

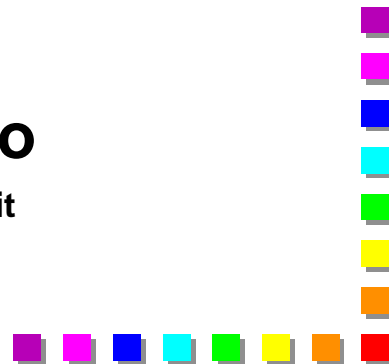


*E.M.I. Shield e Grounding:
analisi applicata ai sistemi di
cablaggio strutturato*

Tecniche di schermatura

Pier Luca Montessoro

pierluca.montessoro@diegm.uniud.it



Nota di Copyright

- Questo insieme di trasparenze (detto nel seguito slides) è protetto dalle leggi sul copyright e dalle disposizioni dei trattati internazionali. Il titolo ed i copyright relativi alle slides (ivi inclusi, ma non limitatamente, ogni immagine, fotografia, animazione, video, audio, musica e testo) sono di proprietà degli autori indicati a pag. 1.
- Le slides possono essere riprodotte ed utilizzate liberamente dagli istituti di ricerca, scolastici ed universitari afferenti al Ministero della Pubblica Istruzione e al Ministero dell'Università e Ricerca Scientifica e Tecnologica, per scopi istituzionali, non a fine di lucro. In tal caso non è richiesta alcuna autorizzazione.
- Ogni altra utilizzazione o riproduzione (ivi incluse, ma non limitatamente, le riproduzioni su supporti magnetici, su reti di calcolatori e stampate) in toto o in parte è vietata, se non esplicitamente autorizzata per iscritto, a priori, da parte degli autori.
- L'informazione contenuta in queste slides è ritenuta essere accurata alla data della pubblicazione. Essa è fornita per scopi meramente didattici e non per essere utilizzata in progetti di impianti, prodotti, reti, ecc. In ogni caso essa è soggetta a cambiamenti senza preavviso. Gli autori non assumono alcuna responsabilità per il contenuto di queste slides (ivi incluse, ma non limitatamente, la correttezza, completezza, applicabilità, aggiornamento dell'informazione).
- In ogni caso non può essere dichiarata conformità all'informazione contenuta in queste slides.
- In ogni caso questa nota di copyright non deve mai essere rimossa e deve essere riportata anche in utilizzi parziali.

Obiettivi di una schermatura

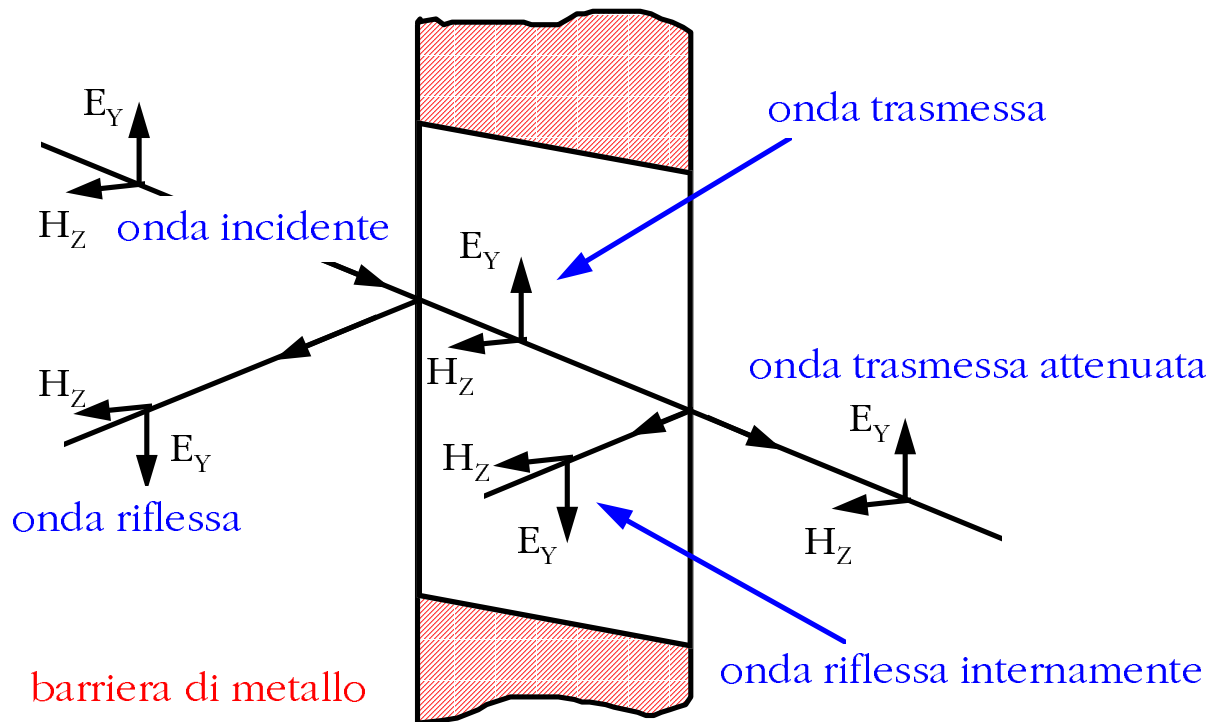
- Ridurre l'energia elettromagnetica incidente dall'esterno su un sistema "vittima"
- Ridurre l'energia elettromagnetica irradiata da un sistema "sorgente"
- In condizioni normali vale la reciprocità dei due problemi (medesima efficacia dello stesso schermo in entrambi i casi)
- Efficacia di una schermatura:

$$SE_{dB} = 10 \log \left(\frac{\text{potenza incidente}}{\text{potenza trasmessa}} \right)$$

