Comparison of the Efficiency of Electromagnetic Solvers in the Time-and Frequency-Domain for the Accurate Modeling of Planar Circuits and MEMS

Luca Pierantoni*, Marco Farina*, Tullio Rozzi*,
Fabio Coccetti**, Wolfgang Dressel** and Peter Russer**
Dipartimento di Elettronica ed Automatica, University of Ancona, Ancona, Italy*
Technische Universität München, Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik, Munich, Germany**

***Abstract* - In this contribution we present an accurate investigation of three different techniques for the modeling of complex planar circuits. The em analysis is performed by means of different electromagnetic full-wave solvers in the time-domain and in the frequency-domain. The first one is the Transmission Line Matrix (TLM) method. In the second one the TLM method is combined with the Integral Equation (IE) method. The latter is based on the Generalized Transverse Resonance Diffraction (GTRD). In order to test the methods we model different structures and compare the calculated S-parameters to measured results, with good agreement.**

I. INTRODUZIONE

L'obiettivo del nostro lavoro è lo sviluppo e l'applicazione di simulatori elettromagnetici (e.m.) basati su metodi "full-wave" per l'analisi e la modellizzazione di strutture complesse 2.5-3D quali, ad esempio antenne, filtri e Sistemi Microelettromeccanici (MEMS).

Queste strutture usualmente sono caratterizzate da numerosi dettagli geometrici, strati dielettrici di spessore rilevante, perdite, metallizzazioni non infinitesime e, nel caso dei MEMS, da oggetti di dimensioni molto diverse tra loro.

In genere è molto difficile analizzare l'intera classe di queste strutture usando un unico metodo. L'uso di metodi semi-analitici con equazioni integrali (IE), risolte spesso con il metodo dei momenti (MoM), è stato in passato limitato a strutture strettamente planari [1].

Uno degli approcci presentati in questo contributo, definito come metodo della Rifrazione e Diffrazione Trasversa Generalizzato ("Generalized Transverse Resonance Diffraction" GTRD), pur rientrando nella categoria IE, è in grado di effettuare l'analisi di strutture 3D.

Al fine di applicare efficientemente il metodo GTRD sono necessarie alcune ipotesi sulla struttura da analizzare, poiché la GTRD richiede il calcolo di una funzione di Green.

In [2] è stata presentata una formulazione 3D del metodo GTRD per strutture multistrato racchiuse in una scatola metallica. Il metodo utilizza in tal caso la funzione diadica di Green di una data scatola metallica con una pila di dielettrici. In recenti lavori abbiamo visto che il metodo GTRD è particolarmente adatto all'analisi di circuiti MMIC e MEMS.

I metodi diretti che richiedono la segmentazione dello spazio, come il metodo della Matrice delle Linee (Transmission Line Matrix, TLM) permettono la modellizzazione del campo elettromagnetico in strutture con geometrie pressoché arbitrarie [3,4].

Un aspetto critico di tali metodi appare quando si devono modellizzare estese regioni omogenee, quale lo spazio al di sopra di una struttura radiante, che aumentano considerevolmente la regione da segmentare, incrementando il numero delle celle elementari.

Ciò conduce, a parità di risorse, ad una riduzione della densità della discretizzazione (mesh).

Il metodo ibrido TLM-IE combina i vantaggi del metodo TLM ed i vantaggi del metodo IE [6].

Uno svantaggio, relativamente secondario, deriva dalla necessità di memorizzare l'evoluzione temporale del campo tangenziale sulle superfici ove il metodo TLM viene interfacciato con il metodo IE: quest'ultima procedura richiede infatti una convoluzione temporale.

Sulla base dei metodi "full-wave" appena descritti sono stati sviluppati tre pacchetti software:

i) Un programma basato sul metodo TLM; esso incorpora un dispositivo di post-processing che consente una visualizzazione animata dei campi, [5].
ii) Un programma basato sul metodo TLM-IE [6].
iii) Un programma commerciale "general-purpose", che include strumenti per il pre- e post-processing, EM3DS, distribuito da MEM Research, basato sul nostro metodo GTRD [2].

