

Un metodo FDTD parallelo per lo studio dell'esposizione umana al campo vicino di antenne per stazioni radiobase

L. Catarinucci¹, P. Palazzari², L. Tarricone¹

¹ DIEI, Università di Perugia, Via G. Duranti, Perugia

² ENEA – HPCN Project - C.R. Casaccia - S. Maria di Galeria (Roma)

³ DII, Università di Lecce, Via Monteroni, 73100, Lecce

email: tarricone@diei.unipg.it

Abstract

The rigorous solution of the problem of human exposure to EM fields emitted by radiobase antennas requires a heavy computational effort, unless the far-field approximation is adopted. In such a case, it is extremely important to estimate the achieved accuracy.

In this paper we propose a full-wave solution to the addressed problem, based on the implementation of a Finite-Difference Time-Domain method on the Quadrics/APE100 massively parallel system. The code allows an accurate characterization of a large class of antennas for wireless communication systems and a detailed discussion on the limitations of the far-field approximation too, useful both for antenna project reasons and for radio protectionist purposes. It also allows a fullwave solution to the near-field exposure problem, provided that suitable numerical human phantoms are used.

The obtained results show the validity of the parallel approach for the solution of large EM problems, allowing the simulation of complex EM problems, unmanageable through the conventional calculation tools.

I. Introduzione

La stima di possibili rischi per la salute dell'uomo causati dall'esposizione a campi elettromagnetici (EM) assume un'importanza sempre crescente, a causa della continua diffusione di sorgenti EM artificiali. In questo vasto filone di ricerca è importante, fra gli altri, il problema occupazionale, con riferimento in particolar modo all'esposizione in condizione di campo vicino di persone a sorgenti EM artificiali per la telefonia mobile.

In un recente lavoro [1] si pone l'attenzione sulla determinazione della quantità di energia EM indotta all'interno di un fantoccio umano omogeneo. L'approccio proposto è sperimentale ed in letteratura non sono presenti rigorose soluzioni teoriche o numeriche per lo stesso problema. Questo è fondamentalmente dovuto alle elevate richieste di memoria e di risorse di calcolo necessarie per la caratterizzazione rigorosa delle antenne per Stazioni Radio Base (SRB) in condizioni di campo vicino. Infatti, in questo caso, l'approssimazione di onda piana non è valida e pertanto sia il campo elettrico sia quello magnetico devono essere valutati. Inoltre, la definizione rigorosa di soglia per la distanza di campo lontano è essa stessa oggetto di discussione. Considerando come limite inferiore per la zona di campo lontano la classica distanza [2]

$$D_F = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

dove D è la massima dimensione geometrica dell'antenna e λ è la lunghezza d'onda del segnale, si ha spesso a che fare con distanze dell'ordine dei 10-20 metri (considerando un caso tipico di antenne per SRB quale un array di dipoli elettrici). L'elevata dimensione della regione di campo vicino e la necessità di accurati solutori full-wave per una caratterizzazione EM rigorosa, rende elevato l'onere computazionale richiesto. L'utilizzo di architetture di calcolo parallelo sembra essere dunque la via più promettente per risolvere il problema della caratterizzazione della regione di campo vicino in prossimità di una SRB. Inoltre, come appare evidente nell'ampia classe di applicazioni riportate in letteratura, lo sviluppo di queste soluzioni parallele risulta utile in un largo numero di diversi problemi.

In questo lavoro, nella sezione II viene brevemente descritto lo schema di integrazione alle Differenze Finite nel Dominio del Tempo (FD-TD) usato per la soluzione delle equazioni di Maxwell [3-5] e considerato come metodo di riferimento per problemi di interazione uomo-antenna; vengono inoltre forniti nella sezione III dei cenni su una sua implementazione efficiente su un'architettura di calcolo massivamente parallela. I risultati nella sezione IV evidenziano poi come il problema dell'esposizione umana al campo vicino di antenne di grosse dimensioni possa essere trattato in modo rigoroso, dimostrando l'accuratezza e l'efficienza del metodo.

