COME MISURARE L'IMPEDENZA CARATTERISTICA DEI CAVI

Rev.1 del 10/01/2012

Articolo pubblicato su Radio Rivista del 01/2012

Generalità

Propongo questo semplice strumento perché utile per misurare l'impedenza caratteristica dei cavi coassiali e delle linee bifilari ignote.
Il riflettometro nel domino del tempo, detto anche TDR (dall'Inglese Time Domain Reflectometer) prende spunto dal progetto apparso a pag. 27-31 dell'Antenna Book [1]. Il progetto originale è poi stato adattato dal sottoscritto per poter reperire i componenti sul mercato nazionale.

Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento del TDR consiste nell'inviare un impulso, nel nostro caso un treno d'impulsi quadri, sulla linea da testare ed esaminare l'interferenza che l'onda riflessa ha con l'onda diretta.
Mi spiego meglio: se inviamo un impulso quadro (che è la brutta copia di un impulso) su di uno spezzone di linea, cortocircuitato in fondo, quando l'impulso quadro raggiunge l'altro capo dello spezzone avremo una riflessione totale con inversione di fase pari a 180°. L'impulso riflesso ritorna verso il generatore sommandosi all' impulso quadro diretto.
Poiché l'impulso quadro riflesso è in ritardo rispetto a quello diretto, a causa del tempo che serve per percorrere due volte la linea (andata e ritorno), i due impulsi quadri sulla linea di partenza si ritroveranno con ampiezze opposte ed una piccola differenza di fase.

Più in generale, l'impulso riflesso, nelle linee reali, è sempre attenuato in ampiezza dall'attenuazione della tratta percorsa mentre l'ampiezza e la fase dell'impulso riflesso dipendono dal disadattamento che si è trovato in fondo alla linea. Il piccolo ritardo di fase, tra l'onda incidente e quella riflessa, dipende invece dalla lunghezza della tratta e dal fattore di velocità K della linea.

Per cui ai morsetti del generatore i due impulsi quadri si sommeranno in ampiezza e fase e daranno origine ad un impulso quadro diverso da quello trasmesso.
Quindi, dall'esame della forma dell'onda risultante al generatore potremo dedurre molte cose, tra le quali l'impedenza caratteristica della linea.
Infatti se terminiamo la linea con un corto circuito avremo una riflessione totale con inversione di fase pari a 180°, quindi troveremo che l'impulso diretto sarà pressoché cancellato; salvo un piccolo spike dovuto alla differenza di tempo che riflessa serve all'impulso riflesso per tornare al generatore (Foto 1).

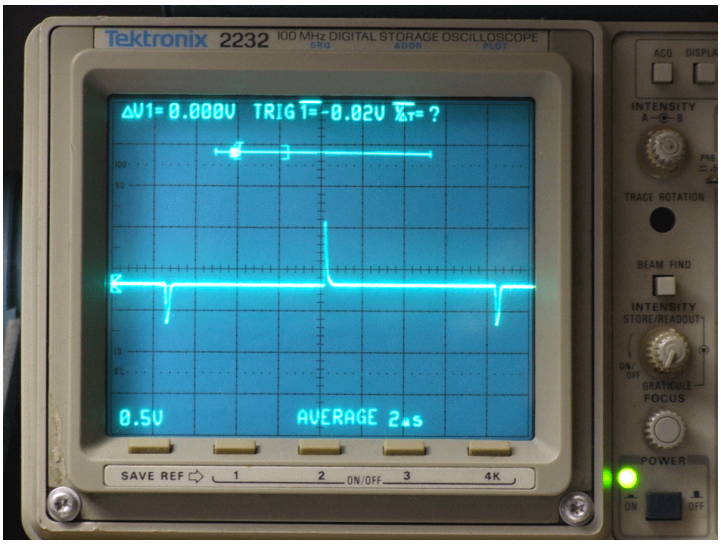


Foto 1

Se invece terminiamo la linea con un aperto avremo una riflessione totale senza inversione di fase, quindi troveremo che l'impulso diretto sarà aumentato d'ampiezza; salvo un piccolissimo scacco (praticamente invisibile in foto) presente sul fronte di salita e discesa, dovuto alla differenza di tempo che serve all'onda riflessa per tornare al generatore (Foto 2).

