Caratterizzazione a Larga Banda di Sensori di Corrente per Compatibilità Elettromagnetica

R. De Leo, V. Mariani Primiani, S. Pennesi
Dipartimento di Elettronica ed Automatica
Università degli studi di Ancona

Abstract

The use of current probes, for the injection of wide-band disturbance in EMC applications, requires an accurate characterisation up to few GHz. This can be accomplished directly in the frequency domain, making use of a S matrix representation of the probe, or in the time domain, recovering the transfer function from the impulse response measurement.
Both techniques suffer of limitations due to numerical and experimental problems; in particular the frequency domain approach leads to the solution of an inverse problem, with numerical instabilities in the high frequency range, whereas the time domain approach is not so accurate in the low frequency range of the sought transfer function.
The paper combines the two techniques to overcome these difficulties and achieve a better accuracy across the overall bandwidth. The characterisation of a commercially available current probe allows to compare numerical results with experimental measurements.

1. INTRODUZIONE

In compatibilità elettromagnetica è frequente l'utilizzo di sensori per la misura di campi irradiati, nonché di correnti e tensioni prodotti da cablaggi. Gli stessi sensori vengono anche impiegati per la iniezione di segnali di disturbo in fase di verifica della immunità di apparati elettronici. In entrambi i casi, qualora i segnali da trattare siano di tipo impulsivo (scariche elettrostatiche, fulminazioni, transitori elettrici veloci, etc), al sensore è richiesta una notevole estensione di banda, anche diversi GHz, che impone una accurata caratterizzazione.

In particolare, per trattare segnali impulsivi è necessario conoscere la funzione di trasferimento del sensore, come rapporto tra la grandezza da misurare (generare) e la tensione in ingresso (uscita), per poter ricostruire correttamente la forma d'onda della sollecitazione sotto esame. Pertanto, in generale, la maggior parte delle applicazioni richiede una accurata determinazione sia teorica sia sperimentale della risposta impulsiva del sensore. Allo scopo, vengono impiegate tecniche nel dominio della frequenza e nel dominio del tempo; quelle in frequenza sono tradizionalmente le più impiegate, ma presentano delle difficoltà al di sopra di qualche centinaio di MHz. Infatti, è necessario impiegare una struttura per la generazione della grandezza nota, verso la quale il sensore deve rispondere, in grado di assicurare una sufficiente accuratezza sul valore calcolato. Questo obiettivo è difficile da raggiungere a frequenze elevate, dove le riflessioni prodotte dalle terminazioni della struttura, nonché l'instaurarsi di modi superiori, impongono realizzazioni di costo elevato (celle GTEM, camere anecoiche, ecc.). Nel caso di sensori di corrente è possibile tenere conto delle imperfezioni della linea utilizzata per generare la corrente nota mediante tecniche di

“de-embedding”, per estrarre i parametri della sonda [1]. Come tutti i problemi inversi, anche in questo caso possono sorgere difficoltà numeriche in corrispondenza delle frequenze di risonanza della linea.
Molti inconvenienti possono essere superati lavorando nel dominio del tempo, dove è possibile isolare la risposta del sensore sotto esame da quella della struttura impiegata per generare la grandezza di riferimento. In questo modo, viene meno la necessità di realizzazioni accurate volte a minimizzare le riflessioni, con conseguente riduzione del costo, analogamente a quanto fatto per i sensori di campo elettromagnetico [2]. Le tecniche nel dominio del tempo presentano a loro volta problemi a bassa frequenza, dove la ricostruzione della funzione di trasferimento è legata al tipo di finestra utilizzata per la trasformata e al passo temporale impiegato nelle misure.
Pertanto, un impiego combinato delle due tecniche consente di sfruttarne i reciproci vantaggi: la risposta in bassa frequenza si ricava da misure in frequenza, mentre la parte superiore dello spettro viene ricostruita trasformando misure nel tempo.

2. MODELLIZZAZIONE

Questa tecnica mista viene applicata, nel presente lavoro, per la caratterizzazione di una sonda di corrente che inietta o preleva segnale su una linea di trasmissione (figura 1). La sonda può essere considerata una rete 3 porte: la porta di ingresso (1p) è quella collegata all’avvolgimento primario – dove sarà applicato il generatore per iniettare il disturbo – e le altre due porte sono quelle viste dalla parte sinistra e destra della linea. Il sistema complessivo formato dalla linea e dalla sonda può essere anch’esso visto come una rete tre porte costituita dalla connessione di tre sottosistemi: una rete tre porte che rappresenta la sonda e due reti due porte che rappresentano il lato sinistro e destro della linea (figura 2).