Al fine di confrontare l'accuratezza e l'efficienza dei tre metodi di cui sopra, abbiamo modellato numerose strutture. In questo contributo discutiamo tre esempi: una antenna patch, come esempio di struttura radiante, un filtro in microstriscia, come esempio di circuito puramente planare e un interruttore capacitivo MEMS, che è notoriamente una struttura geometricamente e

fisicamente complessa, [7,8]. I parametri di diffusione ottenuti per via teorica sono confrontati con quelli sperimentali dimostrando un ottimo accordo.

II. TEORIA

Nel metodo TLM l'evoluzione temporale e spaziale dei campi elettromagnetici è modellata per mezzo di onde che si propagano in una rete 3D ("mesh") di linee di trasmissione; tali onde vengono diffuse dai "nodi" delle maglie [3,4].

Nel metodo TLM-IE lo spazio 3D viene segmentato in differenti sotto-regioni, in ciascuna delle quali viene adottato il metodo più adatto, sia esso TLM o IE.

Nelle regioni IE il campo elettromagnetico viene rappresentato analiticamente per mezzo della funzione di Green. L'imposizione delle condizioni di continuità per le componenti tangenziali del campo alle interfacce tra le differenti regioni genera equazioni integrali.

Le equazioni di tipo "Electric Field Integral Equation" (EFIE) e "Magnetic Field Integral Equation" (MFIE) vengono risolte con il metodo dei momenti nel dominio del tempo (MoMTD). La soluzione di tali equazioni rappresenta, per ogni istante temporale, l'esatta condizione al contorno per l'algoritmo TLM [6].

Nel metodo GTRD si calcola la funzione diadica di Green di una pila multistrato di dielettrici [2]: tale funzione di Green lega i campi all'interno della pila ad arbitrarie distribuzioni di sorgenti di corrente.

Le correnti, a loro volta, sono definite in volumi che descrivono regioni di conduttore con perdite; imponendo la legge di Ohm che lega correnti e campi, si ottiene un'equazione diretta agli autovalori per i campi stessi. L'ultimo passo è selezionare le appropriate eccitazioni tali da trasformare le equazioni agli autovalori in equazioni deterministiche. Nel nostro caso le eccitazioni sono sorgenti impulsive di campo (delta-gap); la discontinuità della sorgente è stata eliminata tramite una tecnica di calibrazione numerica sviluppata dagli stessi autori.

III. RISULTATI

La Fig.1 mostra l'antenna patch descritta in [7] e il confronto relativo all'S11 ottenuto con i differenti metodi presentati ed i valori sperimentali riportati in [7].

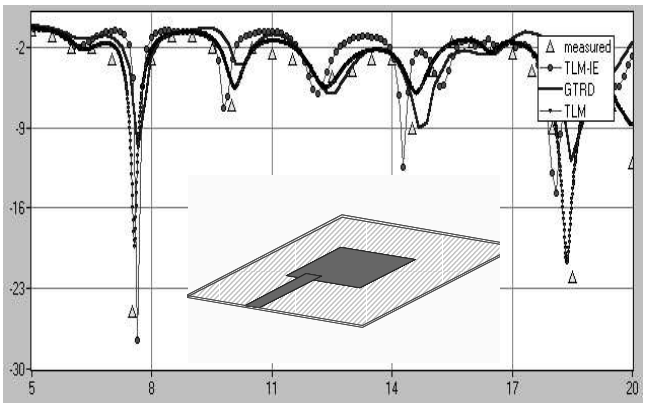

Fig. 1: Antenna a microstriscia in [7].
Return Loss (dB) in funzione della frequenza in [GHz].

La Fig.2 mostra il filtro a microstriscia riportato in [7], mentre la Fig.3 riporta il confronto relativo al modulo di S_{11}.(in alto) e di S_{11}.(in basso).

