

Appunti di Compatibilità Elettromagnetica **La diafonia**

Introduzione: importanza della diafonia	1
Descrizione del fenomeno	2
Tipiche configurazioni di linee a tre conduttori	4
Uso di un modello a parametri concentrati per una soluzione approssimata	7

INTRODUZIONE: IMPORTANZA DELLA DIAFONIA

La **diafonia** è uno tra i più importanti aspetti della progettazione di apparati compatibili dal punto di vista elettromagnetico. *Il termine **diafonia** indica essenzialmente l'accoppiamento elettromagnetico non voluto tra fili e piste dei circuiti che si trovano vicini tra loro. Questo fenomeno è dovuto, come si vedrà, proprio alle correnti ed alle tensioni nei conduttori, il che lo farebbe sembrare analogo al semplice e noto problema dell'*accoppiamento d'antenna*; al contrario, esso differisce da quest'ultimo in quanto si tratta di un problema di accoppiamento in campo vicino, mentre invece quello d'antenna è generalmente un problema di accoppiamento in campo lontano.*

La diafonia tra fili in un cavo oppure tra piste in un circuito stampato rappresenta un fenomeno di **interferenza interna** di un sistema; in altre parole, *la sorgente dell'emissione elettromagnetica ed il ricevitore (o vittima) di questa emissione appartengono allo stesso sistema*. Questo mostra che siamo nel terzo fondamentale campo di interesse della compatibilità elettromagnetica: la progettazione di un prodotto che non interferisca con se stesso¹.

D'altra parte, possiamo renderci conto facilmente di come la diafonia possa influenzare le emissioni radiate e/o condotte di una apparecchiatura:

- consideriamo, per esempio, un **cavo a nastro** che si trovi all'interno di un prodotto e sia collocato molto vicino ai fili di collegamento con una periferica esterna all'apparecchiatura: la diafonia tra questi due cavi può indurre segnali sui fili di collegamento della periferica, i quali possono irradiare all'esterno, col rischio di superare i limiti delle norme sulle *emissioni radiate*;
- un'altra possibilità è invece quella per cui l'accoppiamento tra i cavi coinvolge il **cordone di alimentazione** dell'apparecchiatura, sul quale vengono indotti dei segnali che, ancora una volta, potrebbero violare le norme sulle *emissioni condotte*.

Non è finita qui, in quanto la diafonia può influenzare anche la *suscettività* di un apparato alle emissioni di un altro apparato: ad esempio, le emissioni di un apparato A possono accoppiarsi sul

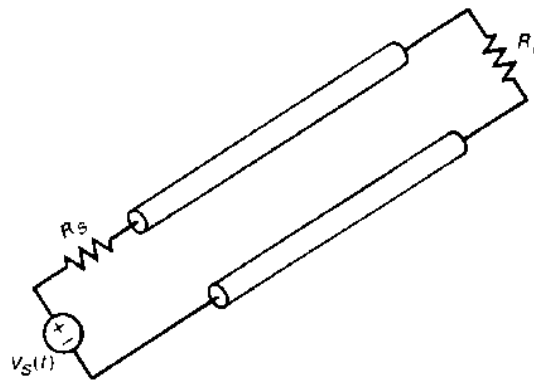
¹ Ricordiamo che gli altri due campi riguardano le emissioni prodotte e la suscettività alle emissioni esterne (prodotte da altre apparecchiature)

cavo di alimentazione di un altro apparato B e poi, all'interno di questo, si possono accoppiare per diafonia a qualche altro cavo, il che rappresenta un evidente aumento della suscettività al segnale esterno da parte dell'apparato B.

Queste considerazioni evidenziano l'importanza del fenomeno della diafonia e della necessità di difendersi da esso.