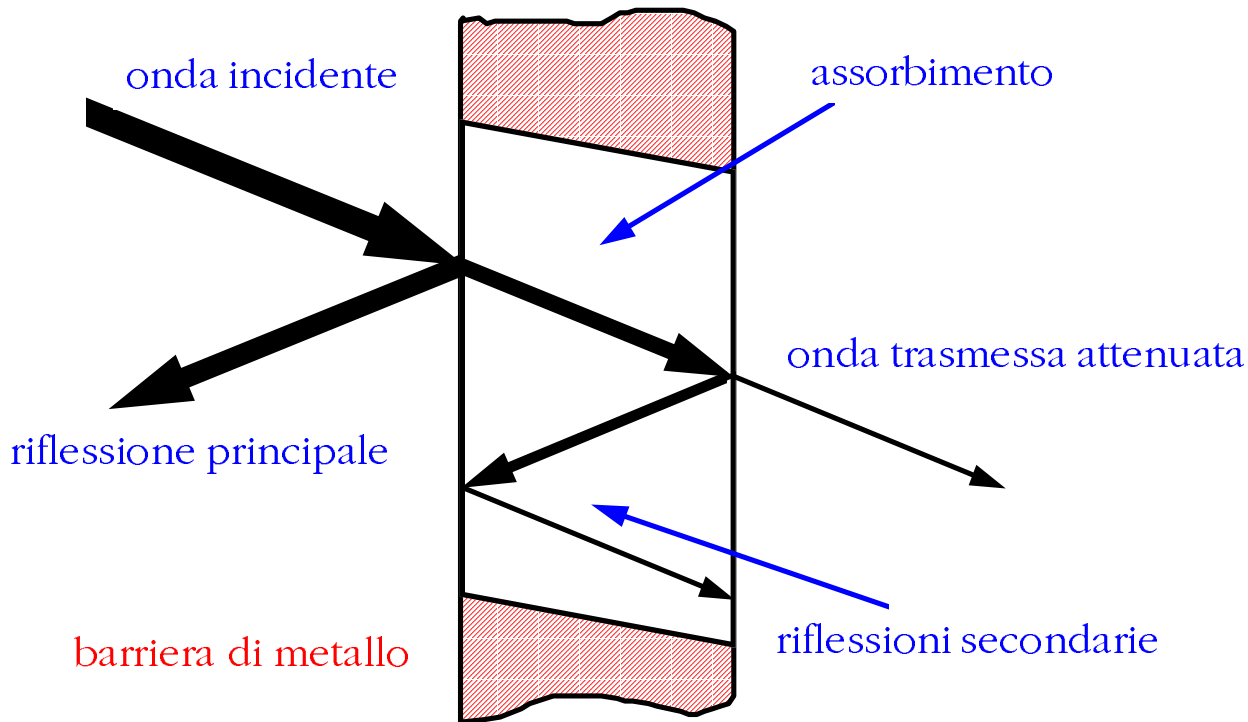
Funzionamento di uno schermo

- Si basa sulla combinazione di due fenomeni:
 - riflessione
 - assorbimento
- La riflessione è dovuta alla discontinuità di impedenza del mezzo attraverso cui l'onda elettromagnetica si propaga (per esempio nel passaggio dall'aria al metallo)
- L'assorbimento è dovuto alla capacità del mezzo (lo schermo) di dissipare l'energia elettromagnetica dell'onda che lo attraversa

Funzionamento di uno schermo

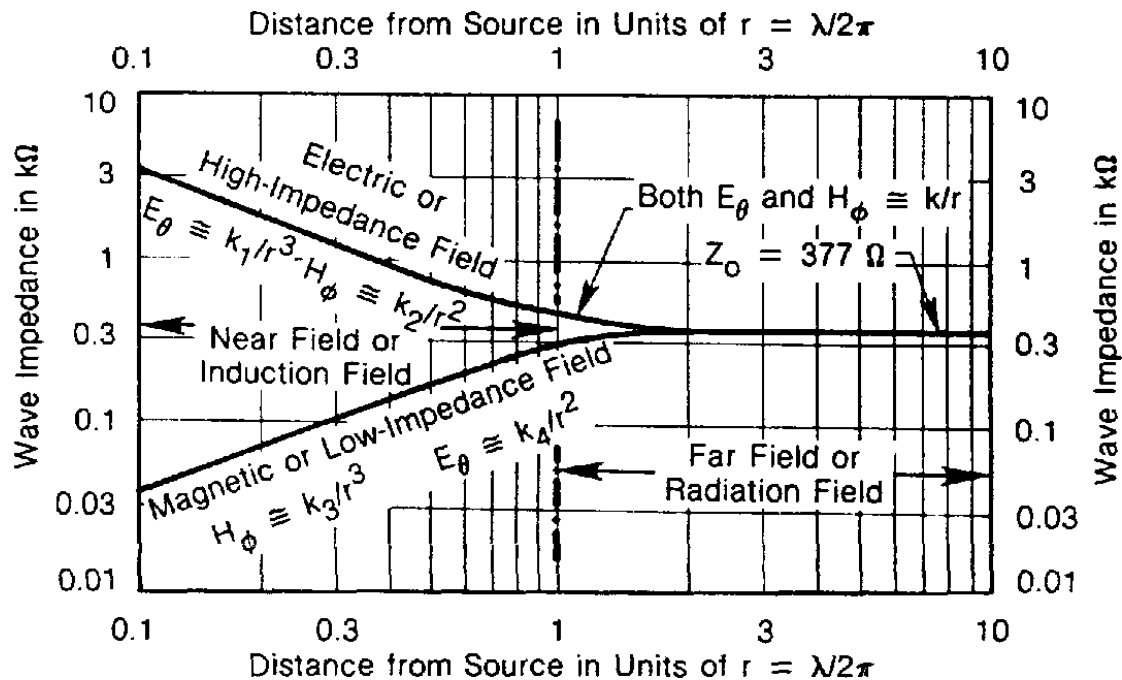


Funzionamento di uno schermo



Riflessione

■ Diagramma dell'impedenza di un'onda elettromagnetica:



Riflessione

- Ogni metallo omogeneo è caratterizzato da una grandezza detta *impedenza intrinseca*:

$$Z_j = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}}$$

dove: σ = conducibilità, μ = permeabilità magnetica, ϵ = costante dielettrica

Nell'aria σ è molto bassa, e in particolare $\sigma \ll \omega\epsilon$:

$$Z_{aria} = \sqrt{\frac{\mu_{aria}}{\epsilon_{aria}}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377\Omega$$

Riflessione

- Per i metalli, $\sigma \gg \omega\epsilon$, e quindi:

$$Z_{\text{metallo}} (\Omega) = 3.69 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{\mu_r \cdot f_{MHz}}{\sigma_r}}$$

(σ_r e μ_r conducibilità e permeabilità relative rispetto al rame)

- Per il rame:

$$Z_{Cu} = 3.69 \cdot 10^{-4} \Omega \quad @ 1MHz$$

$$Z_{Cu} = 3.69 \cdot 10^{-2} \Omega \quad @ 10GHz$$

Riflessione

- **Attenuazione ottenibile nel caso di onde elettromagnetiche ad alta impedenza (prevalenza del campo elettrico):**

$$R(dB) = 141.7 - 10 \log \left(\frac{\mu_r f_{MHz}^3 r^2}{\sigma_r} \right)$$

(r distanza dello schermo dalla sorgente)

Riflessione

- **Attenuazione ottenibile nel caso di onde elettromagnetiche a bassa impedenza (prevalenza del campo magnetico):**

$$R(dB) = 74.6 - 10 \log \left(\frac{\mu_r}{f_{MHz} \sigma_r r^2} \right)$$

(r distanza dello schermo dalla sorgente)

Riflessione

- **Attenuazione ottenibile nel caso di onde elettromagnetiche piane (campo lontano):**

$$R(dB) = 108.1 - 10 \log \left(\frac{\mu_r f_{MHz}}{\sigma_r} \right)$$

Effetto pelle

- Alle frequenze elevate la corrente tende a scorrere soltanto sulla superficie dei conduttori
- Si definisce profondità di pelle (δ) lo spessore di un metallo in cui scorre $(1-1/e)$ cioè il 63.2% della corrente totale
- Se lo spessore dello schermo è $t \gg 3\delta$, l'effetto pelle è trascurabile (in 3δ scorre il 95% della corrente)
- Per il rame, a 10 MHz, $\delta = 0.05$ mm

Riflessioni secondarie

- Se lo schermo è molto sottile e l'assorbimento non è elevato, l'onda riflessa internamente può sommarsi costruttivamente (in fase) o distruttivamente (in controfase) con l'onda trasmessa in uscita dalla superficie interna dello schermo
- Tale onda, però, transita due volte attraverso lo schermo, e quindi viene attenuata due volte
- Il fenomeno è quasi sempre trascurabile, tranne quando lo spessore dello schermo è inferiore a δ
- E` importante considerarlo per schermature tramite vernici

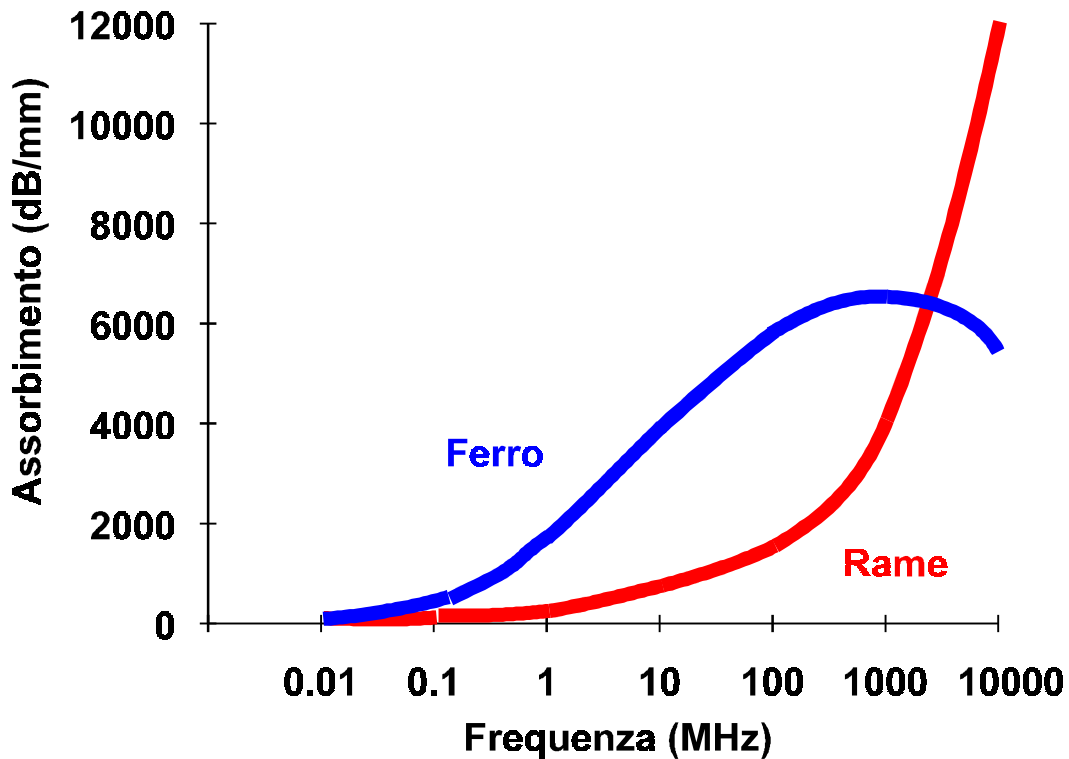
Assorbimento

- Per i metalli, l'attenuazione per assorbimento vale:

$$A(\text{dB} / \text{mm}) = 131.4 \sqrt{f_{\text{MHz}} \mu_r \sigma_r}$$

(σ_r e μ_r conducibilità e permeabilità relative rispetto al rame)