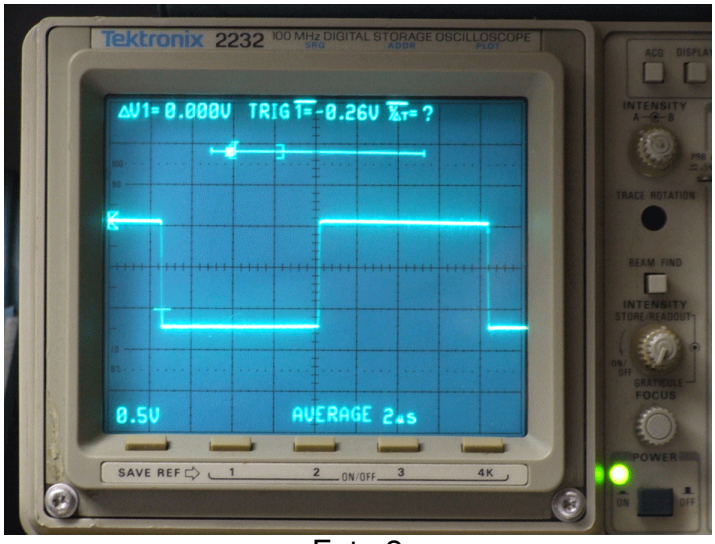


Foto 2

Se invece terminiamo la linea con la sua impedenza caratteristica non avremo alcuna riflessione e quindi troveremo che l'impulso quadro di partenza non avrà subito alcuna deformazione (Foto 3).

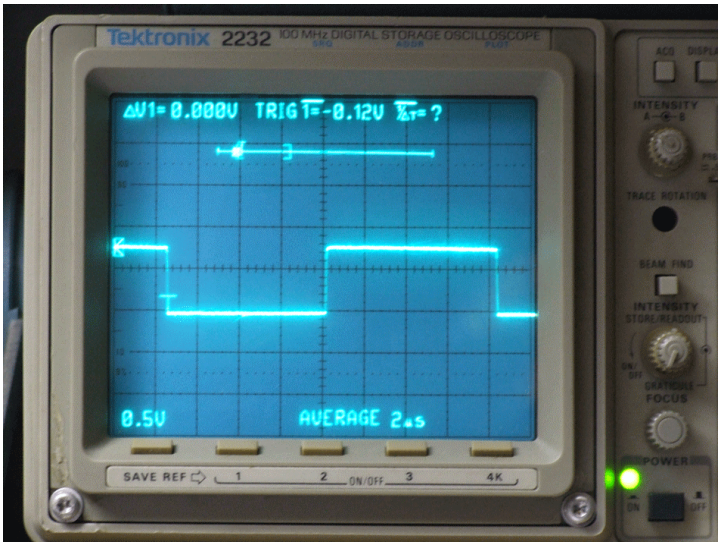
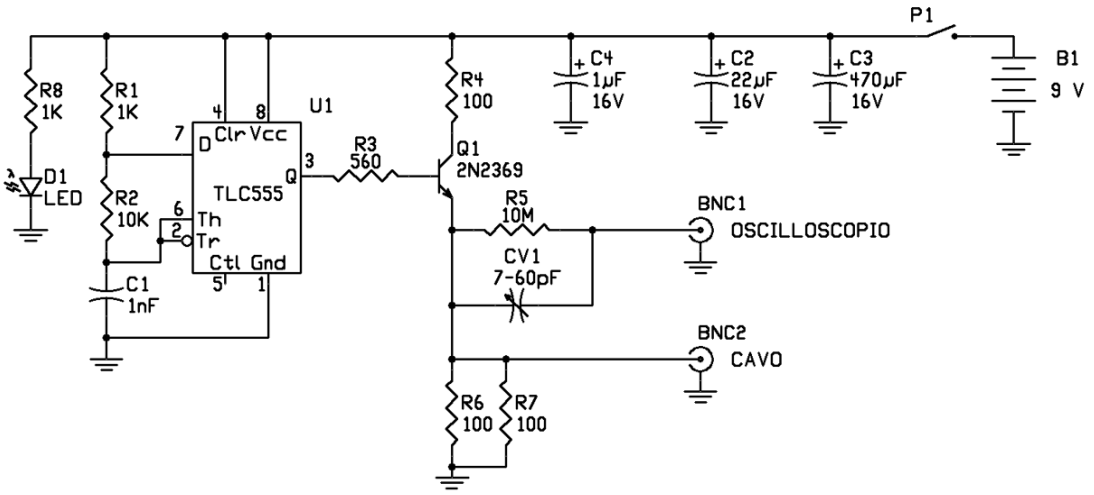