DESCRIZIONE DEL FENOMENO

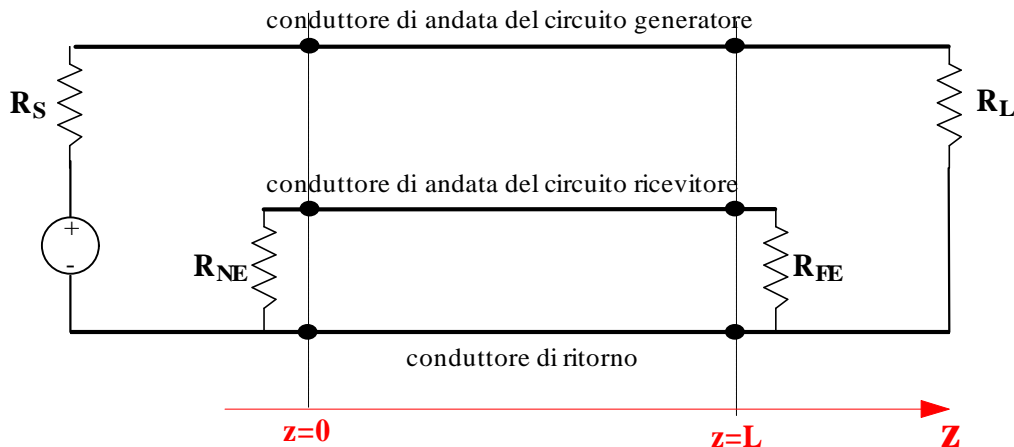
Scendiamo ora in maggiori dettagli nella descrizione del fenomeno della diafonia. A tal fine, dobbiamo partire da una **linea di trasmissione a due conduttori**, del tipo schematizzato nella figura seguente:



In una linea di trasmissione a due conduttori, non può esistere il fenomeno della diafonia. Perché questo fenomeno abbia luogo, ci devono essere almeno 3 conduttori (linee di trasmissione multiconduttore), il che accade, ad esempio, come si vedrà, quando le linee di trasmissione sono due, ma utilizzano lo stesso conduttore di ritorno.

Ad ogni modo, per studiare linee di trasmissione a 3 o più conduttori, bisogna applicare concetti del tutto simili a quelli noti sulle linee di trasmissione a due conduttori.

L'aggiunta di un terzo conduttore ad un sistema a due conduttori genera la possibilità di creare interferenze sui circuiti collegati alle estremità dei conduttori stessi, a causa appunto della **diafonia**. Per spiegarci meglio, facciamo riferimento alla figura seguente, nella quale è riportata una classica schematizzazione di una linea di trasmissione a tre conduttori:

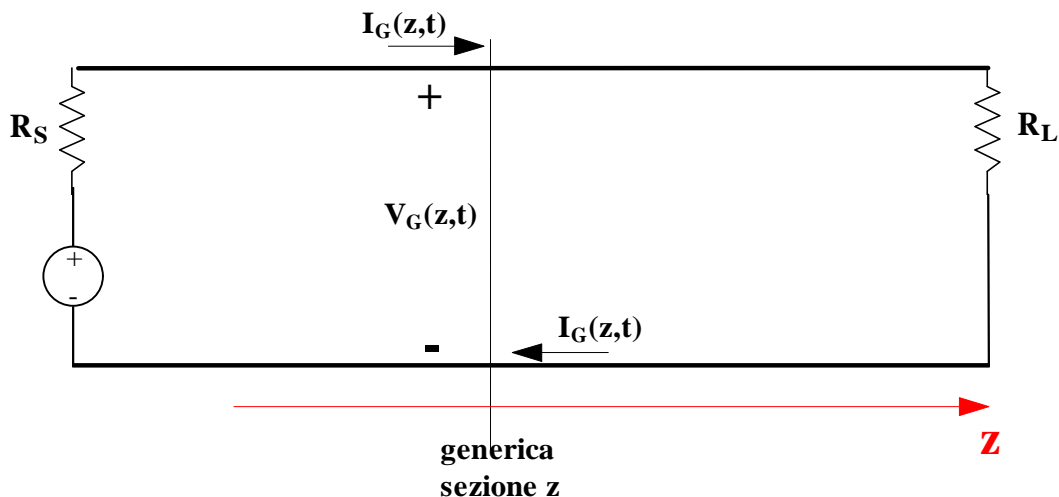


Abbiamo dunque un **circuito generatore** (o *circuito sorgente*), costituito da un generatore $V_S(t)$ con resistenza serie R_S collegato, tramite un conduttore di andata ed uno di ritorno (detto anche **conduttore di riferimento**), su un carico resistivo R_L ; poi c'è un **circuito ricevitore** (detto anche *circuito vittima*), costituito semplicemente da altre due terminazioni (R_{NE} ed R_{FE}) collegate tra loro tramite un altro conduttore di andata e lo stesso conduttore di ritorno del circuito sorgente².