Assorbimento



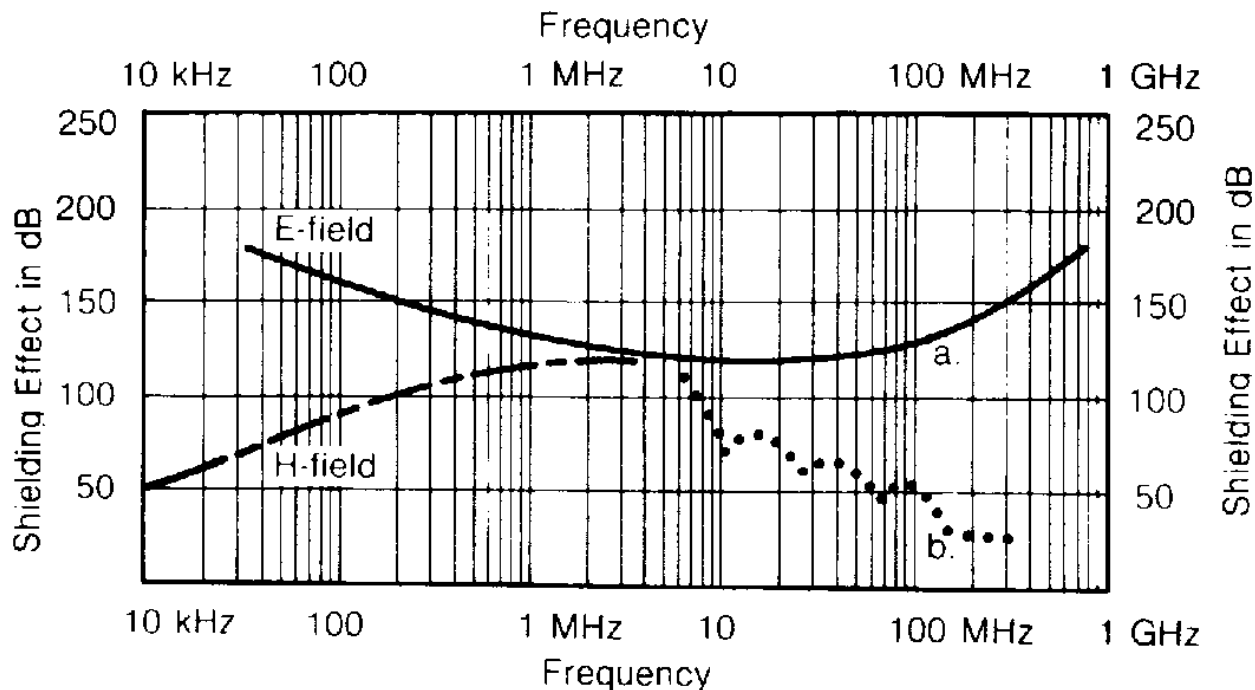
Assorbimento

- L'andamento dell'assorbimento al crescere della frequenza è legato all'effetto pelle: la corrente indotta scorre soltanto sulla superficie esterna dello schermo, e non penetra all'interno
- Alle basse frequenze schermi di spessore inferiore a 0.2 mm non presentano assorbimento significativo, e l'unico effetto di schermatura è dovuto alla riflessione, che richiede un'elevata conducibilità

Efficacia della schermatura

- A frequenze elevate è importante l'assorbimento introdotto da uno schermo metallico conduttore
- A frequenze basse, per onde elettromagnetiche ad alta impedenza, è importante la riflessione introdotta da uno schermo metallico, che presenta impedenza intrinseca molto bassa
- A frequenze basse, per onde elettromagnetiche a bassa impedenza, l'attenuazione ottenibile non è molto elevata (è il caso di coppie vicine di conduttori)

Efficacia della schermatura



Effetto combinato di assorbimento e riflessione per schermo in rame da 25 μm alla distanza di 1 m - (a) foglio continuo, (b) treccia

Considerazioni pratiche

- **Quanto visto finora vale per schermi infinitamente lunghi o per involucri completamente sigillati. Nella pratica i sistemi sono molto più imperfetti.**
- **Dal punto di vista del cablaggio strutturato interessano in particolare le tecniche di realizzazione di cablaggi in cavo schermato:**
 - **schermature dei cavi**
 - **connettori**
 - **geometria del sistema**

Impedenza di trasferimento

- Anche per i cavi schermati si può definire la grandezza “efficacia della schermatura”
- Poichè il conduttore (o i conduttori) all'interno dello schermo si comportano da antenna ricevente, la definizione diventa:

$$\begin{aligned}
 SE(dB) &= 20 \log \frac{V_{\text{indotta senza schermo}}}{V_{\text{indotta con schermo}}} = \\
 &= 20 \log \frac{E_{\text{senza schermo}}}{E_{\text{con schermo}}} = 20 \log \frac{H_{\text{senza schermo}}}{H_{\text{con schermo}}}
 \end{aligned}$$

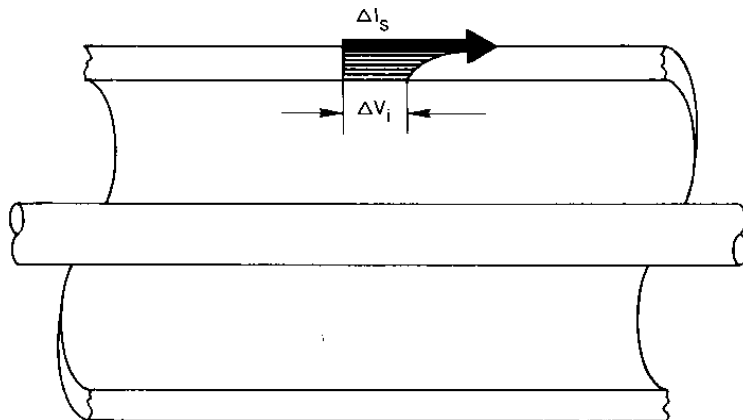
Impedenza di trasferimento

- La *SE* così definita, però, non è facilmente misurabile:
 - la tensione misurata dipende dai connettori agli estremi del cavo
 - richiede due cavi identici, tranne che per la schermatura, disposti, in sequenza, in modo assolutamente identico all'interno del campo elettromagnetico di prova
- Per poter effettuare misure accurate e ripetibili si introduce il concetto di *impedenza di trasferimento*

