

CAPITOLO 5

SCHERMATURE DEGLI APPARATI ELETTRICI ED ELETTRONICI

5.1 Introduzione

5.2 Efficienza di schermatura

5.3 Schermatura dei cavi che attraversano uno schermo

5.4 Importanza delle aperture: il principio di Babinet

5.5 Calcolo dell'efficienza di schermatura

Sommario

Il problema di isolare dall'influenza dei campi elettromagnetici i circuiti elettronici o, dualmente, di impedire ai campi prodotti dalle apparecchiature elettroniche di propagarsi entro l'ambiente circostante, viene risolto per mezzo della schermatura degli apparati elettrici ed elettronici che costituiscono il sistema in esame. In questo capitolo si fornirà una panoramica generale sugli "schermi" metallici.

5.1 Introduzione

Il termine *schermo* indica un contenitore metallico che racchiude completamente una apparecchiatura elettronica. I compiti di uno schermo sono due, complementari tra loro. Il *primo compito*, schematizzato nella Figura 5.1, è di impedire alle emissioni dell'apparecchiatura di irradiarsi all'esterno del contenitore, in modo da non compromettere il soddisfacimento delle norme sulle emissioni irradiate e da impedire all'apparecchiatura di causare interferenze con altri apparecchi.

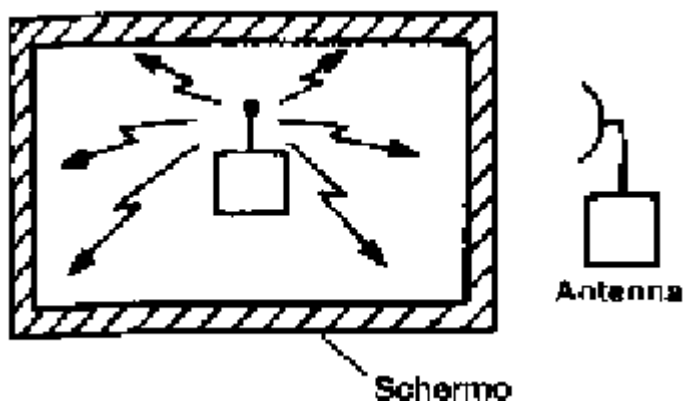


Figura 5.1: esempio di schermo.

Il *secondo compito*, proposto nella Figura 5.2, è di impedire alle emissioni radiate esterne all'apparecchiatura di accoppiarsi con i dispositivi elettronici interni, causando così interferenze al loro funzionamento. Ad esempio, la schermatura può essere usata per ridurre la suscettività ai segnali esterni causati da trasmettitori ad alta potenza, ossia tipicamente da radar o trasmettitori radio e TV.

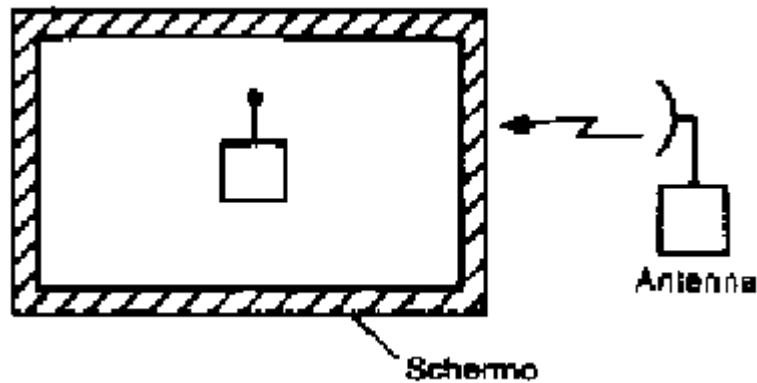


Figura 5.2: schermo di protezione.

Concettualmente, quindi, uno schermo è una barriera alla trasmissione dei campi elettromagnetici. Questa definizione, data la sua generalità, può essere applicata anche alle emissioni condotte, ossia alle correnti di disturbo che si propagano attraverso i cavi che collegano tra loro le varie apparecchiature di un sistema o che collegano le singole apparecchiature alla rete di distribuzione dell'energia e, pertanto, un eventuale filtro posto in serie a tali cavi, al fine appunto di attenuare o eliminare del tutto tali disturbi, potrebbe essere considerato anch'esso come uno schermo. Ad ogni modo, in questo contesto sarà utilizzata la nozione di schermo in senso stretto, con riferimento semplicemente ad una barriera per le emissioni radiate.

