

# L'impedenza di trasferimento di cavi coassiali – Cosa è e come si misura

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)

I cavi coassiali sono largamente impiegati per la trasmissione di segnali. Il cavo coassiale realizza un collegamento elettrico meccanicamente solido, elettricamente sicuro (il conduttore esterno è a massa, prevenendo il contatto accidentale con il conduttore interno in tensione) e intrinsecamente immune alle interferenze elettromagnetiche. E' proprio quest'ultimo aspetto che vogliamo approfondire in questo e in alcuni successivi numeri della Rubrica della CEM. Cercheremo cioè di capire come si caratterizza l'immunità di un cavo alle interferenze elettromagnetiche. I contenuti che vengono presentati sono frutto di una sintesi originale basata sull'esperienza degli autori. Due riferimenti importanti e utili sono [1] e [2].

## Schermo a calza

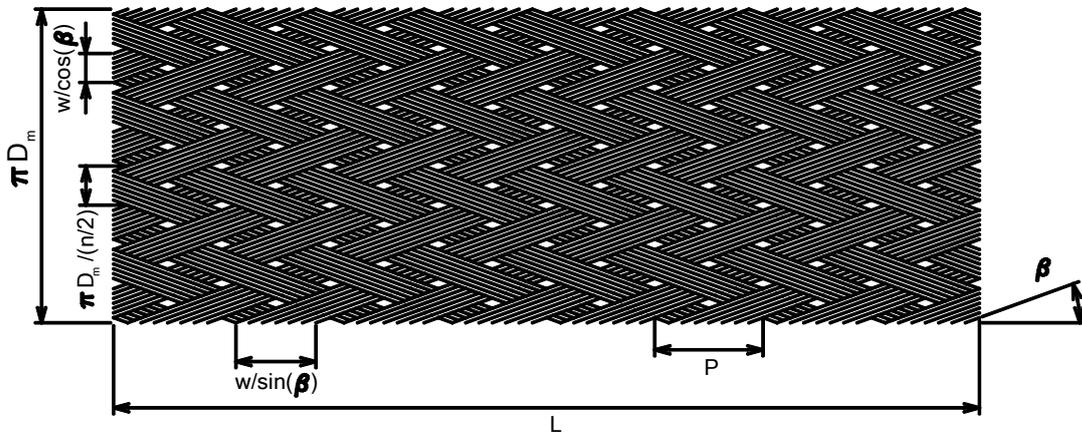
Idealmente i campi elettrico e magnetico associati alle cariche e alle correnti del segnale trasmesso da un generatore ad un carico per tramite di un cavo coassiale dovrebbero essere confinati all'interno del cavo stesso. Reciprocamente i campi elettrico e magnetico generati esternamente al cavo da una sorgente di interferenze non dovrebbero dar luogo a cariche e correnti indotte internamente. In effetti, con buona approssimazione, questo è vero, tuttavia ci sono delle circostanze sfavorevoli in cui, vuoi perché il segnale trasmesso è molto debole, vuoi perché il cavo è sottoposto ad una interferenza elettromagnetica molto intensa, lo scostamento dall'ideale diviene significativo.

La principale causa di non idealità, dal punto di vista della schermatura, nei cavi coassiali di impiego più comune consiste nel fatto che il conduttore esterno (o schermo) è costituito da una calza anziché da un conduttore continuo. Impiegando un conduttore esterno a calza, anziché continuo, si ottengono cavi coassiali dotati di maggiore maneggevolezza e robustezza, al costo però di una perdita di efficacia di schermatura. Per quelle applicazioni in cui si rende necessaria una elevata efficacia di schermatura si usano cavi in cui, ad esempio, il conduttore esterno consiste di due calze sovrapposte (cavi doppia-calza) oppure di un foglio metallico sottile (eventualmente una lamina avvolta a spirale) a cui è sovrapposta una calza oppure, nelle installazioni fisse, si possono utilizzare cavi semi-rigidi in cui il conduttore esterno è un vero e proprio tubo massiccio.

