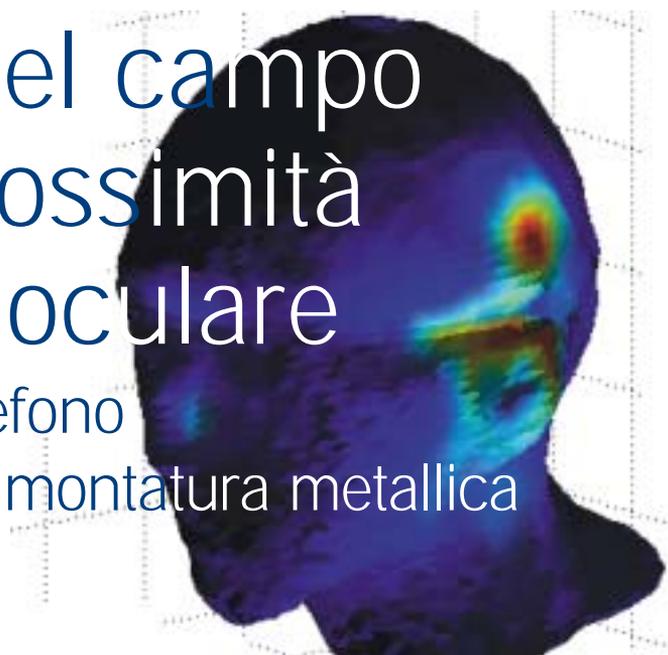


Incremento del campo elettrico in prossimità della regione oculare

Accoppiamento tra telefono cellulare e occhiali con montatura metallica



Gaetano Bellanca, Gianluca Caniato, Antonello Giovannelli, Piero Olivo
 LUCE (Laboratorio Universitario Compatibilità Elettromagnetica)
 Università di Ferrara - via Saragat 1 – 44100 Ferrara

Nel corso degli ultimi anni, con il considerevole sviluppo della telefonia mobile, le preoccupazioni sui possibili effetti biologici causati dai campi elettromagnetici (e.m.) ad alta frequenza e connessi all'impiego di tali apparati sono aumentate notevolmente

L'interesse della popolazione, così come degli studiosi operanti nei settori biomedico ed epidemiologico, si è indirizzato verso la ricerca di una correlazione fra i campi e.m. prodotti da apparati per telefonia mobile e l'insorgere di fenomeni neoplastici. Nonostante numerosi e qualificati studi epidemiologici e sperimentali, effettuati anche sotto l'egida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, non abbiano messo in evidenza aumenti di incidenza di malattie neoplastiche attribuibili ai campi elettrici connessi all'uso dei telefoni cellulari, l'attenzione da parte del mondo scientifico verso queste problematiche rimane alta, dal momento che non sono ancora documentati risultati sugli effetti a lungo termine.

Nel tenere conto dell'impatto della telefonia cellulare sull'uomo va però riscontrato come l'attenzione da parte della popolazione si sia rivolta principalmente verso le Stazioni Radio Base (SRB), con le quali i terminali mobili devono essere

connessi per poter operare correttamente. Le motivazioni principali della preoccupazione suscitata dalle SRB risiedono probabilmente negli effetti psicologici legati all'impatto visivo di queste grandi strutture e trascurano un principio basilare nella valutazione scientifica delle relazioni di causa-effetto: i valori delle grandezze in gioco. Infatti nell'interazione fra onde e.m. e corpo umano, oltre alla frequenza (dalla quale dipendono essenzialmente le caratteristiche di assorbimento dell'energia da parte del materiale), risulta di fondamentale importanza il valore effettivo del campo e.m. incidente, indipendentemente dalla sorgente che l'ha generato. Partendo da questa considerazione di base si può dedurre come, per quanto riguarda la telefonia mobile, la sorgente di campo e.m. più significativa sia il telefono cellulare, in grado di generare campi elettrici in prossimità della testa dell'utilizzatore aventi intensità dell'ordine delle decine di

