Appunti delle lezioni:
Direttiva EMC 89/336/CEE
Compatibilità Elettromagnetica

24 giugno 2002

Sommario

Questo documento è stato redatto per aiutare la comprensione delle problematiche relative alla Compatibilità Elettromagnetica viste durante il corso di Tecnologie-Disegno-Progettazione presso l'Istituto Tecnico Industriale G.Galilei di Conegliano.
La trattazione risulta abbastanza superficiale, non vi è l'esigenza di entrare nei dettagli, tuttavia risultano presenti le nozioni di base per la risoluzione dei problemi incontrati al fine di raggiungere gli obiettivi essenziali imposti dalla Direttiva EMC.

Gli autori del documento sono:

- Ing. Paolo Subiaco - docente di Elettronica e TDP all'Istituto Tecnico Industriale G.Galilei - Conegliano

Il documento è stato in parte tratto dagli *Appunti sulla Compatibilità Elettromagnetica* scritto dall' Ing. Antonello Giovannelli, docente di Compatibilità Elettromagnetica all'Istituto di Ingegneria - Università di Ferrara.

Un sentito ringraziamento a Davide Scottà per la segnalazione di alcuni errori.

Il documento è stato scritto grazie al wordprocessor LyX ed il programma di disegno Xfig, ed è liberamente scaricabile, in formato PDF e PostScript, dal sito *http://corsi.ir3ip.net* ed utilizzabile a patto di mantenere inalterate le informazioni sugli autori. Eventuali correzioni, segnalazioni o richieste di collaborazione possono essere inoltrate in email a *paolo@ir3ip.net*

Indice

Elenco delle figure

1 Introduzione

La Compatibilità Elettromagnetica, spesso abbreviata con l'acronimo EMC ovvero ElectroMagnetic Compatibility, si prefigge di studiare

1. le condizioni sotto le quali gli apparati elettrici conservano le prestazioni previste, in presenza di disturbi

2. il livello dei disturbi emessi che possono degradare le prestazioni degli altri apparati operanti nello stesso ambiente.

Considerando che il degrado delle prestazioni di un'apparecchiatura puó comportare un'inaccettabile danno a persone e cose, alla fine degli anni '80 sono state studiate delle norme atte alla standardizzazione dei metodi di misura della Compatibilità Elettromagnetica, ed all'imposizione di vincoli sulla emissione de immunità ai disturbi delle apparecchiautre elettroniche, al fine di favorire il libero scambio in Europa di dispositivi elettronici che garantiscano i requisiti indispensabili al corretto funzionamento.

Gli Enti Normatori, che hanno cioè provveduto alla stesura delle norme riguardanti l'EMC, sono *IEC, CENELEC, ETSI, CISPR* e *CEI*; insieme hanno prodotto la *Direttiva Compatibilità Elettromagnetica*, ovvero direttiva 89/336, e le successive modifiche (92/31 e 93/68).
Essendo direttive comunitarie, non costituiscono un obbligo per i cittadini di ogni singolo stato finché non vengono recepite ed inserite nella legislazione; lo scopo delle direttive comunitarie è infatti l'armonizzazione delle leggi di ogni singolo stato appartenente, il quale ha l'obbligo di recepure il contenuto delle direttive eliminando la legislazione evenutalmente contrastante.

Altre direttive d'interesse per le applicazioni elettroniche sono

- Direttiva Macchine (89/392, 91/368, 93/44, 93/68)

- Direttiva Bassa Tensione (73/23, 93/68).

Ogni direttiva è applicabile ad una vasta categoria di prodotti: al fine di non limitare lo sviluppo tecnologico, queste direttive sono state studiate secondo un nuovo approccio che consiste nell'indicare gli obiettivi da raggiungere (*requisiti essenziali*) ma non il metodo attraverso cui raggiungerli: in questo modo non si limita l'evoluzione del processo tecnologico.

Per questo motivo si parla di *presunzione di conformità*, ovvero l'applicazione di norme tecniche che non vincolano il progettista nel dettaglio per il raggiungimento dei requisiti essenziali.

L'ultimo atto è l'applicazione del simbolo CE al prodotto destinato al mercato europeo a cui sono applicate le direttive comunitarie.

Il costruttore o l'importatore deve redigere la dichiarazione di conformità indicando, in una delle lingue ufficiali della Comunità, i propri dati, la descrizione del prodotto e l'elenco delle direttive e norme tecniche applicate.

La dichiarazione sarà conservata dal costruttore o importatore per almeno 10 anni dalla produzione dell'ultimo esemplare.

2 Direttiva EMC 89/336

Ogni prodotto destinato al mercato comune europeo, per essere commercializzato deve essere conforme alle direttive a cui risulta soggetto. La conformità autorizza il costruttore ad apporre al *marcatura*

CE, condizione indispensabile per l'immissione nel mercato europeo; ciò si attua mediante l'apposizione del *bollino CE* stampigliato in modo permanente sul prodotto stesso o, nel caso non sia possibile, sull'imballo, sul manuale d'uso o sul foglio di garanzia, in modo chiaro e ben visibile .

Essendo tale marcatura obbligatoria, e testimoniando la conformità ai requisiti minimi indispensabili all'inserimento del prodotto nel mercato europeo, la marcatura CE non deve essere in alcun caso confusa con un marchio di qualità, di applicazione volontaria e che impegnerebbe il costruttore alla verifica periodica dei requisiti imposti dal tipo marchio scelto.

Inoltre, deve essere chiaro che il simbolo CE non deve essere in alcun modo confuso con la direttiva EMC, in quanto stabilisce la conformità del prodotto alle direttive comunitarie a cui tale categoria di prodotti è vincolata. Per tale ragione, possono esservi più direttive coinvolte nell'apposizione della marcatura CE, e fra queste può non esservi la Direttiva EMC.

2.1 Prodotti interessati

La Direttiva EMC si applica a tutti gli apparati impieganti componenti elettrici e/o elettronici potenzialmente in grado di essere disturbati da perturbazioni elettromagnetiche, o di disturbare altri apparati posti nello stesso ambiente elettromagnetico.

Esempio di apparati espressamente citati nella Direttiva EMC 89/336:

- elettrodomestici
- trasmettitori radio e televisivi
- ricevitori radio e televisivi
- apparecchiature radio mobili
- apparecchiature elettromedicali
- apparati per illuminazione
- lampade fluorescenti
- macchine industriali
- apparecchiature elettroniche per scopi didattici
- apparati della tecnologia dell'informazione
- ricetrasmettitori CB e LPD
- KIT per montaggio "fai-da-te"
- componenti con funzione intrinseca ai fini dell'utilizzatore finale

2.2 Prodotti non interessati

Sono, in generale, i prodotti ritenuti non in grado di emettere perturbazioni elettromagnetiche potenzialmente pericolose per altri apparati, ed intrinsecamente immuni da perturbazioni elettromagnetiche, ad esempio:

- apparati radio utilizzati da radioamatori che non risultino disponibili nel mercato

- apparati coperti da apposite Direttive
- lampade ad incandescenza
- componenti elettrici e/o elettronici privi di una funzione intrinseca ai fini dell'utilizzatore finale.

2.3 Tipi di norme

Si possono distinguere i seguenti tipi di norme relative alle direttive comunitarie in questione:

Norme generiche: fissano i requisiti che le apparecchiature dovranno avere a seconda dell'ambiente a cui sono destinate, senza tener conto del particolar tipo di prodotto. Ad esempio viene spesso differenziata l'*industria leggera* (in cui l'energia elettrica viene fornita attaverso una linea condivisa da altri impianti, causando maggiori problemi di EMC) dall'*industria pesante* (in cui l'energia elettrica è fornita attraverso apposita cabina di trasformazione).

Norme di prodotto: come le Norme generiche, fissano dei limiti a specifiche categorie di prodotti.

Norme Armonizzate: possono essere sia generiche che di prodotto, ovvero norme che fissano dei limiti, le quali vengono emanate dalla Comunità Europea al fine di essere poi *armonizzate* dagli stati membri, ovvero incluse nella legislazione vigente.

Norme di base: contengono la descrizione delle configurazioni di prova, le caratteristiche della strumentazione e le prescrizioni sui metodi di misura; poiché non fissano dei limiti, non possono essere armonizzate.

2.4 Terminologia riguardante l' EMC

Ambiente elettromagnetico: è l'insieme dei fenomeni elettromagnetici che esercitano un'influenza sull'ambiente fisico preso in considerazione

Apparato sorgente: è l'apparato che genera il disturbo

Apparato vittima: è l'apparato che subisce il disturbo

Compatibilità Elettromagnetica: è la capacità di un'apparecchiatura di funzionare in modo soddisfacente nel suo tipico ambiente elettromagnetico senza, in ogni caso, introdurre disturbi intollerabili

Disturbi condotti: sono i disturbi elettromagnetici la cui propagazione avviene attraverso un conduttore (ad esempio il cavo di alimentazione)

Disturbi irradiati: sono disturbi elettromagnetici emessi nell'ambiente la cui propagazione avviene in assenza di conduttori, cioè secondo le leggi della propagazione EM in spazio libero

E.U.T.: Equipment Under Test, sta ad indicare l'apparecchiatura in test

Immunità: è la capacità di un'apparecchiatura di garantire determinate prestazioni anche in presenza di disturbi elettromagnetici (condotti o irradiati). Le prove di immunità portano solo ad un risultato logico "positivo" o "negativo" (passa o non passa), mentre l'individuazione del livello di disturbo che porta l'apparecchiatura in crisi è chiamata *suscettibilità*

Interferenza elettromagnetica: si indica anche con il termine EMI (ElectroMagnetic Interference) e costituisce la degradazione delle prestazioni di un'apparecchiatura o di un canale di trasmissione causata da un disturbo di tipo elettromagnetico

Laboratorio Accreditato: laboratorio di misura che, possedendo alcuni requisiti, è stato riconosciuto ufficialmente (da alcuni Enti di accreditamento) in grado di effettuare alcuni tipi di misure su certi tipi di prodotto

Organismo Competente: organismo che, possedendo determinati requisiti, ha conseguito il riconoscimento ufficiale di "competenza" a livello europeo

Suscettibilità: è l'incapacità di un'apparecchiatura di garantire determinate prestazioni in presenza di disturbi elettromagnetici (condotti o irradiati). Una prova di suscettibilità è tesa all'individuazione del livello di disturbo che riesce a far entrare in crisi l'apparato.