La calza realizza uno schermo imperfetto, con delle violazioni, cioè dei fori. Si veda la figura 1 in cui è rappresentata schematicamente la struttura della calza di un cavo coassiale. La rappresentazione di figura 1 è ottenuta immaginando di tagliare la calza parallelamente all'asse del cavo e di appiattirla sulla pagina. I parametri geometrici indipendenti necessari per descrivere la geometria della calza sono cinque: 1) il numero di fusi (o cinture)  $n$ , 2) il numero di fili  $N$  che compone ciascun fuso, 3) il diametro  $d$  dei fili, 4) l'angolo caratteristico della calza  $\beta$ , 5) il diametro medio della calza  $D_m$  che è la somma del diametro del dielettrico che isola il conduttore esterno dal conduttore interno più circa tre volte il diametro  $d$  dei fili che compongono la calza. Altri parametri utili derivati dai cinque indipendenti sono la larghezza dei fusi  $w = Nd$ , il passo della calza  $P = 2\pi D_m / (n \tan \beta)$  e la lunghezza ottenuta sviluppando la calza l'ungo l'asse del cavo  $L = \pi D_m / \tan \beta = n/2 \cdot P$ . La distanza fra i fori della calza lungo l'asse del cavo è il passo  $P$ , la distanza lungo la perpendicolare all'asse è  $P \tan \beta$ .

Il rapporto fra il volume pieno ( $w/\sin \beta$ )  $d L$  ed il volume totale (pieno più vuoto)  $P d L$  è detto *fattore di riempimento* e lo si indica con la lettera  $q$ . Ovviamente  $q < 1$ , e sarà tanto più piccolo quanto più ampie sono le violazioni. Si definisce *fattore di copertura ottica* il rapporto fra la

superficie coperta dalla calza e la superficie totale (coperta più scoperta)<sup>1</sup> e lo si indica con la lettera  $k_c$  ( $k_c < 1$ ). In genere il fattore di copertura ottica lo si esprime in percentuale. E' semplice ricavare da quanto finora definito (ma non lo facciamo) che il fattore di copertura ottica ed il fattore di riempimento sono in relazione biunivoca fra loro: infatti vale che  $k_c = 2q - q^2$  e  $q = 1 - \sqrt{1 - k_c}$ .

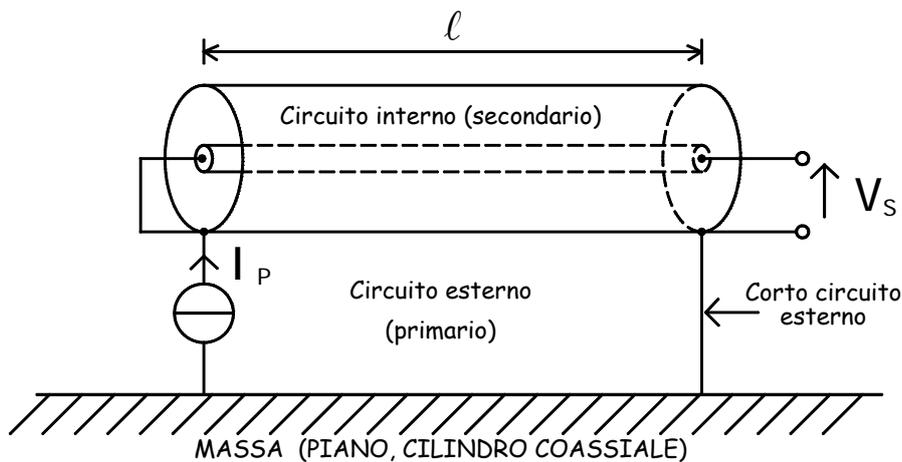


**Figura 1:** rappresentazione stilizzata della calza di un cavo coassiale.

E' intuitivo che il fattore di riempimento o, in maniera equivalente, il fattore di copertura ottica giocano un ruolo essenziale nel determinare l'efficacia di schermatura offerta dalla calza. Nel caso di un comune cavo coassiale del tipo RG 58 C/U (dati del fabbricante Suhner) si ha  $n = 16$ ,  $N = 6$ ,  $d = 0,15$  mm,  $\beta = 30^\circ$ ,  $D_m = 3,45$  mm e il filo è di rame stagnato. Il fattore di copertura ottica è circa il 94,6 %.