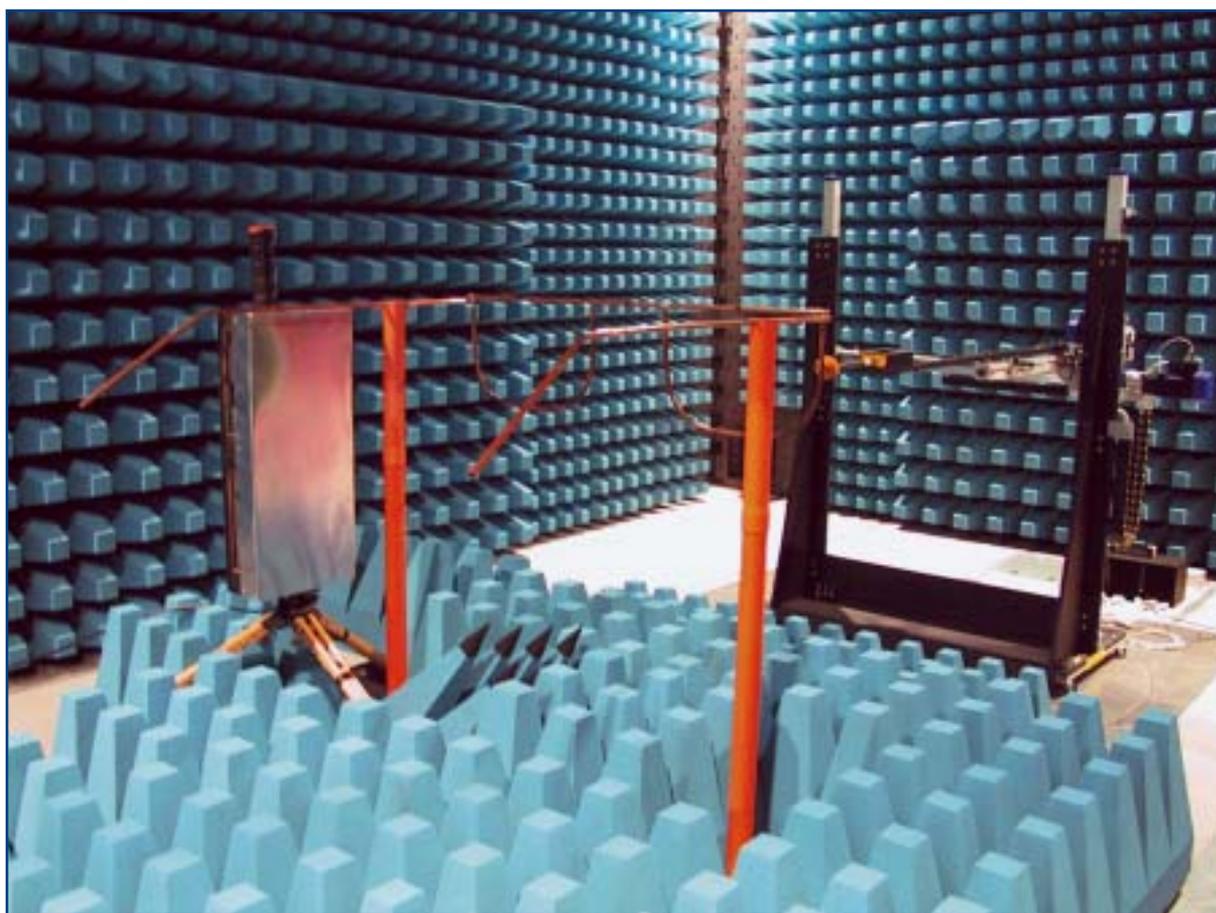


Figura 1
Set-up utilizzato per la misura sperimentale del campo elettrico in prossimità dei cerchi di montature metalliche.

V/m, ben superiori quindi ai valori imputabili alle SRB o ad antenne per la diffusione di segnali radio-televisivi.

Entrambe queste sorgenti infatti, pur ospitando trasmettitori ben più potenti (un ordine di grandezza per le SRB, diversi ordini di grandezza per gli apparati radio e TV), grazie al fatto di operare ad una distanza significativamente più elevata rispetto a quella a cui viene trovarsi un terminale di telefonia mobile, espongono la popolazione a campi e.m. di livello molto basso. Una se-

conda considerazione importante riguarda gli effetti biologici imputabili ai campi e.m. ad alta frequenza. Come già accennato, la maggioranza degli studi scientifici è rivolta ai possibili effetti neoplastici, mettendo in secondo piano altri effetti, peraltro già ampiamente studiati e documentati. Tra questi, uno dei principali riguarda gli effetti termici indotti dai campi e.m.1: è noto come il corpo umano sia capace di regolare la propria temperatura mediante un meccanismo di termoregolazione che fa uso del sangue come veicolo per lo smaltimento del calore. Tramite un'azione di vasodilatazione o vasocostrizione, che modifica opportunamente la portata sanguigna, viene assicurato il mantenimento della temperatura ideale indipendentemente, almeno entro certi limiti, dalla temperatura esterna. Non