5.2 Efficienza di schermatura

Il parametro più importante per qualificare uno schermo è *l'efficienza di schermatura*, per la quale sono possibili due definizioni:

- è definito come rapporto tra il modulo del campo elettrico, o del campo magnetico, incidente sullo schermo ed il modulo del campo elettrico, o magnetico, trasmesso attraverso lo schermo;
- oppure si può definire come il rapporto tra il modulo del campo elettrico, o del campo magnetico, incidente sui dispositivi interni senza lo schermo ed il modulo del campo elettrico, o magnetico, incidente sui dispositivi interni in presenza dello schermo.

Nel calcolare i valori ideali dell'efficienza di schermatura, si possono ottenere anche valori piuttosto grandi, dell'ordine di centinaia di decibel. Ad esempio, una efficienza di schermatura di 100 dB significa che in presenza dello schermo il campo incidente viene ridotto di un fattore pari a 10^5 . Tuttavia, per ottenere un valore talmente alto di efficienza di schermatura, è necessario che lo schermo racchiuda completamente i dispositivi elettronici e non presenti alcuna via d'accesso dall'esterno, come ad esempio giunture, aperture, fessure o cavi. Al contrario, qualsiasi via di accesso attraverso lo schermo, se non adeguatamente trattata, può ridurre drasticamente l'efficienza di schermatura.

5.3 Schermatura dei cavi che attraversano uno schermo

Per capire l'importanza della schermatura dei cavi che attraversano uno schermo, è possibile partire da un esempio concreto e molto istruttivo. Si consideri uno schermo realizzato mediante una scatola metallica chiusa, in cui entra un filo, ad esempio quello necessario a portare l'alimentazione ai dispositivi interni oppure quello di collegamento con una periferica esterna, come illustrato in Figura 5.3.

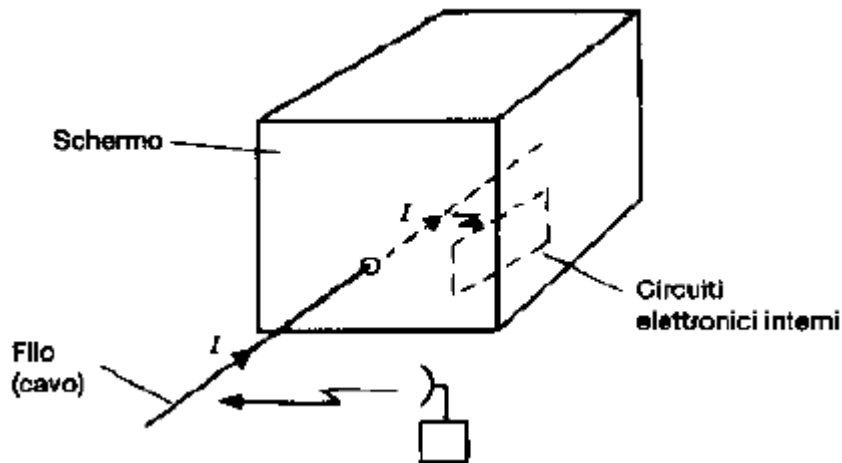


Figura 5.3: esempio di schermatura di dispositivi elettronici.

Si ipotizzi, inoltre, che una vicina sorgente elettromagnetica, ad esempio una antenna, irradi un campo elettromagnetico. Questo campo si accoppia con il filo e induce quindi in esso una corrente, che fluisce liberamente attraverso lo schermo, dal momento che il filo non presenta alcun filtro di protezione, per cui è in grado di accoppiarsi con i dispositivi interni. Analogamente, può avvenire anche il processo contrario: un eventuale disturbo generato all'interno dello schermo può accoppiarsi con il filo ed essere convogliato all'esterno, dove è libero di irradiarsi. Questi meccanismi di penetrazione del campo annullano, di fatto, l'efficienza dello schermo. Di conseguenza, per preservare l'efficienza, è opportuno prendere dei provvedimenti:

- si possono collocare dei filtri sul cavo, in corrispondenza del punto di attraversamento dello schermo;
- è possibile usare cavi schermati con il proprio schermo collegato, per l'intero perimetro, allo schermo dell'apparecchiatura, come illustrato nella Figura 5.4.

