

# Misura dell'impedenza di trasferimento con la tecnica triassiale: dal principio fisico all'esperimento

Carlo Carobbi, Carlo Panconi

Dip. Elettronica e Telecomunicazioni, Università di Firenze, Via Santa Marta, 3 – 50139 Firenze  
[carlo.carobbi@unifi.it](mailto:carlo.carobbi@unifi.it)

Nella Rubrica della CEM del numero 2/2007 di Tutto\_Misure abbiamo introdotto le grandezze che caratterizzano la schermatura di un cavo coassiale: l'impedenza di trasferimento  $Z_T$  ( $\Omega/m$ ) e l'ammettenza di trasferimento  $Y_T$  (S/m). Di queste grandezze abbiamo dato delle definizioni operative basate sul loro principio di misura. Abbiamo anche visto che le due grandezze entrano in gioco in fenomeni fisici ben distinti:  $Z_T$  rappresenta l'attitudine alla schermatura dal campo magnetico mentre  $Y_T$  dal campo elettrico. In genere gli accoppiamenti indesiderati dovuti al campo magnetico dominano quelli dovuti al campo elettrico e l'interesse (in particolare la normativa relativa alla Compatibilità Elettromagnetica dei cavi) si concentra maggiormente sulle tecniche di misura dell'impedenza di trasferimento piuttosto che dell'ammettenza di trasferimento. Si è fornita poi una descrizione della calza dei cavi coassiali e si sono definiti i parametri che ne caratterizzano la maggiore o minore trasparenza ai campi, in particolare il fattore di copertura ottica. Per i cavi con il conduttore esterno continuo (privo di fori) si ha  $Y_T = 0$ , quindi la schermatura nei confronti del campo elettrico è perfetta. Nessuno schermo è invece in grado di schermare del tutto il campo magnetico, cioè è in grado di assicurare  $Z_T = 0$ . In questo numero della Rubrica della CEM approfondiremo alcuni aspetti fisici dell'impedenza di trasferimento<sup>1</sup>. Dobbiamo infatti capire, prima di passare alle misure, approssimativamente quanto vale  $Z_T$  e come si comporta al variare della frequenza. Presenteremo poi la tecnica di misura triassiale (la più impiegata e consolidata), come la si realizza in pratica e quali limitazioni ha.

## L'impedenza di trasferimento in formule

Nel caso di uno schermo continuo la formula di Schelkunoff (1934) fornisce una stima accurata dell'impedenza di trasferimento. Se  $d$  è lo spessore dello schermo,  $\delta$  è la profondità di penetrazione dei campi nel conduttore<sup>2</sup> e  $\gamma = (1 + j)/\delta$  allora  $Z_T = R_S \frac{\gamma d}{\sinh \gamma d}$ , dove  $R_S$

rappresenta la resistenza in continua dello schermo. L'andamento dell'impedenza di trasferimento di un cavo con schermo continuo (tubolare di alluminio di spessore  $d = 125 \mu m$ ) è rappresentato in Fig. 1 con linea rossa tratteggiata. Sull'asse verticale (in scala logaritmica) è riportata l'impedenza di trasferimento normalizzata alla resistenza  $R_S$ . L'impedenza di trasferimento per frequenze basse coincide con il valore della resistenza in continua. Oltre la frequenza per cui  $\delta = d$  (1,33 MHz) l'impedenza di trasferimento diminuisce sensibilmente al crescere della frequenza. Le correnti sullo schermo tendono infatti ad essere confinate in una pelle di spessore  $\delta$ . Se  $d > \delta$  i campi non penetrano l'intero volume del metallo e l'interno del cavo risulta isolato dall'esterno. Più spesso è lo schermo più bassa è la resistenza in continua e più bassa è la frequenza oltre la quale l'impedenza di trasferimento comincia a ridursi, migliore è quindi la schermatura.