tutti gli organi, però, sono abbondantemente irrorati dal sangue e possono contare sull'efficacia di tale meccanismo; in particolari situazioni di esposizione ai campi e.m. l'innalzamento della temperatura, dovuta alla dissipazione dell'energia del campo all'interno del tessuto, non può essere compensata, con possibili conseguenze dannose a carico dell'organo stesso. In generale, l'innalzamento rilevante di temperatura di un organo non vascolarizzato si ha dopo circa 6 minuti di esposizione continua ad un campo sufficientemente intenso (si ritiene che 1 grado di incremento sia la soglia di attenzione), ed è per questo che i valori di campo compatibili con la salute umana devono essere valutati strumentalmente per escludere il superamento di un certo valore limite (es. 6 V/m in Italia in caso di

esposizione prolungate oltre le quattro ore) in qualsiasi intervallo di sei minuti.

Tra i principali organi che potrebbero subire danni a causa dell'incremento di temperatura in caso di esposizione a campi e.m. ad alta frequenza di forte intensità può essere annoverato l'occhio, ed in particolar modo il cristallino: tale organo, infatti, essendo scarsamente vascolarizzato, non può beneficiare della termoregolazione e potrebbe subire, a lungo termine, danni irreversibili (opacizzazione, cataratta).

Questi effetti sono stati lungamente studiati negli ultimi decenni e conseguenti misure precauzionali sono state sviluppate a protezione dei lavoratori esposti a forti campi e.m., come per esempio i tecnici addetti alla manutenzione di antenne per la diffusione di segnali radio-televisivi.

Queste premesse sono necessarie per inquadrare gli studi effettuati presso il LUCE (Laboratorio Universitario di Compatibilità Elettromagnetica) dell'Università di Ferrara. In particolare, la domanda a cui si è voluto rispondere è: durante l'utilizzo di un telefono cellulare, la presenza di oggetti metallici (come montature di occhiali) in prossimità della regione oculare può provocare un aumento dei campi elettrici rispetto a quanto misurabile in loro assenza?

Questo ultimo punto nasce da un principio di base sull'interazione tra campi e.m. ed oggetti metallici: i campi e.m. presenti in corrispondenza di tali oggetti inducono sugli stessi una corrente elettrica alla medesima frequenza del campo incidente ed intensità dipendente dall'intensità del campo esistente attorno all'oggetto e dalle condizioni di accoppiamento tra campo ed oggetto metallico.

Un oggetto metallico percorso da corrente genera, a sua volta, un campo elettrico di riemissione che

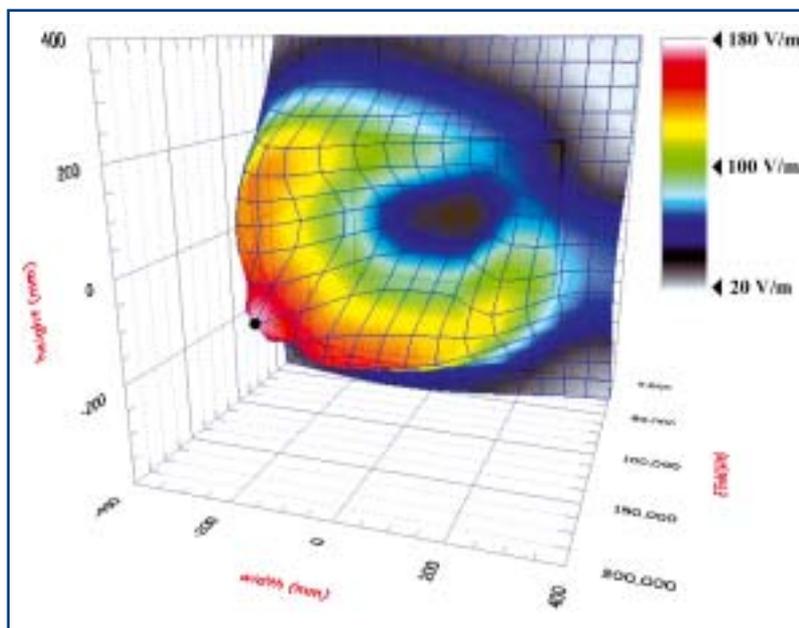


Figura 2
Diagramma di radiazione del campo elettrico in prossimità del cerchio della montatura più lontano rispetto alla posizione del cellulare.