II. Schema di integrazione del metodo alle Differenze Finite nel Dominio del Tempo (FD-TD)

Il metodo alle Differenze Finite nel Dominio del Tempo (FD-TD) [3], grazie soprattutto alla sua versatilità, è uno degli approcci più utilizzati per la soluzione di un'ampia classe di problemi EM. La vasta letteratura disponibile rende superflua ed inutile una trattazione particolareggiata del metodo FD-TD in questo contesto. Risulta tuttavia importante segnalare che, tra i possibili tipi di condizioni di assorbimento (ABC) implementabili [3-5], le condizioni di MUR [6] al secondo ordine sono risultate quelle più bilanciate dal punto di vista del rapporto (costo computazionale/accuratezza). Ad esempio, sebbene l'implementazione delle condizioni Perfect Matched Layer (PML) [7-8] può dar luogo a risultati più accurati, le maggiori risorse di calcolo richieste e la non banalità di una loro implementazione su architetture parallele, ne condiziona l'utilizzo; le ABC di Mur, d'altro canto, garantiscono un'accuratezza adeguata ai problemi trattati in questo lavoro, come verrà dimostrato successivamente.

La stabilità spaziale e temporale del metodo è stata ottenuta applicando le classiche relazioni riportate in [3-5].

III. Implementazione parallela

L'architettura eletta per l'implementazione parallela è una piattaforma di tipo SIMD (Single-Instruction Multiple-Data) della serie Quadrics/APE100 [9-12]. La scelta è legata alle peculiarità che legano le architetture multiprocessore SIMD con il metodo FD-TD: l'esigenza dei microprocessori delle architetture SIMD di eseguire contemporaneamente la stessa operazione su dati diversi, si sposa bene con la possibilità offerta dal metodo FD-TD di aggiornare i campi EM contemporaneamente in ogni punto interno al dominio di simulazione, grazie alla località dei dati necessari alla valutazione.

Viene ora dato uno schema di implementazione parallela dell'algoritmo FD-TD su un'architettura Quadrics/APE100. In un sistema con n processori, l'intero dominio computazionale viene suddiviso in n sotto-domini (uguali in forma e volume); ogni sotto-dominio è assegnato ad un processore e sottodomini adiacenti sono assegnati a processori adiacenti (l'algoritmo e la macchina hanno entrambe topologia 3D).

Le componenti dei campi E ed H vengono aggiornate contemporaneamente in ogni processore; quando viene valutata una componente di confine di un sotto-dominio, è necessario conoscere alcuni valori relativi ai bordi di sottodomini adiacenti: per minimizzare le comunicazioni durante la simulazione, ogni sotto-dominio è "bordato" con le celle di confine dei sottodomini adiacenti. Questi valori di bordo vengono comunicati dopo la fase di aggiornamento.

L'implementazione dell'algoritmo proposto sull'architettura Quadrics/APE100 garantisce speed-ups elevati e contemporaneamente permette di soddisfare grandi fabbisogni di memoria. Questo grazie in particolar modo alla bassa granularità dello schema di integrazione del metodo FDTD, che rende questo algoritmo particolarmente adattabile ad un sistema massivamente parallelo.

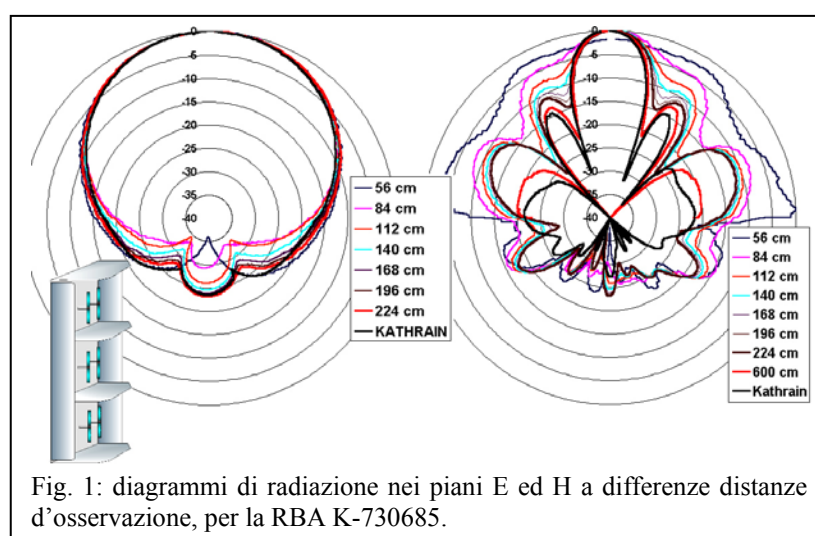


Fig. 1: diagrammi di radiazione nei piani E ed H a differenze distanze d'osservazione, per la RBA K-730685.

