

**METODI DI ANALISI DELL'EFFICACIA DI DISPOSITIVI PER LA  
RIDUZIONE DELL'ESPOSIZIONE A CAMPI ELETTROMAGNETICI  
GENERATI DA TELEFONI CELLULARI**

L. Anglesio, S. Adda, A. Benedetto, M. Tasso, G. d'Amore  
*A.R.P.A. Piemonte, Dipartimento Subprovinciale di Ivrea*

**RIASSUNTO**

Le misure e le simulazioni effettuate nell'ambito di questo lavoro riguardano l'efficacia di dispositivi per l'attenuazione delle emissioni di apparecchi mobili per la telefonia cellulare e la diminuzione dell'esposizione connessa all'utilizzo di auricolari.

Sono state effettuate misure di attenuazione del campo elettromagnetico offerta da due custodie antiradiazioni in tessuto conduttivo e da un'antenna a "bassa emissione", misure della variazione dell'esposizione a seguito dell'utilizzo di tre diversi dispositivi auricolari e anche alcune misure atte a valutare le eventuali variazioni introdotte nella distribuzione del campo da dispositivi di materiale ceramico tipo "coccinella".

La variazione nella distribuzione del campo e nell'esposizione è stata anche valutata tramite simulazioni, con il metodo delle Differenze Finite nel Dominio del Tempo (FDTD), del campo elettromagnetico emesso da un telefono cellulare in condizioni normali e in presenza di un auricolare e di un modello di "coccinella". È stato valutato in questo modo il campo elettrico nell'area circostante il telefono e il suo diagramma di irradiazione.

**INTRODUZIONE**

Recentemente è stata posta, a livello nazionale e internazionale, una forte attenzione alle problematiche connesse all'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici generati da telefoni cellulari. In particolare, è molto discusso il problema della riduzione dell'esposizione degli utilizzatori a tali campi: sono stati messi in commercio dispositivi che offrono la diminuzione di questa esposizione tramite allontanamento dell'antenna dalla testa dell'utente (auricolare) o l'attenuazione delle emissioni (ad es. "custodie antiradiazioni").

In quest'ambito, è importante definire ed eventualmente standardizzare metodi per la valutazione dell'esposizione e delle sue variazioni in presenza di questi dispositivi. Si propone in tal senso, affiancato alle misurazioni, l'utilizzo di metodi numerici di calcolo, che permettono di valutare l'influenza di tali dispositivi sulla distribuzione e sull'intensità del campo vicino alla sorgente.

**MATERIALI E METODI**

**Metodi di misura e strumentazione utilizzata**

Le misure per la valutazione dell'efficacia dei diversi dispositivi sono state effettuate all'interno di una camera anecoica per frequenze 250 MHz – 1 GHz, di dimensioni  $(4 \times 4 \times 3) \text{m}^3$  (Anglesio et al., 1998), in condizioni di massima trasmissione del telefono.