3 Richiami di propagazione

Al fine di semplificare lo studio della propagazione delle onde elettromagnetiche, si fa riferimento a onde TEM (il cui fronte di propagazione è piano e trasversale alla direzione di propagazione) ed a *sorgenti isotropiche* (che irradiano in modo uniforme secondo la direzione di propagazione).

Secondo queste ipotesi, indicando con P_t la potenza trasmessa e con d la distanza a cui facciamo la misura, definiamo la *densità di potenza* ricevuta

$$p_r = \frac{P_t}{4\pi d^2} \quad \left[\frac{W}{m^2}\right] \tag{1}$$

A questo punto possiamo calcolare la potenza ricevuta P_r moltiplicando la densità di potenza dalla (1) per l'*area efficace* A_{eff} che nel caso di antenna isotropica vale

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad \left[m^2\right] \tag{2}$$

Poiché l'antenna isotropica non esiste, ma è solo un modello utilizzato per semplificare il calcolo, si introduce il termine *guadagno d'antenna* G tale per cui l'area efficace di un'antenna sia

$$A_{eff} = G\frac{\lambda^2}{4\pi} \quad \left[m^2\right] \tag{3}$$

in cui si puó inoltre esprimere $G = \eta D$ in cui $\eta = rendimento\, antenna$ e $D = direttività\, antenna.$

Attraverso queste relazioni possiamo quindi esprimere la potenza ricevuta come

$$P_r = p_r\, A_{eff} = G_t G_r P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \tag{4}$$

in cui G_t e G_r rappresentano il guadagno dell'antenna trasmittente e ricevente.

Il prodotto $P_t G_t$ rappresenta la potenza necessaria affinché un'antenna isotropica produca la stessa densità di potenza dell'antenna in oggetto nella direzione di massima irradiazione; tale potenza si misura in $W\, ERP$ oppure in $dBm\, ERP$ in cui ERP è l'acronimo di Effective Radiated Power; in altre parole tale prodotto ci consente di ricondurci all'ipotesi di antenne isotropiche, con tutti i vantaggi del caso.

Dalla (4) è interessante ricavare l' *attenuazione in spazio libero*

$$A_{sl} = \frac{P_t G_t G_r}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = 32.4 + 20\log d[Km] + 20\log f[MHz] \tag{5}$$

calcolabile sia in unità lineari (a sinistra) sia in logaritmiche (a destra).[1]

3.1 Modello a due raggi

Le considerazioni viste finora partono dal presupposto di propagazione in spazio libero, evento poco riproducibile in realtà; nella maggioranza dei casi ci si può però ricondurre con buona approssimazione al modello a due raggi, in cui consideriamo una superficie abbastanza piana di materiale conduttore (quindi riflettente) il quale entra in gioco nel fenomeno di propagazione dell'onda elettromagnetica da una sorgente all'antenna ricevente.

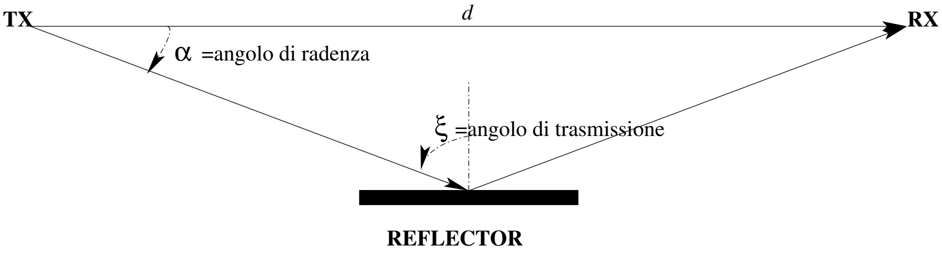

Figura 1: Disegno rappresentativo del modello a due raggi

Attraverso questo modello è quindi possibile calcolare il campo ricevuto dall'antenna ricevente in base alla somma dei contributi del raggio diretto e del raggio riflesso $\overline{E} = \overline{E_d} + \overline{E_r}$.

Nel caso in cui il piano riflettente sia un conduttore ideale, tutta l'energia incidente sarà riflessa; in realtà potremo scrivere che $E_r = \rho E_i$ in cui ρ è il coefficiente di riflessione (o di Fresnel) ed esprime il rapporto fra il campo riflesso ed il campo incidente la superficie: in altre parole dovremo considerare l'attenuazione introdotta dalla non perfetta conducibilità del piano riflettente.

Il modello a due raggi viene utilizzato anche nelle misure di EMC, in cui vi è l'esigenza di una perfetta riproducibilità delle misure effettuate in qualsiasi laboratorio.
È pertanto necessario dotare il laboratorio di misura di una struttura standardizzata che consenta di ricondurci al modello a due raggi nel modo piú fedele possibile, e per questo si eseguono le misure in *camera semianecoica,* la quale rappresenta con buona approssimazione il modello a due raggi in quanto possiede un pavimento costituito da un buon conduttore e le altre faccie in materiale assorbente per la radiofrequenza.

[1]*Esempio: dato un trasmettitore che eroga una potenza di 1W a 2.4 GHz attraverso un'antenna con guadagno $G_t = 15dB$ ed un ricevitore che sfrutta un'antenna con guadagno $G_r = 20dB$ posto a distanza di 120km dal trasmettitore, si calcoli la potenza ricevuta.*

Conviene certamente eseguire i calcoli in unità logaritmiche, che ci consentono di pervenire ad una rapida soluzione senza l'uso della calcolatrice.
Calcoliamo innanzitutto l'attenuazione in spazio libero: in base alla (5) ricaviamo
$A_{sl} = 32.4 + 20\log d[Km] + 20\log f[MHz] \simeq 32.4 + 42 + 74 \simeq 148dB$
per cui la potenza ricevuta sarà $P_r = P_t + G_t + G_r - A_{sl} = 30 + 15 + 20 - 148 = -83dBm$
A questo punto possiamo fare, a titolo di esercizio, una considerazione non necessaria ai nostri fini: se il segnale trasmesso ha una larghezza di banda di 10 MHz ed il ricevitore ha una cifra di rumore di 3dB, quant'e' il rapporto segnale/rumore del segnale ricevuto?
Si calcola con $SNR = P_r - P_n - NF = -83dBm - (-100dBm) - 3dB = 14dB$

3.2 Antenne

L'antenna è una struttura che consente di trasferire un'onda elettromagnetica dallo spazio ad una linea di trasmissione e viceversa.

Le caratteristiche principali di un'antenna sono:

impedenza caratteristica: è l'impedenza vista dalla linea di trasmissione a cui è collegata; generalmente l'antenna viene realizzata affinché sia adattata all'impedenza caratteristica delle linee di trasmissione, ovvero 50, 75 o 300Ω al fine di minimizzare le perdite per riflessione

frequenza di risonanza: è la frequenza a cui si verifica il miglior adattamento d'impedenza con la linea di trasmissione; le antenne risultano utilizzabili solo in un range di frequenze limitato, in quanto al di fuori non è verificata la condizione di buon adattamento d'impedenza: il risultato è che la potenza trasferita dal trasmettitore all'antenna viene in buona parte respinta al trasmettitore, causando un peggioramento del rendimento ed una maggiore dissipazione di potenza da parte del trasmettitore (con possibile danneggiamento dello stadio amplificatore).

guadagno: come già anticipato, è il parametro che individua il miglioramento di prestazioni lungo la direzione di massima radiazione rispetto al dipolo isotropico

diagramma di irradiazione: trattasi di due grafici polari che mettono in luce il guadagno dell'antenna nelle diverse direzioni del piano E (dove si trova il campo elettrico) e del piano H (in cui si trova il campo magnetico)

beamwidth: apertura in gradi del lobo principale del diagramma di irradiazione, ovvero angolo formato dalle direzioni in cui il guadagno scende di 3dB rispetto al valore massimo

Le caratteristiche del campo elettromagnetico variano fra la *zona di campo lontano*, in cui il campo elettromagnetico è di tipo radiativo, e la *zona di campo vicino* in cui il campo elettromagnetico è di tipo reattivo. In quest'ultima zona il campo elettromagnetico non è di tipo TEM in quanto le linee di forza del campo si richiudono su se stesse; lo studio in questa zona risulta alquanto difficoltoso, per cui è importante operare nella zona di campo lontano, in cui siamo nella condizione di propagazione di onda TEM con impedenza d'onda $\eta = \frac{E_{c.l.}}{H_{c.l.}} = \eta_0 = 377\Omega$. In questa condizione sappiamo quindi il rapporto fra il modulo del campo elettrico e del campo magnetico.

Bisogna però considerare che tanto maggiore è la dimensione dell'antenna, e quindi il suo guadagno, maggiore dovrà essere la distanza dall'antenna affinché sia verificata la condizione di campo lontano.

Da queste considerazioni si evince la necessità di utilizzare, per le misure di EMC in camera anecoica, antenne con guadagno modesto al fine di non richiedere l'utilizzo di una camera anecoica troppo grande e quindi costosa.

3.2.1 Antenne per misure EMC

Le antenne utilizzate per le misure EMC sono essenzialmente quattro:

- *biconica*, impiegabile nel range di frequenze $30 \div 300 MHz$.
  Ha una lunghezza di circa un metro ed è formata da 8 conduttori piegati per formare una specie di "gabbia". Deve essere alimentata attraverso una linea bilanciata, quindi attraverso una linea bifilare oppure un cavo coassiale terminato da un balun (**bal**anced↔**un**balanced).

- *log-periodica*, impiegabile nel range di frequenze $200 \div 1000 MHz$.
  È un'antenna largamente utilizzata per la ricezione TV terrestre poiché ha una banda molto larga: le sue proprietà di impedenza e di irradiazione variano periodicamente con il logaritmo della frequenza.
  È un'antenna direttiva, la cui massima radiazione avviene lungo la direzione longitudinale dell'antenna e nel verso in cui la lunghezza degli elementi dell'antenna decresce.

- *broadband antenna*, impiegabile nell'intero spettro di interesse per le misure EMC, ovvero fra $30 \div 1000 MHz$.
  È un'antenna che combina una log periodica (nella parte anteriore) ed un elemento risonante a bassa frequenza, che consente quindi di comprire bene la banda $80 \div 1000 MHz$ ed eventualmente di scendere fino a $30 MHz$.