si propaga nello spazio circostante l'oggetto stesso ed interagisce con quello preesistente modificandone, a volte anche significativamente, l'andamento. A causa di questa interazione si può avere, ad esempio, un aumento dell'intensità del campo elettrico rispetto al caso di assenza dell'oggetto stesso. Tale effetto è ben noto per chi effettua misure di campo e.m. e deve realizzare la misura ad una distanza sufficiente da oggetti metallici che possano alterarne il valore.

Nel caso della ricerca svolta presso il LUCE, l'oggetto metallico è costituito dalla montatura metallica di occhiali indossati da una persona, mentre il campo e.m. che si accoppia con la montatura può essere generato da sorgenti "lontane" dal corpo umano, sia dal punto di vista geometrico che dal punto di vista delle caratteristiche del campo, o da sorgenti poste nelle immediate vicinanze dell'oggetto. Alla prima categoria appartengono i campi e.m. generati dai trasmettitori per diffusione radiotelevisiva, SRB, radar per impieghi civili o militari. Alla seconda, invece, appartengono i campi generati da telefoni cellula-

ri, ma anche da accessori a loro correlati quali auricolari bluetooth, da radiotelefoni per uso domestico e da ricetrasmittitori portatili. Diverse sono le motivazioni che hanno focalizzato l'attenzione verso le possibili interazioni tra telefono cellulare ed occhiali con montatura metallica. Innanzitutto la larghissima diffusione di terminali per telefonia cellulare presso la popolazione; in secondo luogo la considerazione che la densità di potenza incidente sull'occhiale generata da un telefono cellulare durante la

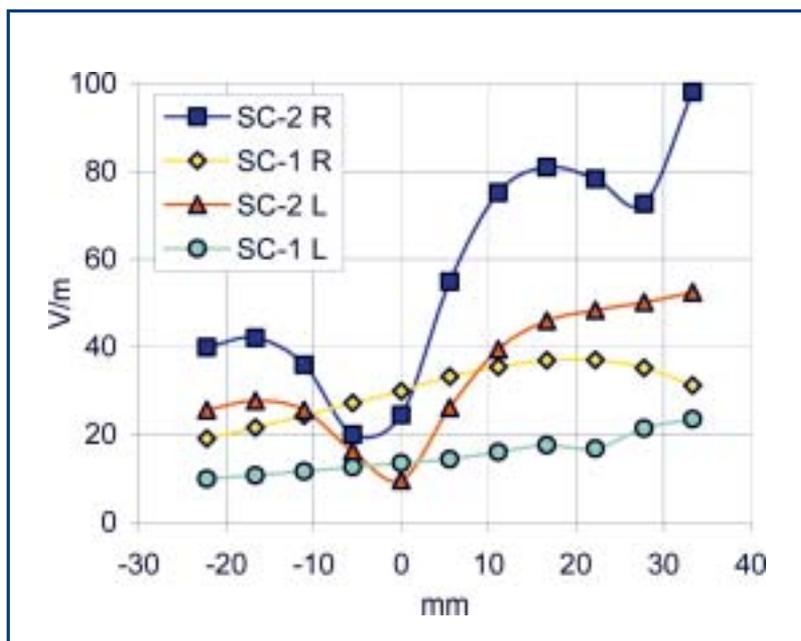


Figura 3
 Campo elettrico misurato sull'asse oculare in funzione della distanza dal piano delle lenti. R e L si riferiscono rispettivamente al cerchio destro e sinistro. Il cellulare è posizionato dalla parte del cerchio destro. I due casi SC-1 e SC-2 si riferiscono rispettivamente alla assenza e presenza di montatura metallica.

conversazione risulta essere decisamente superiore a quella attribuibile a sorgenti in campo lontano (quali, ad esempio, le SRB); il fatto che le modalità di accoppiamento tra antenna del cellulare ed asta metallica della montatura risultano particolarmente efficaci, a causa della correlazione esistente fra la dimensione geometrica di questa e la lunghezza d'onda della radiazione e.m. emessa dal telefono.

Lo studio dell'accoppiamento cellulare-occhiale e della valutazione del campo di riemissione da parte della montatura metallica è stata svolta seguendo tre diverse metodologie di analisi.

