



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea in Ingegneria Biomedica
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

***Effetto della variazione dell'ambiente riverberante sulla
focalizzazione elettromagnetica in mezzi biologici.***

*Effects of reverberating environment on the electromagnetic focusing in
biological media.*

Relatore: Chiar.mo

Prof. **VALTER MARIANI PRIMIANI**

Correlatore: Chiar.mo

Prof. **FRANCO MOGLIE**

Tesi di Laurea di:

ELISABETTA ZINGARETTI

1. INTRODUZIONE

La focalizzazione sfrutta i campi elettromagnetici.

In ambito medico, la focalizzazione del campo elettromagnetico permette l'interazione con l'uomo, in maniera non invasiva e senza particolari ripercussioni nel lungo e nel breve termine sul soggetto trattato. Tranne che per l'area focalizzata in cui effetti sono irreversibili. Infatti, già intorno ai 43°- 44° l'ipertermia ha effetti irreversibili sulle cellule, portandole alla morte.

L'approccio non invasivo è garantito dalla possibilità di interagire dall'esterno con il corpo da studiare, data la capacità dei campi elettromagnetici di penetrare nei corpi e quindi anche nei tessuti.

L'assenza di gravi ripercussioni sull'individuo trattato deriva dalla natura non ionizzante dei campi elettromagnetici, che hanno come effetto principale l'indurre i tessuti irradiati ad un regime di ipertermia.

L'ipertermia se correttamente sfruttata in tempi utili risulta, altrimenti si possono riscontrare danni ai tessuti. Un tessuto biologico ha una differente risposta a seconda della temperatura a cui è sottoposto.

Temperatura a cui è esposto il corpo biologico	Effetto riscontrato sul corpo biologico
Fino a 42°	Non vi sono effetti
Da 43° a 50°	Ipertermia
Maggiori di 60°	Regime coagulativo

A 100°	Evaporazione dell'acqua
Maggiori di 100°	Carbonizzazione tessuti
Circa di 300°	Fusione delle cellule

Riprendendo il discorso sulla focalizzazione, la convenienza di questo approccio crea innumerevoli opportunità di studio e sviluppo di tecniche diagnostiche e terapeutiche sui corpi biologici di diversa natura.

Uno dei principali ostacoli che si riscontrano nello studio dei tessuti biologici è la precisione elevata che si richiede in punti del corpo sensibili alle temperature elevate.

All'atto pratico, nella gamba si può avere una precisione, nella focalizzazione dell'area, più bassa di quella che sarebbe più funzionale usare nella testa di un soggetto preso in analisi durante le prove. Inoltre, le difficoltà nell'analisi delle simulazioni derivano anche dall'ambiente in cui vengono svolte che necessita di determinate caratteristiche, che verranno illustrate più avanti.

La scarsa reputazione di queste tecniche deriva da un passato in cui, nell'uso delle onde elettromagnetiche, non teneva in considerazione che vi potessero essere degli effetti sui corpi irradiati durante la trasmissione dei segnali tra i vari apparecchi.

All'epoca dei fatti, non si valutava l'effetto sui corpi biologici perché non era quello che si voleva ottenere. Un esempio pratico è la trasmissione di segnali radio, nell'effettuare la comunicazione si vuole che il segnale sia il più chiaro possibile, si ignorava l'effetto sui corpi biologici. Passarono gli anni e quindi col tempo tutti gli spetti hanno iniziato ad essere visti con occhi sospetti, eppure non tutto viene per nuocere.

In questo lavoro verrà riportato lo studio dell'analisi numerica, fatta al calcolatore, sfruttando programmi scritti, con uno specifico linguaggio di programmazione, di un'antenna adeguatamente distante dall'arto studiato all'interno di una camera riverberante.

Lo scopo è portarlo ad una temperatura sufficiente affinché si scadi. Si vuole scaldare il corpo in quanto, l'ipertermia può risultare terapeutica per differenti patologie.

Nel mentre, la sicurezza per i tessuti trattati è garantita dal monitoraggio costante degli effetti delle onde elettromagnetiche e dalla già citata natura delle onde.

Nello studio sono state sfruttate le simulazioni FDTD e le tecniche del Time Reversal per vedere come reagiscono i tessuti di un corpo biologico specifico, quello di un piede umano.

Per rendere la simulazione il più attendibile possibile e con tempi computazionali ragionevoli i tessuti sono stati esaminati in strati distinti.

È stato scelto di programmare utilizzando il linguaggio C, utilizzando di supporto delle specifiche librerie correlate all'acquisizione dei dati e alla stampa dei risultati.

Di seguito vengono descritti i due principi di funzionamento usati durante le prove e successivamente le conclusioni tratte dai dati raccolti.

2. TIME REVERSAL

Il time reversal in elettromagnetismo è molto utile nello studio dei campi elettromagnetici, i quali sono formati da onde; infatti, nasce come tecnica applicata in acustica, nello studio delle onde sonore.

Il time reversal, traducibile in italiano col termine di inversione temporale, è una tecnica di calcolo che permette a diverse frequenze di onde di focalizzare nel tempo in un punto dello spazio preso in analisi, in cui è contenuto un mezzo con perdite e disomogeneo, come i tessuti biologici.

Viene utilizzata questa tecnica in quanto ci si trova nella situazione di voler scaldare un punto di un corpo contenuto in un ambiente altamente riflettente.

Con il termine time reversal ci si riferisce a cosa accade quando, sfruttando la reciprocità dell'equazione dell'onda, si inverte l'ordine delle onde che arrivano in un punto per poi propagarsi all'interno del mezzo e focalizzare nell'antenna mittente.