L'impedenza di trasferimento e l'ammettenza di trasferimento

La schermatura nei confronti del campo magnetico di un cavo coassiale si caratterizza in termini di *impedenza di trasferimento*  $Z_T$ . La *ammettenza di trasferimento*  $Y_T$  caratterizza invece la schermatura nei confronti del campo elettrico. Si noti bene:  $Z_T$  non è assolutamente uguale a  $1/Y_T$ .



**Figura 2:** rappresentazione circuitale della definizione operativa di impedenza di trasferimento.

<sup>1</sup> La superficie totale è  $\pi D_m L$ , quella coperta è  $\left( \pi D_m - \frac{n w}{2 \cos \beta} \right) \left( \pi D_m - \frac{n w}{2 \sin \beta} \right)$ .

Diamo delle definizioni operative di queste grandezze. Si consideri la figura 2. Si definiscono: circuito esterno (o primario) il circuito formato dallo schermo del cavo e il conduttore di massa (un piano esteso oppure un cilindro coassiale), circuito interno (o secondario) il circuito formato dal conduttore interno e lo schermo. Si faccia scorrere una corrente  $I_p$  nel circuito primario e si misuri la tensione di circuito aperto  $V_s$  indotta nel secondario. L'impedenza di trasferimento è il rapporto fra la tensione indotta internamente al cavo e la corrente che scorre sullo schermo, per unità di lunghezza di cavo. In formule

$$Z_T = \frac{V_s}{I_p} \frac{1}{l}$$

Si assume che lo spezzone di cavo abbia lunghezza  $l$  piccola rispetto alla lunghezza d'onda  $\lambda$  (la più piccola delle lunghezze d'onda nel primario e nel secondario, alla frequenza dell'eccitazione<sup>2</sup>). Si noti che il primario è in corto-circuito e quindi è sede di un intenso campo magnetico e di un debole campo elettrico. Più piccola è l'impedenza di trasferimento maggiore sarà l'efficacia di schermatura del cavo nei confronti del campo magnetico.

La definizione di ammettenza di trasferimento è duale rispetto a quella di impedenza di trasferimento. Si veda la figura 3. L'ammettenza di trasferimento è il rapporto fra la corrente indotta nel secondario  $I_s$  e la tensione nel primario, impressa fra lo schermo e la massa,  $V_p$ , per unità di lunghezza del cavo. In formule