Nel caso di uno schermo a calza, le formule servono a fornirci l'ordine di grandezza e le tendenze (informazioni preziosissime per chi si appresta ad effettuare una misura!) ma non possono sostituire le misure con una accurata predizione. Per via della grande complessità dei fenomeni di accoppiamento dei campi attraverso una calza, o addirittura due sovrapposte, la parola definitiva sul

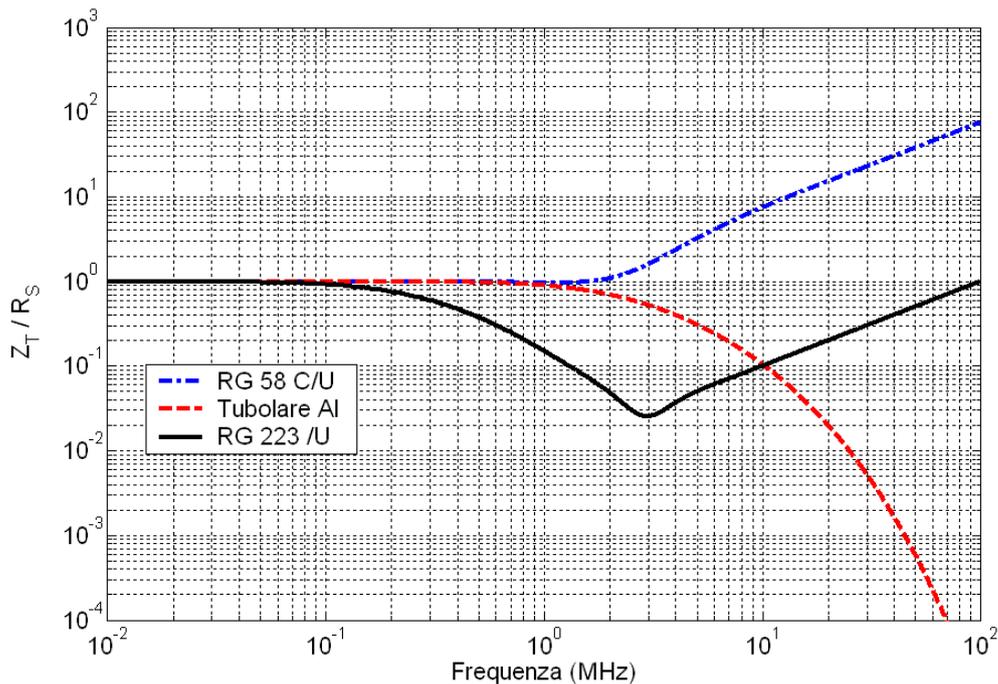
<sup>1</sup> Ci limitiamo al caso, peraltro di gran lunga più comune, di schermo non ferromagnetico.

<sup>2</sup> Si ricordi che la profondità di penetrazione dei campi nei conduttori è  $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$ , dove  $f$  è la frequenza,  $\mu$  è la permeabilità magnetica,  $\sigma$  è la conducibilità del conduttore.

valore (e la relativa incertezza) dell'impedenza di trasferimento spetta alle misure. La formula fu ideata e verificata sperimentalmente da Vance (1975) che ne valutò l'accuratezza entro un fattore 3. Nel caso di uno schermo a calza al contributo di Schelkunoff, detto di diffusione, si somma un contributo  $j2\pi fM$  che tiene conto dell'accoppiamento mutuo ( $M$ ) fra interno ed esterno dovuto ai fori. La formula dell'impedenza di trasferimento diviene la seguente:

$$Z_T = R_s \frac{\gamma d}{\sinh \gamma d} + j2\pi fM$$

$M$  è inversamente proporzionale al numero di cinture, decresce al crescere del fattore di copertura ottica e dell'angolo caratteristico della calza<sup>3</sup>.



**Figura 1:** andamento in frequenza dell'impedenza di trasferimento per tre diversi tipi di cavo coassiale: il comune cavo RG 58 C/U (schermo a calza singola), cavo RG 223/U (doppia calza), cavo EZ\_47\_AL\_TP (schermo continuo, costruttore Suhner). Gli andamenti sono stati ottenuti dalla formula di Vance in base ai dati fisici e geometrici nominali dei cavi.