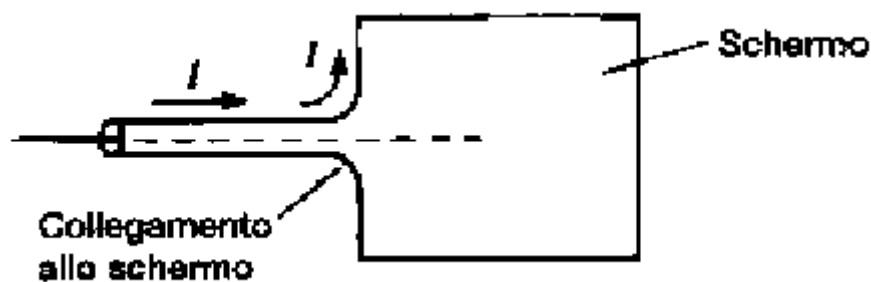


Figura 5.4: utilizzo di cavi schermati.

Si osservi che il collegamento tra i due schermi deve avvenire per l'intero perimetro; infatti, se lo schermo del cavo è collegato allo schermo dell'apparecchiatura semplicemente con un altro filo, come indicato in Figura 5.5, si ipotizzano che alcuni campi esterni abbiano indotto sul cavo delle correnti di disturbo; tramite il filo usato per il collegamento, è possibile che le correnti presenti sullo schermo del cavo vengano condotte sulla superficie interna dello schermo dell'apparecchiatura.

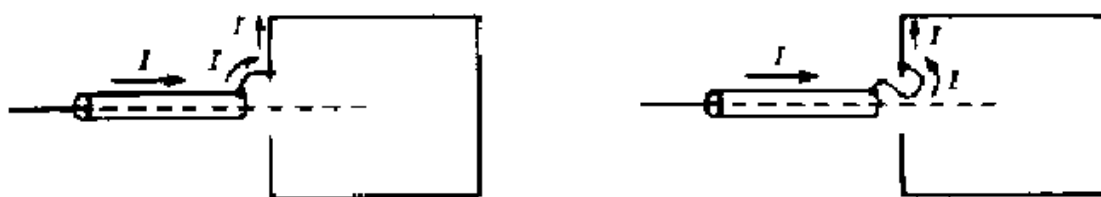


Figura 5.5: esempi di collegamento del filo allo schermo.

In questa situazione, le correnti indotte sulla superficie interna dello schermo possono irradiare ed interferire con i dispositivi interni. Vale, ovviamente, il discorso contrario: se lo schermo del cavo non è collegato per l'intero suo perimetro allo schermo dell'apparecchiatura, le eventuali correnti di disturbo

presenti sulla superficie interna di quest'ultimo possono uscire fluendo lungo la superficie esterna dello schermo del cavo e da qui irradiare. Queste sono tipiche situazioni in cui, rimuovendo lo schermo posto attorno al cavo di collegamento esterno, si nota una diminuzione delle emissioni irradiate dal cavo stesso, quando, invece, intuitivamente si aspetterebbe il contrario. Questi illustrati sono casi tipici in cui la schermatura viene realizzata nel modo sbagliato, al punto da peggiorare l'efficienza. In generale, quindi, uno schermo collocato attorno ai fili di un cavo non riduce necessariamente le emissioni irradiate del cavo. Una spiegazione molto semplice si ottiene facendo riferimento alla Figura 5.6.

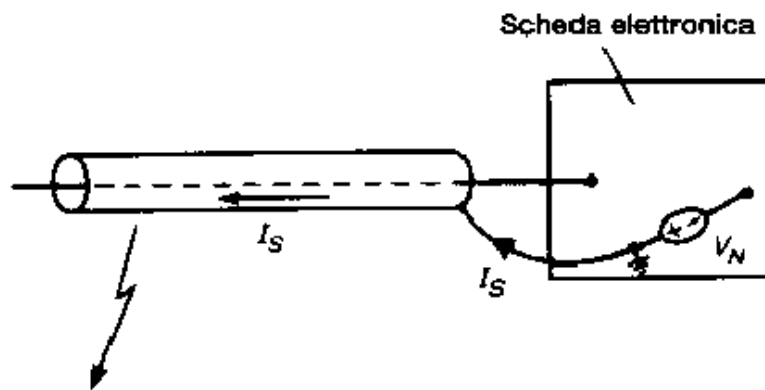


Figura 5.6: esempio di collegamento di un cavo schermato ad una scheda elettronica.