Fantocci Numerici

Un ruolo di primo piano nella soluzione accurata del problema dell'esposizione umana al campo emesso da sorgenti EM, è giocato dalla tecnica numerica adottata per descrivere le proprietà elettromagnetiche del soggetto da esporre. In questo lavoro ci si riferisce al fantoccio proposto dal Visible Human Project (VHP) all'Università di Yale. Il fantoccio numerico di Yale è stato ottenuto elaborando i dati ricavati da esami radiologici e di Risonanza Magnetica (MRI) effettuati sul busto e sulla testa di due soggetti maschi viventi. Il fantoccio finale è stato elaborato in modo da essere costituito da $128 \times 128 \times 243$ elementi (voxel) di forma cubica con passo 4mm. Ogni voxel del volume contiene un puntatore che lo associa

al tipo di tessuto che lo rappresenta, e quindi alle sue caratteristiche elettromagnetiche, dipendenti ovviamente dalla frequenza di lavoro. La rappresentazione dell'informazione sull'architettura adottata risulta semplice grazie all'uso delle librerie QAPI.

IV. Risultati

La validazione del codice FDTD parallelo è stata ottenuta simulando il comportamento di diverse RBA realmente utilizzate per la trasmissione GSM 900 MHz. La Fig. 1, ad esempio, è riferita alla simulazione dell'antenna Kathrein (K) 730685, ed i diagrammi di radiazione (ddr) nei due piani E ed H sono confrontati con quelli del costruttore. Si noti come i diagrammi valutati ad una distanza di 6m dal centro fisico dell'antenna siano in ottimo accordo con i dati Kathrein, convalidando l'accuratezza del tool parallelo.

Uso dell'approssimazione di campo lontano

Per stimare l'accuratezza dell'approssimazione di campo lontano a distanza r da una RBA con dimensione massima D , è stato condotto uno studio sistematico su un cospicuo numero di RBA indagando ognuno degli aspetti che influiscono su detta approssimazione. Tutte le antenne simulate sono realizzate da array di dipoli a mezz'onda distanti $\lambda/4$ da un piano riflettente posteriore, e da alette metalliche orizzontali e verticali per il direzionamento del fascio (si veda ad esempio l'antenna raffigurata in Fig. 1). La massima dimensione lineare delle antenne simulate varia da λ ad 8λ ; per ogni diversa D , più configurazioni sono state considerate, variando ad esempio il numero e la posizione dei dipoli. Tutte le simulazioni si riferiscono alla stessa frequenza di lavoro pari a 902.5 MHz, tipica dei sistemi GSM.

Sono stati considerati tutti gli aspetti che contribuiscono alla caratterizzazione dell'approssimazione di campo lontano, curando in particolar modo la descrizione delle componenti radiali del campo EM, il confronto tra impedenza d'onda e impedenza intrinseca, l'esame dell'ampiezza del campo elettrico E rispetto ad r , ed infine l'analisi sulla dipendenza dei ddr dalla distanza di osservazione.

Nella già citata Fig. 1, ad esempio, sono riportati i diagrammi di radiazione per una delle antenne studiate valutati a diverse distanze di osservazione. Si può notare che nel piano H il ddr diviene praticamente indipendente dalla distanza per distanze di osservazione inferiori a 2m, mentre nel piano E la stabilità si raggiunge a 6m di distanza. La stessa analisi è stata condotta per tutte le antenne simulate.