Foto 3

Ovviamente per rappresentare i risultati del TDR abbiamo bisogno di un oscilloscopio con una buona banda passante. O meglio, con più la banda passante dell'oscilloscopio è elevata con più sarà possibile vedere piccole differenze di fase e quindi sarà possibile esaminare spezzoni di linea corti. Utilizzando un oscilloscopio con 100MHz di banda passante (10nS) si riescono a caratterizzare spezzoni di linea non più corti di un metro e mezzo.
C'è anche un limite superiore alla lunghezza della linea da misurare ed è dato dalla tempo di pausa tra la ripetizione di un impulso quadro e l'altro. Se la pausa fosse intorno ai 7µS (come nel nostro caso) lo spezzone non potrebbe essere più lungo di 1km (metro più, metro meno).

Il circuito elettrico



Schema TDR

Il circuito elettrico è imperniato attorno all'integrato TLC555 configurato come multivibratore astabile. La frequenza d'oscillazione non è critica ed è determinata da R_1, R_2 e C_1. A titolo di cronaca riporto le formule per il calcolo della frequenza *f* e del tempo di pausa t_L:

$$f = \frac{1{,}44}{(R_1 + 2 \cdot R_2) \cdot C_1} \text{ in Hz} \qquad (1)$$

$$t_L = 0{,}693 \cdot R_2 \cdot C_1 \quad \text{in Secondi} \qquad (2)$$

Se mettiamo nelle formule (1) e (2) i nostri valori otterremo:

f= 68,5 kHz

t_L=6,93 µS

In altre parole si tratta di un'onda quadra alla frequenza di 68,5kHz, con periodo di 14,60µS e tempo di pausa tra un impulso e l'altro di 6,93µS.

L'uscita del multivibratore astabile (pin 3) và a pilotare il driver che forza l'impulso di tensione all'inizio della linea. Il driver è composto dal BJT Q_1 2N2369, in configurazione non invertente, che genera l'impulso su una resistenza, non critica, da 50 Ohm, fatta con due resistenze da 100 Ohm in parallelo, sulle quali, con collegamento molto corto, è posto in parallelo il BNC2 ove verrà collegata la linea da testare (D.U.T. Device Under Test). La scelta del valore di 50 Ohm è perché solitamente abbiamo a che fare con linee di questa impedenza caratteristica ma se l'impedenza della linea fosse più alta o più bassa di 50 Ohm il TDR funzionerebbe bene comunque.

Se il TDR fosse utilizzato maggiormente con linee d'impedenza molto diversa da 50 Ohm sarebbe opportuno cambiare le resistenze R_6 ed R_7 con valori il cui parallelo risulti più vicino a quello da misurare.