- *horn*, utilizzata per misure nel range $1 \div 26 GHz$ che esula dal campo di interesse della Direttiva EMC 89/336, ma che acquisterà sempre piú importanza nell'immediato futuro.
  Si tratta di un'antenna composta da una corta guida d'onda che termina con un tronco piramidale; essendo una guida di tipo multimodale, per le frequenze alte, è dotata di alcuni soppressori di modo per privilegiare un solo modo di trasmissione.

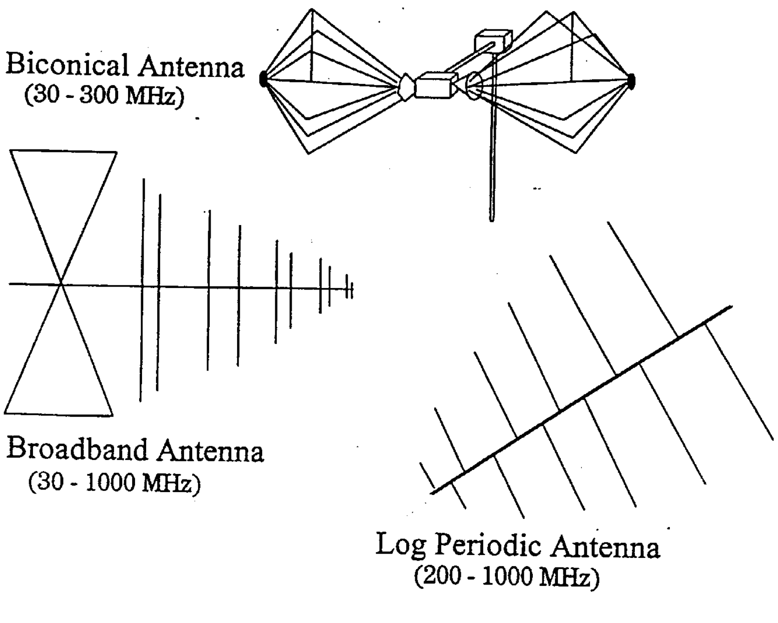

Figura 2: Antenne utilizzate in misure EMC

3.2.2 Sbilanciamento nelle antenne

L'antenna, solitamente, è costituita da una struttura simmetrica, pertanto le correnti che alimentano l'antenna risultano bilanciate: significa che la corrente che entra in un "morsetto" esce dall'altro.

Tuttavia spesso le correnti che alimentano l'antenna non sono bilanciate, a causa della presenza di oggetti metallici nelle immediate vicinanze oppure a causa della linea di alimentazione non adatta; questi due fenomeni portano ad una distorsione del lobo di irradiazione dell'antenna.

Spesso si utilizza come linea di trasmissione il cavo coassiale, il quale è una linea di trasmissione sbilanciata in quanto il conduttore esterno è posto ad un potenziale idealmente sempre nullo; essendo l'antenna bilanciata, si possono verificare due casi:

1. la corrente ritorna alla sorgente passando attraverso la superficie interna del conduttore esterno del coassiale

2. la corrente ritorna alla sorgente passando in parte attraverso la superficie interna, in parte attraverso la superficie esterna del conduttore esterno $\Rightarrow$ irradiazione!

Nell'ultimo punto si verifica il problema dell'irradiazione della linea di trasmissione, con la dispersione di energia. Questo fenomeno si verifica in particolare quando la linea di trasmissione non è adattata all'impedenza dell'antenna.
Per evitare questo fenomeno, è indispensabile l'utilizzo di strutture da interporre fra linea di trasmissione ed antenna, ad esempio il balun (convertitore balanced/unbalanced), adattatore a "bazooka", oppure inserendo dei manicotti di ferrite in prossimità della parte terminale della linea di trasmissione.

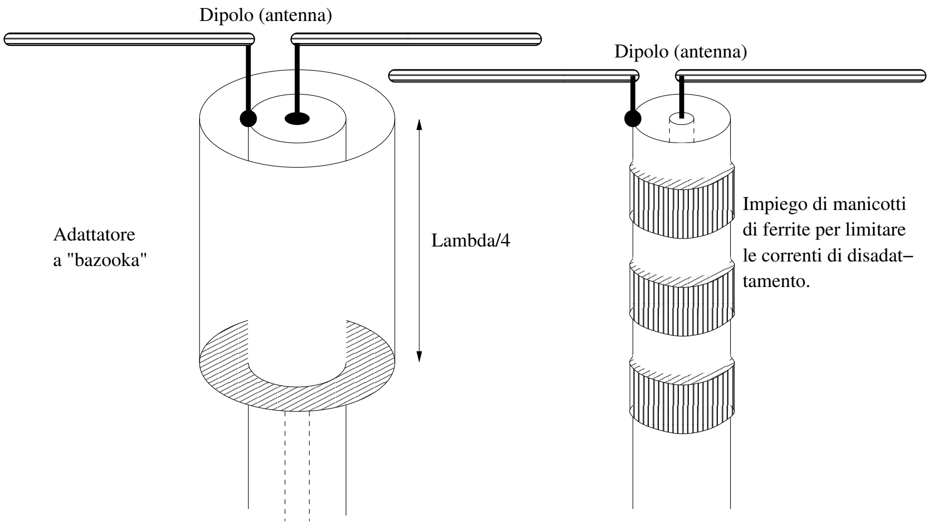

Figura 3: Schematizzazione adattatori d'antenna

L'impiego dell'adattatore a bazooka non risulta idoneo nell'impiego in misure EMC, in quanto è un adattatore a banda stretta mentre le misure EMC irradiata coinvolgono tutto lo spettro $30 \div 1000\,MHz$.

3.3 Schermi elettromagnetici

Al fine di limitare l'interazione dell'EUT con campi elettromagnetici esterni (prova di immunità) o la generazione di disturbi (prova di emissione irradiata), è necessario dotare l'apparecchiatura di elementi di schermatura.

Gli schermi possono essere realizzati di materiale conduttore o magnetico, i quali funzionano piú o meno bene in alta frequenza, mentre difficile è la soppressione dei disturbi a frequenza molto bassa.

L'attenuazione sul campo e.m. introdotto da uno schermo può essere rappresentata come

$$S = A + R + B \quad [dB] \tag{6}$$

in cui A=attenuazione per assorbimento, B=attenuazione per riflessioni multiple, R=attenuazione per riflessione, come evidenziato in figura 4.

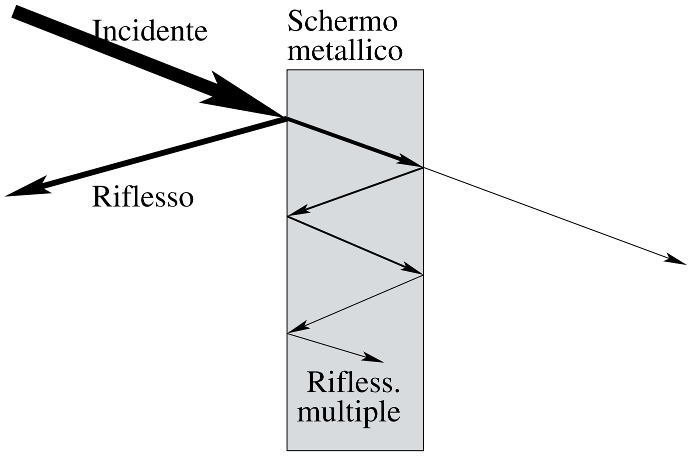

Figura 4: Schematizzazione dello schermo elettromagnetico

Solitamente l'attenuazione per riflessioni multiple risulta trascurabile rispetto all'attenuazione per assorbimento e riflessione, almeno a frequenze sufficientemente alte, per cui considereremo solo queste ultime due.

3.3.1 Attenuazione per assorbimento

Il campo elettrico, passando attraverso lo schermo, subisce un'attenuazione secondo una legge esponenziale del tipo

$$E \propto e^{-\frac{x}{\delta}} \tag{7}$$

in cui δ rappresenta la *profondità di penetrazione* ed assume la seguente dipendenza dalla frequenza, conducibilità e permittività magnetica:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\, f\, \sigma\, \mu}}$$

A questo punto vale la pena riscrivere la (7) in forma logaritmica[2] per uno schermo di spessore t (thickness):

$$A = 8.69 \left(\frac{t}{\delta}\right) \quad [dB] \tag{8}$$

A titolo di esempio riporto la seguente tabella che mette in luce la profondità di penetrazione e l'attenuazione per assorbimento di un'onda elettromagnetica incidente uno schermo di alluminio con

[2] *Ci si chiede se, in base alla 8, sia migliore uno schermo in ferro, in ottone oppure in rame.*

I tre tipi di metallo sono elencati in ordine crescente di conducibilità pertanto una possibile risposta (azzardata) potrebbe essere "il rame" che, avendo una maggiore conducibilità, presenta una profondità di penetrazione inferiore e quindi una maggiore attenuazione.

Tuttavia bisogna considerare anche la permittività magnetica dei materiali, che risulta molto maggiore nel ferro che negli altri due materiali. Pertanto sarà il ferro a presentare una minore profondità di penetrazione! Inoltre il ferro risulta piú facilmente saldabile rispetto al rame (il quale presenta una conducibilità termica troppo elevata per essere facilmente saldato), per cui è preferibile utilizzare schermi in ferro.

spessore 1mm, da cui si evince che l'attenuazione per assorbimento è utilizzabile solo a frequenze elevate, ma non a basse frequenze.

Freq.	δ $[mm]$	A $[dB]$
50Hz	12	0.72
1KHz	2.7	3.2
1MHz	83μm	105
100MHz	8.3μm	1047

3.3.2 Attenuazione per riflessione

In generale, quando si parla di riflessioni entrano in gioco due parametri: il coefficiente di riflessione $\overline{\Gamma} = \frac{\overline{Z}_2 - \overline{Z}_1}{\overline{Z}_2 + \overline{Z}_1}$, ed il coefficiente di trasmissione $\overline{T} = \frac{2\overline{Z}_2}{\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2}$ in cui $\overline{Z}_1$ e $\overline{Z}_2$ sono le impedenze d'onda delle due regioni.