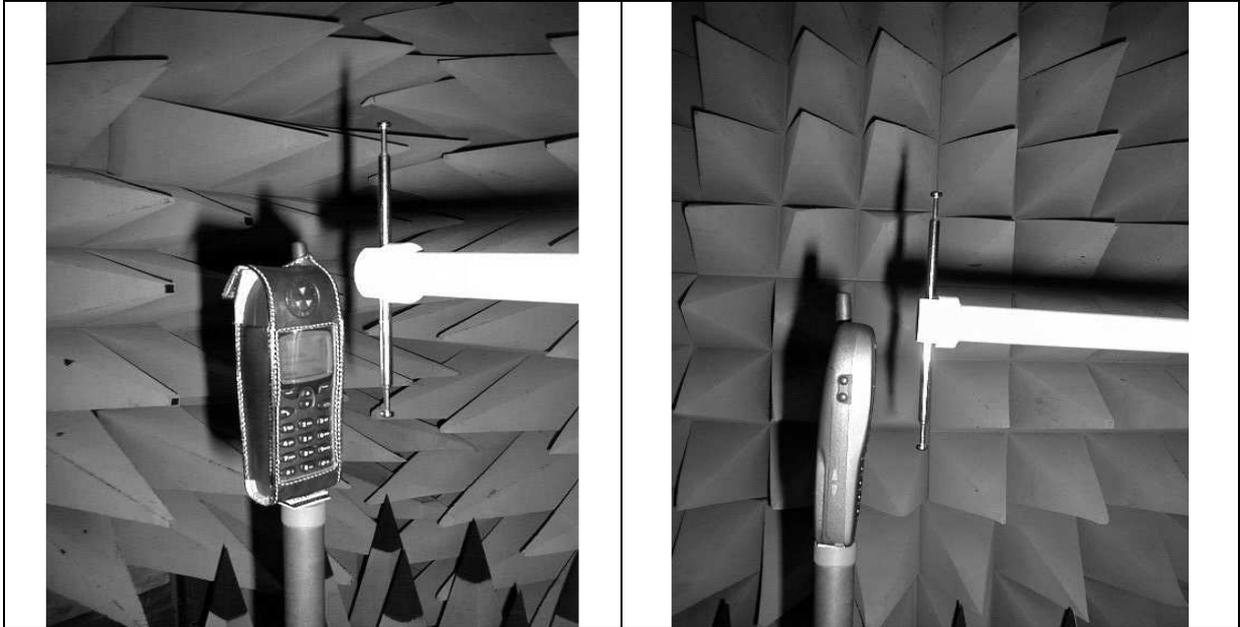
Sono state effettuate misure selettive in frequenza (banda stretta) che permettono, a differenza di quelle in banda larga, di seguire la variazione del segnale con modulazione GSM, che è molto rapida.

La catena strumentale era così costituita:

- Antenna a dipolo (EMCO 3121C DB4)

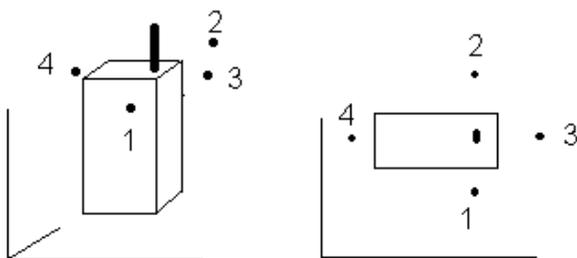
- Cavo coassiale calibrato (RG 213 U)
- Analizzatore di spettro (HP 8562 B)

Le misure dell'attenuazione del campo elettromagnetico offerta dalle custodie antiradiazioni e dall'antenna a bassa emissione sono state effettuate posizionando il telefono su un cavalletto di materiale dielettrico, con l'allestimento di misura riportato in figura 1.



**Figura 1:** Allestimento della misura per i dispositivi per l'attenuazione delle emissioni

Il centro elettrico del dipolo di misura è stato posto ad una distanza fissa di 5 cm dal punto di inserzione dell'antenna dell'apparecchio mobile sul corpo dello stesso, nei punti riportati nello schema seguente.



**Figura 2:** Punti di misura – 1: perpendicolare al piano contenente la tastiera (posizione denominata “davanti telefono”); 2: perpendicolare al piano contenente il dorso del telefono (“dietro telefono”); 3: perpendicolare al piano laterale del telefono più prossimo all'antenna (“lato antenna”); 4: perpendicolare al piano laterale del telefono più lontano dall'antenna (“lato opposto antenna”).

L'efficacia di ogni dispositivo è stata valutata confrontando le misure con e senza il dispositivo stesso.

L'analizzatore di spettro è stato impostato in condizioni di max-hold, con risoluzione 30 kHz e span 10 MHz. Si è inoltre effettuata una rilevazione della convoluzione dei segnali emessi, ottenuta impostando una risoluzione dell'analizzatore di spettro pari a 3 MHz.