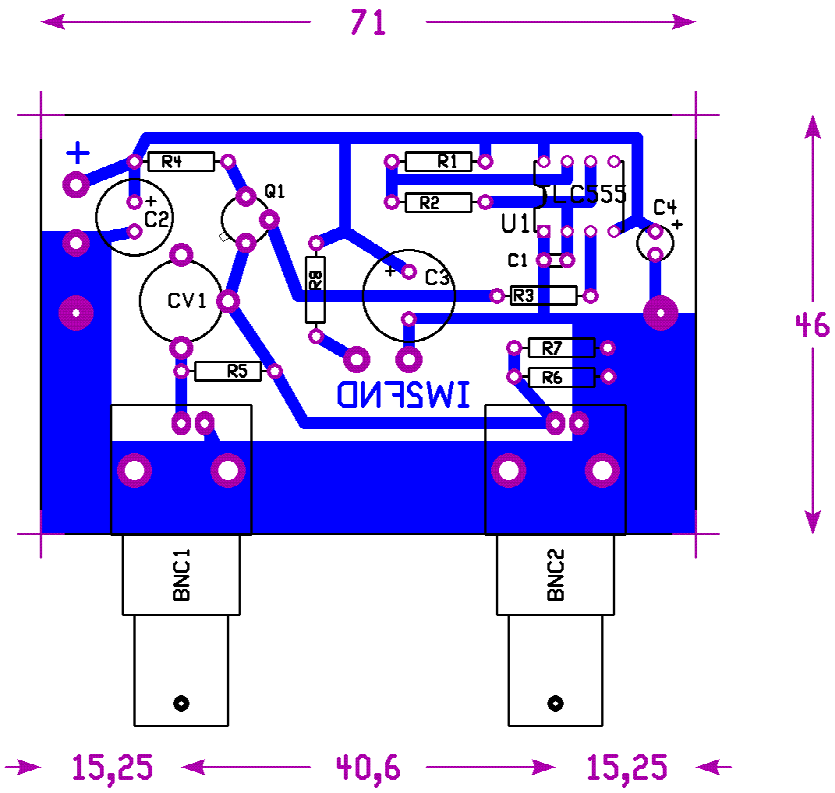
Il BJT Q_1 è però un componente importante e non deve assolutamente essere cambiato. Infatti la scelta è caduta sul 2N2369 perché ha tempi di conduzione e d'interdizione molto brevi e ciò rende i fronti dell'onda quadra generata molto ripidi. La ripidità del fronte di salita e di discesa sono una condizione indispensabile per il funzionamento del TDR.

Sull'emettitore di Q1 viene prelevata anche un po' di tensione per visualizzarla sull'oscilloscopio. Il prelievo è fatto con la resistenza R_5 da 10Mohm, compensata col trimmer capacitivo CV_1. Il trimmer capacitivo CV_1 serve per ottenere sull'oscilloscopio

un'onda quadra perfetta. In pratica ha la stessa funzione che ha sulle sonde degli oscilloscopi e sarà oggetto di taratura finale.
Su questa uscita è posto il BNC1 ove si deve collegare, tramite un cavo ad alta impedenza, l'oscilloscopio.
Il cavo da utilizzare per il collegamento del TDR all'oscilloscopio **deve necessariamente essere ad alta impedenza**. Cioè deve avere un'impedenza caratteristica intorno ad 1 MOhm perché altrimenti il TDR non funziona. I cavi a così alta impedenza sono utilizzati per costruire le sonde degli oscilloscopi quindi è gioco forza prendere una sonda da oscilloscopio di basso costo (o rotta) tagliargli via il probe (la punta) ed intestare al suo posto un BNC del tipo a crimpare (perché il centrale di un coax ad alta impedenza è sottilissimo e molto difficile da saldare). Controllate che dall'altro capo la sonda non abbia già il sistema di compensazione integrato nel BNC perché la compensazione è già stata prevista all'interno del TDR e quindi una delle due sarebbe ridondante.