C'è uno schermo che racchiude una scheda elettronica; attraverso lo schermo passa un cavo schermato, ad esempio per l'alimentazione. Per ottenere una schermatura efficiente e ridurre le emissioni irradiate del cavo, lo schermo del cavo è stato collegato ad un punto della scheda elettronica a potenziale zero (massa ideale). Se non ci fosse il collegamento a massa e se la tensione, indicata in figura con V_N , del punto di collegamento del ponticello flessibile dello schermo fosse variabile, sarebbe stata realizzata un'antenna a monopolo, costituita dallo schermo del cavo, se la lunghezza dello schermo del cavo è

dell'ordine di un quarto di lunghezza d'onda del segnale di disturbo presente, lo schermo si trasforma in un elemento radiante. Si deduce, dunque, quanto sia importante che il punto di collegamento sia a potenziale zero. Un esempio pratico riguarda i cavi di collegamento con le unità periferiche di un PC, ad esempio una stampante, tali cavi sono generalmente lunghi 1.5 metri, che equivale a $\lambda/4$ per una frequenza di 50 MHz. Su questi cavi si possono osservare frequentemente dei picchi di risonanza delle emissioni irradiate dovuti appunto alle correnti di modo comune per frequenze comprese tra 50 MHz e 100 MHz. Se il cavo è scollegato dall'apparecchiatura, si nota la cessazione delle risonanze e quindi delle conseguenti elevate emissioni radiate.

5.4 Importanza delle aperture: il principio di Babinet

Altra fonte di accesso dei disturbi elettromagnetici è costituita dalle *aperture* sulla parete di uno schermo: i campi elettrici e magnetici, interni oppure esterni allo schermo, possono propagarsi attraverso queste aperture e, quindi, abbattere l'efficienza di schermatura.

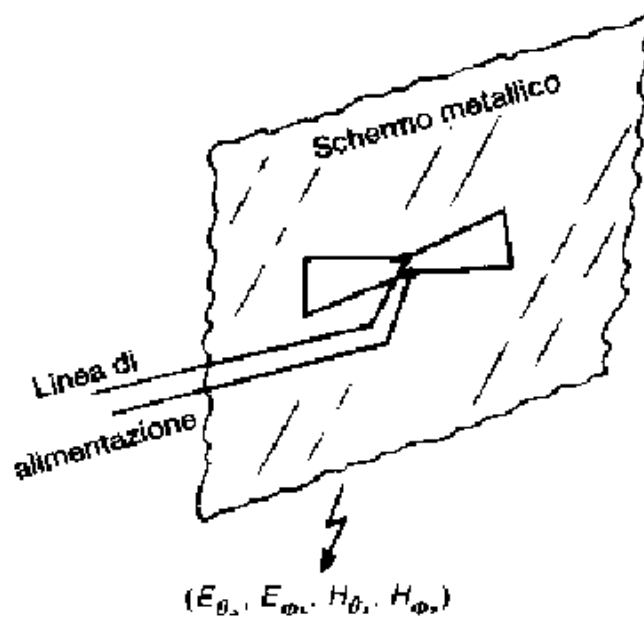


Figura 5.7: schema di riferimento per illustrare il principio di Babinet.

Un principio fondamentale che consente di studiare questo fenomeno è **principio di Babinet**. Per illustrarlo, si consideri la Figura 5.7, nella quale è mostrata una fessura aperta all'interno di uno schermo supposto di materiale perfettamente conduttore. Come si nota, si è supposto che due punti opposti della fessura siano collegati ad una linea di trasmissione, che trasporta un generico segnale di eccitazione. In tal modo, si è ottenuta un'antenna ad apertura, la quale costituisce un elemento radiante. Utilizzando un generico sistema di riferimento sferico, in zona lontana, laddove i campi possono essere approssimati ad un'onda piana ed uniforme per la quale i vettori elettrico ed magnetico sono tra loro ortogonali ed ortogonali alla direzione di propagazione, i campi elettrico e magnetico mancano della componente radiale. Si indichi, allora, con $E_{\theta s}, E_{\phi s}$ le componenti del campo elettrico irradiato in zona lontana e con $H_{\theta s}, H_{\phi s}$ le componenti del campo magnetico, irradiato sempre in zona lontana. Si consideri, poi, la struttura complementare a questa, illustrata in Figura 5.8.

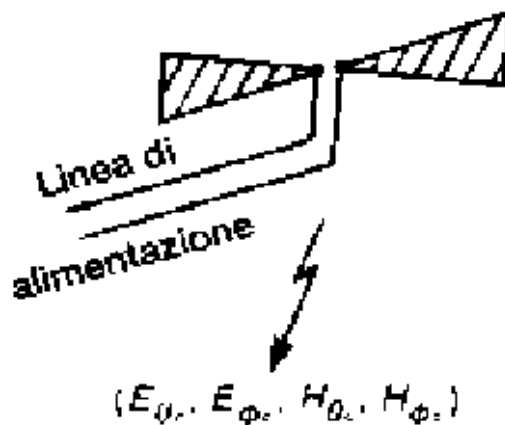


Figura 5.8: struttura complementare per illustrare il principio di Babinet.