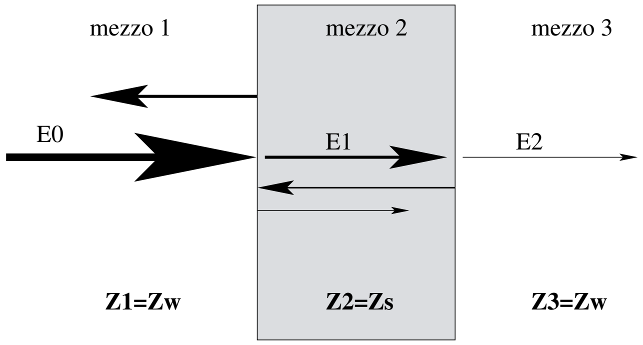

Figura 5: Riflessioni attraverso uno schermo

In figura 5 è rappresentata la situazione tipica, in cui siamo in presenza di uno schermo: in questo caso vi sono due interfacce con salto d'impedenza, ovvero le interfacce $aria \rightarrow schermo$ e $schermo \rightarrow aria$, pertanto si può scrivere

$$E_2 = T_{32}E_1 = T_{32}T_{21}E_0 = \frac{4Z_wZ_s}{(Z_w + Z_s)^2}E_0 \tag{9}$$

in cui Z_w rappresenta l'impedenza d'onda e Z_s rappresenta l'impedenza dello schermo.

Per quanto riguarda l'impedenza d'onda, mentre nella condizione di campo lontano questa assume valore uguale a η_0, nella zona di campo vicino può assumere valori molto bassi, nel caso di antenna di tipo magnetico (spira), oppure valori molto alti nel caso di antenne aperte (dipolo).
Nel caso di sorgente in zona di campo vicino è quindi necessario stabilire il tipo di sorgente per poi stabilire quale materiale utilizzare per la schermatura.

L'impedenza dello schermo vale

$$\overline{Z}_s = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \tag{10}$$

che può essere approssimata considerando il peso di σ rispetto a $\omega\varepsilon$: si hanno i seguenti due casi:

1. schermo in materiale isolante $\Rightarrow$ $Z_s \cong \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$

2. schermo in materiale conduttore $\Rightarrow \; Z_s \cong \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}}$ che solitamente assume valori molto inferiori a η_0.

Da queste considerazioni si evince che, in presenza di sorgente ad alta impedenza (campo lontano, oppure dipolo in campo vicino) i conduttori funzionano molto bene soprattutto a basse frequenze. Nel caso invece di sorgenti a bassa impedenza (spira magnetica in zona di campo vicino) è invece preferibile utilizzare schermi ad alta impedenza, ovvero con una permittività magnetica molto alta (ferriti).

3.3.3 Considerazioni conclusive

Analizzando la (10) si vede come per gli schermi conduttori la Z_s cresca con la frequenza, pertanto l'efficienza di schermatura per riflessione peggiora all'aumentare della frequenza. Tuttavia migliora invece l'efficienza di schermatura per assorbimento, per cui i due fenomeni si compensano.

Nel caso in cui i disturbi da schermare siano a bassa impedenza, l'unica soluzione consiste invece nell'utilizzo di materiale schermante ad alta permittività magnetica, mettendo in luce come sia quindi preferibile il ferro ai buoni conduttori come il rame ed alluminio. Inoltre, a bassissime frequenze (<1KHz) risulta indispensabile utilizzare spessori notevoli di materiale ferromagnetico, ed in questo caso il fenomeno delle riflessioni multiple risulta tutt'altro che trascurabile, e questo risulta vantaggioso poiché in tal modo i disturbi vengono guidati all'interno del materiale ferromagnetico.

Infine, per migliorare la schermatura da sorgenti a bassa impedenza, conviene porre lo schermo ad una distanza maggiore.

3.3.4 Schermatura dei trasformatori ed avvolgimenti induttivi

Tutti gli avvolgimenti induttivi, quindi anche i trasformatori, dovranno essere realizzati preferibilmente su supporto di ferrite in modo che il flusso sia guidato all'interno del materiale ferromagnetico.

Per ridurre poi i flussi dispersi è possibile costruire una spira in cortocircuito da da applicare esternamente all'avvolgimento, in modo che si concatenino tutti i flussi dispersi, come visibile in figura 6.

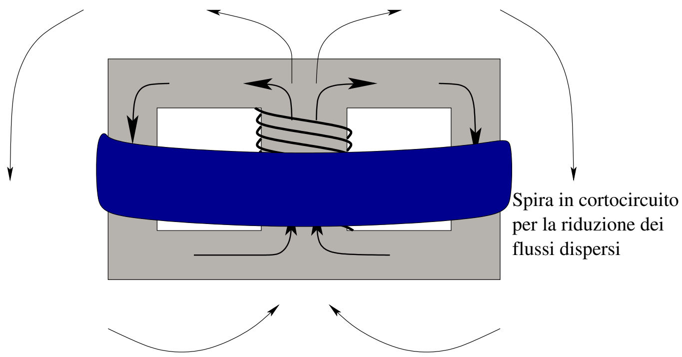

Figura 6: schermatura degli avvolgimenti

3.3.5 Efficienza di schermatura

Si indica con $S_E = 20\,log\left(\frac{|E|_{vuoto}}{|E|_{scherm.}}\right)$ ed $S_H = 20\,log\left(\frac{|H|_{vuoto}}{|H|_{scherm.}}\right)$ l'efficienza di schermatura riferita al campo elettrico e magnetico. In genere $S_E \neq S_H$ e comunque non è facile calcolare né S_E né S_H, essendo dipendenti dal

- tipo di materiale
- distanza fra schermo e sorgente
- presenza di aperture
- frequenza
- tipo di sorgente (di campo elettrico o di campo magnetico?)

Possono però essere calcolate strumentalmente.

4 Ambiente di misura e strumentazione

In questo capitolo saranno considerati i diversi ambienti in cui possono effettuarsi le misure EMC, e la strumentazione necessaria; le misure saranno effettuate ponendo l'EUT su un tavolo rotante, in legno, e dovrà essere ripetuta, per ciascun disturbo riscontrato, cambiando la polarizzazione e l'altezza dell'antenna, nonché la direzione del tavolo.

4.1 Sito all'aperto

È possibile effettuare misure EMC all'aperto (Open Area Test Site), a patto che non vi siano ostacoli all'interno dell'*ellisse CISPR*, ovvero all'interno di un'area elittica con diametro maggiore $D = 2X$ e diametro minore $d = \sqrt{3}X$, in cui X è la distanza fra antenna e EUT.

Vantaggi: economicità e precisione nelle misure

Svantaggi: dipendenza della propagazione da fenomeni atmosferici, e rumorosità elettromagnetica dell'ambiente. Inoltre non è ammessa la misura di immunità irradiata in un sito all'aperto poiché introdurrebbe disturbi elettromagnetici nell'ambiente.

4.2 Camera schermata

Si pone l'obiettivo di ridurre i disturbi esterni, i quali rendono difficoltose le misure in campo aperto. Si tratta di una stanza rivestita da pareti metalliche unite insieme attraverso dei finger (contatti metallici che stabiliscono un collegamento elettrico fra le pareti e le porte), introducendo un'attenuazione dei disturbi esterni di $50 \div 110dB$.

Non è utilizzabile per misure EMC di immunità ed emissione irradiata in quanto la presenza di piú facciate conduttrici pregiudica la possibilità di utilizzare il modello a due raggi. La camera schermata può comunque essere utilizzata per individuare i valori di frequenza dei disturbi irradiati da un apparato; individuate le frequenze per poi effettuare una misura attendibile del disturbo in un sito all'aperto.

Vantaggi: economicità, protezione da fenomeni meteorologici ed isolamento dal rumore elettromagnetico ambientale.

Svantaggi: impossibilità di effettuare misure di ampiezza di campi elettromagnetici a causa delle riflessioni sulle pareti.

4.3 Camera semianecoica

Si tratta di una camera schermata le cui pareti e soffitto sono rivestiti di materiale assorbente per le onde elettromagnetiche. Il pavimento risulta invece conduttore, cosicché lo studio della propagazione all'interno della camera semianecoica risulta semplificata dal modello a due raggi.

Per rientrare con buona approssimazione nell'ipotesi di campo lontano, è necessaria una distanza $Antenna \Leftrightarrow EUT$ di almeno 3 metri, da aumentare nel caso si utilizzino antenne molto direttive; per tale ragione le camere semianecoiche hanno dimensioni tipiche dell'ordine di 10x6x6 metri.

Vantaggi: protezione dai fenomeni meteorologici e dai disturbi esterni. Importante inoltre è la riproducibilità delle condizioni tipiche di misura (assenza di riflessioni sulle pareti e soffitto, come nel sito all'aperto).

Svantaggi: costo tipicamente maggiore di 300.000 euro, ed impossibilità di effettuare misure di immunità irradiata in quanto, a causa del pavimento riflettente, non si può raggiungere l'ipotesi di uniformità di campo.

4.4 Camera anecoica

È formata da una camera schermata con tutte le sei pareti interne rivestite di materiale assorbente; si può ottenere da una camera semianecoica rivestendo di materiale assorbente il pavimento.

Vantaggi: gli stessi della camera semianecoica, ed inoltre la possibilità di ottenere la condizione di uniformità di campo (indispensabile per le prove di immunità irradiata).

Svantaggi: il costo elevato, per cui nei grossi laboratori di misura vengono costruite camere anecoiche solo per le misure di immunità irradiata, con dimensioni dell'ordine di 3x2x2 metri.

4.5 Materiale anecoico

È il materiale utilizzato per rivestire le pareti delle camere anecoiche e semianecoiche: serve per rendere le pareti radio-assorbenti, e quindi evitare il problema delle riflessioni per simulare le condizioni ideali del sito all'aperto.

4.5.1 Ferrite

Si possono utilizzare mattonelle di ferrite di dimensioni approssimative di 10x10cm, le quali vanno fissate alle pareti della camera schermata.

Forniscono buone prestazioni nella banda di frequenze $30 \div 1000\,MHz$, è però necessario fare attenzione a minimizzare le fessure fra mattonelle adiacenti.

Gli svantaggi di questa soluzione sono il peso elevato, che impone l'uso di una struttura di adeguata robustezza, ed il comportamento delle ferriti che, al di sopra del GHz non risultano piú assorbenti bensì riflettenti.

4.5.2 Piramidi assorbenti

Si tratta nella maggior parte dei casi di tronchi piramidali costituiti da una mescola di grafite in una matrice di poliuretano, dal tipico colore scuro ed aspetto schiumoso.
In altri casi si utilizza una matrice in polistirene, che ha il vantaggio di essere rigida, piú resistente e consente inoltre di essere colorata in modo da assumere un colore chiaro, il quale migliora l'illuminazione della camera.

