

Tematica: Applicazioni Biologiche e Mediche (2.)

Titolo: Valutazione del Campo Elettromagnetico Indotto in Strutture Biologiche
Esposte mediante un Approccio ai Valori al Contorno

Autori: E. Bermani, S. Caorsi e A. Massa

Corresponding Author:

Prof. Salvatore Caorsi
Dipartimento di Elettronica, Università di Pavia
Via Ferrata 1, I-27100, Pavia
Tel. +39 0382 505661
Fax. +39 0382 422583
E-mail: s.caorsi@ele.unipv.it

Valutazione del Campo Elettromagnetico Indotto in Strutture Biologiche Esposte mediante un Approccio ai Valori al Contorno

E. Bermani¹, S. Caorsi¹ e A. Massa²

¹ Dipartimento di Elettronica, Università di Pavia
via Ferrata 1, I-27100, Pavia
e.bermani@ele.unipv.it, s.caorsi@ele.unipv.it

² Dipartimento di Informatica e Telecomunicazioni, Università di Trento,
via Sommarive 14, I-38050, Trento
andrea.massa@ing.unitn.it

Abstract

In this paper, a boundary value approach for the estimation of the electric field distribution in exposed biological structures is presented. Starting from the measurement of the electric field around the biological body and solving a suitably defined boundary value problem, the prediction of the electric field is obtained without requiring a numerical description of the electromagnetic source. As a consequence, the proposed method turns out to be suitable to address those situations where the illuminating source is unknown or when its numerical model is not available. In order to show the effectiveness and robustness of the proposed approach, selected numerical results concerning a two-dimensional geometry are provided.

1. Introduzione

Negli ultimi anni, la crescente diffusione di apparecchi per telefonia mobile e comunicazioni wireless e, con essa, il crescente timore da parte dell'opinione pubblica per possibili danni alla salute causati dall'esposizione a campi elettromagnetici, ha sollecitato, in ambito scientifico, lo studio di adeguate metodologie per la valutazione del campo elettromagnetico indotto in strutture biologiche esposte. Sia soluzioni analitiche [1] che tecniche numeriche (vedasi, ad esempio, [2]-[5]) sono state proposte. Tali tecniche consentono una accurata predizione della distribuzione del campo elettromagnetico indotto qualora sia disponibile un modello numerico accurato della sorgente.

Tuttavia, una modellizzazione della sorgente non sempre è possibile (si pensi, ad esempio, al caso in cui la sorgente o la sua posizione non siano note con esattezza) o facilmente ottenibile.

Al fine di affrontare tali situazioni, è stato recentemente proposto dagli autori [6][7] un approccio inverso, basato su una tecnica di *imaging* a microonde. La distribuzione del campo elettromagnetico, all'interno della struttura biologica esposta, è ottenuta a partire dalle sole misure del campo scatterato, acquisite attorno alla struttura biologica, e del campo incidente. Nessuna modellizzazione della sorgente è pertanto richiesta e la

valutazione del campo elettrico indotto è ottenuta attraverso la minimizzazione di un opportuno funzionale di costo.

In questo lavoro, viene presentato un approccio alternativo al precedente, basato su una tecnica “diretta”. Tale metodologia consente di valutare il campo elettromagnetico indotto in una struttura biologica senza richiedere una modellizzazione della sorgente elettromagnetica, riformulando il problema iniziale in termini di un problema ai valori al contorno. Le misure del campo elettrico, acquisite attorno alla struttura durante l'esposizione, rappresentano (anche secondo questo approccio) gli unici dati del problema.

Nel proseguo, il contributo risulta così strutturato: nella Sezione 2, il problema della predizione elettromagnetica viene riformulato come un problema ai valori al contorno. Alcuni risultati scelti sono quindi riportati nella Sezione 3 a dimostrazione della efficacia e robustezza del metodo proposto. Seguono infine alcune considerazioni conclusive.

2. Formulazione Matematica

Si consideri una struttura biologica caratterizzata da una permittività dielettrica $\epsilon_b(\mathbf{r})$ e da una conducibilità elettrica $\sigma_b(\mathbf{r})$, posta in un mezzo di proprietà dielettriche $\epsilon_d(\mathbf{r})$ e $\sigma_d(\mathbf{r})$ ed esposta ad una sorgente elettromagnetica operante alla frequenza f_0 .