Questa struttura è stata ottenuta sostituendo lo schermo con lo spazio libero e la fessura con un conduttore perfetto di forma identica alla fessura. Usando la stessa linea di trasmissione e lo stesso tipo di eccitazione di prima, sono indicate con $(E_{\theta C}, E_{\varphi C}, H_{\theta C}, H_{\varphi C})$ le componenti del campo elettromagnetico irradiato in zona lontana. Sulla base di queste premesse, il principio di Babinet afferma che i campi lontani irradiati dalle due strutture sono legati dalle espressioni

$$\begin{cases} H_{\theta C} \rightarrow E_{\theta S}; \\ H_{\varphi C} \rightarrow E_{\varphi S}; \end{cases} \quad \begin{cases} E_{\theta C} \rightarrow -\zeta_0^2 H_{\theta S}; \\ E_{\varphi C} \rightarrow -\zeta_0^2 H_{\varphi S}. \end{cases}$$

Queste relazioni suggeriscono che le aperture possono irradiare esattamente come delle antenne i cui elementi radianti abbiano le loro stesse dimensioni e, quindi, mostrano l'importanza delle aperture nei problemi di schermatura delle apparecchiature.

Tutte le considerazioni fatte non devono indurre, tuttavia, a pensare che la schermatura possa eliminare completamente le emissioni irradiate da una apparecchiatura o, dualmente, proteggere completamente tale apparecchiatura da emissioni provenienti dall'esterno. Ci sono numerosi esempi di prodotti elettronici che, pur non utilizzando alcuna schermatura, riescono comunque a soddisfare le norme sulle emissioni radiate e condotte. Ad esempio, le macchine da scrivere elettroniche, per problemi sia di costo che di impossibilità a realizzare un rivestimento metallico continuo senza aperture, non possono usufruire di schermature, ma soffrono comunque del problema delle emissioni radiate, in quanto hanno frequenze di temporizzazione dell'ordine di 10 MHz e più, per cui possono presentare problemi di accoppiamenti non voluti: sono, dunque, tipici casi in cui la riduzione delle emissioni radiate non può servirsi delle schermature. Al contrario, i calcolatori, sia domestici che di grandi

dimensioni, utilizzano contenitori metallici e tutte le possibili vie di accesso attraverso tali contenitori sono opportunamente trattate, in modo da assicurare la necessaria efficienza dello schermo.

5.5 Calcolo dell'efficienza di schermatura

Nel seguito sarà trattato in modo quantitativo lo studio dell'efficienza di schermatura, la cui definizione qualitativa è stata data in precedenza. Per ottenere una definizione quantitativa, si consideri una barriera metallica con le seguenti caratteristiche:

- spessore t ;
- conduttività σ ;
- permittività ϵ_r ;
- permeabilità relativa μ_r .

Si ipotizzi che su tale barriera incida un'onda elettromagnetica, come schematizzato in Figura 5.9, nella quale è visualizzata la sezione della barriera.