L'angolazione delle pareti della piramide viene scelta in modo da minimizzare la riflessione dell'onda incidente, che penetra interamente nel materiale assorbente dove viene dissipata. La lunghezza delle piramidi è proporzionale alla massima lunghezza d'onda (si arriva a 2 metri circa per la frequenza di 30 MHz).

4.5.3 Strutture miste

Prevedono il rivestimento della camera schermata con piastrelle di ferrite sopra le quali vengono incollate le piramidi assorbenti.

La ferrite assicura buone caratteristiche alle basse frequenze, mentre le piramidi consentono di raggiungere facilmente frequenze di 18-26 GHz.
Il vantaggio è la possibilità di ridurre la lunghezza dei tronchi piramidali, con un conseguente risparmio degli ingombri che in qualche modo compensa il maggiore costo del materiale assorbente.

4.6 Ricevitore di misura

Il ricevitore utilizzato per misure di emissione è dotato di tre tipi di rivelatore: *rivelatore di picco* (generalmente utilizzato in tutti gli strumenti per applicazioni generiche), *rivelatore di quasi picco* e *rivelatore di media*.

La ragione di questa particolarità risiede nella necessità di attribuire ai disturbi l'effettiva pericolosità: se il disturbo si presenta poco frequentemente, il rivelatore di quasi picco fornirà un valore modesto, che aumenterà con la frequenza con cui si presenterà il disturbo nel tempo. È chiaro allora che un disturbo che si presenta in modo continuo sarà segnalato dal rivelatore di quasi picco con lo stesso valore di un rivelatore di picco.

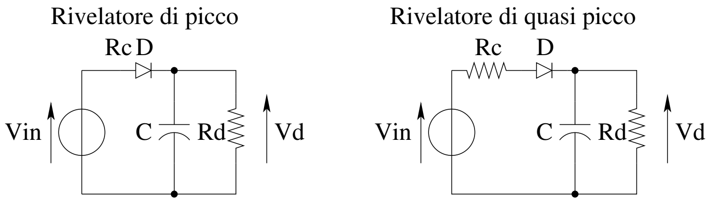

Figura 7: Schema rivelatori di picco e quasi picco

La scansione dell'intero range $30 \div 1000\ MHz$ con rivelatore di picco e filtro EMI richiede circa 5 secondi, mentre l'utilizzo del rivelatore di quasi picco richiede almeno 10 minuti: per tale motivo solitamente si utilizza il rivelatore di picco per fare la prima scansione ed analisi dello spettro; laddove si riscontrano dei disturbi che superino il limite imposto, si effettua una seconda scansione locale con rivelatore di quasi picco nella speranza che il livello del disturbo correttamente misurato (i limiti imposti si riferiscono all'uso del rivelatore di quasi picco) non superi il limite imposto (ipotesi probabilmente soddisfatta se il disturbo si presenta con una bassa frequenza).[3]

È inoltre indispensabile l'utilizzo del filtro di preselezione, affinché la misura effettuata sia attendibile e non sia invece un prodotto di intermodulazione generato dallo strumento di misura.

[3]Da alcuni anni, le frequenze di clock utilizzate dai microprocessori non risultano piú stabili in frequenza, ma vengono modulate secondo un algoritmo pseudocasuale nell'intento di generare uno spettro in frequeza piatto fra una frequenza minima ed una massima in cui il microprocessore può operare.
Questo accorgimento è stato adottato proprio affinché queste schede possano superare il test EMC, i cui limiti imposti si riferiscono alla misurazione con rivelatore di quasi picco. Utilizzando un rivelatore di picco, nella maggior parte dei casi i PC attuali non supererebbero il test di emissione irradiate.

A seconda della frequenza in cui si effettua la misura si utilizzano generalmente i seguenti tipi di filtro IF, la cui larghezza di banda (RBW) misurata a $-6dB$ risulta:

Measurement Range	*CISPR band*	*CISPR bandwidth*
$9KHz \div 150KHz$	A	200Hz
$150KHz \div 30MHz$	B	9KHz
$30MHz \div 1GHz$	C/D	120KHz

È possibile utilizzare sia un ricevitore EMI sia un analizzatore di spettro opportunamente calibrato e dotato dei rivelatori e filtri necessari per realizzare le misure.

5 Emissioni irradiate ed immunità

Sono prove tese ad ottenere lo spettro delle emissioni in frequenza dell'EUT, al fine di stabilire la conformità con le norme generiche e le eventuali norme di prodotto le quali fissano il limite massimo di disturbi emessi.

5.1 Emissioni irradiate

È una prova da effettuarsi in camera semianecoica o sito aperto. Al fine di chiarire la natura dei disturbi, si effettuerà uno studio preliminare sulla tipologia di disturbi.

5.1.1 Correnti di modo differenziale

Nello schema di figura 8 è schematizzato a sinistra un tipico segnale trapezoidale impiegato in circuiti

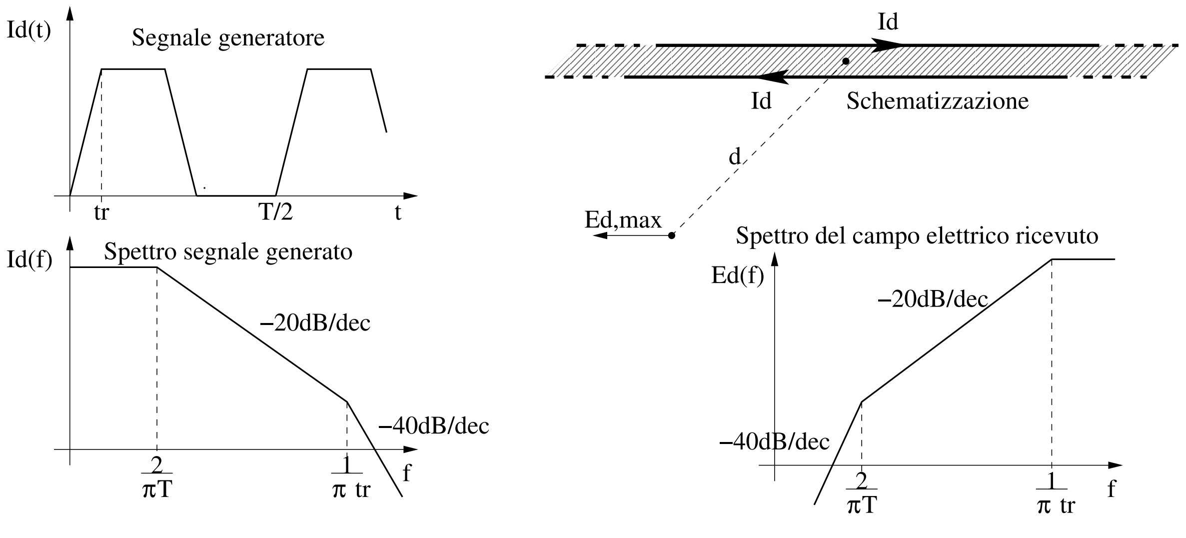

Figura 8: disturbi di modo differenziale

logici, con il relativo spettro in frequenza; in alto a destra è schematizzata la generazione di disturbi di modo differenziale, originati da una corrente.
A distanza d dai due conduttori è possibile misurare il campo elettrico del disturbo originato, la cui espressione, nell'ipotesi che $d \gg (distanza\, fra\, i\, due\, conduttori)$, risulta

$$\frac{|E_{d,max}|}{|I_d|} = 1.316 \times 10^{-14} \frac{f^2 A}{d} \tag{11}$$

in cui è indicato con A la superficie interna al circuito composto dai due conduttori.
Essendo la (11) dipendente da f^2, il diagramma di Bode di $\frac{|E_{d,max}|}{|I_d|}$ sarà costituito da una retta con pendenza di $40dB/decade$.

Combinando ora la (11) con lo spettro della corrente I_d otteniamo lo spettro di $E_{d,max}$, la cui caratteristica risulta crescente con la frequenza fino al secondo polo dopo il quale $|E_{d,max}|$si mantiene costante. È quindi possibile osservare come le correnti di modo differenziale risultino apprezzabili solo a frequenze elevate, tipicamente sopra i 100MHz.

Per dedurre la presenza di disturbi dovuti a correnti di modo differenziale, bisogna considerare le seguenti caratteristiche:

- il punto di massima irradiazione si ha nel piano dei fili, ed in posizione ad essi laterale
- il campo emesso è nullo nei punti equidistante dai fili (le due componenti di E si cancellano
- il campo emesso varia sensibilmente in caso di rotazione della coppia di fili
- i disturbi si presentano preferenzialmente a frequenze alte, come si nota dalla (11).

5.1.2 Correnti di modo comune

In questo caso, considerando due conduttori paralleli, le correnti di modo comune presentano la stessa direzione. In questo caso l'espressione del campo elettrico a distanza d dai conduttori, riferita all'intensità di corrente I_c, assume la seguente espressione

$$\frac{|E_{c,max}|}{|I_c|} = 1.257 \times 10^{-6} \frac{fL}{d} \tag{12}$$

in cui L è la lunghezza dei due conduttori; si noti che ora il rapporto $\frac{|E_{c,max}|}{|I_c|}$risulta proporzionale alla frequenza, ovvero il suo diagramma di Bode sarà costituito da una retta con pendenza di $20dB/decade$, cosicché combinata con il tipico segnale trapezoidale utilizzato in applicazioni logiche, si ottiene un disturbo E_c il cui diagramma di Bode presenterà uno zero e due poli, come visibile in figura 9.Attraverso queste considerazioni si evince come i disturbi dovuti all'emissione di correnti di modo comune si manifestino a frequenze tipicamente al di sotto dei 200 MHz.

5.1.3 Problematiche applicative

- Il segnale di clock presente nelle schede digitali è una fonte di emissioni irradiate, essendo questo un segnale ad onda quadra (ampio spettro) che scorre sulle piste del circuito stampato (che non sono assimilabili a linee di trasmissione ideali). È in questo caso indispensabile dotare la scheda digitale di una scatola opportunamente schermata.
- Disturbi irradiati sono emessi da elettrodomestici che fanno uso di motori in corrente continua: in prossimità delle spazzole si creano degli archi elettrici con la conseguente irradiazione di campi elettromagnetici che possono creare interferenza con altri dispositivi (radio, televisore, eccetera).