A partire dalla conoscenza della componente tangenziale del campo elettrico su una superficie chiusa S posta intorno alla struttura biologica, il problema della valutazione del campo elettromagnetico indotto può essere riformulato in termini di un problema ai valori al contorno. In particolare, indicata con Ω (dominio d'indagine) la regione orlata da S ed assunto che la sorgente elettromagnetica sia esterna a tale regione, il problema può essere descritto mediante il seguente set di equazioni

$$\begin{cases} \nabla \times \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) - \omega_0^2 \epsilon(\mathbf{r}) \mu_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 & \text{in } \Omega \\ \mathbf{n} \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathfrak{I}(\mathbf{r}) & \text{su } S \end{cases} \quad (1)$$

dove \mathbf{n} indica la normale uscente da S ; $\epsilon(\mathbf{r})$ è la permittività dielettrica complessa in Ω ; μ_0 è la permeabilità magnetica del vuoto; $\omega_0 = 2\pi f_0$ è la frequenza angolare ed $\mathfrak{I}(\mathbf{r})$ è una funzione vettoriale nota definita sulla superficie S .

Il problema ai valori al contorno (1) viene risolto numericamente impiegando il Metodo degli Elementi Finiti. Considerando una procedura di Galerkin standard [8] e rappresentando il campo elettrico $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ come combinazione lineare degli elementi della base ($\mathbf{v}_i(\mathbf{r})$, $i=1, \dots, m$), a partire da (1) si ottiene il seguente sistema di equazioni

$$\sum_{i=1}^m \int_{\Omega} E_i \left[\nabla \times \mathbf{v}_i(\mathbf{r}) \cdot \nabla \times \mathbf{w}_j(\mathbf{r}) - \omega_0^2 \epsilon(\mathbf{r}) \mu_0 \mathbf{v}_i(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{w}_j(\mathbf{r}) \right] d\Omega = 0 \quad (2)$$

$\forall \mathbf{w}_j(\mathbf{r})$, $j=1, \dots, n$, in cui $\mathbf{w}_j(\mathbf{r})$ indica la generica funzione di test.

In forma matriciale, la (2) può essere riscritta come

$$\left[\mathbf{S}_{jf} - \omega_0^2 \mathbf{T}_{jf} \right] \bar{\mathbf{E}}_f = - \left[\mathbf{S}_{jp} - \omega_0^2 \mathbf{T}_{jp} \right] \bar{\mathbf{E}}_p \quad (3)$$

in cui $\bar{\mathbf{E}}_f$ e $\bar{\mathbf{E}}_p$ indicano, rispettivamente, il vettore delle incognite e quello dei dati del problema mentre $S_{j,i}$ e $T_{j,i}$ hanno la seguente espressione

$$S_{j,i} = \int_{\Omega} \nabla \times \mathbf{v}_i(\mathbf{r}) \cdot \nabla \times \mathbf{w}_j(\mathbf{r}) d\Omega \quad \text{e} \quad T_{j,i} = \int_{\Omega} \epsilon(\mathbf{r}) \mu_o \mathbf{v}_i(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{w}_j(\mathbf{r}) d\Omega.$$

Il sistema (3) è quindi risolto mediante una tecnica ai gradienti coniugati [8].

3. Risultati Numerici

L'efficacia dell'approccio proposto è valutata nel caso di una geometria bidimensionale. Quale struttura biologica si considera una versione discretizzata di una sezione orizzontale di una testa umana. Il dominio d'indagine, di forma quadrata e di lato $l_{\Omega} = 0.648\lambda_o$ (essendo λ_o la lunghezza d'onda nel vuoto), è discretizzato in modo uniforme considerando elementi triangolari di lato $l_{\text{elem}} = 0.018\lambda_o$. La componente tangenziale del campo elettrico viene valutata in 18 punti di misura equispaziati, coincidenti con altrettanti nodi su S . I dati di misura in tali punti sono ottenuti sinteticamente considerando quale sorgente di illuminazione una linea di corrente elettrica posta alla sinistra della struttura biologica ad una distanza $d = 0.126\lambda_o$ dalla struttura stessa.

Al fine di assegnare una opportuna condizione al contorno anche nei nodi su S non coincidenti con i punti di misura, i corrispondenti valori della componente tangenziale del campo elettrico sono stati ottenuti mediante una interpolazione dei dati di misura.