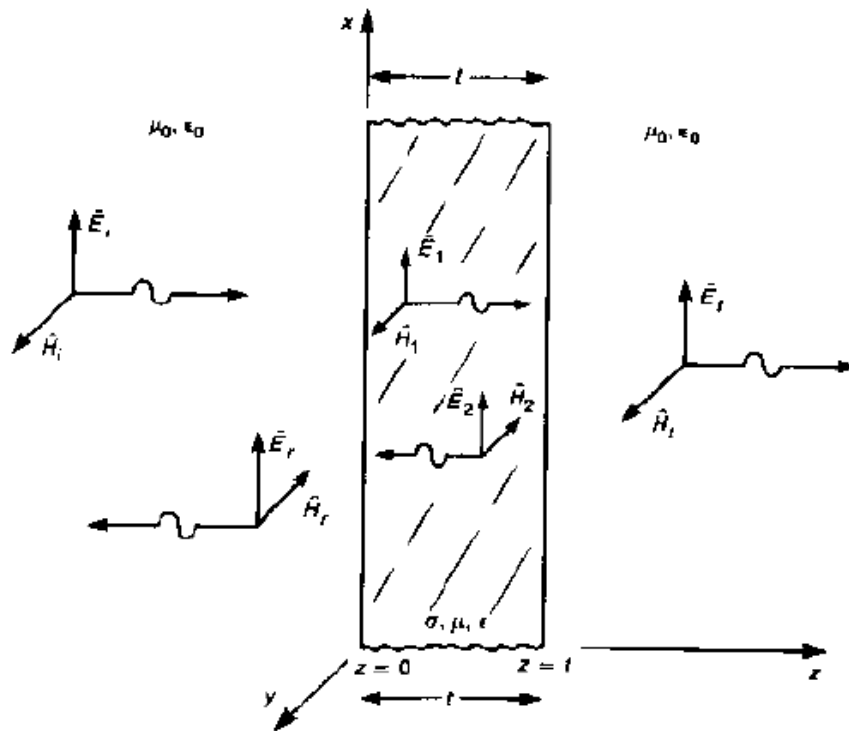


Figura 5.9: schema per valutare quantitativamente l'efficienza di schermatura.

È stato adottato un riferimento cartesiano con l'asse z trasversale alla barriera ed il piano $[x, y]$ parallelo. Si è supposto, per semplicità, che, sia a destra che a sinistra della barriera, sia presente il vuoto. L'incidenza dell'onda, supposta piana ed uniforme, costituita dai campi (\vec{E}_i, \vec{H}_i) genera un'onda riflessa ed un'onda trasmessa in corrispondenza della prima discontinuità, ossia in corrispondenza della interfaccia sinistra della barriera: l'onda riflessa torna indietro, verso sinistra, mentre l'onda trasmessa si propaga attraverso la barriera. Quest'onda trasmessa arriva, poi, in corrispondenza della seconda discontinuità, costituita dalla interfaccia destra della barriera; qui avviene nuovamente riflessione e trasmissione: tuttavia, mentre l'onda riflessa continua a propagarsi nella barriera verso sinistra, l'onda trasmessa penetra nel mezzo a destra della barriera. Naturalmente, l'onda riflessa torna indietro verso la prima discontinuità, dove il meccanismo si ripete identicamente. Come si osserva in

Figura 5.9, si individuano quattro onde complessive, oltre quella incidente, vale a dire

- (\vec{E}_r, \vec{H}_r) è l'onda che complessivamente torna indietro nel mezzo da cui proviene l'onda incidente, (\vec{E}_i, \vec{H}_i) ;
- (\vec{E}_1, \vec{H}_1) è l'onda complessiva che all'interno della barriera si propaga da sinistra verso destra;
- (\vec{E}_2, \vec{H}_2) è l'onda complessiva che, all'interno della barriera, si propaga da destra verso sinistra;
- (\vec{E}_t, \vec{H}_t) è, infine, l'onda che complessivamente è trasmessa a destra della barriera.

Con queste posizioni, è possibile definire *l'efficienza di schermatura*, come il rapporto, espresso in decibel, tra il modulo del campo elettrico incidente sullo schermo ed il modulo del campo elettrico trasmesso attraverso lo schermo

$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{\vec{E}_i}{\vec{E}_t} \right|.$$

Si osserva che si tratta di una quantità positiva, dato che il campo incidente è sicuramente maggiore del campo che riesce a superare la barriera. Ad esempio, una efficienza di schermatura di 120 dB indica che l'intensità del campo trasmesso si è ridotta di un fattore 106 rispetto all'intensità del campo incidente.

Se, invece, si desidera esprimere l'efficienza in funzione del campo magnetico, ovviamente risulta

$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{\vec{H}_i}{\vec{H}_t} \right|.$$

Se il campo incidente è un'onda piana uniforme, ad esempio con le sorgenti sufficientemente lontane, vista l'ipotesi di mezzo di propagazione uguale in entrambe le parti della barriera, allora le definizioni appena fornite sono identiche, visto che i campi elettrico e magnetico sono legati tra loro dalla impedenza caratteristica del mezzo. Al contrario, in presenza di campi vicini e/o di mezzi diversi dalle due parti della barriera, le due definizioni non sono assolutamente equivalenti. In generale, la definizione più usata è quella che coinvolge il campo elettrico, per cui in seguito si farà riferimento ad essa.

Sono molti i fenomeni che contribuiscono a ridurre il campo elettromagnetico in seguito all'attraversamento di una barriera di materiale conduttore. A tal proposito, si consideri lo schema di Figura 5.10.