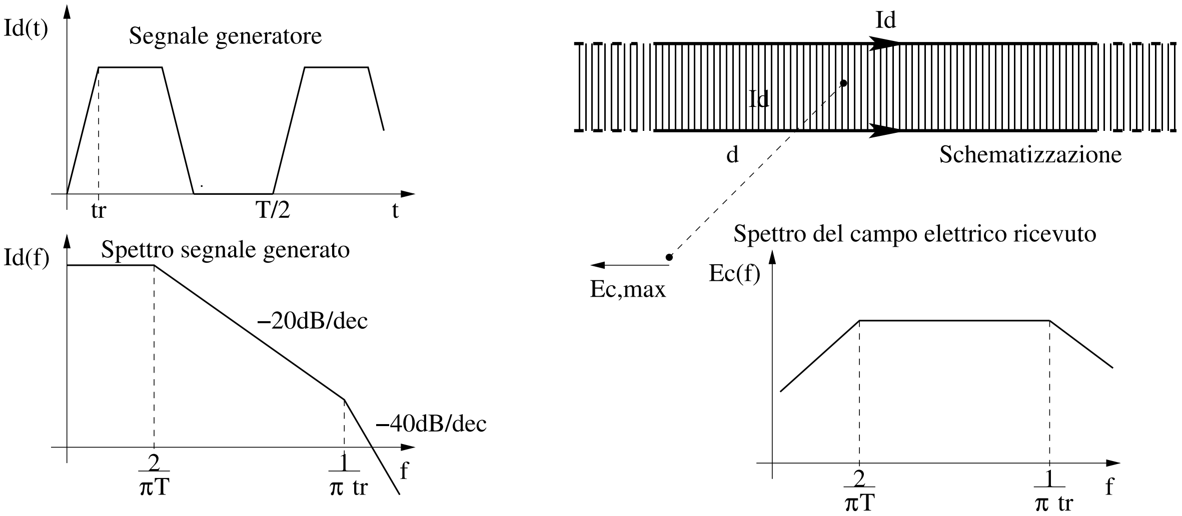

Figura 9: disturbi di modo comune

- Una situazione in cui si ha a che fare con problemi generati da emissioni irradiate è quella relativa all'uso di telefoni cellulari o altri apparati elettronici in un'aereo il quale, essendo altamente schermato, è quasi assimilabile ad una cavità in cui il campo elettromagnetico in esso generato viene riflesso dalla scocca metallica. In altre parole l'energia del campo elettromagnetico resterà confinata all'interno della scocca, senza subire l'attenuazione tipica della propagazione in spazio libero. Campi elettromagnetici intensi possono creare malfunzionamenti alla strumentazione di bordo!

5.1.4 Risoluzione dei problemi

Queste problematiche possono certamente essere risolte attraverso una migliore schermatura, operazione non sempre possibile a causa dei problemi di dissipazione (contenitore forato consentire la ventilazione) e di peso (la schermatura in ogni caso introduce un peso aggiuntivo non ammissibile specie in apparecchiature portatili).

Soluzioni più intelligenti possono essere la riduzione del valore di picco della corrente che costituisce il segnale origine del disturbo, non sempre attuabile specie all'aumentare della frequenza ci commutazione. Si può aumentare il tempo di salita e discesa del segnale t_r, abbassando quindi la pulsazione dei poli e zeri della caratteristica di E_d ed E_c, in accordo alla (11) e (12); questa possibilità risulta però in contrasto con l'esigenza di utilizzare frequenze di commutazioni sempre maggiori.

Soluzioni veramente valide al problema sono la riduzione dell'area delle spire costituite dai collegamenti, con una conseguente diminuzione del disturbo di modo differenziale, ed una minimizzazione della lunghezza delle linee di collegamento. In sostanza si tratta di progettare correttamente il layout dell'apparecchiatura, posizionando tutti i dispositivi collegati attraverso linee di clock in modo da ridurre la lunghezza delle connessioni. Si dovrà inoltre attuare soluzioni tali da rendere le linee di connessione sempre più simili alle linee di trasmissione, pensando quindi ad una tecnica microstrip o stripline.

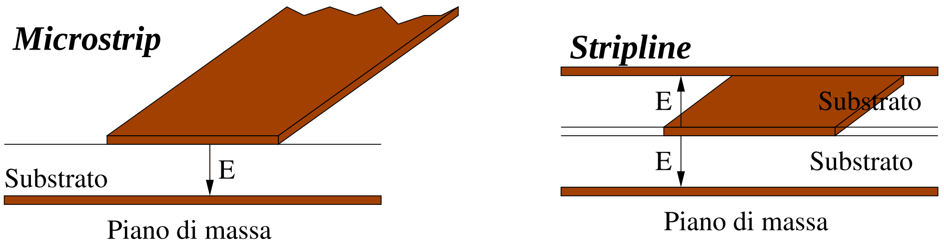

Figura 10: schematizzazione tecnologia microstrip e stripline

5.1.5 Normativa

Le misure vanno effettuate nel range di frequenze $30 \div 1000 MHz$. Le norme di riferimento sono la EN55022, applicata in ambiente residenziale (classe B) e prevede la misura a 10 metri di distanza dall'EUT, e la EN55011 da applicare in ambiente industriale (classe A) con misure effettuate a 30 metri di distanza dall'EUT. In quest'ultimo caso la misura viene effettuata a maggiore distanza sia perché le apparecchiature possono essere di notevole dimensione (ad esempio intere linee di produzione), sia per simulare una misura fatta all'esterno dell'edificio in cui andrà ad operare l'EUT.

In entrambe le norme, limiti sono imposti secondo il grafico di figura 11.

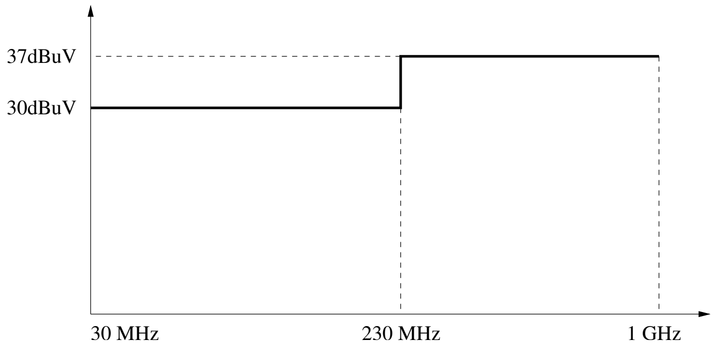

Figura 11: Limiti di campo elettrico imposti per misure di emissione irradiata

5.1.6 Procedura di prova

1. Predisposizione del luogo di misura
2. Scansione con analizzatore di spettro e rivelatore di picco per individuare le frequenze ove si riscontrano disturbi superiori al limite imposto
3. Scansione lenta con rivelatore di quasi picco in prossimità delle righe di ampiezza rilevante
4. Per ogni riga si effettua la ricerca del massimo valore variando l'altezza dell'antenna dal suolo fra 1 e 4 metri e ruotando l'apparecchiatura in test; si registra il valore massimo
5. Si ripete la misura di cui al punto precedente , cambiando la polarizzazione dell'antenna
6. Si stampa il risultato della misura sull'intera banda, indicando i valori massimi con i segni **x** e **+** per indicare i valori massimi misurati in polarizzazione verticale ed orizzontale.

Nel caso di misura di apparecchiature di classe B (ambiente residenziale) la normativa consente la misura a distanza inferiore a 10mt applicando la correzione

$$L_2[dB] = L_1[dB] + 20log\frac{D_1}{D_2} \tag{13}$$

la quale esprime l'attenuazione in spazio libero. Ad esempio, eseguendo le misure a 3 metri anziché 10 il nuovo livello salirà di $10.5dB$.

Nel caso invece di misura di apparecchiature di classe A (ambiente industriale), la normativa consente la correzione dei limiti fino a 10 metri (in tal caso, applicando la (13) il limite risulterà aumentato di $10dB$): in tal modo si penalizzano le misure effettuate a distanza inferiore a 10 metri.

5.1.7 Correzione di eventuali problemi

Nel caso in cui si riscontri il superamento dei limiti imposti è necessario provvedere alla ricerca del disturbo attraverso l'uso dello sniffer, ovvero della sonda di campo elettrico o campo magnetico che evidenzia localmente l'intensità del campo. In questo modo è possibile stabilire se vi siano delle zone del contenitore che non effettuano una corretta schermatura della scheda in esso contenuta, ed in tal caso si dovrà arginare temporaneamente il problema, in attesa di migliorare la scatola, utilizzando un foglio di alluminio tipo "domopak". Si dovrà inoltre prestare attenzione al collegamento elettrico fra i vari elementi del contenitore: nel caso in cui il contatto sia garantito solo da viti, è necessaria la dislocazione di esse ad una distanza non superiore a $\frac{\lambda}{10}$rispetto alla massima frequenza di disturbo.

5.2 Immunità irradiata

La prova di immunità, come già anticipato, fornisce come unico risultato la positività o meno del test. Per valutare invece l'intensità del campo elettromagnetico tale da creare malfunzionamenti all'apparecchiatura è necessario eseguire una prova di suscettibilità che comunque non risulta contemplata nella Direttiva 89/336.

Il test va condotto in camera anecoica al fine di garantire l'uniformità di campo nei pressi dell'EUT, il quale dovrà essere di 3 o 10 V/m, nel range di frequenze $80 \div 1000MHz$ utilizzando un generatore RF modulabile in AM con frequenza modulante di 1KHz e potenza d'uscita maggiore di 10Watt.
È chiaro che tanto maggiore sarà il guadagno dell'antenna trasmittente, minore sarà la potenza richiesta dal generatore RF per raggiungere l'intensità di campo imposta dalla Direttiva; attenzione però che l'uso di antenne ad alta direttività impone l'utilizzo di una distanza maggiore dall'EUT al fine di garantire che quest'ultimo si trovi in zona di campo lontano. Per questo motivo l'antenna generalmente utilizzata risulta di piccole dimensioni e quindi di guadagno modesto, poiché per ragioni economiche è preferibile l'uso di generatori RF di potenza piuttosto che camere anecoiche di dimensioni molto grandi.

Per il monitoraggio dell'apparecchiatura in test, al fine di verificarne il funzionamento, dovrà essere predisposta una telecamera in modo da operare all'esterno della camera anecoica.

