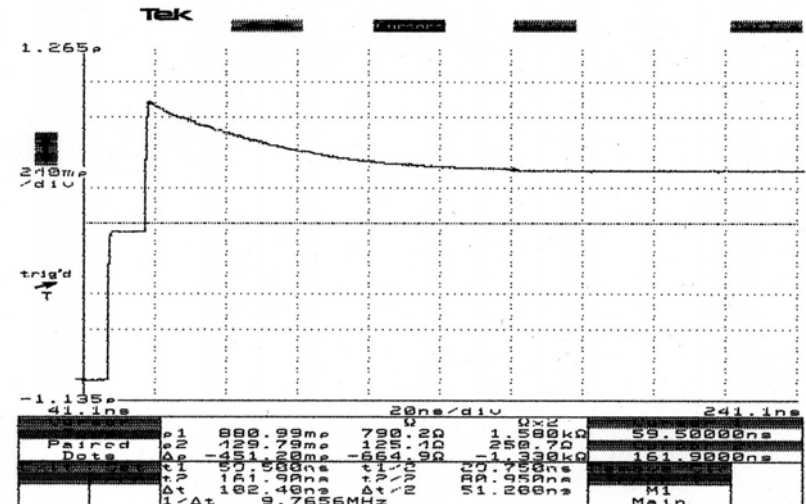


Carico ohmico-induttivo (R=100 Ω L=6.2uH)

Inizialmente l'induttanza si comporta come un circuito aperto. A regime invece l'induttanza si comporta come un cortocircuito e perciò misuriamo solo la resistenza da $100\ \Omega$.

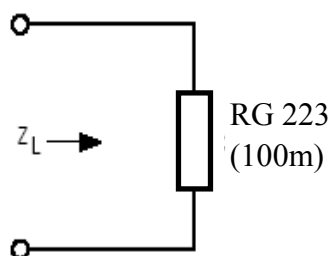


11801A DIGITAL SAMPLING OSCILLOSCOPE
date: 9-MAY-08 time: 11:34:21

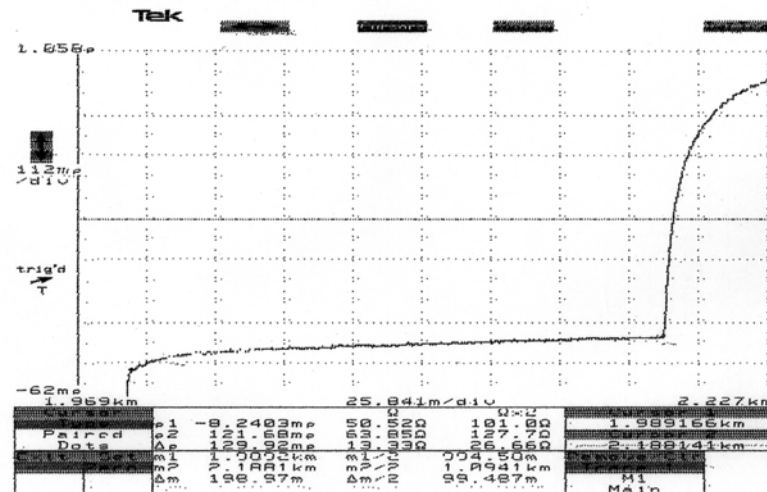


Misura lunghezza di un cavo RG 223 di circa 100m

Impostando nel TDR la velocità di propagazione del cavo coassiale RG223 ($V_p=0,66$), lo strumento visualizza direttamente la lunghezza del cavo in metri.