Supponendo di non poter ritenere valida l'ipotesi dei parametri concentrati, dobbiamo considerare i tre conduttori tramite un **modello a parametri distribuiti**, così come si fa tradizionalmente per lo studio delle linee di trasmissione a due conduttori. Ci conviene dunque fissare (come evidenziato nell'ultima figura) un **riferimento** ad esempio con l'asse z parallelo ai conduttori, in modo da poter descrivere, in ciascuna sezione z ed in ciascun istante t , l'andamento delle correnti e delle tensioni nei conduttori. Come si vede, abbiamo indicato con $z=0$ la *sezione di alimentazione* e con $z=L$ la *sezione di carico*, adottando così implicitamente una **lunghezza** della linea pari proprio ad L .

Stiamo inoltre facendo, per semplicità, l'ipotesi che qualsiasi **disomogeneità** del dielettrico circostante abbia una sezione trasversale uniforme lungo l'asse della linea, il che consente di ritenere la linea **uniforme**.

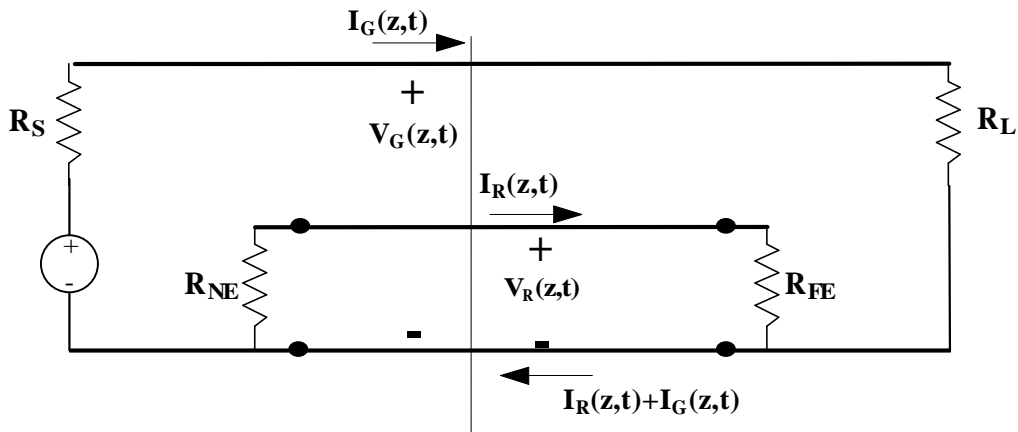
Sia $I_G(z,t)$ la funzione che descrive l'andamento spaziale e temporale della corrente nel circuito generatore e, analogamente, sia $V_G(z,t)$ la funzione che descrive l'andamento spaziale e temporale della tensione tra il conduttore di andata e quello di ritorno del circuito generatore³:



In condizioni ideali di funzionamento, questa corrente e questa tensione non dovrebbero sortire alcun effetto sul circuito ricevitore: i conduttori di tale circuito, in cui manca ogni sorgente di segnale, non dovrebbero presentare alcuna differenza di potenziale e non dovrebbero essere attraversati da alcuna corrente. Al contrario, la corrente e la tensione del circuito generatore producono un campo elettromagnetico, che necessariamente interagisce con il circuito ricevitore (*accoppiamento non voluto*): questa interazione induce una corrente $I_R(z,t)$ ed una tensione $V_R(z,t)$ lungo il circuito ricevitore:

² Facciamo notare che stiamo usando solo carichi resistivi lineari, ma tutti i risultati che otterremo saranno validi per carichi generici, comprendenti quindi anche condensatori e/o induttori. Inoltre, l'ipotesi di ritenere che il circuito ricevitore sia costituito solo da carichi e non possieda generatori è solo una semplificazione, in quanto a noi interessa solo evidenziare l'azione (indesiderata) su tale circuito dei segnali presenti sul circuito generatore e, a tal fine, non serve considerare generatori nel circuito vittima.

³ Ci riferiamo, evidentemente, a funzioni definite nel dominio del tempo



Ovviamente, la presenza di una corrente e di una tensione nel circuito ricevitore produce una tensione ai capi delle resistenze terminali R_{NE} ed R_{FE} , tensione che altrimenti (cioè in condizioni ideali di funzionamento) sarebbe assente. Indicando perciò rispettivamente con $V_{NE}(t)$ e $V_{FE}(t)$ tali tensioni, le chiamiamo **tensioni di diafonia** (o, più genericamente, *tensioni di disturbo*).