Impedenza di trasferimento

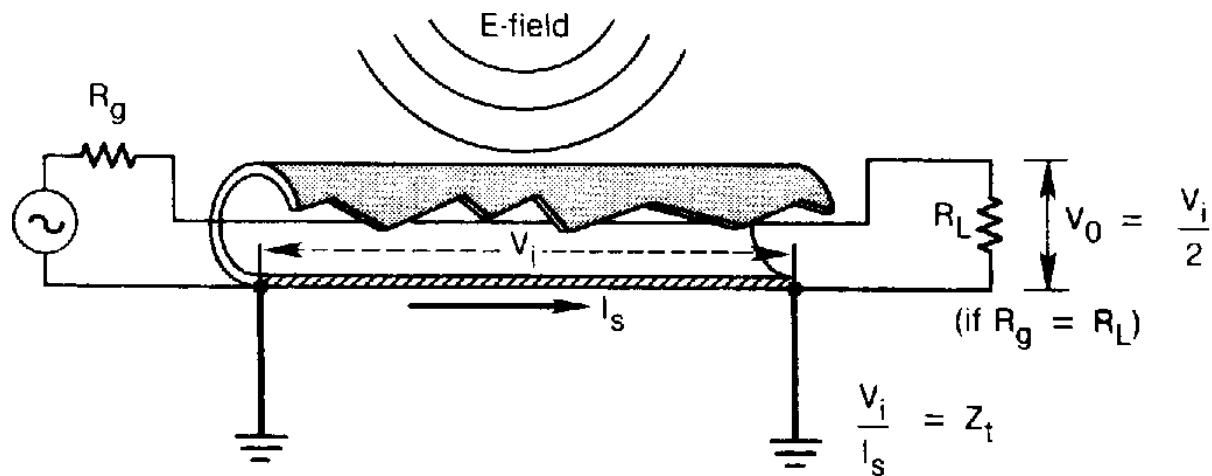
- E` definita come rapporto tra la corrente indotta sulla superficie esterna dello schermo e la tensione che si sviluppa sulla superficie interna:

$$Z_t (\Omega) = \frac{\Delta V_i}{\Delta I_s}$$



Impedenza di trasferimento

Metodo di misura:

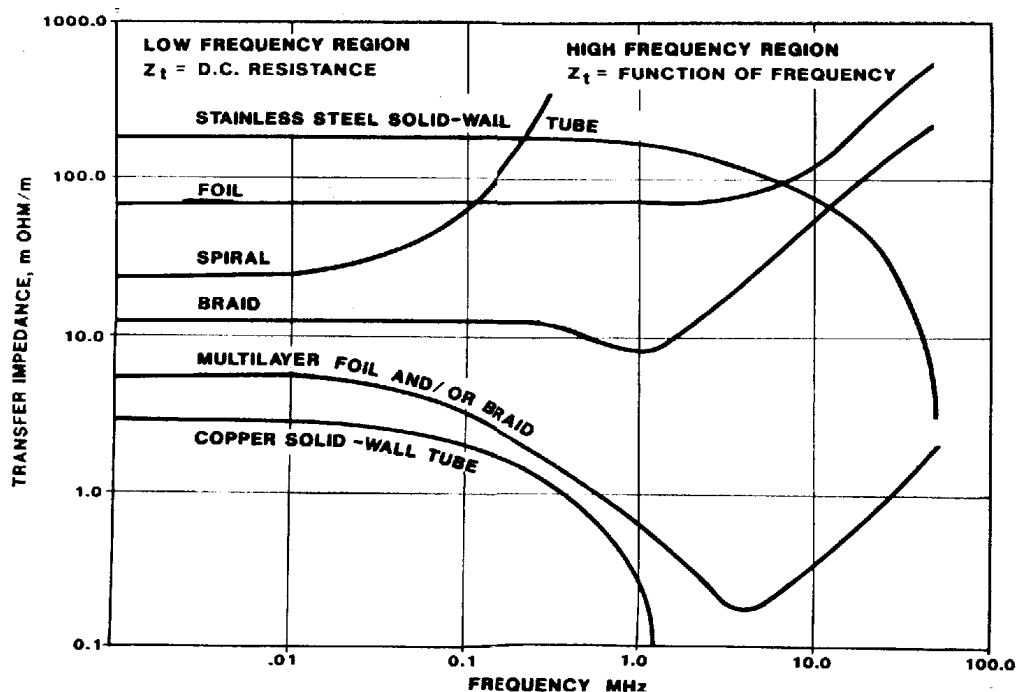


Nota: il valore di Z_t è normalizzato rispetto ad uno schermo di 1 m di lunghezza

Impedenza di trasferimento

- Poiché la tensione indotta è proporzionale a Z_t , minore è Z_t , migliore è il cavo
- A frequenze inferiori a 100 KHz è praticamente uguale alla resistenza dello schermo in corrente continua
- A seconda del tipo di schermo, può dipendere moltissimo dalla “storia” del cavo (es. pieghe raddrizzate, ecc.)