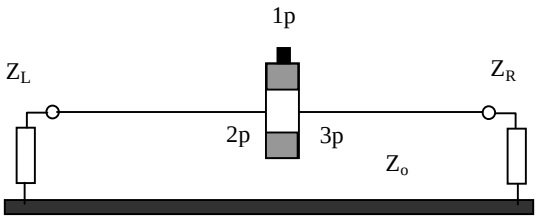

Fig. 1: La sonda inietta su una linea di trasmissione

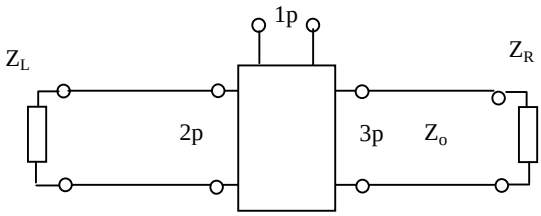

Fig. 2: Circuito equivalente

2a. Matrice S ricostruita da Misure in Frequenza

La matrice di scattering della sonda può essere ricostruita mediante misure – effettuate con un analizzatore di rete – della risposta dell’intero sistema. Lavorando nel dominio della frequenza, dalla misura dei parametri S dell’intero sistema e dalla conoscenza – teorica o sperimentale – di quelli della linea, si può ricavare - utilizzando la teoria dei multipoli e routine numeriche per la soluzione di sistemi di equazioni non lineari (NAG C05NBF) – la matrice S della sonda. Le figure 3 e 4 mostrano un esempio di ricostruzione dei parametri S_{11} (riflessione sull’avvolgimento primario) e S_{12} (iniezione del segnale sulla linea) di una sonda Fisher F61 ottenuti utilizzando una linea lunga 50 cm. Questo metodo per la caratterizzazione della sonda ha il vantaggio – rispetto ad un semplice modello circuitale - di tenere conto anche dei parametri parassiti e delle

perdite. La presenza di instabilità numeriche ne limita però l'accuratezza alle alte frequenze, in quanto la ricostruzione della matrice S della sonda richiede la soluzione di un sistema di equazioni non lineari che – a particolari frequenze (in prossimità delle risonanze della linea) – risulta mal condizionato, dando origine a oscillazioni spurie nei parametri calcolati.

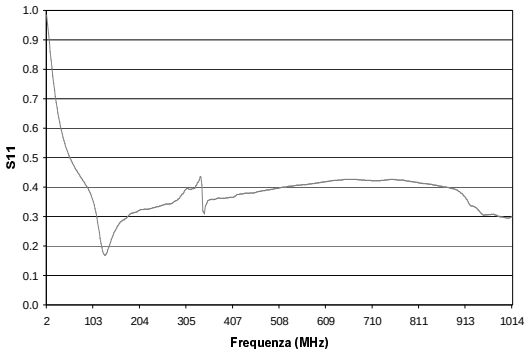

Fig. 3: Riflessione della Sonda (S_{11})

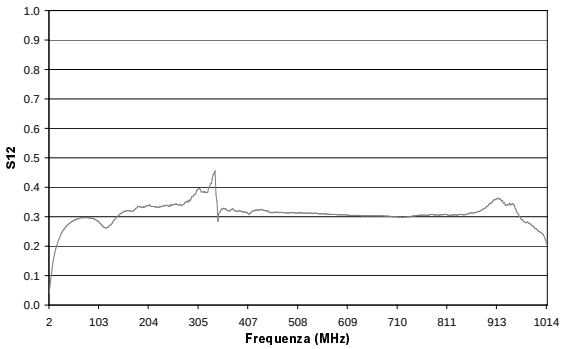

Fig. 4: Iniezione della Sonda (S_{12})

2b. Studio nel Dominio del Tempo

La seconda possibilità per determinare la matrice di scattering della sonda è quella di lavorare nel dominio del tempo. Con questa tecnica si inietta sull'avvolgimento primario della sonda (porta 1) un impulso Si(t). Sulla linea si produrranno una serie di repliche distorte dell'impulso originario, causate dall'iniezione del disturbo da parte della sonda e dalle successive riflessioni alle due terminazioni. Come esempio, si riporta in figura 5 l'evoluzione temporale della tensione $v_L(t)$ alla terminazione sinistra della linea (porta 2). Realizzando un'operazione di "gate" su $v_L(t)$ – come illustrato in figura - si può isolare il primo termine, eliminando tutte le riflessioni. A questo punto, applicando la trasformata di Fourier al risultato, e tenendo conto dei coefficienti di riflessione e trasmissione alla terminazione della linea, si ottiene la funzione di trasferimento della sonda (S_{12}). La figura 6 mostra un esempio di ricostruzione del parametro S_{12} di una sonda Fisher F61 ottenuto con questa tecnica, utilizzando una linea lunga 100 cm. La stessa procedura può essere ottenuta per determinare l'intera matrice di scattering della sonda.