L'effetto della diafonia è dunque appunto nel manifestarsi di queste tensioni. Si tratta perciò di determinare le tensioni di diafonia, supponendo noti i valori dei vari elementi circuitali (generatore e carichi) e le dimensioni trasversali della struttura.

Così come accade per lo studio classico delle linee di trasmissione, ci sono due tipi di analisi che possono interessare:

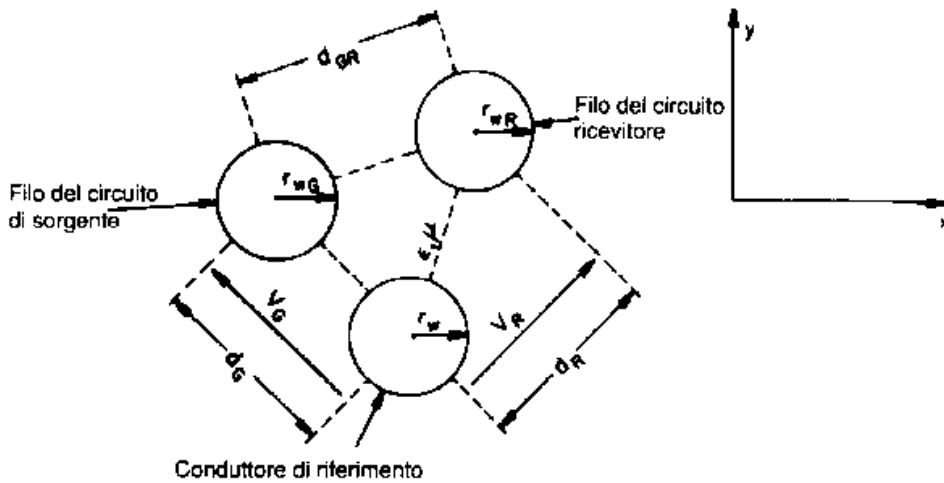
- l'**analisi nel dominio del tempo** consiste nel determinare la forma d'onda delle tensioni di diafonia in presenza di una forma d'onda generica $V_S(t)$ applicata dal generatore;
- l'**analisi nel dominio della frequenza** consiste sempre nel determinare la forma d'onda delle tensioni di diafonia, ma questa volta in presenza di una forma d'onda sinusoidale $V_S(t) = \cos(\omega t + \varphi)$ applicata dal generatore e nell'ipotesi che nella struttura si sia instaurato un *regime sinusoidale permanente*⁴: si tratta quindi sostanzialmente di andare a calcolare i **fasori** $V_{NE}(j\omega)$ e $V_{FE}(j\omega)$ delle tensioni di diafonia.

TIPICHE CONFIGURAZIONI DI LINEE A TRE CONDUTTORI

Prima di vedere qualche dettaglio in più sullo studio della diafonia, diamo dei cenni ad alcune **strutture fisiche** nei quali il fenomeno della diafonia tipicamente si manifesta. Consideriamo in particolare linee di trasmissione a 3 conduttori, del tipo schematizzato prima.

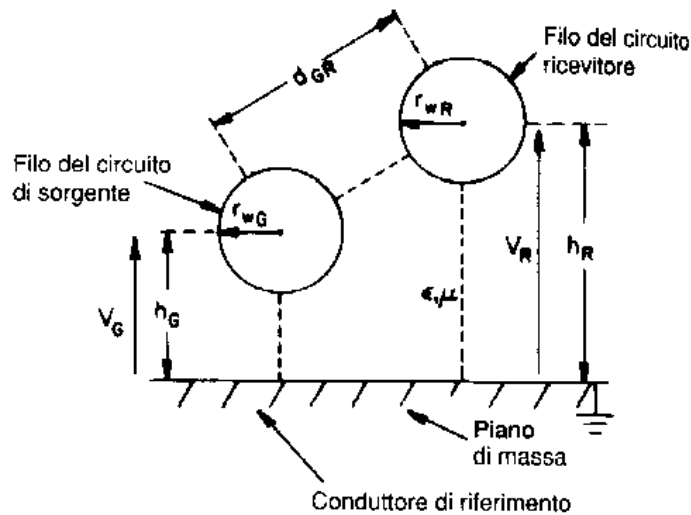
Il caso più semplice da immaginare è quello di una linea a 3 conduttori formata banalmente da 3 fili cilindrici paralleli, di cui la figura seguente propone una sezione trasversale:

⁴ Ritenere che, nella struttura, si sia instaurato un ben preciso regime (quale che esso sia) di correnti e di tensioni significa presupporre che sia trascorso un tempo sufficientemente lungo dall'inizio del funzionamento del generatore, in modo che ogni eventuale fenomeno transitorio possa ritenersi esaurito.