In Fig. 2, invece, viene mostrato uno dei risultati ottenuti riferiti all'analisi dell'impedenza d'onda. L'impedenza d'onda lungo la direzione di massimo guadagno, valutata utilizzando la classica relazione $Z_w = E/H$, è stata confrontata con l'impedenza intrinseca del vuoto $Z_0 = 377\Omega$. Il grafico è riferito ad 8 diverse RBA le cui sigle, corredate dalla relativa dimensione massima D , sono riportate nella stessa Fig. 2. Si osservi che Z_w e Z_0 sono comparabili a partire da una distanza

minima che varia nel range $\left[\frac{D^2}{\lambda} \div \frac{5 D^2}{2 \lambda} \right]$ in funzione dell'antenna esaminata

Quelli presentati sono solo una parte dei numerosi test eseguiti allo scopo di caratterizzare l'accuratezza dell'approssimazione di campo lontano in funzione della distanza; per brevità ci si limiterà a fornire di seguito quelli che sono stati i risultati più interessanti dedotti dagli studi eseguiti:

- L'andamento dei rapporti E_r/E e H_r/H valutati lungo la direzione di massimo guadagno, utili per valutare il soddisfacimento dell'approssimazione di onda TEM, ha mostrato che per distanze d'osservazione inferiori a D^2/λ rispetto al centro elettrico delle antenne, le ampiezze delle componenti radiali dei campi E ed H sono due ordini di grandezza inferiori al loro modulo.

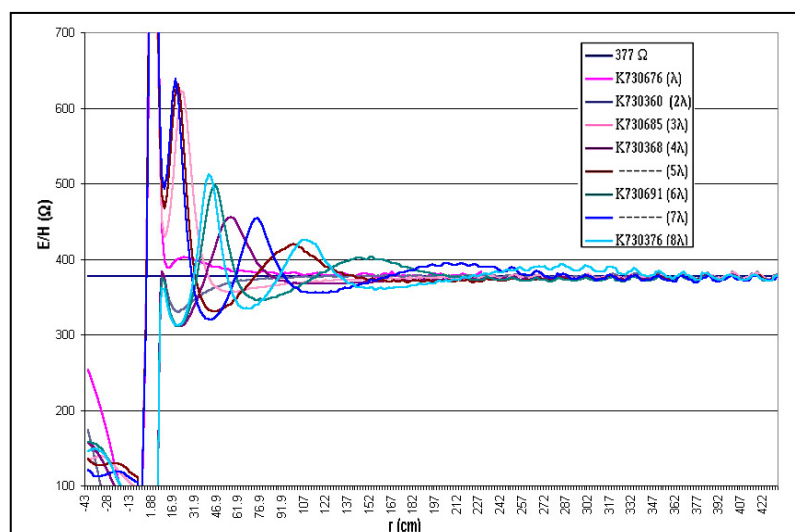


Fig. 2: Andamento dell'impedenza d'onda lungo la direzione di massimo guadagno per 8 diverse RBA.

- La dipendenza inversa di E da r può essere osservata per distanze sino a $6D^2/\lambda$;
- L'equivalenza tra impedenza d'onda ed impedenza del mezzo è raggiunta generalmente per distanze inferiori a $2.5D^2/\lambda$
- La stabilità dei ddr con la distanza è fortemente variabile in funzione, ad esempio, del piano considerato (E o H).

Esposizione umana al campo vicino di una RBA

Viene riportato di seguito un risultato relativo all'esposizione del fantoccio numerico del VHP al campo vicino di un'antenna per stazioni radio-base GSM, la K-730678. Per brevità, viene omessa la presentazione di altri risultati, che verranno discussi nella presentazione orale. Come mostrato in Fig. 3, i valori dei campi E ed H , così come i parametri

dosimetrici principali (ad esempio il SAR), possono essere valutati puntualmente con risoluzione su scala millimetrica. In figura, vengono riportati sia i valori di SAR massimo, sia quelli mediati su due diverse zone del fantoccio (rispettivamente la testa ed il tronco); le simulazioni sono state effettuate considerando una potenza radiata pari a 32W; nel caso specifico della Fig. 3, la distanza tra antenna e fantoccio è di 30cm. I valori ottenuti possono essere comparati con i limiti di sicurezza ricavati dagli standard ICNIRP per i lavoratori:

- 1) SAR mediato sull'intero corpo: 0.4 W/Kg;
- 2) SAR mediato su 10g di tessuto in ogni punto della testa e del tronco: 10 W/Kg;
- 3) SAR mediato su 10g di tessuto in ogni punto degli arti: 20 W/Kg.

Come evidente dalla figura, in questa situazione espositiva i limiti ICNIRP riferiti ai valori di SAR medi non vengono superati; tuttavia i valori locali di SAR non sono trascurabili, rendendo necessaria una discussione più dettagliata.