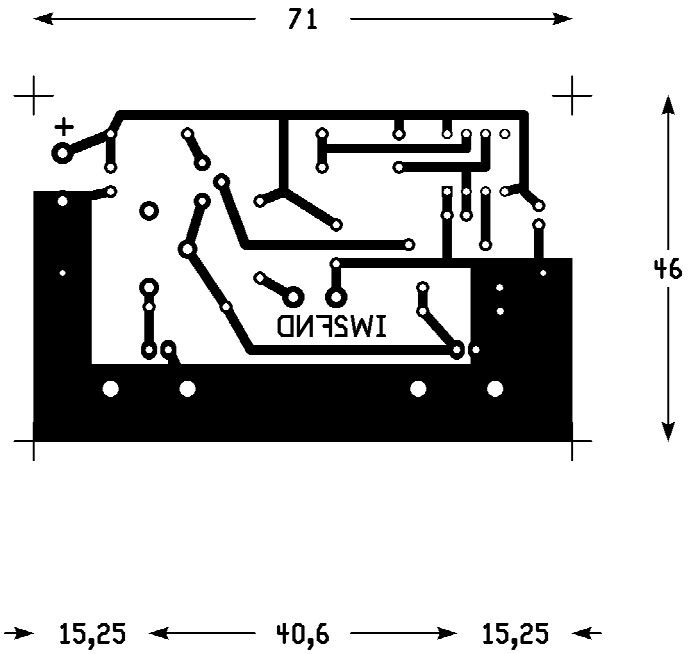
Realizzazione pratica

Ferme restando le criticità evidenziate nel paragrafo precedente, la realizzazione pratica non presenta alcuna difficoltà. Il layout è il seguente:



TDR Layout

Mentre il circuito stampato, lato componenti e realizzato su vetronite singola faccia, è il seguente:



TDR PCS

Infine l'elenco dei materiali:

Q.tà	Riferimento SCH	Tipologia	Valore	Variante	Package
1	B1	Presa batteria	9 V		Volante
2	BNC1 - 2	BNC			Orizzontale da PCS
1	C1	Condensatore Ceramico	1pF		A disco CC100
1	C2	Condensatore Elettrolitico	22µF	16V	Verticale E125/320
1	C3	Condensatore Elettrolitico	470µF	16V	Verticale E200/400
1	C4	Condensatore Elettrolitico	1µF	16V	Verticale E100/150
1	CV1	Compensatore Variabile	7-60pF		Ceramico
1	D1	Diodo LED	Rosso		LED 3mm
1	P1	Interruttore			A pulsante da pannello
1	Q1	Transistor NPN	2N2369		TO18
1	R1 - R8	Resistenza	1K		R400
1	R2	Resistenza	10K		R400
1	R3	Resistenza	560		R400
1	R4 - R6 - R7	Resistenza	100		R400
1	R5	Resistenza	10M		R400
1	U1	Integrato lineare	TLC555		
1		Zoccolo			DIL8
1		Scatola	55x74x30	Plastica	TEKO
1		PCS monofaccia	71x46		

Il tutto è poi stato inserito in un contenitore TEKO di plastica.