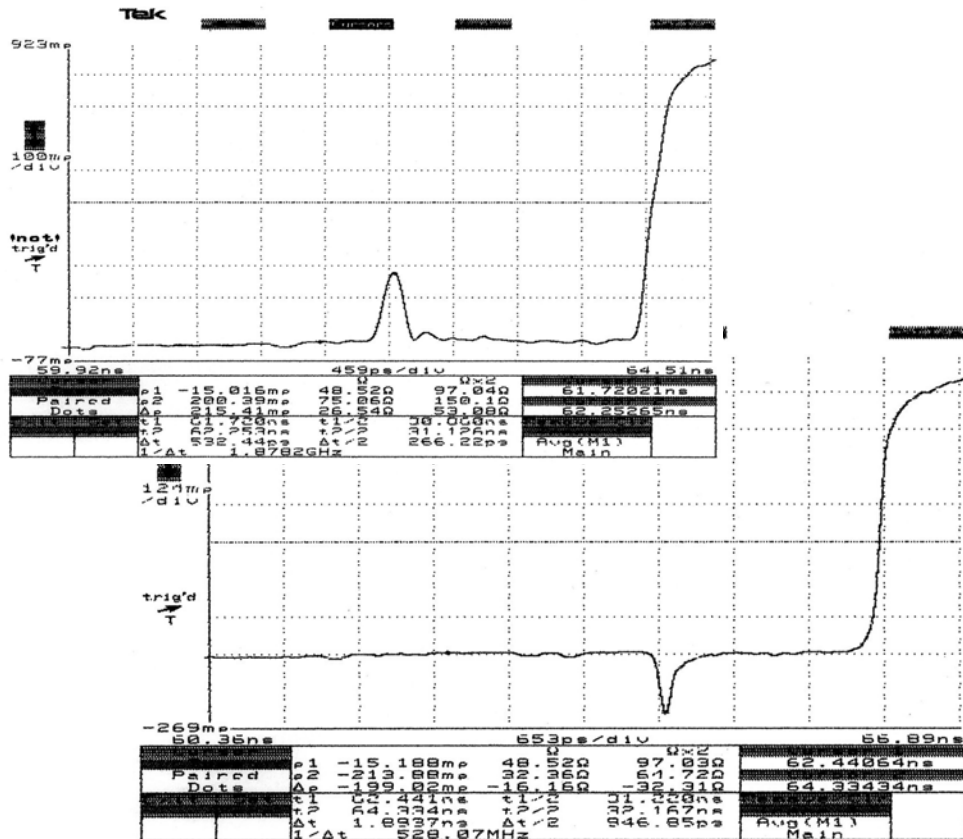


11801A DIGITAL SAMPLING OSCILLOSCOPE
date: 22-APR-08 time: 14:20:11



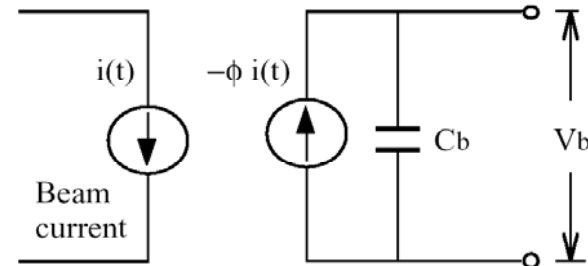
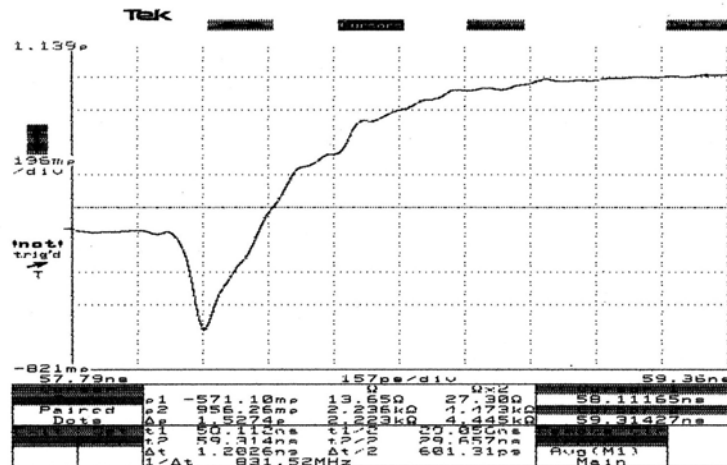
di un cavo coassiale con il TDR