La prima ha riguardato la misura dei campi elettrici in prossimità della montatura metallica ed il loro confronto con i valori riscontrabili in assenza di montatura. Tale analisi è stata effettuata senza tenere conto della presenza della testa umana.

La seconda ha riguardato simulazioni numeriche basate sul metodo dei momenti (MOM, da Method Of Moments), che sono servite per verificare la validità delle misure sperimentali.

La terza, infine, ha riguardato si-

mulazioni numeriche basate sulla tecnica delle Differenze Finite nel Dominio del Tempo (FDTD dall'inglese Finite Difference Time Domain), ampiamente utilizzata per la soluzione numerica di problemi elettromagnetici complessi in settori che spaziano dalle microonde all'ottica. Questo metodo, grazie alla formulazione del tutto generale delle equazioni del problema, ha consentito di mettere in conto anche la presenza della testa dell'utilizzatore, cosa non permessa dall'approccio più semplice basato sul MOM, ed ha reso possibile la valutazione dell'effettivo incremento del campo elettrico nella regione oculare in una situazione reale di funzionamento.

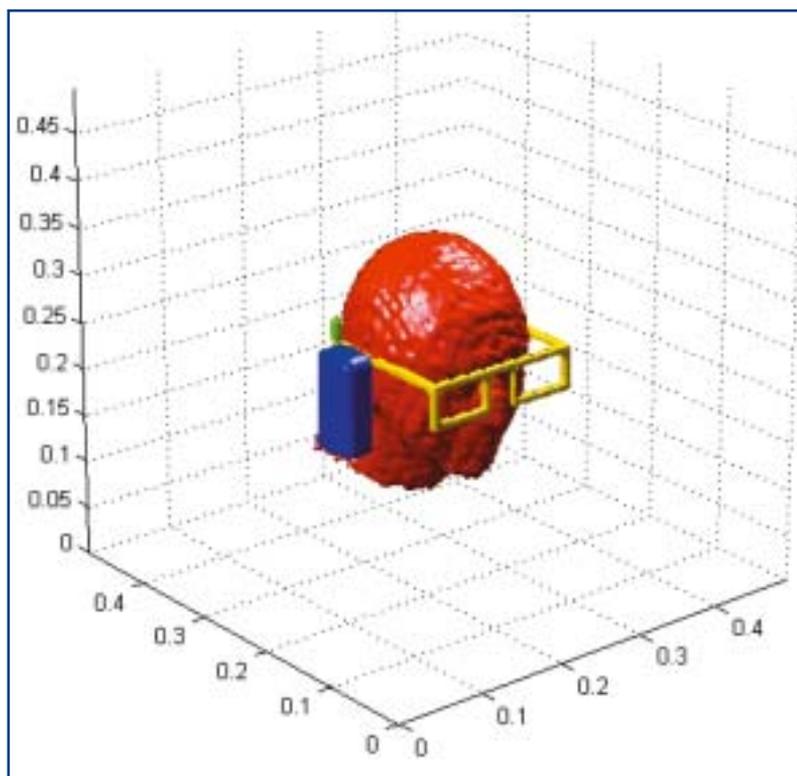
Gli studi sono stati eseguiti tenendo conto di telefoni cellulari GSM (Global System for Mobile communications) a 900 MHz, utilizzando antenne ad elica (particolarmente diffuse per questa tipologia di apparati) e potenza di trasmissione, durante la conversazione (trascurando quindi il picco di potenza emesso al momento di aggancio con la SRB) di 200 mW.

Le misure sperimentali sono state effettuate all'interno della camera anecoica per misure EMC (Electro-Magnetic Compatibility) a 3m fino a 18 GHz recentemente realizzata presso il LUCE. Poiché la componente elettrica del campo è più direttamente correlata agli effetti di riscaldamento del tessuto umano, è stata misurata questa sola componente mediante la sonda Schaffner EMC20 electric-field probe. Dal momento che le dimensioni del sensore utilizzato non avrebbero permesso la risoluzione spaziale richiesta da questo tipo di esperimenti, è stato utilizzato un modello in scala nove volte più grande rispetto all'originale. La frequenza e la potenza emessa dalla sorgente sono state modificate di conseguenza, in modo da garantire la