Le misure sui telefoni con auricolare sono state effettuate posizionando l'apparecchio su una plancia di materiale dielettrico, su cui è stato fissato il filo dei diversi dispositivi auricolari, e

posizionando il dipolo nelle immediate vicinanze (circa 3 cm) del punto di inserzione dell'antenna dell'apparecchio (posizione A) ed in prossimità del filo (1 cm), in corrispondenza del microfono (posizione B), della metà del tratto di cavo compreso tra microfono e auricolare (posizione B), e in corrispondenza dell'auricolare (posizione C)

### Simulazioni numeriche

Il metodo alle Differenze Finite nel Dominio del Tempo risolve numericamente le equazioni di Maxwell "campionando" il campo elettromagnetico in punti distinti di una griglia spaziale ed anche in distinti istanti di tempo ugualmente spazati fra loro. Questo algoritmo risolve insieme i campi elettrici e magnetici nel tempo e nello spazio, usando le equazioni accoppiate: in questo modo, si possono modellare le proprietà sia elettriche che magnetiche dei materiali, e le caratteristiche dei singoli campi (Yee, 1966).

Affinché il campionamento spaziale sia accurato e il calcolo sia stabile, sono necessarie due sole condizioni sulle dimensioni della cella  $\delta$  (minore o uguale ad  $1/10$  di lunghezza d'onda) e sull'intervallo temporale  $\delta t$  (minore o uguale a  $\delta/2c$ ) (Taflove, 1995).

L'inserimento di oggetti nello spazio discreto avviene con un'approssimazione "a gradini" delle superfici: in questo modo non è necessaria l'introduzione di condizioni al contorno all'interfaccia, ma basta specificare inizialmente i valori di permittività, conducibilità e permeabilità in ciascuna cella.

Il programma implementato secondo questo algoritmo è stato validato tramite confronto con valutazioni analitiche (d'Amore et al., 1999) e tramite interconfronto dei risultati derivati da problemi canonici (d'Amore et al., 1994).

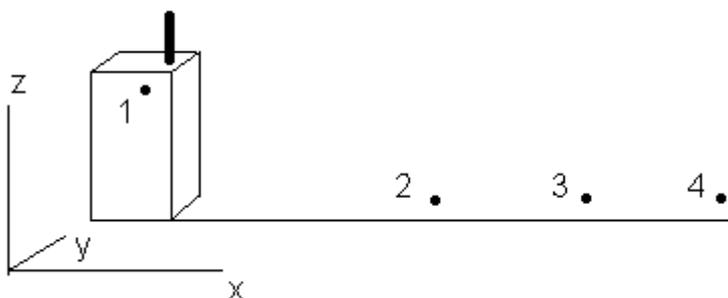
E' stato quindi simulato un telefono cellulare in trasmissione a 900 MHz, modellando un monopolo sopra una scatola di materiale perfettamente conduttore (Luebbers et al., 1992), e sono stati inseriti prima un filo conduttore per simulare l'auricolare e poi una "coccinella" (assegnando adeguati valori delle costanti dielettriche alle celle interessate).

Lo spazio utilizzato ha dimensioni  $60 \times 60 \times 60$  celle, con un utilizzo di memoria RAM pari a circa 11 MB. Ciascuna cella ha  $\delta = 1$  cm.

### Auricolare

La presenza dell'auricolare è stata modellata inserendo un filo sottile di materiale conduttore. L'introduzione di una struttura di dimensioni inferiori a quelle della cella fondamentale (1cm) richiede la sostituzione delle equazioni di Maxwell per il calcolo del campo magnetico lungo il filo con una relazione temporale modificata ricavata dall'applicazione della legge di Faraday in forma integrale su circuiti chiusi nella regione occupata dal filo (Taflove et al., 1988).