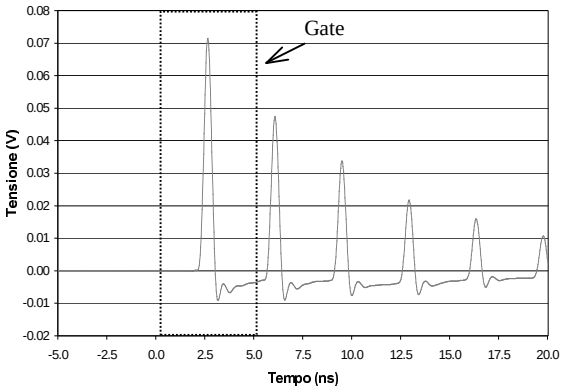

Fig. 5: Operazione di "Gate" sulle riflessioni di un impulso di ampiezza unitaria iniettato sulla linea

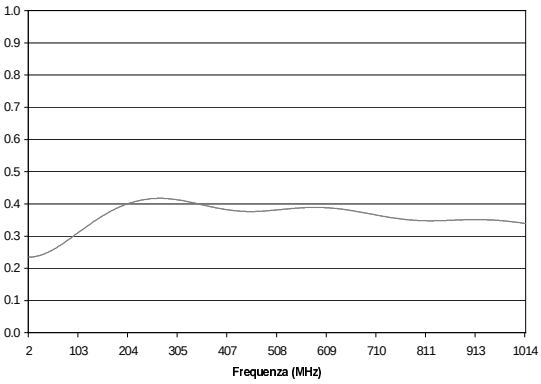

Fig. 6: Iniezione della Sonda (S_{12})

Il principale limite di questo metodo risiede nell'impossibilità di ottenere l'intera evoluzione temporale dell'impulso iniettato sulla linea (il segnale originario non si è ancora esaurito quando arrivano le prime riflessioni) che comporta – dopo la trasformazione - una scarsa accuratezza alle frequenze più basse. Infatti, a 2 MHz il parametro di iniezione di fig. 6 viene chiaramente sovrastimato rispetto a quello vero, che risulta pressoché nullo visto che l'accoppiamento è di tipo induttivo (fig. 4).

2c. Modello Combinato

Come verifica del metodo sono state confrontate le previsioni fornite dal modello e le misure sperimentale (figura 8) dell'andamento nel tempo della tensione all'estremità della linea quando la sonda - posta a 10 cm dalla terminazione - inietta un impulso gaussiano (figura 7).

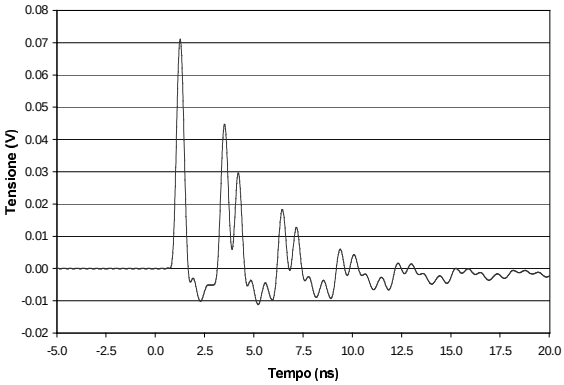

Fig. 7: Tensione all'estremità della linea in risposta ad un impulso gaussiano (misura sperimentale)

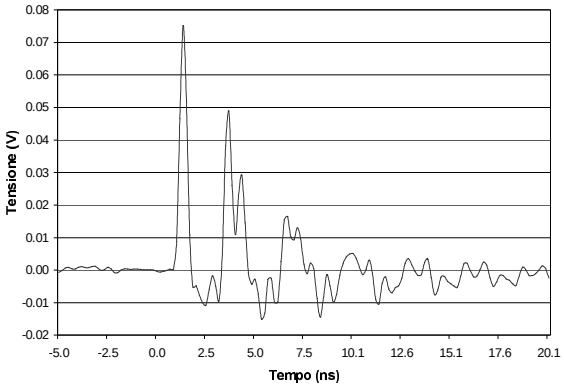

Fig. 8: Tensione all'estremità della linea in risposta ad un impulso gaussiano (previsione teorica)

3. CONCLUSIONI

La presenza di instabilità numeriche in alta frequenza nel primo modello ed i problemi alle basse frequenze dal troncamento della risposta nel dominio del tempo suggeriscono l'utilizzo di un metodo misto che combini i risultati delle due tecniche e consenta una caratterizzazione della sonda accurata nell'intero intervallo di frequenza.

4. BIBLIOGRAFIA

[1] G. Cerri, R. De Leo, V. Mariani Primiani, "A high frequency model of current probes for injection purposes", Proc. of the 14th International Zurich Symposium on EMC, Zurich, February 2001, pp.379-384.

[2] G. Cerri, F. Coacci, L. Fenucci, V. Mariani Primiani, "Measurement of magnetic fields radiated from ESD using Field Sensors", IEEE Transaction on EMC, vol. 43, no. 2, May 2001, pp.187-196.