I tre metodi mostrano elevata accuratezza e concordanza con i risultati sperimentali. Le simulazioni TLM-IE e GTRD sono state effettuate con un PC a 500 MHz con 512 Mb-RAM, mentre per TLM si è usato un HP-9000 C360.

La simulazione TLM-IE ha richiesto circa 15 minuti per ogni struttura.

Per il filtro a microstriscia, ad esempio, è stato utilizzato un Symmetrical Condensed Node (SCN) ottenendo una griglia di 120 x 120 x 12 celle, con una segmentazione omogenea (Δl=0.25 mm). GTRD ha richiesto pochi minuti per la patch antenna, utilizzando solo 195 funzioni espansione, e solo qualche secondo per il filtro (127 funzioni di espansione). La simulazione TLM ha richiesto 50 minuti sulla workstation C360 per l'antenna patch con discretizzazione $100 \times 165 \times 53$ celle.

E' opportuno notare che il metodo GTRD è nel dominio della frequenza, per cui il tempo di simulazione dipende dal numero di punti richiesti in frequenza, mentre TLM e TLM-IE ottengono la risposta in frequenza come dopo trasformata di Fourier (FFT) delle grandezze nel tempo. Questo implica un vantaggio nelle simulazioni a larga banda.

Si deve anche menzionare il fatto che TLM e TLM-IE hanno il loro punto di forza nella capacità di modellare strutture 3D di forma pressoché arbitraria. .

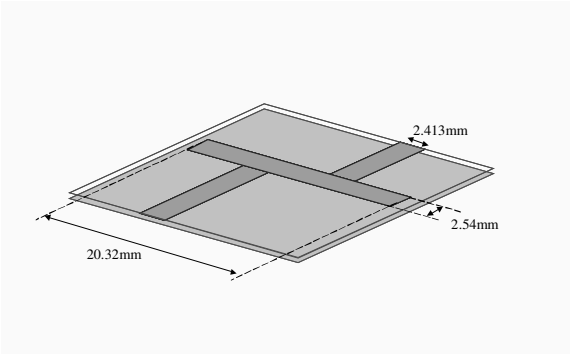

Fig. 2: Il filtro in microstriscia riportato in [7].

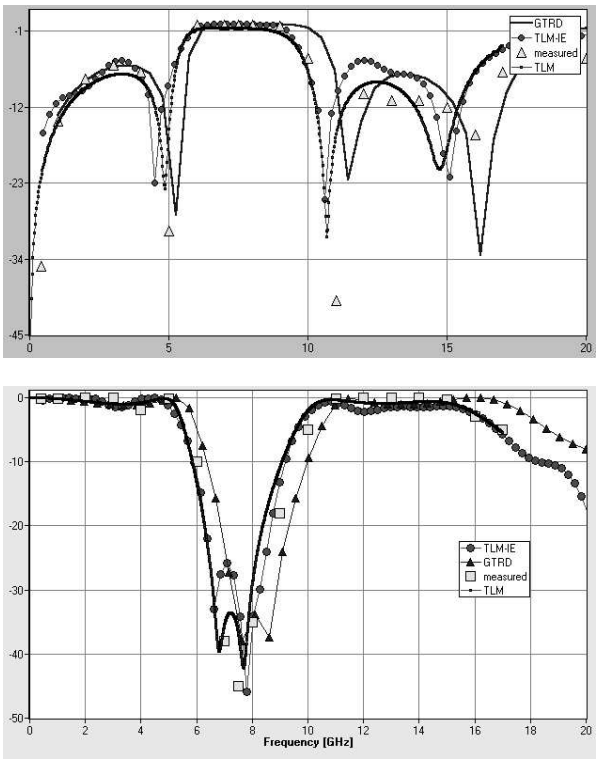

Fig.3: Modulo di S_{11} (in alto) e di S_{21} (in basso per la struttura di Fig.2.