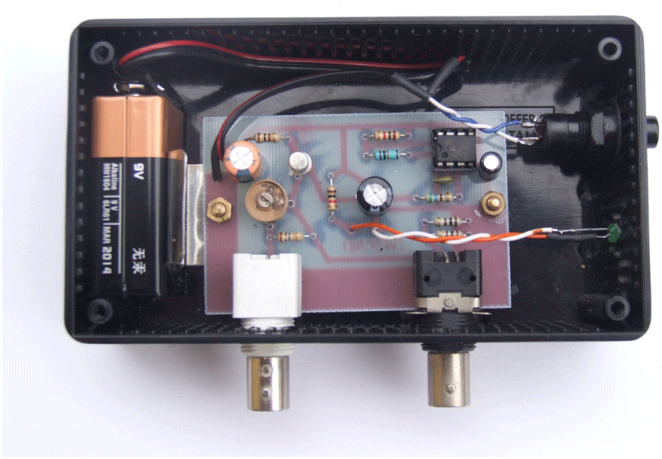


Foto 4

Taratura

Per poter utilizzare il TDR occorre allineare perfettamente il cavo ad alta impedenza con l'oscilloscopio utilizzato. Se si cambia l'oscilloscopio, o il cavo ad alta impedenza, occorre rifare la taratura.
Per procedere occorre inserire un carico fittizio da 50Ohm nella boccola dedicata al D.U.T. e visualizzare sull'oscilloscopio l'onda quadra. Se l'onda non risulta ben squadrata, cioè non ha gli spigoli ben "vivi", occorre compensare girando il trimmer capacitivo CV_1. Quando gli spigoli dell'onda quadra saranno "vivi" potremo dire che la taratura è terminata (Foto 3).

Misura dell'impedenza caratteristica di una linea

Per misurare l'impedenza caratteristica di una linea (coassiale o bifilare) si sfrutta il fatto che: quando la linea è chiusa sulla propria impedenza caratteristica non provoca alcuna riflessione e quindi l'onda incidente non sarà in alcun modo deformata né nella forma né nell'ampiezza.
Per agevolare le operazioni di misurazione è quindi necessario procurare: un trimmer a barilotto da 200 Ohm (se riteniamo che la linea sia ricompresa tra zero e 200Ohm); un connettore BNC maschio con attacco a flangia (Distrelec cod. 130020) ed uno spezzone di circa 1,5m di cavo ad impedenza nota (nell'esempio un cavo TV SAT), vedi foto 5.

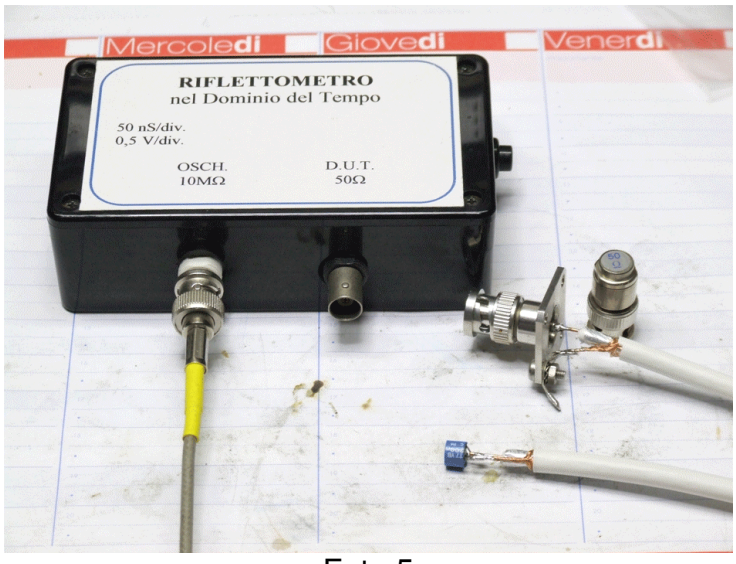


Foto 5

Poi dobbiamo procedere al collegamento con l'oscilloscopio ed al controllo della taratura col carico fittizio da 50 Ohm.
Fatto ciò, ed appurato che sia tutto perfettamente tarato, si collega un capo dello spezzone di cavo ad impedenza nota al connettore BNC flangiato e l'altro capo al trimmer da 200 Ohm, regolato a Zero Ohm (corto circuito).
Togliamo il carico fittizio dal TDR ed inseriamo il BNC flangiato, con lo spezzone ed il trimmer collegato, nel BNC D.U.T.. Dovremo vedere una traccia simile a quella della foto 6 ove si ha la riflessione totale con cancellazione quasi completa dell'onda incidente.