Per un cavo a calza singola come lo RG 58 C/U l'impedenza di trasferimento in bassa frequenza coincide con il valore della resistenza dello schermo, mentre oltre la frequenza d'angolo  $R_s/(2\pi M)$  tende a crescere linearmente con la frequenza (si veda la Fig. 1). Per il cavo RG 58 C/U il mutuo accoppiamento  $M$  vale all'incirca 1,35 nH/m e la resistenza dello schermo  $R_s$  circa 11,24 mΩ/m (da cui la frequenza d'angolo risulta 1,32 MHz). La firma dell'impedenza di trasferimento di un cavo doppia calza come lo RG 223/U segue invece in bassa frequenza l'andamento caratteristico dello schermo continuo mentre in alta frequenza domina il termine  $j2\pi fM$ , come risulta dalla Fig. 1. Per RG 223/U si stima  $M$  all'incirca di 9 pH/m (una riduzione di circa un fattore 150 rispetto a RG 58 C/U).

<sup>3</sup> Per la capacità di accoppiamento  $C_T$  valgono le stesse tendenze eccetto che per l'angolo caratteristico della calza, nei confronti del quale risulta quasi del tutto insensibile.

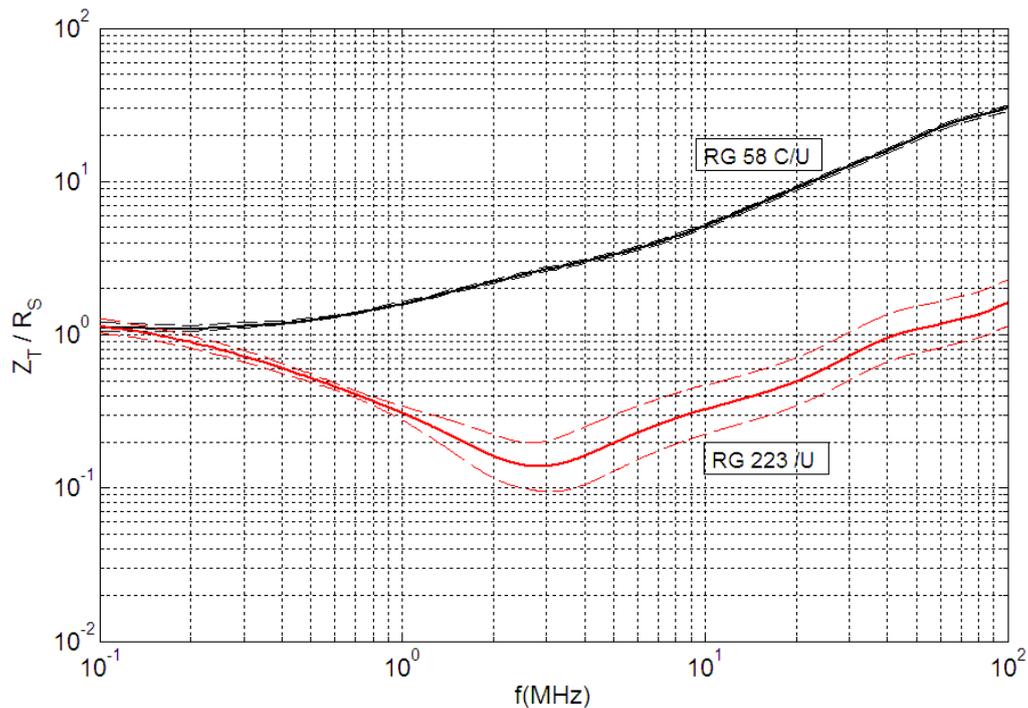
### Le misure con la tecnica triassiale

La tecnica più impiegata e consolidata per la misura dell'impedenza di trasferimento prevede: a) l'impiego di una struttura triassiale per l'iniezione di una corrente nota sullo schermo, b) la misura della tensione indotta internamente al cavo fra conduttore interno ed esterno. Lo schema di misura è quello in Fig. 2 della Rubrica della CEM del numero 2/2007 di Tutto\_Misure, dove la massa è realizzata da un cilindro metallico continuo e coassiale oppure, per una realizzazione meno impegnativa, da una ulteriore calza "milked-on" (cioè "munta sopra", traduzione letterale della pittoresca terminologia anglosassone). Il generatore a radiofrequenza ha impedenza interna di  $50 \Omega$  e dello stesso valore è la resistenza di ingresso del voltmetro (un analizzatore di spettro o di reti vettoriale). La lunghezza della cella deve essere piccola rispetto alla minima lunghezza d'onda d'interesse. Una regola del pollice per la massima frequenza di impiego  $f$  (in megahertz) di una cella di lunghezza  $l$  (in metri) è  $f = 35/l$ . In Fig. 2 è riportata la foto di due celle triassiali di lunghezze 30 cm e 50 cm (massime frequenze di impiego 117 MHz e 70 MHz, rispettivamente). Le dimensioni geometriche complete delle celle sono riportate nella didascalia della Fig. 2.