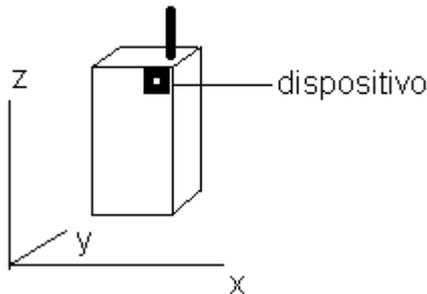
Nella figura 3 si può vedere la geometria modellata, con un filo di lunghezza 45 cm.



**Figura 3:** Modello del telefono con il filo dell'auricolare utilizzato per le simulazioni e punti di calcolo del campo elettrico.

*Dispositivi di materiale ceramico da applicare sul telefono*

In figura 4, si può vedere la geometria adottata per lo studio della variazione nella distribuzione del campo emesso dal telefono in presenza di un dispositivo di materiale ceramico applicato all'esterno dell'apparecchio mobile.



**Figura 4:** Modello del telefono con il dispositivo tipo “coccinella” utilizzato per le simulazioni.

I valori di permittività e permeabilità assegnati alla cella interessata (dimensioni: 1 cm<sup>3</sup>) sono quelli dichiarati da una casa costruttrice di dispositivi di questo tipo per due tipi di materiali utilizzati. Il valore di conducibilità, che non risulta dichiarato, è stato variato entro l'intervallo di possibili valori per un materiale ceramico.

In queste condizioni è stato calcolato il diagramma di irradiazione del modello di telefono, con e senza il dispositivo, implementando il passaggio da campo vicino a campo lontano basato sulla soluzione numerica dell'equazione di Huygens – Fresnel (Luebbbers et al., 1991).

## RISULTATI E ANALISI DEI DATI

### Auricolari

#### Misure

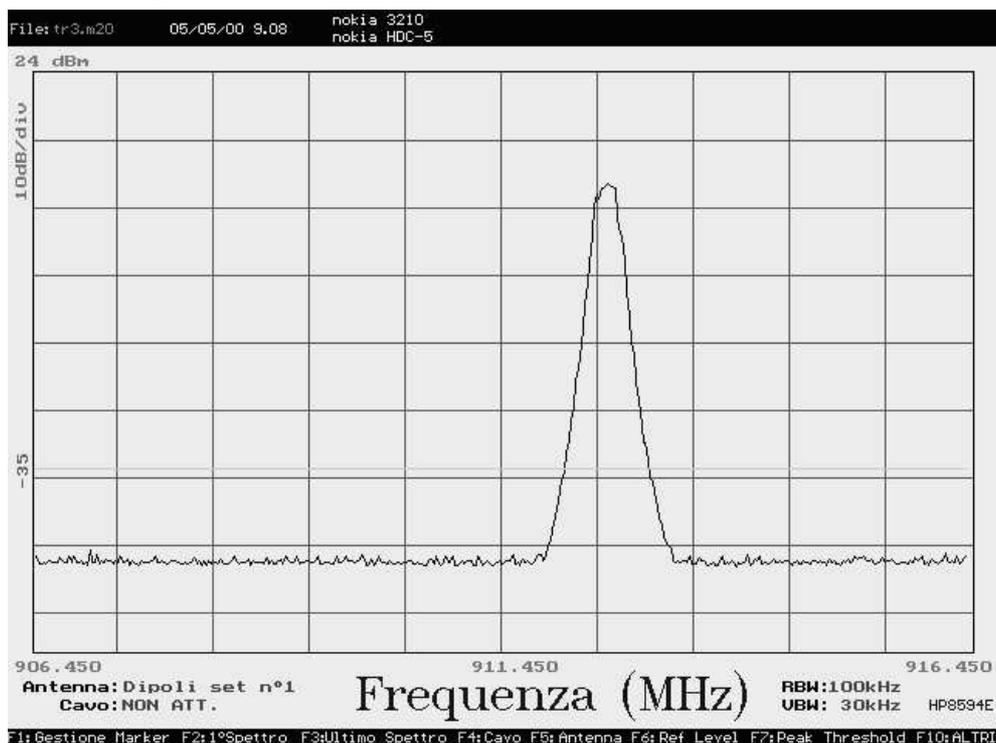
Nella tabella 1 sono riportati i risultati delle misure effettuate in prossimità del telefono e lungo il filo dell'auricolare per 3 diversi tipi di kit telefono-auricolare (valori normalizzati al valore vicino all'antenna).