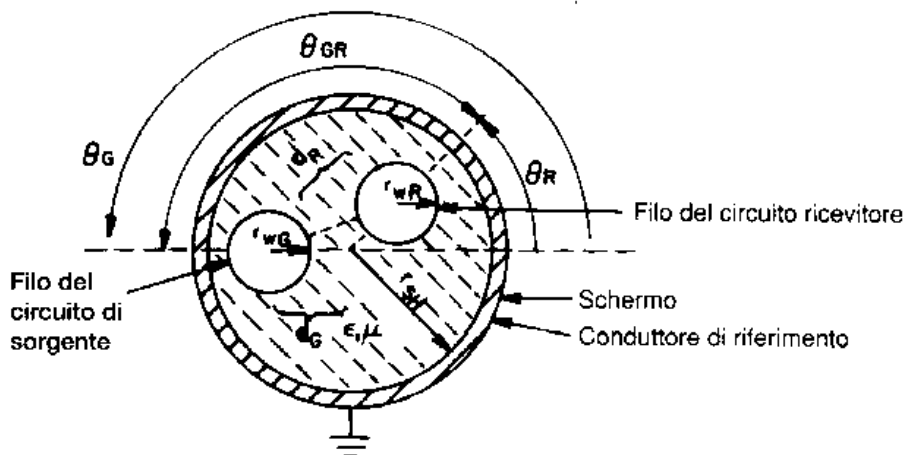


Così come detto prima, abbiamo i due conduttori del circuito sorgente e del circuito ricevitore e poi il conduttore di riferimento, comune ai due circuiti.

In alternativa, è possibile pensare a 2 soli conduttori (entrambi di andata) e ad un piano di massa (infinitamente esteso) che funga da conduttore di ritorno:



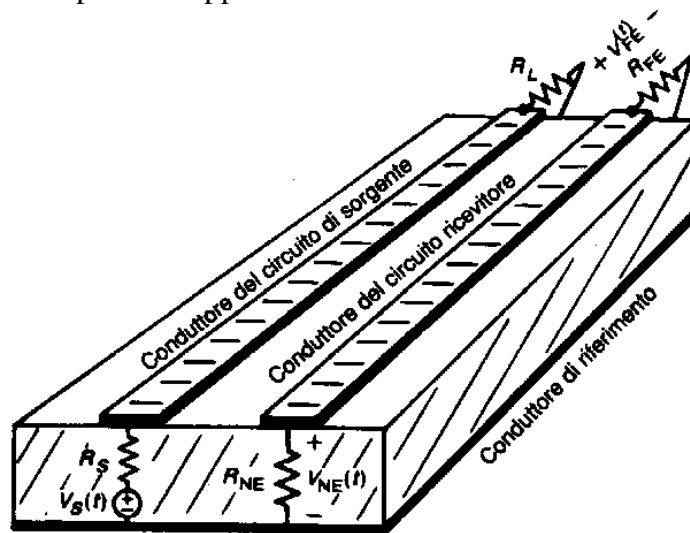
Una configurazione leggermente più complessa è quella di due fili posti all'interno di uno schermo metallico che li avvolge completamente e funge da conduttore di ritorno:



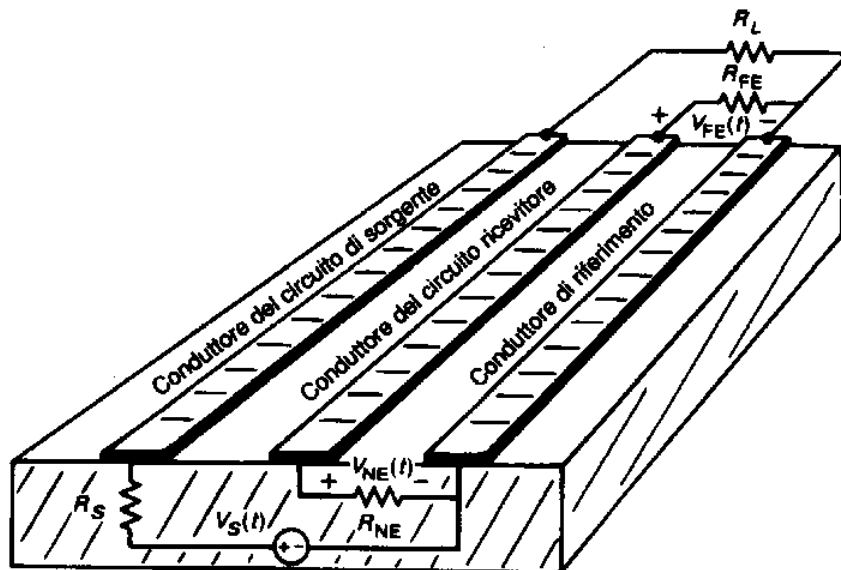
In tutti e 3 i casi appena riportati, si suppone che il mezzo che circonda i conduttori sia **omogeneo**, il che significa sostanzialmente ignorare l'eventuale isolante che ricopre i fili. Al contrario, la presenza di questo isolante è generalmente inevitabile e contribuisce non poco all'andamento dei campi elettromagnetici, ossia alla complicazione matematica dell'analisi della struttura. Allora, volendo trascurare la presenza dell'isolante (al fine di semplificare l'analisi matematica) e, allo stesso tempo, volendo pervenire a risultati in buon accordo con la realtà, è necessario supporre che i fili siano sufficientemente distanti tra loro, nel qual caso i risultati teorici e quelli sperimentali risultano abbastanza congruenti.

L'analisi delle tre strutture appena proposte è assolutamente identica; ciò che cambia, di volta in volta, sono i **parametri per unità di lunghezza**, così come accade nello studio delle linee di trasmissione a due conduttori.

Passando nell'ambito dei **circuiti stampati**, si possono incontrare altri tipi di linee di trasmissioni a 3 conduttori, soggette perciò alla diafonia. Una possibilità è quella della figura seguente, dove sono raffigurate due **piste** parallele (costituenti i due conduttori di andata) poste sulla superficie superiore di una **piastra dielettrica**, con il **piano di massa** (che funge da conduttore di ritorno) sulla superficie opposta:



Questa configurazione è spesso indicata come quella della **microstrisce accoppiate**. Un'altra possibilità consiste invece di 3 piste parallele poste su un **substrato** comune:



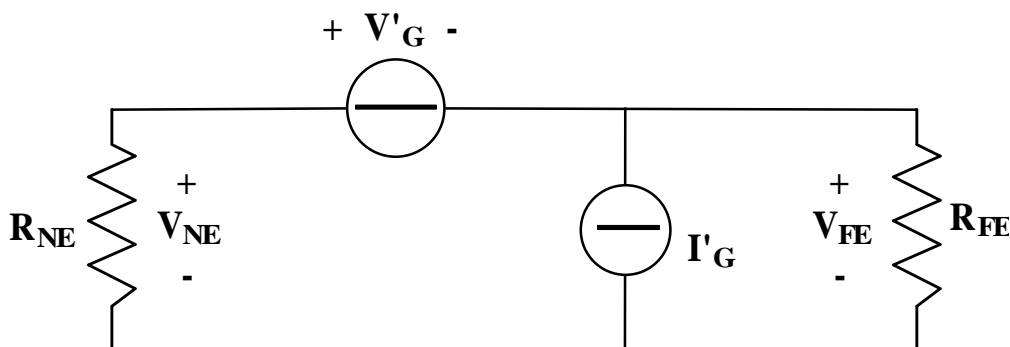
Si parla in questo caso di configurazione a **strisce co-planari accoppiate**.

In entrambi i casi appena illustrati, il mezzo circostante è tutt'altro che omogeneo, dato che i campi attraversano in parte il substrato elettrico ed in parte l'aria circostante. Siamo dunque in una situazione diversa da quella delle tre configurazioni illustrate prima e soprattutto più complicata. Quindi, mentre l'analisi delle varie strutture è assolutamente la stessa, ciò che cambia profondamente è la determinazione dei parametri per unità di lunghezza: nel caso di un mezzo omogeneo o approssimativamente tale (prime tre configurazioni), si riescono ad ottenere espressioni anche semplici, se pur approssimate, mentre invece, nel caso di un mezzo non omogeneo (ultime due configurazioni), la cosa risulta decisamente più complicata ed è infatti questo l'aspetto cruciale dello studio di questo tipo di strutture.