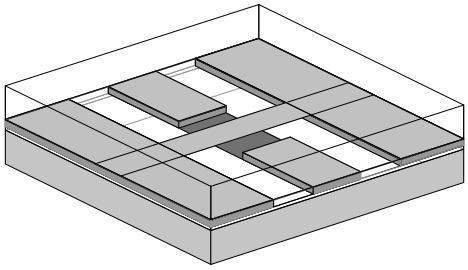

Fig.4:Il MEMS-switch riportatod in [8,9].

La Fig.4 mostra l'interruttore MEMS riportato in [8,9].
La Fig.5 mostra un confronto tra i risultati ricavati da TLM, TLM-IE, GTRD e i risultati sperimentali per lo stato "on". In Fig.6 troviamo lo stesso confronto per lo stato "off". In entrambi casi la simulazione GTRD ha richiesto circa 2 ore di tempo-CPU; la simulazione TLM-IE ha richiesto circa 2 ore di tempo-CPU. Sebbene questa struttura si sia rivelata particolarmente complessa per la GTRD (i tempi di calcolo per altri MEMS variano dalla diecina di minuti al paio di ore), vale il criterio generale per cui la GTRD diviene via via meno efficiente al crescere del numero dei conduttori.
E' da notare che usando il metodo TLM-IE sia la regione del substrato in silicio sia la regione di spazio libero vengono modellate tramite una appropriata funzione di Green; questo riduce drasticamente il dominio spaziale-3D per l'algoritmo TLM.

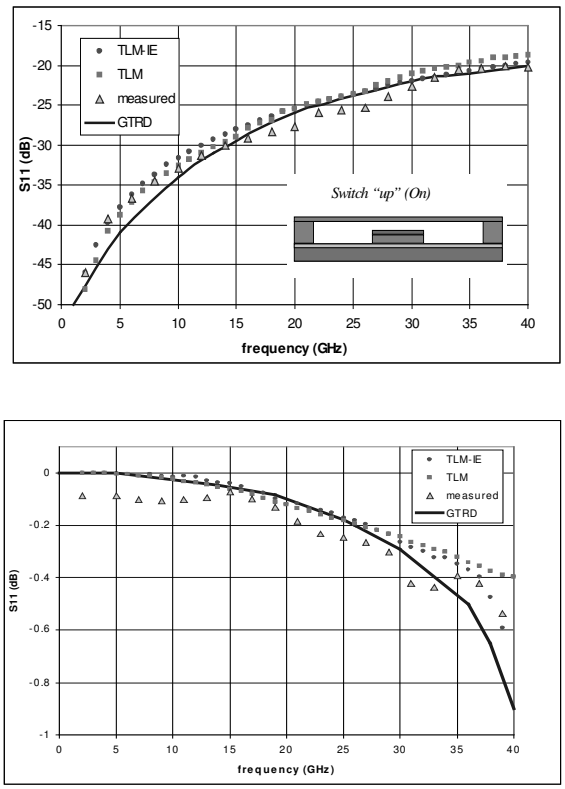

Fig. 5. Stato "on". Modulo di S_{11} (in alto) e S_{21} (in basso) in funzone della frequenza (GHz).

Il confronto tra i risultati ottenuti con i metodi TLM, TLM-IE e GTRD da un lato e i dati sperimentali dall'altro mostra un ottimo accordo in tutti i casi.

Piccole differenze nell'accuratezza sono principalmente dovute alla selezione dei parametri in fase di pre-processing (dimensioni del mesh, numero di istanti temporali per TLM/TLM-IE, numero delle funzioni di espansione per GTRD).

Il metodo TLM-IE, grazie alla sua natura ibrida, sembra offrire un buon compromesso tra flessibilità, accuratezza e tempo di calcolo.