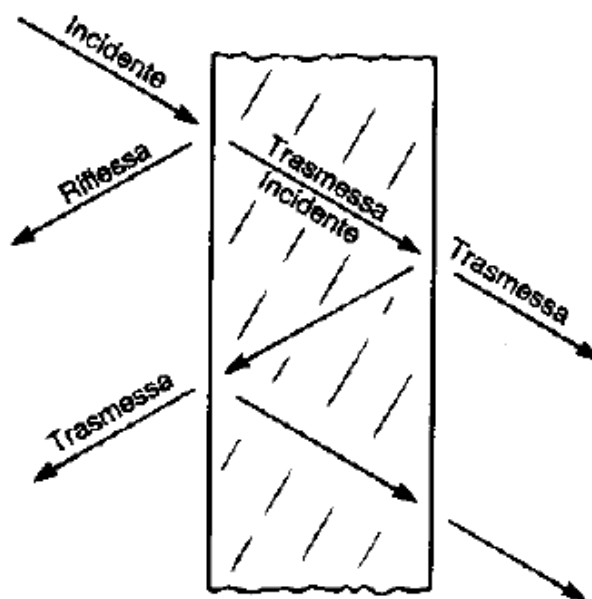


Figura 5.10: diagramma dei campi.

L'onda incidente sulla interfaccia di sinistra subisce il fenomeno della riflessione e della trasmissione: il rapporto tra onda riflessa ed onda incidente corrisponde, per definizione, al *coefficiente di riflessione* ρ della superficie considerata, mentre il rapporto tra l'onda trasmessa e quella incidente corrisponde, sempre per definizione, al *coefficiente trasmissione* τ della stessa superficie:

$$\rho_1 = \frac{E_{\text{rifl},1}}{E_{\text{inc},1}}; \quad \tau_1 = \frac{E_{\text{trasm},1}}{E_{\text{inc},1}}.$$

Si osserva che una frazione ρ_1 del campo incidente non oltrepassa la barriera; si tratta della *perdita per riflessione*, che rappresenta il primo meccanismo di riduzione del campo incidente. L'onda trasmessa, $E_{\text{trasm},1} = \tau_1 E_{\text{inc},1}$, si propaga attraverso lo spessore dello schermo; essendo quest'ultimo costituito da un mezzo conduttivo, l'ampiezza dell'onda viene attenuata secondo un fattore $e^{-\alpha z}$, con α costante di attenuazione del materiale e z direzione ortogonale alla barriera. L'attenuazione prende il nome di *perdita per assorbimento*. Di solito, lo schermo è costituito da un materiale conduttore, nel qual caso la costante di attenuazione è pari all'inverso della *profondità di penetrazione per effetto pelle*, indicata come

$$\alpha = \frac{1}{\delta} \rightarrow \text{fattore di attenuazione} \rightarrow e^{-\alpha z} = e^{-\frac{z}{\delta}}.$$

Quindi, le ampiezze dei campi, nel loro attraversamento della barriera, si attenuano del fattore $\exp(-z/\delta)$. Per valutare quanto valga questa attenuazione in corrispondenza della seconda interfaccia, bisogna conoscere lo spessore t

della barriera considerata; infatti, l'attenuazione complessiva è $\exp(-z/\delta)$, per cui, qualora risulti lo spessore molto maggiore della profondità di penetrazione per effetto pelle, quindi t/δ grande, l'onda trasmessa attraverso la prima interfaccia arriva alla seconda interfaccia fortemente attenuata. Comunque, quest'onda rappresenta un'onda incidente sulla interfaccia di destra che incide dalla parte del mezzo metallico, una frazione della quale viene riflessa, secondo un coefficiente ρ_2 , mentre la rimanente frazione τ_2 si trasmette attraverso l'interfaccia nel mezzo a destra della barriera.