stessa densità di potenza misurata attorno ai cerchi degli occhiali valutabile nelle dimensioni reali. Il segnale è stato generato utilizzando un generatore R&S SML 03RF a 100 MHz, con una potenza di 16.2W (81 x 200 mW). Anche il telefono cellulare è stato riprodotto in scala e dotato di un'antenna perfettamente funzionante a 100 MHz. Per evitare che la misura del campo elettrico in prossimità della regione oculare in presenza di occhiali fosse perturbata dalla misura diretta del campo emesso dalla sorgente (che in condizioni reali sarebbe schermata dalla testa), la zona interna delle aste degli occhiali è stata schermata utilizzando pannelli di ferrite di 600 mm x 600 mm. Per garantire una misura corretta, con la necessaria risoluzione e precisione di posizionamento della sonda di campo elettrico, è stato utilizzato uno scanner a 3 assi, interamente progettato e realizzato presso il LUCE per misure di emissione di campo magnetico a bassa frequenza su apparati per uso domestico, lavorativo ed individuale nonché la valutazione del diagramma di radiazione di antenne. Lo scanner, completamente controllato via PC, permette una precisione di posizionamento della sonda superiore a 0.1 mm e l'acquisizione e l'elaborazione in tempo reale dei risultati delle misure senza l'intervento dell'operatore.

In **figura 1** è riportata una foto del set-up di misura utilizzato.

I risultati sperimentali hanno evidenziato una forte influenza della montatura metallica degli occhiali sui valori del campo elettrico. Un esempio è riportato in **figura 2**, dove si può osservare l'andamento del campo elettrico misurato in prossimità di un cerchio della montatura. Incrementi significativi del campo elettrico, indotti dal fenomeno di riemissione da parte della montatura metallica, sono stati rilevati anche nella regione oculare,



come illustrato in **figura 3** dove è mostrato l'andamento del campo elettrico misurato in una direzione ortogonale al piano delle lenti (penetrando quindi idealmente nella regione oculare) nel punto centrale dei due cerchi. Il telefono è stato posto con l'antenna in posizione parallela all'asta di destra (R). L'andamento del campo elettrico al di fuori (asse $x < 0$) e internamente al piano delle lenti (asse $x > 0$) è stato riportato sia per l'occhio vicino al cellulare (R), sia per quello lontano (L), in presenza della montatura metalliche (caso 2) e in assenza delle stesse (caso 1). È importante osservare che l'aumento della densità di potenza varia con il quadrato del campo e che, pertanto, un fattore 2 di incremento del campo elettrico si ripercuote in un incremento di un fattore 4 della potenza assorbita.

I risultati riportati, che mostrano come in presenza di occhiali con montatura metallica i valori del campo elettrico misurato siano decisamente superiori a quelli ri-

Figura 4
Rappresentazione discreta dello scenario utilizzato per le simulazioni FDTD. Il passo di campionamento utilizzato è di 2.5mm.