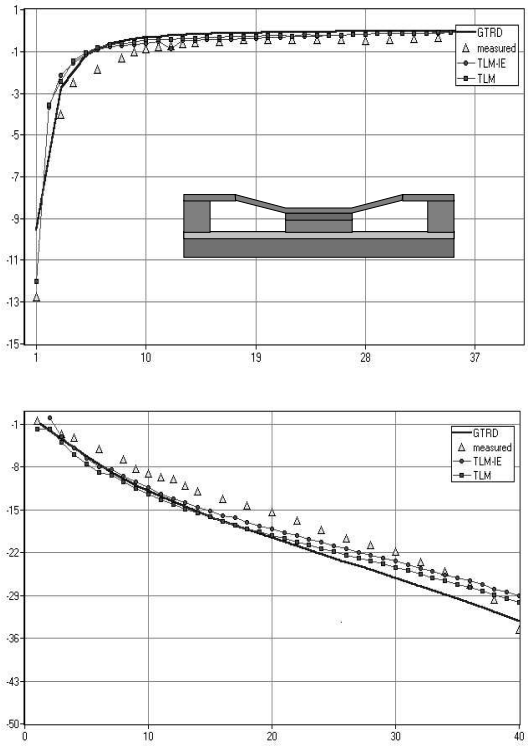

Fig.6. Stato "off". Modulo di S_{11} (in alto) e S_{21} (in basso) in funzone della frequenza (GHz).

IV. CONCLUSIONI

In questo contributo abbiamo illustrato le prestazioni dei tre metodi "full-wave", TLM, TLM-IE e GTRD nel caso di strutture planari e quasi planari.
Il confronto con i risultati sperimentali mostra un ottimo accordo. Il vantaggi del metodo TLM sono accuratezza e flessibilità rispetto a generiche strutture.
Una riduzione del tempo di calcolo fino ad un ordine di grandezza può essere ottenuta, con il puro metodo TLM, usando metodi di identificazione di sistema. [10].

Il metodo TLM-IE combina i vantaggi del metodo TLM con la rappresentazione in forma analitica di regioni omogene: questo conduce alla formulazione di condizioni al contorno esatte e alla conseguente riduzione dello spazio-3D da discretizzare.
Il metodo GTRD ha dimostrato caratteristiche particolarmente attraenti in termini di efficienza e velocità in strutture quasi-planari con substrati dielettrici molto complessi ed un numero contenuto di conduttori: in tali casi la GTRD consente simulazioni vicine al tempo-reale con risorse di calcolo contenute.

BIBLIOGRAFIA

[1] R.F. Harrington, "*Field Computation by Moment Methods*", Krieger, 1982.
[2] M. Farina, T. Rozzi, "A 3-D integral equation-based approach to the analysis of real-life MMICs: application to microelectromechanical systems", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, December 2001.
[3] P.B. Johns, "A symmetrical condensed node for the TLM method", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.35, Apr.1987, pp.370-377.
[4] P. Russer,"The transmission line matrix method*," in Applied Computational Electromagnetics,* NATO ASI Series, pp.243-269. Springer, Berlin, New York, 2000.
[5] T.Mangold, P.Russer, "Full-wave modeling and automatic equivalent-circuit generation of millimeter- wave planar and multilayer structures*", IEEE Trans. Microwave Theory Tech.,* vol.47, pp. 851-858, June 1999.
[6] L. Pierantoni, S. Lindenmeier and P. Russer, "Efficient analysis and modeling of the radiation of microstrip lines and patch antennas by the TLM-integral equation (TLM-IE) method", *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol.12, nr.4, July-Aug.1999, pp.329-340.
[7] D.M. Sheen, S.M. Ali, M.D. Abouzahra and J.A. Kong, "Application of the three-dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of planar microstrip circuits", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 38, no. 7, July 1990, pp. 849-857.
[8] F. Coccetti, L. Vietzorreck, V. Chtchekatourov, P. Russer, "A numerical study of MEMS capacitive switches using TLM", Proc. 16th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, Monterey 2000, pp. 580-586.
[9] K. Strohm, C. Rheinfelder, A. Schurr et al, "SIMMWIC capacitive RF switches", 29th European Microwave Conference, Munich 1999, vol. 2 pp. 411-414.
[10] V. Chtchekatourov, F. Coccetti, P. Russer, "Direct Y-parameters estimation of microwave structures using TLM simulationand Prony's method", Proc. 17th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, Monterey 2001, pp. 461-467.