Kit	Lato telefono Posizione A	Microfono Posizione B	Auric.-microfono Posizione C	Auricolare Posizione D
1	1.0	0.51	0.47	0.17
2	1.0	0.51	0.39	0.13
3	1.0	0.18	0.40	0.24

**Tabella 1:** valori normalizzati di campo elettrico rilevati in condizioni di normale utilizzo del telefono (posizione A), e in presenza di tre tipi di kit auricolare, in diverse posizioni.

Da questi dati si può osservare come l'intensità del campo in prossimità dell'auricolare (posizione D), simulando le condizioni di usuale utilizzo del kit, sia decisamente inferiore a quello vicino all'antenna (posizione A), in condizioni di normale utilizzo del solo telefono. La diversità tra i valori rilevati è dovuta sia alla diversa lunghezza dei tre fili, sia alla diversa tipologia costruttiva (materiale conduttivo e rivestimento).

Nella figura 5 è riportato un esempio di spettro acquisito nella posizione C.



**Figura 5:** esempio di spettro dell'emissione di un telefono cellulare in presenza di dispositivo auricolare, acquisito in prossimità del filo, tra microfono e auricolare.

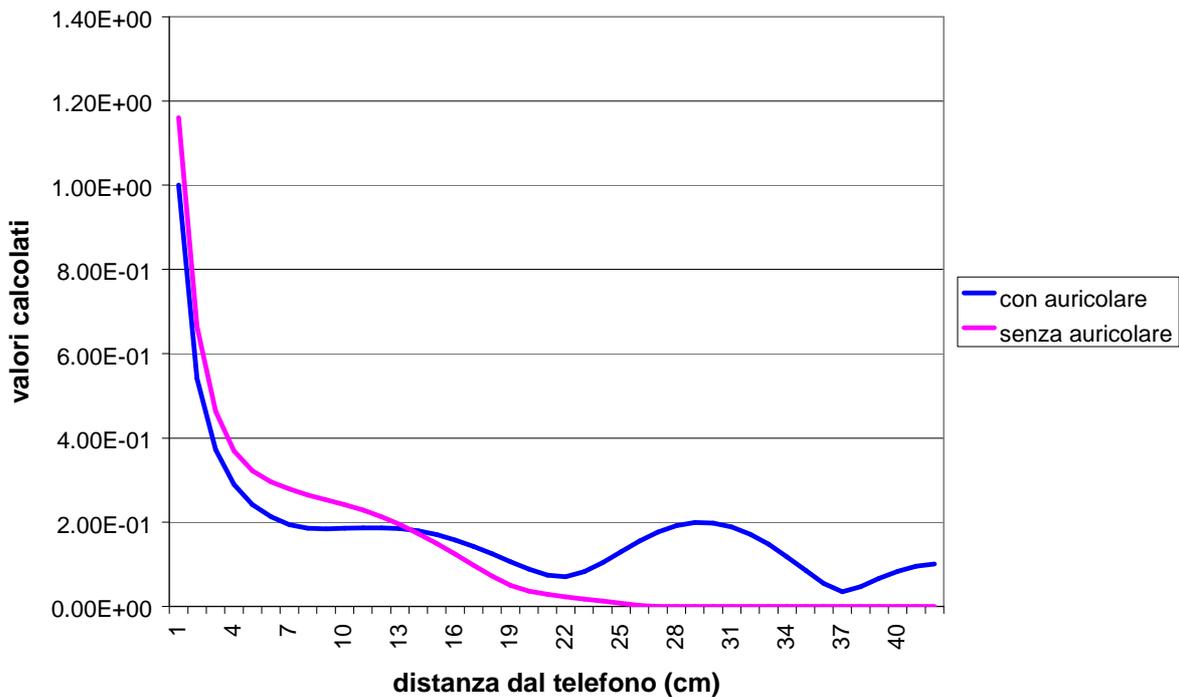
### Simulazioni

Nella tabella 2 sono riportati i valori di campo elettrico efficace calcolati nei punti di figura 3, nel caso in cui è assente il filo dell'auricolare e in quello in cui è presente. Si può vedere che, come già rilevato con le misurazioni, la presenza