Impedenza di trasferimento



Relazione tra SE e Zt

- Ammettendo alcune semplificazioni, si ha:

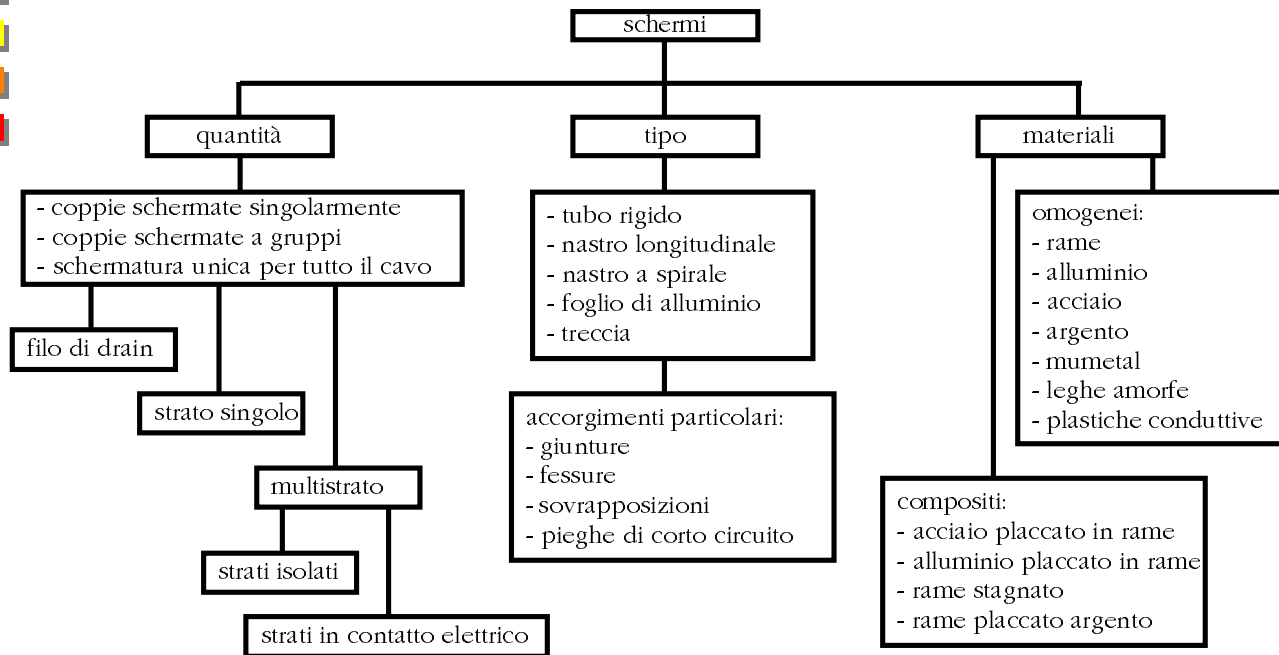
$$SE (dB) = 20 \log Z_{0l} - 20 \log (Z_{tx} \cdot l)$$

dove: $Z_{0l} (\Omega)$ è l'impedenza caratteristica della linea schermata rispetto a terra, Z_{tx} è l'impedenza di trasferimento (Ω / m) dello schermo, e $l (m)$ è la lunghezza

Tipi di schermature per cavi

- La schermatura in un cavo è sempre il risultato di un compromesso tra i seguenti fattori:
 - efficacia dello schermo
 - efficacia nella trasmissione dei segnali
 - robustezza meccanica alla trazione
 - flessibilità e robustezza all'installazione
 - stabilità delle caratteristiche nel tempo
 - maneggevolezza, facilità di installazione
 - facilità di manutenzione
 - costo

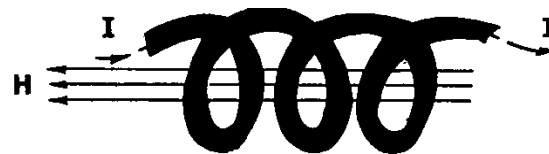
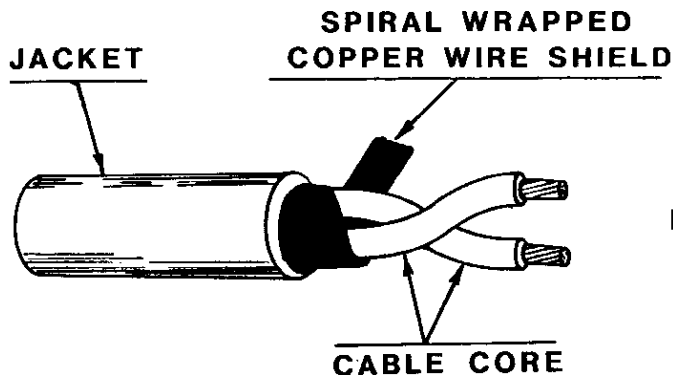
Tipi di schermature per i cavi



Tubo metallico rigido

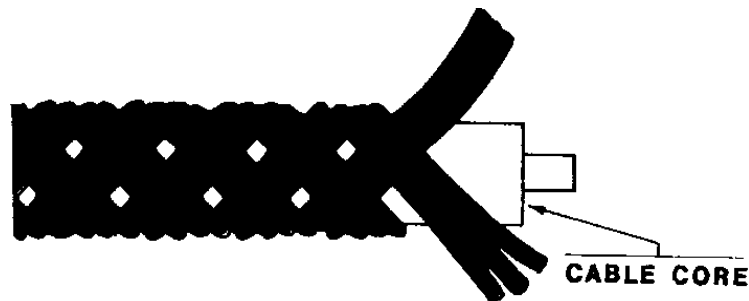
- Impiegabile come canalina a muro
- Elevata schermatura
- Alle basse frequenze non si verifica l'effetto pelle, e l'attenuazione è dovuta esclusivamente alla conducibilità

Calza a spirale



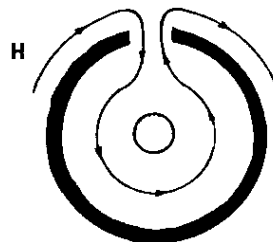
- Produce campi magnetici longitudinali nei conduttori interni
- Pessime prestazioni alle alte frequenze

Calza intrecciata (braid)