6 Emissioni condotte ed immunità

L'emissione di campi elettromagnetici avviene non solo in modo irradiato, ma anche in modo condotto attraverso i cavi di alimentazione. Questo aspetto risulta molto importante perché l'emissione di disturbi da un'apparecchiatura attraverso il cavo di alimentazione può compromettere il corretto

funzionamento di altri dispositivi collegati sia all'interno dello stesso ambiente, sia in altri edifici. In considerazione di ciò si dovranno predisporre dei filtri opportuni di alimentazione per evitare l'emissione e la ricezione di disturbi condotti.
Anche in questo caso l'insieme delle prescrizioni imposte dalla Direttiva sono pensate in modo da garantire un livello accettabile di degradazione delle prestazioni nella maggioranza dei casi di impiego tipico, quindi non hanno l'ambizione di garantire il funzionamento dell'apparato in qualsiasi ambiente elettromagnetico.

Sistemi che certamente non funzionano correttamente sono gli alimentatori a parzializzazione di fase i quali utilizzano tiristori per stabilire quando dovrà avvenire la conduzione, producendo un largo

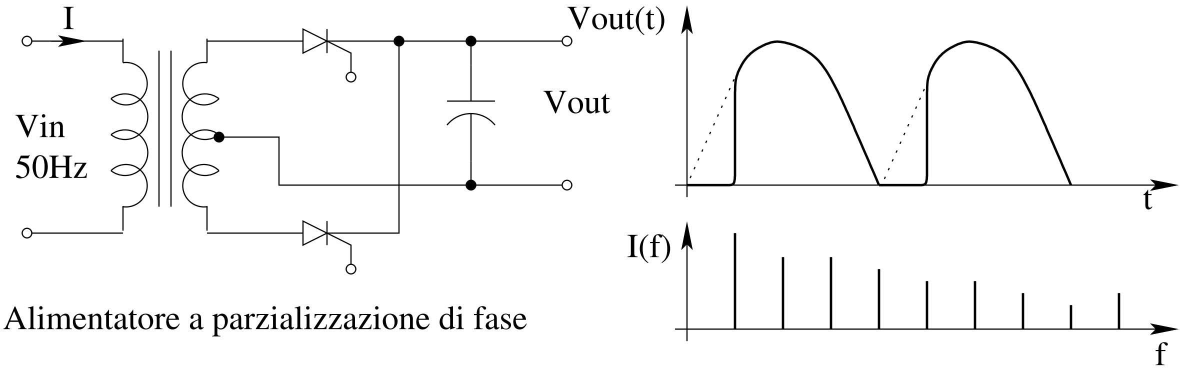

Figura 12: schema alimentatore a parzializzazione di fase

spettro della corrente assorbita; questi non solo provocano l'emissione di disturbi condotti ed una drastica riduzione del fattore di potenza, ma frequentemente possono innescare dei fenomeni di risonanza con conseguente surriscaldamento di conduttori e trasformatori, portando inoltre all'invecchiamento precoce dei materiali isolanti. Si dovrà pertanto evitare l'utilizzo di circuiti di alimentazione che assorbano correnti impulsive a causa dei problemi sopraesposti.

In ogni caso dovrà essere predisposto un filtro di alimentazione al fine di ridurre la trasmissione e la ricezione di disturbi condotti; anche in questo caso si deve tener conto dell'origine dei disturbi (correnti di modo comune o differenziale) e del tipo di sorgente di disturbo (ad alta o bassa impedenza): nel caso di sorgenti a bassa impedenza (forti correnti) si può attuare un filtraggio efficace mediante una o più induttanze in serie; al contrario, nel caso di sorgenti ad alta impedenza, conviene utilizzare le capacità in parallelo.

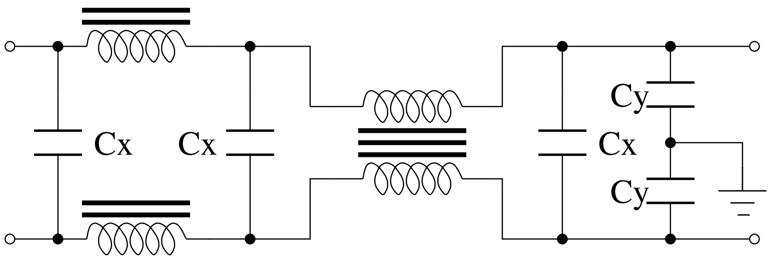

Figura 13: tipico filtro di alimentazione

Molta attenzione dovrà essere posta al collegamento di capacità fra le linee di alimentazione e la terra, utili per ridurre i disturbi di modo comune, le quali introdurranno una corrente di scarica verso massa che può diventare pericolosa per le persone ed apparecchiature stesse; tali capacità dovranno pertanto essere di valore piccolo, tipicamente non superiore a 4.7nF, e dovranno essere di ottima qualità poiché, nel caso in cui rompendosi vadano in corto circuito, collegherebbero la linea di alimentazione allo chassis dell'apparecchiatura con tutti i rischi del caso; per filtrare le correnti di modo comune conviene quindi adottare un'altra strategia, ovvero costruire un doppio avvolgimento su nucleo toroidale, come mostrato in figura 13, cosicché la corrente di modo comune in un conduttore induca una corrente contraria nel secondo avvolgimento contrastando quindi il disturbo stesso.

6.1 Emissioni condotte

Per le misure di emissioni condotte si fa uso di un ricevitore (o analizzatore di spettro) per la banda $9KHz \div 30MHz$ con i tre rivelatori di picco, quasi-picco e media, filtri RBW CISPR e preselettore; il ricevitore sarà collegato attraverso la rete LISN (Line Impedance Stabilization Network) ovvero un

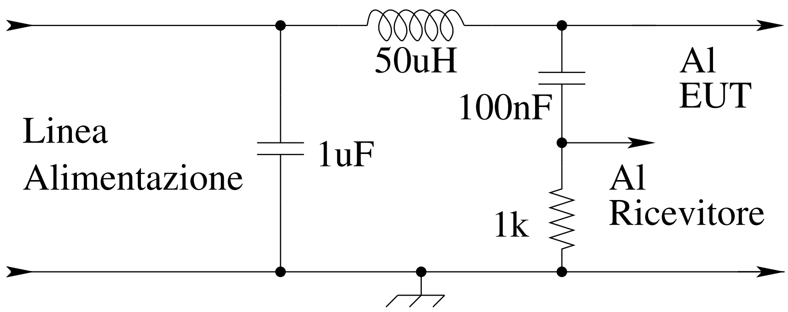

Figura 14: rete LISN monofase

circuito passivo con le seguenti funzionalità:

- presenta una impedenza d'uscita costante a 50Ω in tutta la banda d'interesse
- riduce i disturbi provenienti dalla linea elettrica d'alimentazione
- fornisce alimentazione all'EUT con una impedenza di sorgente nota, in modo che le misure effettuate siano ripetibili.

Attenzione che a causa del condensatore di filtro da $1\mu F$ la corrente che drenata verso la massa risulta di svariate decine di mA, superiore quindi a quella imposta dai normali interruttori differenziali di protezione (*salvavita*) per cui spesso è necessario inserire fra la linea di alimentazione e la LISN un trasformatore di disaccoppiamento.
Inoltre la figura 14 mostra il circuito interno di una LISN monofase: operando in trifase serviranno tre o quattro di questi circuiti (tre per le linee R,S,T ed eventualmente uno per la linea N).
Al fine di non danneggiare il ricevitore è consigliato l'inserimento di un filtro passa-alto fra LISN e ricevitore, e l'attivazione dell'attenuatore da 20dB previsto dalla LISN per effettuare la prima misura.

6.2 Immunità condotta

La strumentazione utilizzata per questo tipo di prova è la seguente:

- generatore RF per la banda $9KHz \div 80MHz$

- amplificatore di potenza per tale banda
- dispositivo di accoppiamento dei disturbi con le linee di alimentazione
- generatore di burst, fast transient, buchi di rete, eccetera.

Si utilizzano sia i generatori RF sia i generatori di disturbo, che vanno ad interagire con le linee di alimentazione dell'EUT attraverso una rete di accoppiamento oppure una pinza capacitiva; l'alimentazione viene poi disaccoppiata dalla linea elettrica per evitare di iniettare gli stessi disturbi in tutta la rete elettrica!

7 Scariche elettrostatiche

L'elettricità statica si genera per contatto e successiva separazione dei materiali: ad esempio con lo sfregamento di due materiali isolanti si può verificare un trasferimento di carica elettrica da un materiale all'altro, cosicché allontanando i due materiali si genera un campo elettrico che, superando la rigidità dielettrica del mezzo che li separa, causerà una scarica elettrostatica (arco elettrico, oppure in inglese ElectroStatic Discharge).

Lo scopo dei test è la verifica dell'immunità dell'EUT alle scariche elettrostatiche generate ad esempio da un operatore o oggetto che vanno a contatto diretto con l'apparato, oppure che operano in prossimità dell'apparato.

7.1 Tipico esempio di generazione ESD

Supponiamo si verifichi uno sfregamento fra le scarpe di una persona ed un tappeto; lo stesso dicasi per lo sfregamento fra gli indumenti ed il sedile dell'auto.

In questo caso il tappeto si carica positivamente, quindi la suola negativamente; essendo il corpo umano conduttore, le cariche negative si distribuiranno in tutto il corpo con maggiore concentrazione nelle estremità (ad esempio nelle punta delle dite; cfr. effetto delle punte).
Avvicinandosi ad un mezzo conduttore si avrà dapprima una induzione di cariche positive nella parte sulla superficie del conduttore vicino alle nostre dita, e poi, quando la distanza tra dita e corpo conduttore risulta sufficientemente piccola, l'innesco di una scarica. La velocità con la quale ci si avvicina al conduttore modifica la durata e intensità dell'arco elettrico; questo sono considerazioni non banali in quanto, nel caso di misure ESD dovremo metterci nella condizione peggiore ovvero dovremo avvicinare lentamente la pistola elettrostatica all'EUT in modo da massimizzare la lunghezza dell'arco elettrico.

7.2 Problemi introdotti dall'ESD

Si verifica dapprima un intenso campo elettrico dovuto alla separazione/induzione di cariche, cosicché al verificarsi della scarica elettrostatica si genera un campo elettromagnetico che si estende tranquillamente fino a $2GHz$ con una corrente di scarica che assume valori di circa $10 \div 40A$.