del filo fa aumentare il valore di campo elettrico nei punti 3 e 4, ma il valore all'estremità del filo (dove c'è l'auricolare, e cioè vicino alla testa dell'utilizzatore) rimane comunque circa 5 volte più basso del valore in prossimità del punto di inserzione dell'antenna.

Punto di valutazione	E(V/m) senza auricolare	E(V/m) con auricolare
1 –davanti telefono	1.0	
2 –20 cm dal telefono	0.21	0.17
3 – 35 cm dal telefono	0.14	0.28
4 – 50 cm dal telefono	0.10	0.21

**Tabella 2:** valori normalizzati di campo elettrico calcolati in condizioni di normale utilizzo del telefono (senza auricolare), e in presenza di un filo conduttore per simulare la presenza di un kit auricolare, in diverse posizioni.

In figura 6 è riportato l'andamento del campo elettrico (valori normalizzati) calcolato lungo il filo conduttore, a distanza 1.5 cm da esso. Anche qui si osserva come, allontanandosi dal telefono, l'esposizione diminuisca molto anche in presenza dell'auricolare.



**Figura 6:** andamento del campo elettrico calcolato lungo il filo conduttore e in assenza dello stesso, allontanandosi dal telefono.

### Dispositivi per l'attenuazione delle emissioni

#### Misure

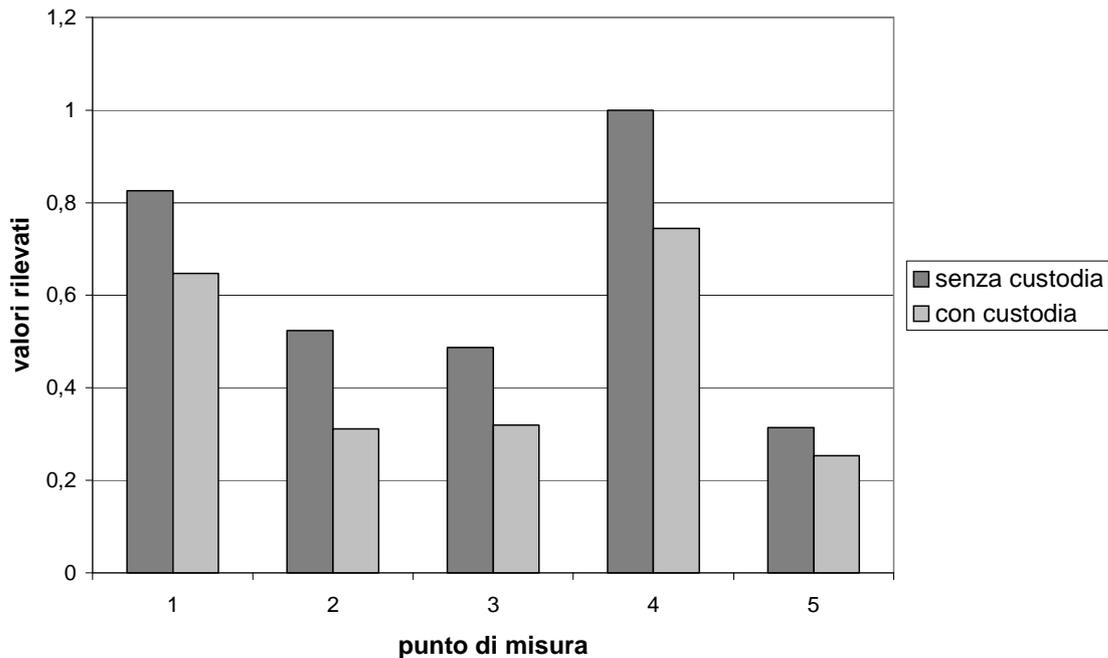
Nella tabella 1 sono riportati i risultati delle misure effettuate davanti al telefono (punto 1 di figura 2) sui diversi dispositivi (valori normalizzati).