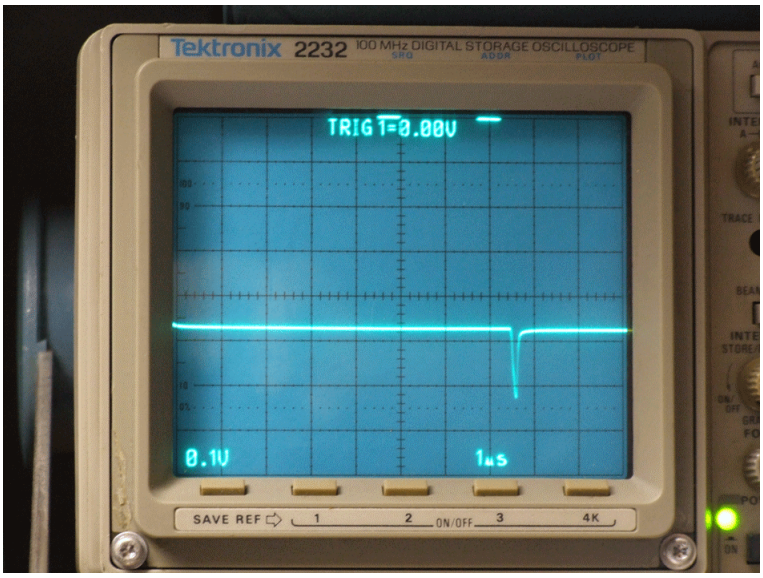


Foto 6

Notate che abbiamo evidenziato solo il fronte di discesa ma le cose saranno simili se viste sul fronte di salita salvo che il verso della tensione sarà opposto, vedi foto 1 dove si vedono entrambi i fronti.

Fatto ciò cominciamo ad alzare la resistenza del trimmer posto in fondo allo spezzone di linea. L'onda incidente comincerà ad apparire nella sua completezza e risulterà deformata fintanto che saremo lontani dall'adattamento, foto 7.

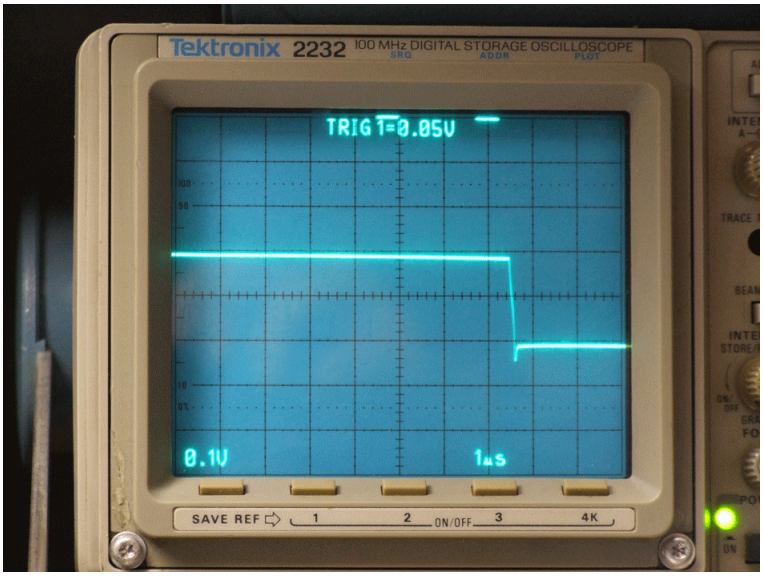


Foto 7

Continuando ad aumentare la resistenza di terminazione vedremo sparire l'under shoot presente in foto 7. Non appena sparisce la forma d'onda incidente prende l'aspetto che abbiamo visto nel perfetto adattamento, foto 8.