I meccanismi di accoppiamento con il circuito in prova saranno i seguenti:

- conduzione diretta attraverso i circuiti elettronici
- scariche secondarie attraverso i vari punti dell'EUT
- accoppiamento del campo elettrico (accoppiamento capacitivo)

- accoppiamento del campo magnetico (accoppiamento induttivo).

Il risultato è la generazione di disturbi sia condotti che irradiati, con la possibilità di danneggiamento dei dispositivi elettronici dell'EUT.

7.3 Modello di scarica elettrostatica del corpo umano

Essendo la Direttiva EMC indirizzata a prevenire i malfunzionamenti delle apparecchiature in condizioni normali, anche per le misure ESD saranno utilizzati dei tipi di prove e valori di scarica elettrostatica rappresentativi delle condizioni operative normali. Per questo si è studiato il modello di scarica elettrostatica del corpo umano; in figura 15 è rappresentata la scarica prodotta dal corpo umano

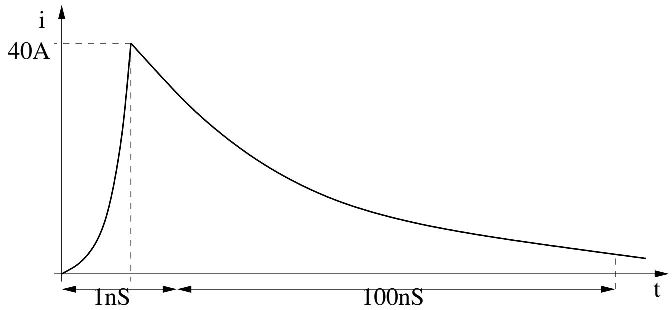

Figura 15: scarica elettrostatica generata dal corpo umano caricato a 20kV

caricato a 20kV (situazione normale in condizioni di bassa umidità dell'aria).

7.4 Misure per limitare gli effetti delle ESD

Per eliminare la possibilità di danneggiamenti dovuti alle scariche elettrostatiche è necessario inserire l'EUT in un contenitore metallico privo di aperture e collegato a terra. Ovviamente questa soluzione risulta impossibile da attuare, in quanto vi sarà sempre almeno un'apertura (cavo di alimentazione, ventilazione, ...).

In figura 16 è schematizzato il fenomeno ESD in un circuito elettronico, cosicché sia possibile

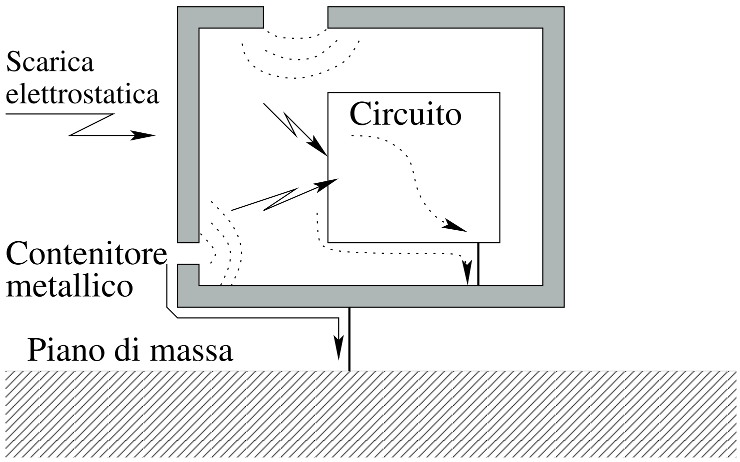

Figura 16: schematizzazione del fenomeno ESD

pervenire ad alcune considerazioni pratiche per il miglioramento dell'affidabilità dell'EUT.

1. È necessario inserire le schede elettroniche in un contenitore metallico da collegare a terra attraverso una connessione a bassa impedenza (bassa resistenza e soprattutto bassa induttanza, viste le frequenze in gioco).

2. Il circuito stampato non dovrà essere posto nelle vicinanze di aperture nella scatola, che lo esporrebbero ai campi elettromagnetici generati dalla scarica stessa.

3. Per evitare scariche secondarie fra scatola metallica e circuito elettronico, questo deve essere collegato alla scatola in uno o piú punti a seconda della conformazione della scatola, in modo da rendere il circuito equipotenziale con la scatola.

4. Si dovranno privilegiare delle vie di fuga per la corrente di scarica che non attraversino il circuito: si ricordi infatti che l'intensità di corrente di scarica raggiunge valori di decine di ampere!

5. Nel caso in cui vi siano parti della scatola realizzate in plastica, ottimo isolante, e quindi predisposte all'accumulo di carica elettrostatica, è necessario provvedere alla loro metallizzazione attraverso una vernice conduttiva.

6. Tutti i cavi di connessione provenienti dall'esterno dovranno essere opportunamente filtrati (circuito LC o almeno RC per favorire il passaggio della scarica direttamente verso la pista di massa.

7.5 Normativa

Per le misure ESD si dovrà posizionare l'EUT su un tavolo completamente in legno con superficie minima di $1m^2$ e altezza $80cm$, sul quale è posto un piano di massa in rame o alluminio di spessore 0.25mm (oppure altri materiali conduttori con spessore 0.65mm) che sbordi dal l'EUT di almeno $50cm$. Il tavolo dovrà essere posizionato su un altro piano di massa posto sul pavimento, collegato al piano di massa superiore attraverso cavo flat o piattina (per minimizzare l'effetto pelle) con in serie due resistenze da $470K\Omega$ a bassa induttanza, per evitare l'accumulo di carica.
A 10cm di distanza dall'EUT, sopra il tavolo, si dovrà inoltre porre un piano conduttore verticale utile per la verifica dell'immunità dell'EUT dalle scariche secondarie.

Le normativa d'interesse,IEC1000-4-2 e EN61000-4-2, derivano dalle precedenti normative IEC801-2 del 1984 e 1991, e prevedono:

- utilizzo di una pistola elettrostatica con impedenza di scarica di 330Ω e capacità di $150pF$
- due diversi tipi di puntale:
  - *puntale appuntito* per le scariche a contatto, utile nel caso di materiali non perfettamente conduttori
  - *puntale tondeggiante* che simula il comportamento del dito umano, per scariche in aria.
- due modi di scarica:
  - *di tipo diretto*, ovvero direttamente sull'apparato in test

– *di tipo indiretto*, ovvero sul piano orizzontale del tavolo o su quello verticale vicino all'EUT.

La normativa tollera che in caso di scarica l'apparecchiatura si spenga senza però causare situazioni di pericolo per persone o cose.

7.5.1 Scariche di tipo diretto

Le scariche devono essere applicate a tutti i punti accessibili dell'EUT. Il test dovrà essere eseguito con almeno 10 scariche singole, sia positive che negative ed un intervallo di tempo di almeno 1s fra una scarica e l'altra.

La norma armonizzata EN50082-2 (ambiente industriale pesante) prevede una tensione di carica di 4kV per la scarica a contatto, e 8kV per la scarica in aria.

7.5.2 Scariche di tipo indiretto

La scarica è applicata su di un piano di riferimento (quello orizzontale sul tavolo, o quello verticale a $10cm$ di distanza dall'EUT) tramite il puntale a contatto.

7.6 Risoluzione dei problemi

Nel trasporto di dispositivi elettronici sono spesso utilizzati dei sacchetti in polietilene, polimero che presenta una resistività di $10^{12}\Omega/quadro$ al contrario di altri isolanti ordinari che presentano una resistività di $10^{14}\Omega/quadro$: in questo modo si vuole favorire una distribuzione di carica uniforme sulla superficie del sacchetto, rendendola quindi equipotenziale. In altri dispositivi, come le stampanti, si utilizzano delle spazzole metalliche che impediscono l'accumulo di carica sulla carta causata dallo scorrere di questa sui rulli di gomma.

Tutte le masse dei circuiti elettronici dovranno essere collegate al contenitore metallico, in modo da evitare che il loro potenziale si trovi a livello diverso da quello del contenitore (producendo in tal caso delle scariche secondarie fra contenitore e circuito). I circuiti elettronici dovranno essere posizionati ad almeno 1cm di distanza da tutte le zone esposte della scatola (aperture): eventualmente fra le aperture della scatola ed il circuito dovrà essere inserito uno schermo secondario al fine di evitare che la scarica arrivi direttamente alla scheda.

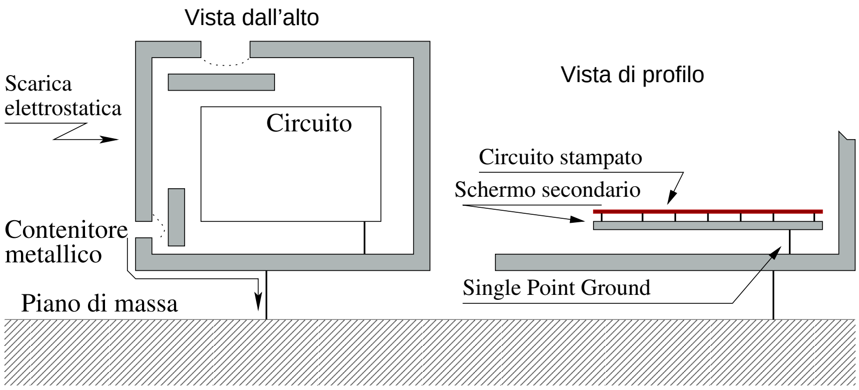

Figura 17: utilizzo di schermi secondari e SPG

A volte è opportuno fissare il circuito stampato come mostrato nella parte a destra della figura 17, ovvero su un piano metallico collegato alla scatola in un unico punto (Single Point Ground), soluzione che assicura l'instradamento della corrente di scarica al di fuori del piano di massa su cui è fissata la scheda.

Nel caso delle connessioni verso l'esterno, poiché le scariche elettrostatiche generano delle correnti di modo comune è indispensabile l'utilizzo il doppio avvolgimento visto in figura 13 per ridurre sensibilmente il problema dovuto alle ESD, oltre ai disturbi irradiati come visto in sezione 6.1. Questa soluzione funziona bene per i collegamenti a bassa impedenza (alimentazione), mentre per i collegamenti ad alta impedenza (linee di segnale) conviene inserire dei condensatori verso massa ed eventualmente dei *soppressori di transitori* (diodi zener o di clamp, varistori (Metal Oxide Varistor), limitatori di tensione a gas o al silicio (Silicon Transient Voltage Suppressor).

Indice analitico