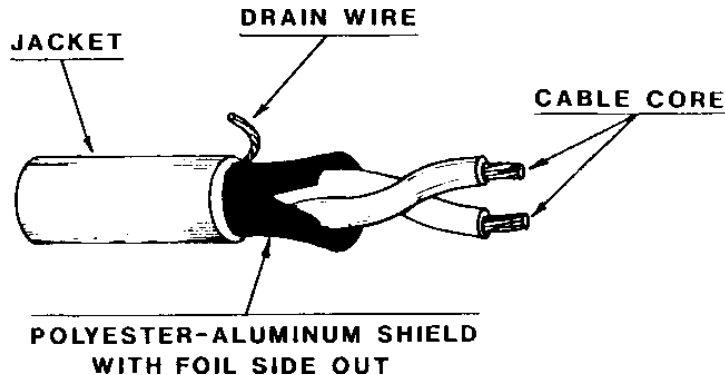
- L'efficacia della schermatura dipende:
 - alle basse frequenze dalla resistenza in corrente continua
 - alle alte frequenze dall'effetto delle spire intrecciate (come per la calza a spirale) e dalla percentuale di copertura

Calza intrecciata



- La calza intrecciata presenta sempre delle aperture attraverso cui il campo elettromagnetico può irradiarsi
- L'alternanza dei fili della calza dalla superficie all'interno e viceversa riduce i benefici dell'effetto pelle, portando direttamente la corrente indotta in prossimità dei conduttori interni

Foglio di alluminio (foil)



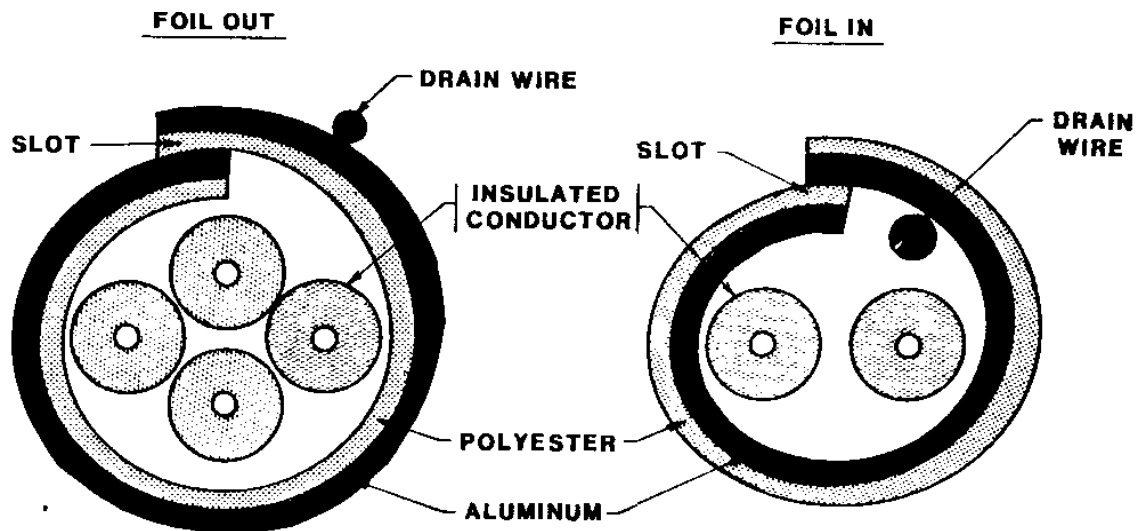
- Si tratta di un sottile nastro metallico avvolto longitudinalmente o a spirale attorno ai conduttori interni
- In alternativa all'alluminio si usano, talvolta, rame, leghe magnetiche o plastiche conduttrici

Foglio di alluminio

- Il sottile foglio è fragile, e normalmente è saldato al rivestimento del cavo o laminato su un nastro di poliestere per fornire una sufficiente resistenza meccanica. Nonostante questo, può rompersi se non viene rispettato il raggio minimo di curvatura previsto per il cavo
- La resistenza in corrente continua è elevata, ed è necessario un filo di “drain” per garantire la continuità elettrica

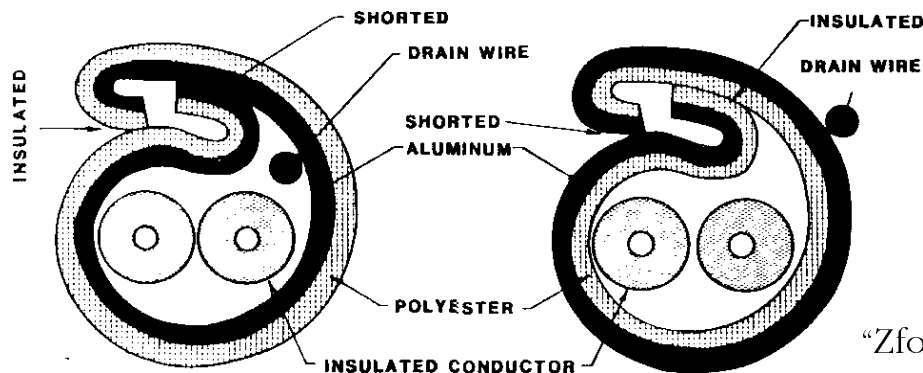
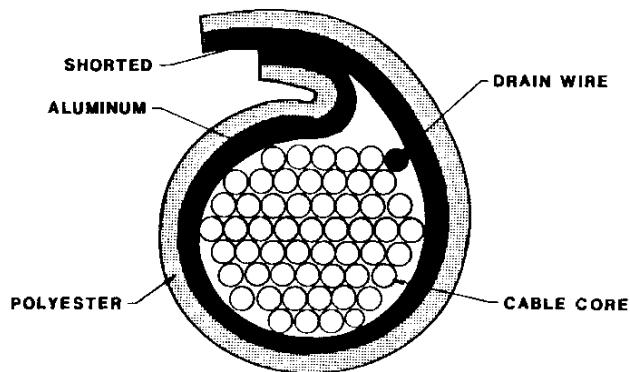
Foglio di alluminio

- Sovrapponendo due lembi del foglio si ottiene una copertura quasi totale:



Foglio di alluminio

- Si possono utilizzare tecniche di sovrapposizione più sofisticate:



“Zfold” Belden

Schermature combinate foglio-calza



foglio/calza



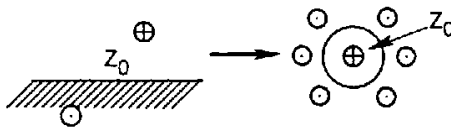
foglio/calza/foglio

- Ne esistono di tipi diversi
- Offrono una schermatura ottimale su un'ampia gamma di frequenze

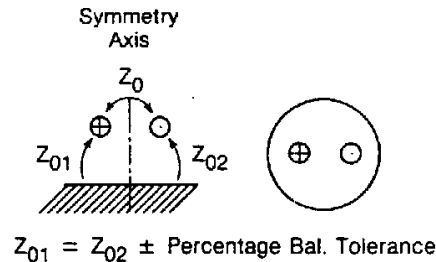


Linee bilanciate e sbilanciate: il ruolo dello schermo

- **Linee sbilanciate: lo schermo è un conduttore attivo, porta la corrente di ritorno alla sorgente**
- **Linee bilanciate: lo schermo ha soltanto un ruolo protettivo**

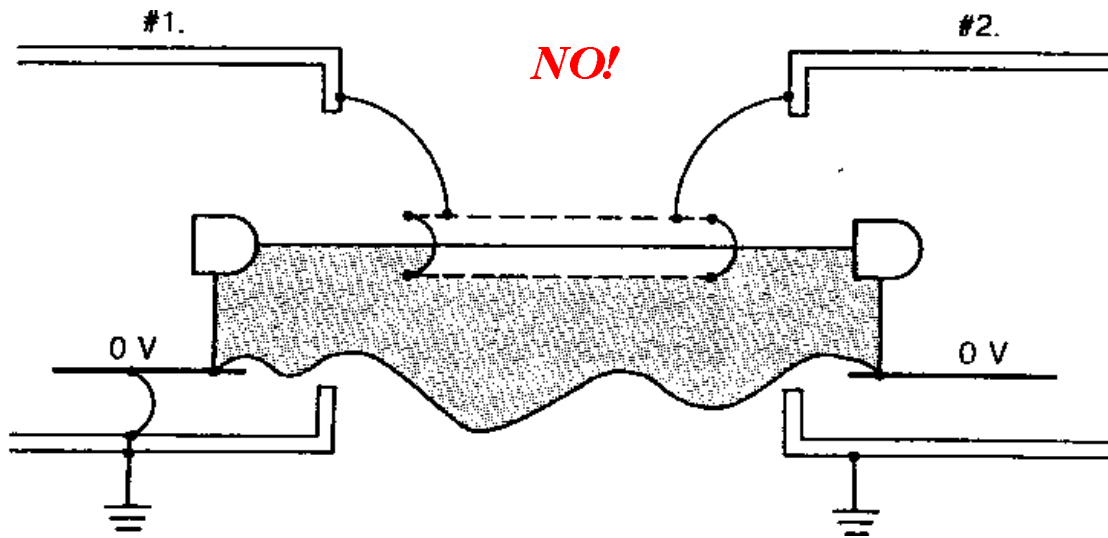


a. Unbalanced Shielded Cable
(Shown as an Evolution from
an Unbalanced Line)



b. Balanced Shielded Cable
(Shown as an Evolution of a
Balanced, or Symmetrical Line)

Lo schermo deve sempre circondare entrambi i conduttori che portano il segnale



Connettori

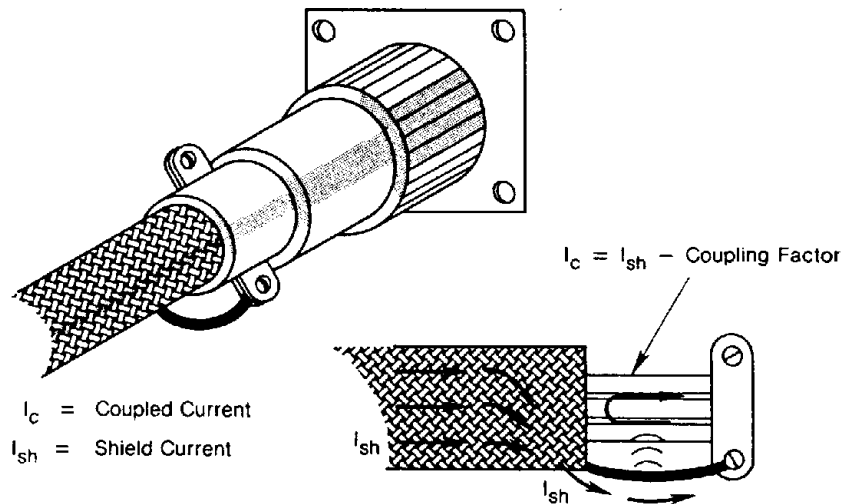
- La terminazione dei cavi è sempre il punto debole delle schermature
- Le caratteristiche dei cavi sono normalmente riferite ad installazioni ideali
- In realtà bisogna considerare:
 - l'impedenza del collegamento connettore-schermo
 - la capacità di schermatura totale del connettore

Connettori

- Consideriamo 0.75 m di calza di rame ($3 \text{ m}\Omega/\text{m}$)
- Valore tipico della resistenza di contatto di una crimpatura: $0.5 \text{ m}\Omega$
- Valore tipico della resistenza di contatto del connettore avvitato a mano (maschio con femmina): $3 \text{ m}\Omega$
- Totale (considerando le due terminazioni):
 $2 \times (0.5 + 3) = 7 \text{ m}\Omega$
- Resistenza della calza di rame:
 $0.75 \times 3 = 2.25 \text{ m}\Omega$

Connettori

- Terminazioni improprie possono causare EMI maggiore che se non ci fosse lo schermo



Invecchiamento dei cavi

- Z_t peggiora da 5 a 30 volte in 10 anni, con un valor medio di 10 volte (25%, cioè 2 dB / anno)