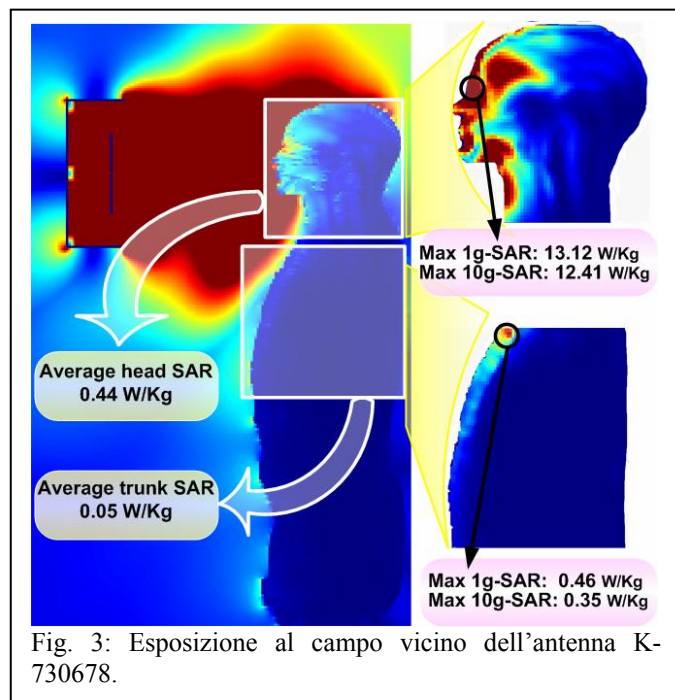


Fig. 3: Esposizione al campo vicino dell'antenna K-730678.

V. Conclusioni

Il problema dell'esposizione umana al campo emesso dalle sorgenti EM è un tema di notevole interesse. In alcuni casi, però, l'utilizzo dell'approssimazione di campo lontano per la sua soluzione, può generare risultati non adeguatamente accurati, soprattutto se osservati da un punto di vista radioprotezionistico.

In questo lavoro è stata presentata un'implementazione parallela del classico metodo alle Differenze Finite nel Dominio del Tempo; il tool parallelo è stato utilizzato per discutere l'impatto dell'approssimazione di campo lontano rispetto ad una eventuale analisi full-wave, e per risolvere l'importante problema dell'interazione tra un lavoratore ed un'antenna per Stazione Radio Base, dimostrando che l'implementazione parallela di un codice FD-TD su architetture di supercalcolo, rappresenta un approccio vincente per affrontare l'analisi EM in domini di simulazione piuttosto ampi.

Bibliografia

- 1 A. Bahr, D. Manteuffel, D. Heberling: 'Occupational safety in the near field of a GSM base station', Proc. of AP2000, Davos, April 2000, 3A6.7.
- 2 J.D. Kraus: 'Antennas'. Mc Graw Hill - 1988
- 3 K. S. Yee: 'Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media', IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-14, 4, pp. 302-307, 1996.
- 4 A. Taflove and M.E. Brodwin: 'Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations', IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-23, 8, pp. 623-630, 1975.
- 5 A. Taflove: 'Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method', Norwood, MA, Artech House, 1995
- 6 G. Mur: 'Absorbing boundary conditions for the Finite-Difference approximation of the Time-Domain Electromagnetic-Field equations', IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-23, 4, pp. 377-382, 1981.
- 7 J.-P. Berenger, 'A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves', *J. Computational Physics*, vol. 114, 1994.
- 8 J.-P. Berenger, 'A perfectly matched layer for the FDTD solution of wave-structure interaction problems', *IEEE Antennas Propag. Symp.*, vol. 44, n.1, 1996.
- 9 Bartoloni, A. et al: 'A hardware implementation of the APE100 architecture'. International Journal of Modern Physics, C4, 1993
- 10 P. Palazzari et al.: 'Heterogeneity as key feature for High Performance Computing: the PQE1 prototype'. Proceedings of the Heterogeneous Computing Workshop (IEEE ed.), May 1st, 2000, Cancun, Mexico.
- 11 APE: The Italian SIMD supercomputer in the teraflop range. URL <http://chimera.roma1.infn.it/apc.html>
- 12 C. Battista et al.: 'The APE100 Computer: (I) the Architecture'. Int. Journal of High Speed Computing n. 5 1993