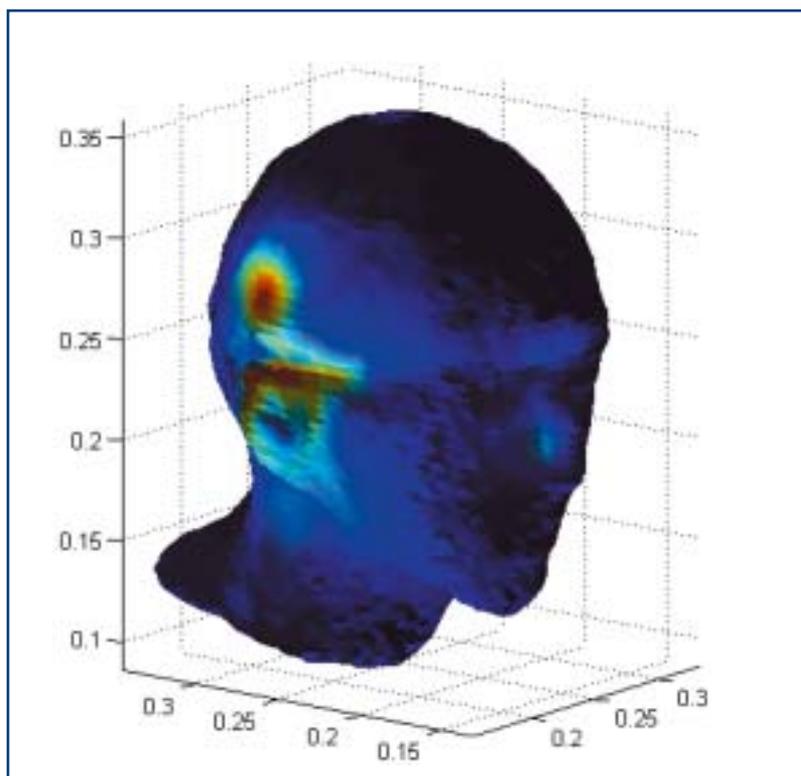


Figura 5
 Andamento del campo elettrico sulla superficie esterna della testa in presenza di occhiali. L'accoppiamento con la stanghetta destra, più vicina alla sorgente del campo elettromagnetico, risulta evidente.

scontrabili in assenza della montatura, non possono comunque essere ritenuti definitivi. Questi, infatti, dipendono fortemente dalle modalità di accoppiamento tra montatura e cellulare. In particolare, si è valutata una forte dipendenza dall'angolo formato tra l'antenna del cellulare e l'asta degli occhiali, con efficienza di accoppiamento massima in caso di posizionamento parallelo tra asta e cellulare ed accoppiamento molto debole in caso di posizionamento ortogonale del telefono rispetto all'asta della montatura. Più debole risulta invece, entro certi limiti, la dipendenza

dell'accoppiamento tra cellulare ed asta al variare della distanza a cui viene tenuto il telefono.

Le simulazioni preliminari effettuate mediante il metodo dei momenti hanno permesso di validare il setup sperimentale, mostrando un'ottima riproducibilità tra risultati sperimentali e quelli delle simulazioni.

Le simulazioni FDTD hanno confermato l'esistenza di un incremento dei valori del campo elettrico nella regione oculare anche in presenza della testa dell'operatore.

Essendo l'approccio FDTD basato sulla soluzione delle equazioni fondamentali dell'elettromagnetismo (Equazioni di Maxwell) mediante una tecnica alle differenze, lo scenario della simulazione (rappresentato dalla testa dell'operatore, gli occhiali metallici ed il telefono cellulare) è stato suddiviso in celle di forma cubica, ognuna delle quali contenente un mezzo avente caratteristiche dielettriche coincidenti con quelle del materiale fisi-

camente presente nella medesima posizione. Il modello utilizzato per la rappresentazione della testa è stato derivato da immagini relative a scansioni mediante risonanza magnetica. Le immagini ottenute da questo procedimento sono state in seguito digitalizzate (cioè campionate con una risoluzione di 2.5mm) e, in base alla corrispondenza colore/tessuto, è stato possibile risalire alle caratteristiche dielettriche di interesse (conduttività elettrica e costante dielettrica relativa) 2. In questo modo si è costruito un database che, per ogni cella dello scenario simulato, consente di rappresentare i differenti materiali presenti in esso.

In Figura 4 è rappresentato il modello discreto dello scenario di simulazione. Il telefono è stato considerato in prossimità dell'orecchio destro ed in posizione verticale. Con l'approccio FDTD, l'analisi dei risultati risulta essere estremamente complessa e laboriosa perché il simulatore fornisce l'andamento delle 3 componenti del campo elettrico (e di quelle del campo magnetico, se richiesto) su tutto lo spazio di calcolo, rappresentato da 200_200_200 celle. L'accoppiamento fra il campo e.m. generato dall'antenna e la montatura metallica degli occhiali è illustrato in Figura 5, che riporta l'andamento dell'intensità del campo elettrico sulla superficie della testa dell'operatore. Il campo assume valori di intensità molto elevata nelle regioni prossime all'orecchio destro, ma risulta seguire anche la geometria della montatura dell'occhiale, a testimonianza delle correnti indotte su di essa. Per rendere più chiara l'evidenza del fenomeno di focalizzazione nella regione oculare, in Figura 6 è riportato l'andamento del modulo del campo elettrico all'interno della testa e per una sola sezione verticale operata in corrispondenza dell'occhio destro, il più soggetto al fenomeno di focalizza-