**Figura 2:** celle triassiali per la misura dell'impedenza di trasferimento. Le dimensioni geometriche della cella corta sono: lunghezza 50 cm, diametro esterno del tubo 5,4 cm, spessore del tubo 2 mm. Le dimensioni della cella lunga sono: lunghezza 30 cm, diametro esterno 35 mm, spessore 1,5 mm. Le celle sono state realizzate in rame. I connettori sono di tipo N per la cella lunga e BNC per la corta.

In Fig. 3 è mostrato l'andamento in frequenza dell'impedenza di trasferimento misurata nel caso di cavi a calza singola RG 58 C/U (colore nero) e doppia calza RG 223/U (colore rosso). L'impedenza è normalizzata rispetto alla resistenza in continua dello schermo. Nel caso del cavo RG 58 C/U si è misurata una resistenza dello schermo  $R_s$  di  $15,2 \pm 0,9 \text{ m}\Omega/\text{m}$  e si stima  $M$  di  $0,89 \pm 0,05 \text{ nH}$ . Per il cavo RG 223/U si è ottenuto invece  $R_s$  di  $9,05 \pm 0,88 \text{ m}\Omega/\text{m}$  e  $M$  di  $22,3 \pm 8,9 \text{ pH/m}$



**Figura 3:** andamento in frequenza misurato dell'impedenza di trasferimento di cavi RG 58 C/U (in nero) e RG 223/U (in rosso). Tratteggiati sono riportati i limiti dell'intervallo di fiducia (corrispondenti al livello di fiducia del 95 %, fattore di copertura pari a 1,96).

Vale la pena di fare due osservazioni riguardanti le incertezze dei dati sperimentali: innanzitutto il termine dominante l'incertezza è quello ottenuto dalla valutazione di categoria A. Si è misurata l'impedenza di trasferimento di diversi (10 per il cavo RG 58 C/U e 6 per il cavo RG 223 /U) spezzoni di cavo estratti dalla stessa matassa ed il tratto continuo rappresenta la media delle diverse misure mentre quello tratteggiato corrisponde ai limiti dell'intervallo di fiducia a  $1,96 s$ , dove  $s$  è lo scarto tipo sperimentale delle misure. La valutazione di categoria B dell'incertezza riguarda essenzialmente le incertezze strumentali che, trattandosi di una misura di attenuazione, sono state rese trascurabili mediante l'impiego, per confronto, di un attenuatore tarato a scatti. Si noti poi che l'incertezza nel caso del cavo RG 223/U è molto superiore rispetto a quella del cavo RG 58C/U e questo soprattutto ad alta frequenza dove domina il termine  $j2\pi fM$ . Ciò è naturale in quanto l'efficacia di schermatura del RG 223/U è molto elevata e, in alta frequenza, è molto sensibile alla geometria e alla disposizione reciproca dei due schermi. Le inevitabili disuniformità fra spezzoni di cavo, anche di una stessa matassa, e le variazioni di geometria prodotte dalla manipolazione, anche attenta, dei cavi producono relativamente grandi variazioni della efficacia di schermatura. Gli effetti sono molto più rilevanti laddove conta  $M$ , che è un parametro dipendente dal dettaglio geometrico dello schermo, piuttosto che  $R_s$  che invece dipende essenzialmente dal diametro e dal numero di trefoli che compongono lo schermo.

#### Riferimenti

- [1] S. A. Schelkunoff, "The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields", Bell Sys. Tech. J., vol. 13, pp. 532-579, Oct. 1934.
- [2] Edward F. Vance, "Shielding Effectiveness of Braided-Wire Shields", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-17, no. 2, pp. 71-77, May 1975.