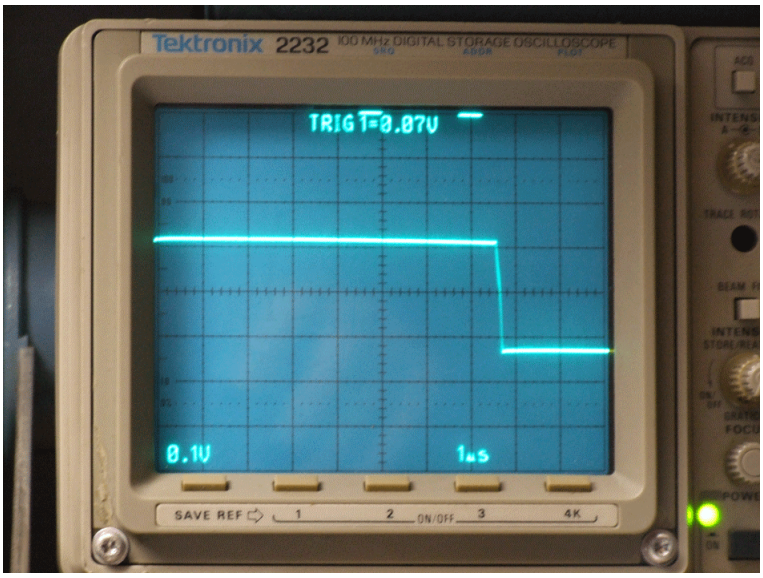


Foto 8

A questo punto rimuoviamo lo spezzone in misurazione dal D.U.T. del TRD e misuriamo, con un tester, la resistenza che ha raggiunto il trimmer in fondo alla linea.
La resistenza misurata sarà uguale all'impedenza caratteristica della linea.
Nel nostro esempio, avendo usato uno spezzone di linea ad impedenza caratteristica nota (il cavo TV SAT ha impedenza di 75 Ohm), abbiamo misurato 77,2 Ohm, foto 9.

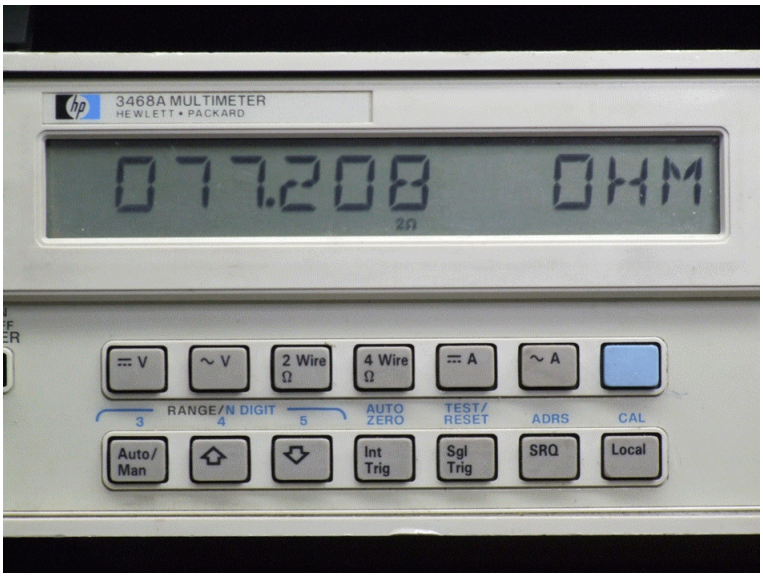


Foto 9

Se continuiamo ad aumentare la resistenza, anche oltre il punto di perfetto adattamento, vedremo che l'onda quadra incidente traslerà quasi intatta verso il basso avvicinandosi sempre più alla condizione di linea aperta, ove l'onda riflessa si somma (con un piccolo ritardo) all'onda incidente, proprio come in foto 2.

Bibliografia

[1] ARRL, The ARRL Antenna Book, 16° Edizione 1991