11801A DIGITAL SAMPLING OSCILLOSCOPE
date: 9-MAY-08 time: 13:21:24



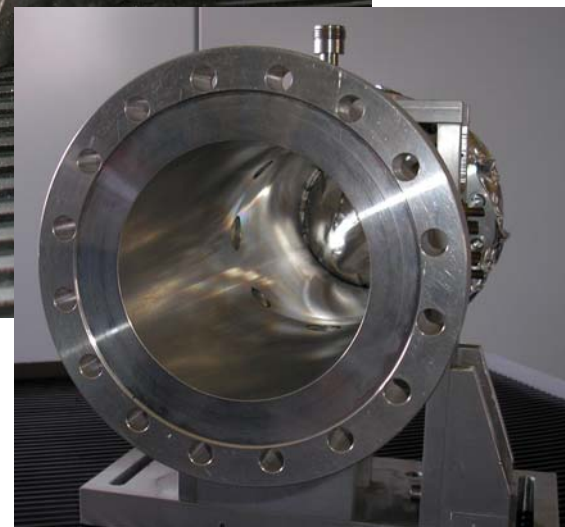
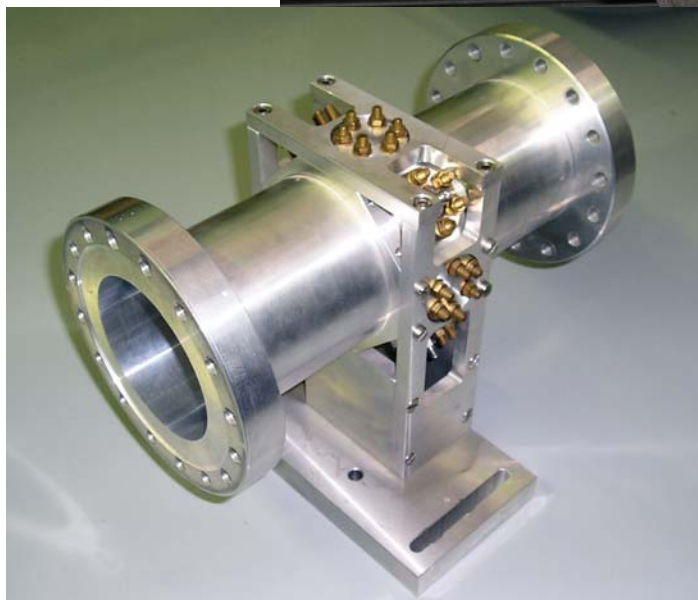
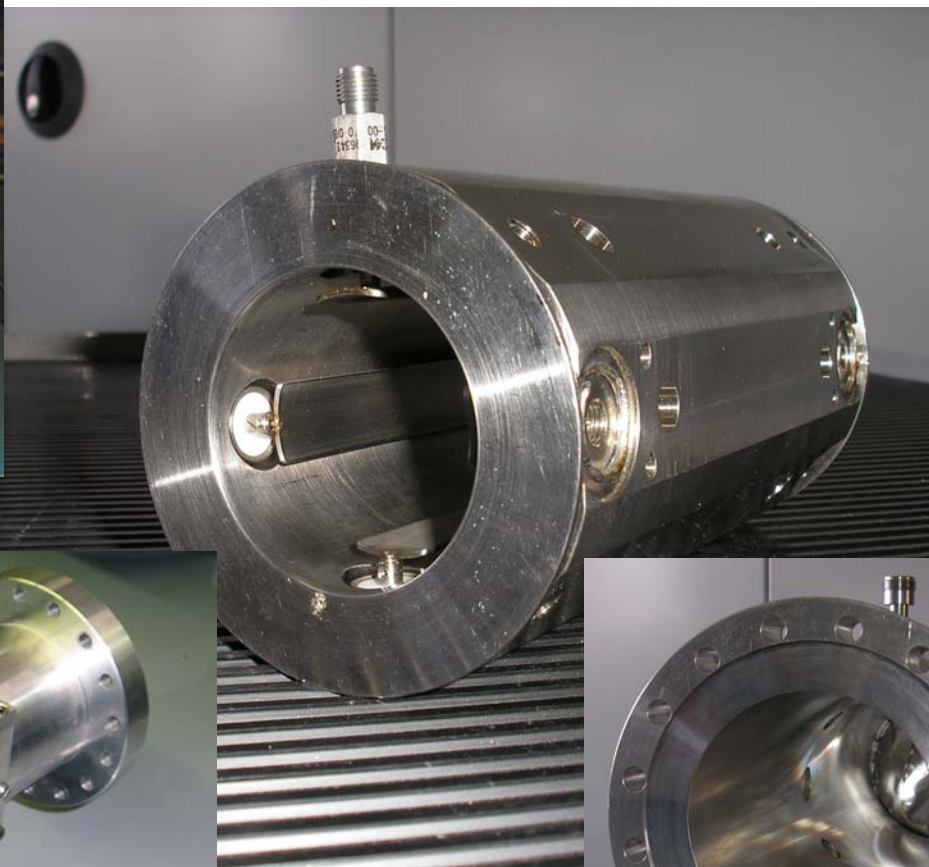
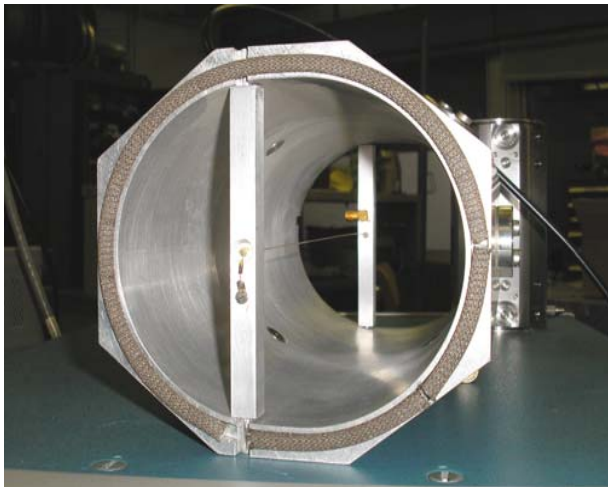
Attraverso il TDR e la misura di riflettometria si possono identificare con precisione eventuali danni presenti lungo la linea coassiale. Nella figura in basso il cavo ha un danno da schiacciamento (effetto capacitivo), in quella in alto il cavo ha il conduttore esterno interrotto (effetto induttivo).