USO DI UN MODELLO A PARAMETRI CONCENTRATI PER UNA SOLUZIONE APPROSSIMATA

Il modo più completo e rigoroso per esaminare il fenomeno della diafonia è, come detto in precedenza, quello di adottare un modello a parametri distribuiti per la linea di trasmissione a 3 conduttori presa in esame. Tuttavia, è comunque istruttivo condurre una analisi approssimata, ipotizzando di poter usare un **modello a parametri concentrati**. Vediamo allora come si può procedere con questa strada.

Il primo passo è quello di pensare ad un **circuito equivalente del circuito ricevitore, a parametri concentrati**, fatto nel modo seguente:



In assenza della diafonia, il circuito ricevitore non possiederebbe generatori. Al contrario, a causa della **diafonia** e cioè dell'accoppiamento non desiderato, con il circuito ricevitore, del campo elettromagnetico generato dal circuito sorgente, dobbiamo includere, rispettivamente, un **generatore indipendente di tensione V'_G** ed un **generatore indipendente di corrente I'_G** :

- il generatore di tensione tiene conto dell'**accoppiamento induttivo** tra i due circuiti, dovuto al fatto che il flusso del campo magnetico, generato dal circuito sorgente, si concatena con il circuito ricevitore inducendovi una forza elettromotrice;
- il generatore di corrente, invece, tiene conto dell'**accoppiamento capacitivo** tra i due circuiti, dovuto al fatto che, essendo i due conduttori di andata affacciati uno sull'altro, esiste tra loro un effetto capacitivo che drena corrente dal circuito generatore al circuito ricevitore.

L'obiettivo è allora quello di andare a calcolare V'_G e I'_G , in modo da pervenire all'espressione delle **tensioni di diafonia**: l'analisi del circuito, eseguita tramite il *principio di sovrapposizione degli effetti*, porta infatti a dire che le tensioni di diafonia valgono evidentemente

$$V_{NE} = \frac{R_{NE}}{R_{NE} + R_{FE}} V'_G + \frac{R_{NE} R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} I'_G$$

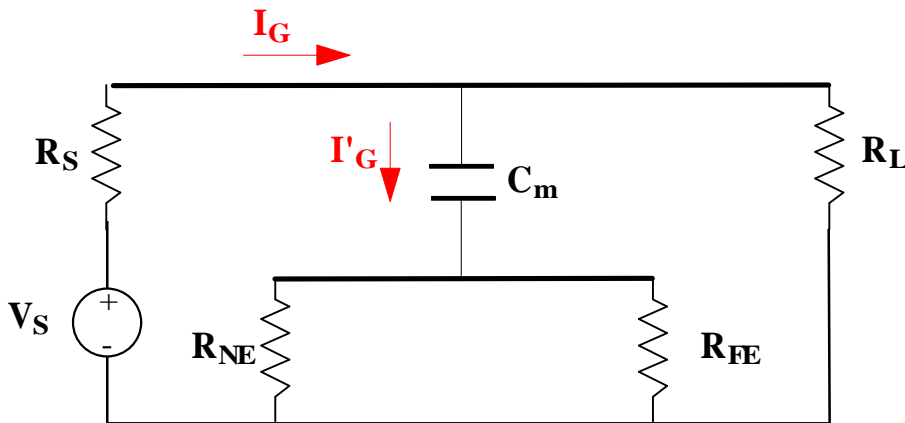
$$V_{FE} = -\frac{R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} V'_G + \frac{R_{NE} R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} I'_G$$

per cui le uniche incognite sono V'_G e I'_G .