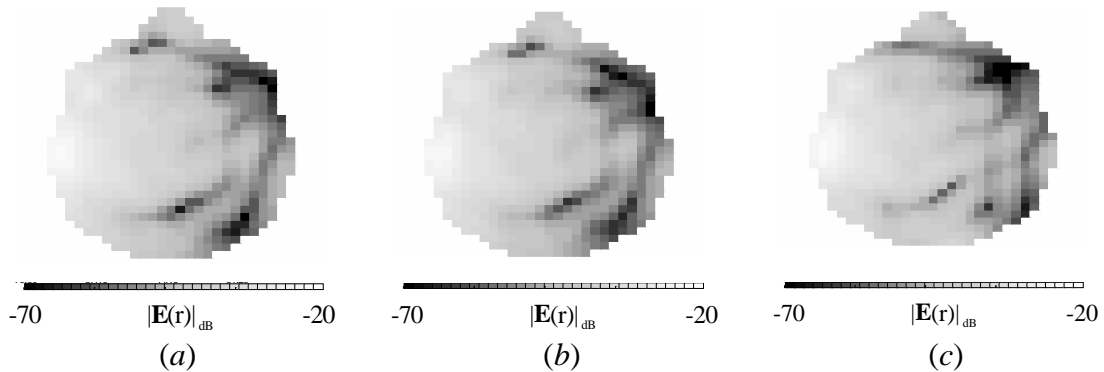


Fig. 1 Campo elettrico all'interno della struttura biologica. (a) Distribuzione di riferimento; campo elettrico ricostruito (b) in assenza di rumore e (c) nel caso di misure caratterizzate da un rapporto segnale rumore pari a 10dB.

Nelle Figure 1(a) ed 1 (b) sono riportate, rispettivamente, la distribuzione di riferimento dell'ampiezza del campo elettrico all'interno della struttura biologica e quella ricostruita (considerando dati di misura non errorati) utilizzando l'approccio proposto. Le due distribuzioni risultano pressoché indistinguibili. In particolare, si possono osservare una corretta localizzazione del picco di ampiezza e una buona stima del suo valore sovrastimato di circa -26dB.

L'approccio proposto si mostra altresì robusto al rumore sperimentale. In Figura 1(c) è mostrata la ricostruzione della distribuzione di ampiezza del campo elettrico nel caso di misure affette da un rumore gaussiano bianco, caratterizzato da un rapporto segnale rumore pari a 10dB. Anche in questo caso, la distribuzione del campo elettrico è

ricostruita in maniera soddisfacente. Il picco di ampiezza è correttamente localizzato e l'errore, nella stima del suo valore, quantificabile in circa -18.7dB.

4. Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato un approccio ai valori al contorno per la valutazione del campo elettromagnetico indotto in strutture biologiche esposte. Dalla sola conoscenza della componente tangenziale del campo elettrico in punti di misura posti attorno alla struttura biologica, senza richiedere alcuna modellizzazione della sorgente elettromagnetica, il metodo proposto consente di stimare la distribuzione del campo elettromagnetico indotto risolvendo un problema ai valori al contorno. Tale caratteristica rende l'approccio particolarmente adatto a trattare i casi applicativi in cui la sorgente di illuminazione sia non nota o non ne sia disponibile un modello numerico accurato.

Al fine di validare l'approccio ai valori al contorno mostrandone altresì l'accuratezza e la robustezza, alcuni risultati scelti, tra le numerose simulazioni numeriche effettuate, sono stati presentati ed illustrati in dettaglio.

Riferimenti Bibliografici

- [1] X. K. Kang, L. W. Li, M. S. Leong and P. S. Kooi, "Specific absorption rate distributions in a multilayered spheroidal human head model exposed to mobile dipoles," *Radio Science*, vol. 35, pp. 247-256, 2000.
- [2] L. Martens, J. DeMoerloose and D. De Zutter, "Calculation of the electromagnetic fields induced in the head of an operator of a cordless telephone," *Radio Science*, vol. 30, pp. 283-290, 1995.
- [3] O. P. Gandhi, G. Lazzi and C. M. Furse, "Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 44, pp. 1884- 1897, 1996.
- [4] M. Okoniewski and M. A. Stuchly, "Modeling of interaction of electromagnetic field from a cellular telephone with hearing aids," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 46, pp. 1686-1693, 1998.
- [5] M. A. Mangoud, R. A. Abd-Alhameed and P. S. Excell, "Simulation of human interaction with mobile telephones using hybrid techniques over coupled domains," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 48, pp. 2014-2021, 2000.
- [6] S. Caorsi and A. Massa, "Electromagnetic field prediction inside biological bodies by using an inverse scattering procedure based on a statistical cooling algorithm," *Bioelectromagnetics*, vol. 21, p. 422-431, 2000.
- [7] S. Caorsi, E. Bermani and A. Massa, "A microwave imaging approach based on amplitude-only data for the reconstruction of the electromagnetic field induced in biological phantoms," *ACES Journal*, Special Issue on Bioelectromagnetics, vol. 16, pp. 79-89, 2001.
- [8] J. Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*. John Wiley & Sons, New York, 1993.