Per definire il circuito equivalente dell'elettrodo abbiamo usato la tecnica della riflettometria. Confrontando con le misure precedenti si verifica che l'elettrodo si comporta come un circuito capacitivo.



2008 - Caratterizzazione di dispositivi diagnostici per acceleratori di particelle

Esempi di monitors di posizione



Stumentazione utilizzata



Agilent Infiniium – Oscilloscopio digitale

- 4 canali di ingresso
- impedenza di ingresso di 50 Ohm oppure alta impedenza
- larghezza di banda 600 MHz
- sampling rate 4 GSa/s



HP 54602B – Oscilloscopio digitale

- 4 canali di ingresso
- alta impedenza di ingresso
- larghezza di banda 150 MHz
- sampling rate 20 MSa/s



Stanford DG535 – Generatore d'impulsi

- 4 canali di uscita
- impedenza di uscita di 50 Ohm oppure alta impedenza
- segnali erogabili: TTL, ECL, NIM, variabili (-3V ÷ 4V)
- rise time 3 ns



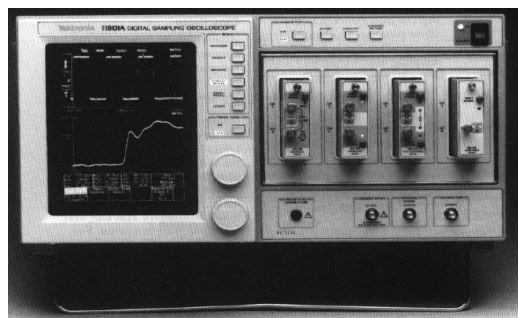
HP 8664A – Generatore di segnali

- range di frequenza 0,1 ÷ 3 GHz
- modulazione AM, FM, PM, FASE
- output level +13 to -139.9 dBm



HP 8656B – Generatore di segnali

- range di frequenza 0,1 ÷ 990 MHz
- modulazione AM, FM
- output level -127 to +17 dBm



Tektronix 118001 A Oscilloscopio Digitale (Riflettometro)

- 4 canali
- impedenza 50 ± 0.5 Ohm
- larghezza di banda 20 GHz
- rise time 17.5 ps
- massimo segnale d'ingresso ± 3 V



HP 8116A - Generatore di impulsi

- 2 canali di ingresso
- larghezza di banda 50MHz
- forme d'onda: triangolare, quadra, sinusoidale, a gradino
- ampiezza da 10 mVp-p a 16 Vp-p
- larghezza d'impulso: da 10 ns a 999 ms



Agilent 33220A – Generatore di impulsi

- larghezza di banda 20MHz
- forme d'onda: triangolare, quadra, sinusoidale, a gradino, rampa, noise e arbitraria
- ampiezza da 10 mVp-p a 10 Vp-p
- modulazione AM, FM, PM, FSK, and PWM
- larghezza d'impulso: minimo 20 ns

Glossario oscilloscopio digitale

Analog Bandwidth

La specifica di larghezza di banda ci dice quale gamma di frequenze l'oscilloscopio misura esattamente. Per convenzione, la larghezza di banda indica la frequenza a cui il segnale visualizzato si riduce al 70.7% del segnale applicato per un'onda sinusoidale. (questo 70.7% equivale a "- 3 dB" su una scala logaritmica.)

Risetime

E' il tempo che l'impulso impiega per salire dal 10% al 90 % del valore massimo in tensione di salita. Un oscilloscopio non può visualizzare esattamente gli impulsi con i tempi di salita più rapidi del risetime specificato dell'oscilloscopio.

Sensibilità Verticale

La sensibilità verticale indica quanto l'amplificatore verticale può amplificare un segnale debole. La sensibilità verticale è data solitamente in millivolt per divisione. La più piccola tensione che un oscilloscopio può rilevare è in genere circa 2 mV per divisione verticale dello schermo.

Gain Accuracy

Indica quanto il sistema verticale attenua esattamente o amplifica un segnale. Ciò è elencata solitamente come errore di percentuale.

Timebase

Indica la scala orizzontale con cui si visualizza esattamente la sincronizzazione di un segnale.

Sample Rate

Sugli oscilloscopi digitali, il sample rate indica quanti campioni al secondo l'ADC (e quindi l'oscilloscopio) possono acquisire. I sample rate sono dati solitamente in megasamples al secondo (MS/s). Tipicamente, il sample rate cambia con i cambiamenti fatti al controllo di sec/div per effettuare un numero costante di punti di forma d'onda.

Risoluzione dell'ADC (o Risoluzione Verticale)

La risoluzione dell'ADC (e quindi dell'oscilloscopio digitale) indica quanto può trasformare precisamente nelle tensioni in ingresso i valori digitali. Le tecniche di calcolo possono migliorare la risoluzione efficace.

Record Length

La lunghezza record di un oscilloscopio digitale indica quanti punti di forma d'onda l'oscilloscopio può acquistare per una forma d'onda. La lunghezza record massima dipende dalla quantità di memoria in vostro oscilloscopio. Poiché l'oscilloscopio può immagazzinare soltanto un numero limitato di punti di forma d'onda, c'è un'alternanza fra il particolare record e la lunghezza record. Potete acquistare un'immagine dettagliata di un segnale per un periodo di tempo corto un'immagine meno dettagliata per un periodo di tempo più lungo.