La frazione riflessa ρ_2 si propaga indietro nella barriera tornando a colpire, questa volta da destra e provenendo da un mezzo metallico, l'interfaccia di sinistra. Ancora una volta, una frazione di quest'onda è trasmessa attraverso l'interfaccia di sinistra e va quindi a sommarsi al *campo riflesso totale* (\vec{E}_r, \vec{H}_r) nel mezzo di sinistra, mentre la parte rimanente viene riflessa e torna a propagarsi verso destra, sommandosi al campo totale (\vec{E}_1, \vec{H}_1) che si propaga nella barriera da sinistra verso destra. Questa frazione viene nuovamente attenuata dallo spessore dello schermo e, poi, torna a colpire l'interfaccia di destra, dove c'è ancora riflessione e trasmissione: la porzione trasmessa va a sommarsi al *campo trasmesso totale* (\vec{E}_t, \vec{H}_t) nel mezzo a destra dell'interfaccia, mentre la porzione riflessa va a sommarsi al campo totale (\vec{E}_2, \vec{H}_2) che si propaga nella barriera da destra verso sinistra. Il meccanismo continua in questo modo, ma le successive frazioni di campo riflesso e trasmesso sono progressivamente attenuate durante la loro propagazione all'interno della barriera. Se lo schermo è stato progettato in modo che, alla frequenza prevista per il campo incidente, il suo spessore sia molto più grande della profondità di penetrazione per effetto pelle, queste continue e ripetute riflessioni sulle superfici interne della barriera sono di scarsa importanza. Quindi, le *riflessioni e trasmissioni multiple* possono essere generalmente trascurate quando, alla frequenza di lavoro del campo incidente, lo spessore della barriera è molto più

grande della profondità di penetrazione per effetto pelle; in queste condizioni, è possibile considerare solo la riflessione e la trasmissione iniziali sulle interfacce alle estremità. L'espressione più generale dell'efficienza di schermatura,

$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{\vec{E}_i}{\vec{E}_t} \right|,$$

può essere suddivisa nella somma di tre termini, rappresentativi rispettivamente della perdita per riflessione, perdita per assorbimento e perdita per riflessioni multiple

$$SE_{dB} = R_{dB} + A_{dB} + M_{dB}.$$

È importante osservare che le ripetute riflessioni alle interfacce producono campi che si sommano al campo iniziale trasmesso attraverso l'interfaccia di destra; ciò significa che questo meccanismo peggiora l'efficienza di schermatura, per cui il termine M_{dB} è negativo, al contrario invece di R_{dB} , riflessione iniziale, e A_{dB} , assorbimento, che sono sempre positivi, in quanto contribuiscono sempre a migliorare l'efficienza di schermatura. Il passo successivo è determinare quantitativamente questi singoli fattori, in modo da comprendere quali parametri, ad esempio la frequenza di lavoro o lo spessore della barriera o le costanti caratteristiche del materiale da cui è costituita, contribuiscano ad aumentarne o diminuirne i rispettivi valori. Questo tipo di analisi va condotto in due distinte situazioni:

- in primo luogo, bisogna ipotizzare che il campo elettromagnetico incidente sia prodotto da una sorgente sufficientemente lontana dallo schermo, in modo da poter attribuire le caratteristiche di campo lontano, ossia quelle delle onde piane uniformi;
- il campo è generato da una sorgente vicina allo schermo, nel qual caso l'ipotesi di onda piana uniforme non è più consistente.

Conducendo lo studio in queste due condizioni, si giunge alle conclusioni, di seguito schematicamente riassunte.

In presenza di *sorgenti lontane* (onde piane uniformi), la perdita per riflessione costituisce il meccanismo di schermatura predominante alle basse frequenze, mentre la perdita per assorbimento è il meccanismo predominante alle alte frequenze; in presenza di sorgenti vicine, invece, la situazione è diversa a seconda che si considerino *sorgenti di campo elettrico*, come il dipolo elettrico elementare, il cui campo irradiato in zona vicina è caratterizzato da una impedenza d'onda $\zeta = E_0 / H_0$ maggiore dell'impedenza intrinseca del vuoto ζ_0 , oppure *sorgenti di campo magnetico*, come il dipolo magnetico elementare, il cui campo irradiato in zona vicina è caratterizzato da una impedenza d'onda minore di ζ_0 .

- ❖ Per *sorgenti vicine di campo elettrico* la situazione risulta, con una buona approssimazione, inalterata rispetto al caso dell'onda piana, la perdita per riflessione predomina in bassa frequenza, mentre quella per assorbimento predomina in alta frequenza.
- ❖ Per *sorgenti vicine di campo magnetico*, invece, è la perdita per assorbimento a prevalere a tutte le frequenze, con la differenza, rispetto al campo elettrico, che essa risulta molto piccola in bassa frequenza. Per questo motivo è

necessario introdurre altri metodi per schermare i *campi magnetici vicini in bassa frequenza*. Esistono, in particolare, due metodi di schermatura per questo tipo di campi: la *deviazione del flusso magnetico* attraverso materiale a basso valore di riluttanza e la *generazione di flusso magnetico contrario*, sfruttando la legge di Faraday.