Dispositivo	Campo con dispositivo/senza dispositivo
Custodia antiradiazioni 1	1.06
Custodia antiradiazioni 2	0.78
Antenna a "bassa emissione"	basso campo ambientale: 0.91 alto campo ambientale: 1.15
Tipo "Coccinella"	1.0

**Tabella 3:** valori normalizzati di campo elettrico rilevati davanti al telefono per diversi dispositivi.

Si è verificato che le misure sull'antenna a "bassa emissione" variavano in relazione alle condizioni di ricezione producendo un rapporto fra il campo generato con e senza dispositivo comunque sempre intorno a 1. In questo caso viene infatti ridotta l'efficienza dell'antenna, con un conseguente aumento della potenza fornita all'antenna in condizioni di normale ricezione.

Nel caso della custodia antiradiazioni tipo 2, c'è effettivamente una riduzione significativa, seppur non elevata, del segnale misurato: sono state effettuate quindi ulteriori misure nei punti di figura 2 per verificare l'effettiva diminuzione dell'esposizione. I risultati di tali misure sono riportati nella figura 7.

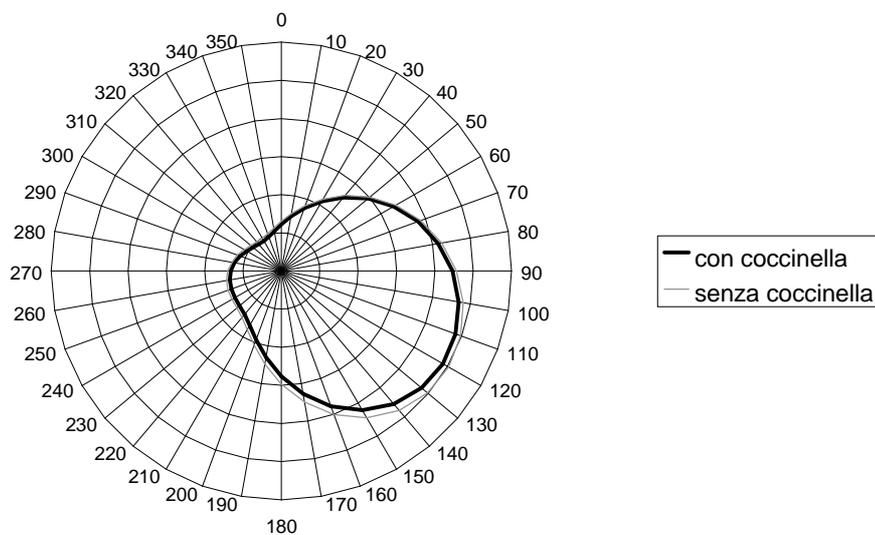


**Figura 7:** valori di campo elettrico (normalizzati al valore massimo) misurati nei punti di figura 2 (1-davanti telefono; 2-dietro telefono; 3-lato antenna; 4-lato opposto antenna) e davanti alla tastiera del telefono (punto 5: dipolo di misura 5 cm più in basso del centro antenna).