$$Y_T = \frac{I_s}{V_p} \frac{1}{l}$$

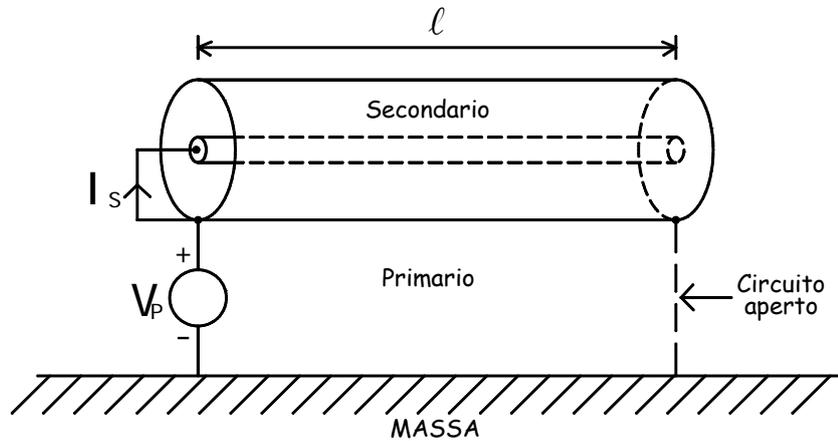
Si osservi che il primario è in circuito aperto e quindi è sede prevalentemente di un campo elettrico piuttosto che magnetico. Più piccola è l'ammettenza di trasferimento maggiore è l'efficacia schermante nei confronti del campo elettrico. E' lecito stupirsi del fatto che scorra corrente nel secondario. Il fatto è che il conduttore interno è accoppiato alla massa per via capacitiva. Se lo schermo è continuo l'accoppiamento capacitivo non c'è e l'ammettenza di trasferimento è zero. Se lo schermo è a calza il conduttore interno "vede" la massa attraverso i fori e i due conduttori risultano accoppiati da una capacità parassita. Risulta quindi  $Y_T = j\omega C_T$  dove  $C_T$  è la capacità per unità di lunghezza fra conduttore interno e massa (in presenza dello schermo). E' evidente che la capacità di accoppiamento  $C_T$  dipende, oltre che dalle caratteristiche geometriche e fisiche del cavo e del suo schermo, anche dalle caratteristiche geometriche e fisiche del circuito esterno. Non è cioè una proprietà esclusiva del cavo. Di fatto nella pratica l'accoppiamento elettrico è in genere trascurabile rispetto a quello magnetico per cui si sente spesso parlare di impedenza di trasferimento e poco di ammettenza di trasferimento. Anche i metodi di misura più consolidati sono stati concepiti per quantificare l'impedenza di trasferimento. Tuttavia non è possibile escludere che in particolari circostanze (intenso campo elettrico esterno, circuito secondario ad alta impedenza) gli effetti

---

<sup>2</sup> Si rammenti che la lunghezza d'onda  $\lambda$  è il rapporto fra la velocità di propagazione dell'onda  $v$  e la sua frequenza  $f$ , cioè  $\lambda = v/f$ . La velocità di propagazione dell'onda in un mezzo omogeneo isolante è ridotta di un fattore  $\sqrt{\epsilon_r}$  rispetto alla velocità di propagazione della luce nel vuoto, dove  $\epsilon_r$  è la costante dielettrica relativa dell'isolante. Nel circuito primario l'isolante è l'aria ( $\epsilon_r = 1$ , in genere è trascurabile il piccolo volume del primario occupato dalla guaina in PVC del cavo). Nel circuito secondario l'isolante è solitamente polietilene o teflon ( $\epsilon_r = 2,3$ ). L'ipotesi  $l \ll \lambda$  è detta delle *costanti concentrate*. E' l'ipotesi per cui i ritardi dovuti agli effetti di propagazione dell'onda lungo la lunghezza  $l$  possono essere considerati trascurabili, ed il comportamento del circuito elettrico può essere previsto con un modello costituito da resistenze, induttanze, capacità e induttanze mutuamente accoppiate (le costanti concentrate, appunto).

dovuti all'ammettenza di trasferimento non siano addirittura dominanti rispetto a quelli dovuti all'impedenza di trasferimento.

Uno schermo continuo garantisce  $Y_T = 0$ , quindi ci mette al riparo dagli accoppiamenti elettrici. Ma che dire degli accoppiamenti magnetici? Qual è il comportamento che è prevedibile attendersi da  $Z_T$  se lo schermo è continuo oppure a calza? A queste e ad altre domande risponderemo nel prossimo numero della Rubrica della CEM.



**Figura 3:** rappresentazione circuitale della definizione operativa di ammettenza di trasferimento.

#### Riferimenti

- [1] Edward F. Vance, "Shielding Effectiveness of Braided-Wire Shields", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-17, no. 2, pp. 71-77, May 1975.
- [2] International Standard IEC 1196-1, "Radio-Frequency cables – Part 1: Generic specification – General definitions, requirements and test methods", First edition, 1995-05.