Facciamo l'ipotesi di essere in regime sinusoidale permanente, per cui stiamo cercando la soluzione nel dominio della frequenza. Dobbiamo calcolare V'_G e I'_G usando l'ipotesi dei parametri concentrati. Questo significa, sostanzialmente, studiare il circuito composto dai tre conduttori senza usare il *modello delle linee di trasmissione*, ma solo le leggi di Kirchoff. Il circuito in questione è ovviamente il seguente:



Consideriamo, ad esempio, l'**accoppiamento capacitivo** e supponiamo che esso sia l'unico a manifestarsi (ossia ignoriamo l'accoppiamento induttivo). Possiamo modellare tale accoppiamento semplicemente tramite un condensatore, di capacità pari alla capacità mutua totale C_m tra i due circuiti, che abbia l'effetto di drenare nel circuito ricevitore parte della corrente I_G che scorre nel circuito generatore:



La corrente I'_G drenata dal condensatore corrisponde proprio al generatore equivalente di corrente considerato prima. Il suo calcolo è immediato: infatti, tenendo conto che l'impedenza incontrata da I_G è data evidentemente da

$$\hat{Z}_{in} = \frac{1}{\frac{1}{R_L} + \frac{1}{(R_{NE} // R_{FE}) + \frac{1}{j\omega C_m}}}$$

deduciamo che la corrente I_G vale

$$\hat{I}_G = \frac{\hat{V}_s}{R_s + \hat{Z}_{in}}$$

e quindi che la tensione ai capi della serie tra C_m e $R_{NE} // R_{FE}$ vale

$$\hat{V}_L = \hat{Z}_{in} \hat{I}_G = \frac{\hat{Z}_{in} \hat{V}_s}{R_s + \hat{Z}_{in}} = \frac{\hat{V}_s}{\frac{R_s}{\hat{Z}_{in}} + 1} = \frac{\hat{V}_s}{R_s \left[\frac{1}{R_L} + \frac{1}{(R_{NE} // R_{FE}) + \frac{1}{j\omega C_m}} \right] + 1}$$

Dividendo ora questa tensione per l'impedenza del ramo con la serie tra C_m e $R_{NE} // R_{FE}$, otteniamo finalmente la corrente di nostro interesse:

$$\hat{I}'_G = \frac{\hat{V}_L}{(R_{NE} // R_{FE}) + \frac{1}{j\omega C_m}} = \frac{\hat{V}_s}{R_s \left[\frac{1}{R_L} (R_{NE} // R_{FE}) + \frac{1}{j\omega C_m} + 1 \right] + 1}$$

Adesso possiamo fare un discorso simile per quantificare l'**accoppiamento induttivo**, ossia sostanzialmente per determinare l'espressione di V'_G . In questo caso, il discorso è più semplice rispetto a prima: infatti, supponendo che non ci sia accoppiamento capacitivo, il circuito ricevitore e quello generatore sono fisicamente separati, nel senso che non ci sono partizioni di correnti e/o tensioni; di conseguenza, possiamo facilmente calcolare la corrente I_G nel circuito generatore: in regime sinusoidale permanente, risulta banalmente

$$\hat{I}_G = \frac{\hat{V}_s}{R_s + R_L}$$

Questa corrente determina un flusso di campo magnetico che attraversa il circuito ricevitore e induce in esso una tensione \hat{V}'_G : in generale, tale flusso concatenato vale notoriamente $\phi_R = L_m I_G$ e la sua derivata temporale corrisponde alla tensione indotta nel circuito ricevitore; in regime sinusoidale permanente, abbiamo perciò che

$$\hat{V}'_G = j\omega L_m \hat{I}_G = j\omega L_m \frac{\hat{V}_s}{R_s + R_L}$$

Concludiamo quindi che la corrente di disturbo (accoppiamento capacitivo) e la tensione di disturbo (accoppiamento induttivo) indotte nel circuito ricevitore dal circuito generatore sono le seguenti:

$$\hat{I}'_G = \frac{\hat{V}_s}{R_s \left[\frac{1}{R_L} (R_{NE} // R_{FE}) + \frac{1}{j\omega C_m} + 1 \right] + 1}$$

$$\hat{V}'_G = j\omega L_m \frac{\hat{V}_s}{R_s + R_L}$$

Andando a sostituire nelle espressioni delle tensioni di diafonia ricavate sul modello a parametri concentrati, otteniamo una approssimazione comunque abbastanza buona delle tensioni di diafonia. Per rendersi conto di quanto buona sia questa approssimazione, si dovrebbe chiaramente andare a confrontare la soluzione appena ricavata con quella ottenuta col metodo rigoroso, basato cioè sull'uso di un modello a parametri concentrati.

Autore: **SANDRO PETRIZZELLI**
e-mail: sandry@iol.it
sito personale: <http://users.iol.it/sandry>
succursale: <http://digilander.iol.it/sandry1>