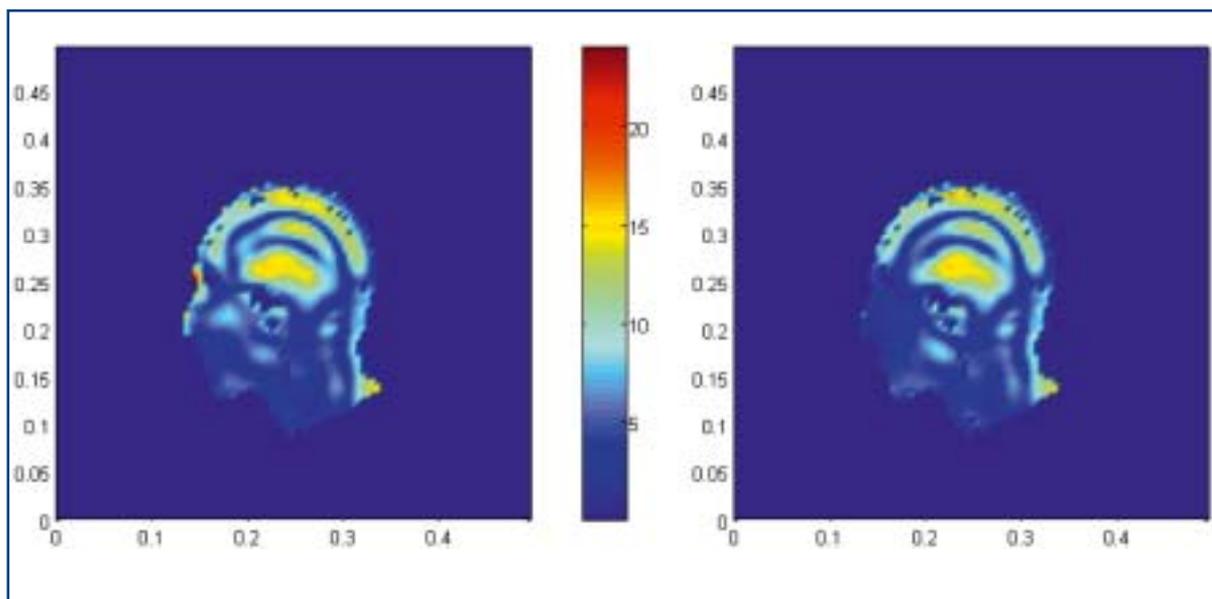


Figura 6
Modulo del campo elettrico (V/m) in una sezione perpendicolare alla testa in corrispondenza della regione oculare in presenza (figura a sinistra) ed in assenza (figura a destra) degli occhiali metallici. Nella figura di sinistra è possibile osservare, in prossimità della regione oculare, il massimo valore del campo elettrico.

zione del campo per la configurazione utilizzata nella simulazione. L'immagine di destra è relativa alla situazione in assenza di occhiali metallici. Come è possibile notare, il campo elettrico nella regione oculare risulta essere molto basso, con intensità inferiori ai 5V/m. In presenza di occhiali con montatura metallica, invece (immagine di sinistra), il valore nella medesima regione è più elevato, ed arriva a superare i 20V/m.

Ulteriori studi sono attualmente in corso per valutare la dipendenza dal campo elettrico misurato in prossimità della regione oculare al variare della frequenza del segnale emesso della sorgente (in particolare telefonia GSM a 1.8 GHz e UMTS tra 1.9 e 2.2 GHz), angolo di inclinazione tra antenna del cellulare ed asta della montatura, forma dei cerchi degli occhiali.

Per quanto riguarda la frequenza, è presumibile che al suo aumentare l'effetto di riemissione possa risultare ancora più evidente, per il fatto che le dimensioni della montatura metallica risultano in questo caso più vicine alla lunghezza d'onda del campo emesso, con

conseguenti effetti di risonanza. Per ciò che riguarda la forma del cerchio (parte che contiene la lente), è presumibile che per occhiali con cerchi più piccoli (quali quelli da lettura), nei quali la parte superiore e quella inferiore sono più vicine, gli effetti siano quantitativamente superiori rispetto al caso in cui le riemissioni generate dalla parte superiore ed inferiore dei cerchi non incidano direttamente sullo stesso punto della regione oculare.

luce.ferrara@elflash.it

Bibliografia

1. Effects of electromagnetic fields on Organs and tissues. Commission on Life Science. National Research Council., ed. National Academic Press, Washington D.C. 1993
2. P. Farace, R. Pontalti, L. Cristoforetti and M. Scarpa, "An automated method for mapping the human tissue permittivities and conductivities by MRI in Hyperthermia treatment planning", Physics in Medicine and Biology, Vol. 42, No. 11, 2159-2174, 1997.