### Simulazioni

I risultati delle simulazioni per il dispositivo tipo “coccinella” rispecchiano i dati rilevati sperimentalmente. Anche in questo caso infatti i valori di campo elettrico massimo valutati in diversi punti non presentano variazioni apprezzabili a seguito dell’applicazione del dispositivo stesso, anche variando il tipo di materiale ceramico, le cui costanti dielettriche sono state considerate variabili entro le seguenti coppie di valori:  $\epsilon$  (3.19 – 7.51);  $\sigma$  (0.5 – 13000);  $\mu$  (1 – 4.28).

In figura 8 sono riportati i diagrammi di irradiazione orizzontali ottenuti con e senza il dispositivo.



**Figura 8:** diagrammi di irradiazione di un monopolo su una scatola di materiale conduttivo in presenza e in assenza di un modello di dispositivo ceramico tipo “coccinella”.

## DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Tramite misurazioni effettuate in camera anecoica e simulazioni eseguite con il metodo alle Differenze Finite nel Dominio del Tempo, si è studiata l'eventuale efficacia di dispositivi per l'attenuazione delle emissioni da telefoni cellulari e la riduzione dell'esposizione durante l'utilizzo di kit auricolari.

Per quanto riguarda gli auricolari si osserva, sia dalle misure che dalle simulazioni, come l'esposizione in prossimità del dispositivo, a circa 50 cm dal telefono, sia notevolmente ridotta (circa 5 volte inferiore) rispetto a quella in prossimità dell'antenna. Dalle simulazioni si osserva anche come la diminuzione del livello di campo elettrico allontanandosi dal telefono sia inferiore in presenza del filo conduttore di quanto non sia in assenza dello stesso. Nonostante ciò, si tratta comunque di una diminuzione notevole e molto rapida.

Per quanto riguarda invece i dispositivi per l'attenuazione delle emissioni, si può vedere come nella maggior parte dei casi essi siano inefficaci: soltanto una delle custodie analizzate fornisce una effettiva diminuzione dell'intensità del campo emesso in prossimità dell'apparecchio. L'efficacia di questo dispositivo dovrebbe essere verificata con prove sperimentali su fantocci e simulazioni teoriche che tengano conto dell'effetto di prossimità della testa umana sulla distribuzione e assorbimento del campo elettromagnetico.

## BIBLIOGRAFIA

- G. d'Amore, L. Anglesio, S. Adda, G.C. Bonazzola, 1999. A procedure for evaluating the reflectivity level of anechoic chambers based on numerical simulations. Proc. 13<sup>th</sup> International Zurich Symposium on Electromagnetic compatibility, pp.671-674.
- G. d'Amore, G. Fiandino, P. Ossola, S. Tofani, 1994. Numerical canonical models for mobile communications: results of FDTD calculations. Proc. of the COST244 meeting on Reference Models for Bioelectromagnetic Test of Mobile Communication Systems, pp.8-15.
- L. Anglesio, G. d'Amore, M. Tasso, A. Benedetto, 1998. Accreditamento del centro SIT del Dipartimento di Ivrea e attività di taratura di antenne e sensori di campo elettromagnetico. Atti della Prima Conferenza Nazionale delle Agenzie Ambientali, pp. 389-395.
- R. Luebbers, L. Chen, T. Uno, S. Adachi, 1992. FDTD calculation of radiation patterns, impedance and gain for a monopole antenna on a conducting box. IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.40, pp. 1577-1583
- R. Luebbers, K.S. Kunz, M. Schneider, F. Hunserberger, 1991. A Finite Difference Time Domain near zone to far zone transformation. IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.39, n.4, pp. 429-433.
- A. Taflove, 1995. Computational Electrodynamics – The Finite Difference Time-Domain Method. Artech House.
- A. Taflove, K.R. Umashankar, K.S. Yee, 1988. Detailed FDTD analysis of electromagnetic fields penetrating narrow slots and lapped joints in thick conducting screens. IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 36, pp. 247-257.
- K.S. Yee, 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. IEEE Trans. Antennas Propagat., vol AP-14, pp. 302-307.