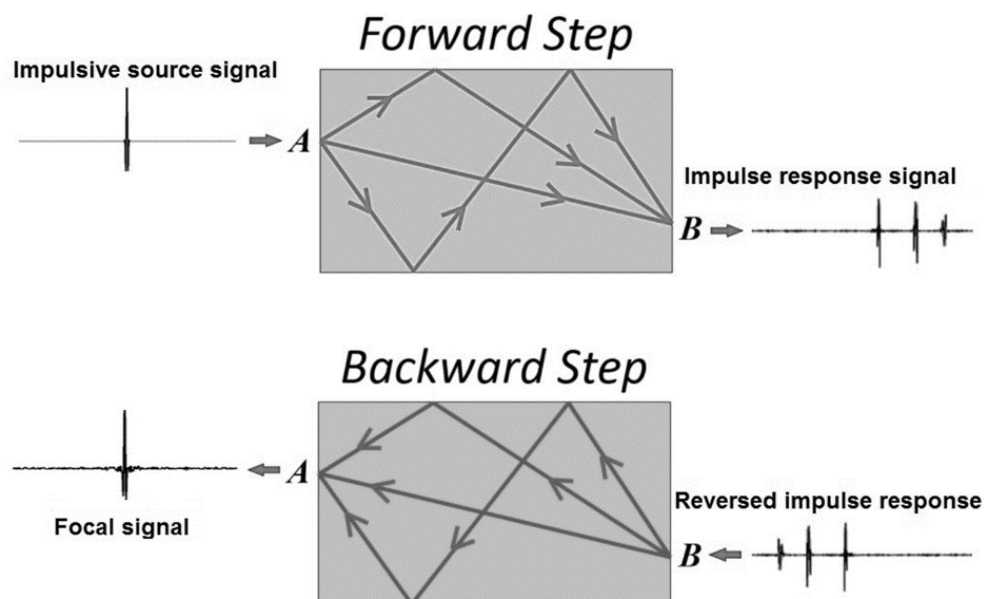


Fig. 2.1. immagine schematica della propagazione delle onde

La reciprocità dell'equazione dell'onda stabilisce che trovata una soluzione dell'equazione d'onda, l'inversione del tempo della soluzione è ancora una sua soluzione.

Questa tecnica ci permette di compensare i riverberi causati dalle differenze di tempo di viaggio correlate a percorsi diversi. **[1]**

2.1. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL TIME REVERSAL

All'interno della camera riverberante si prenda in analisi un sistema lineare a tempo invariante in cui:

- $x(t)$ segnale in ingresso nel dominio del tempo
- $X(f)$ segnale in ingresso nel dominio della frequenza
- $y(t)$ segnale in uscita nel dominio del tempo
- $Y(f)$ segnale in uscita nel dominio della frequenza
- $h(t)$ risposta impulsiva nel dominio del tempo
- $H(f)$ risposta impulsiva nel dominio della frequenza

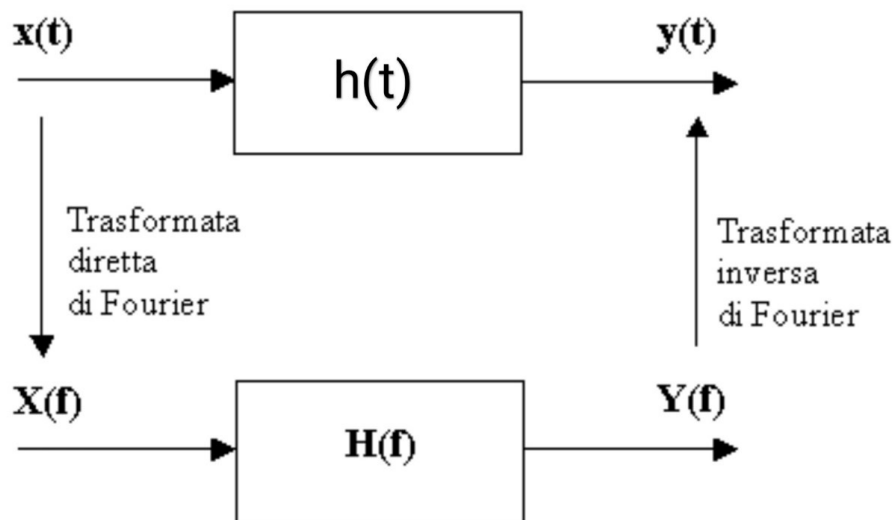


Fig.2.1.1. sistema lineare tempo invariante (in alto) e sistema nel dominio della frequenza (in basso)

L'uscita è rappresentata dalla funzione

$$y(t) = x(t) \otimes h(t)$$

In cui comprare l'operatore di convoluzione \otimes nella funzione nel dominio del tempo che equivale ad una moltiplicazione nel dominio della frequenza.

$$Y(f) = X(f) * H(f)$$

Usando le trasformate di Fourier è possibile passare da un sistema nel dominio del tempo al dominio della frequenza; analogamente usando le anti trasformate di Fourier si passa dal dominio della frequenza al dominio del tempo.

A questo punto per sfruttare il time reversal ribalto il segnale in uscita nel dominio del tempo $y(t)$ imponendo $t = -t$.

$$\text{Ottengo } y_{rib} = y(-t) \otimes h(t)$$

y_{rib} risulta quindi essere uguale a $x(t)$ rovesciato, che poi renderà possibile focalizzare nel punto di invio.

3.CAMERE RIVERBERANTI ELETTROMAGNETICHE

Vediamo ora di definire le caratteristiche dell'ambiente per poter sfruttare questa tecnica di calcolo, lo spazio preso in analisi deve necessariamente essere riverberante, ossia le pareti devono essere riflettenti per poter lavorare con onde caotiche che favoriscono la focalizzazione.

Tuttavia, il punto da focalizzare si trova in un corpo con diverse densità, quindi non è omogeneo, il quale smorza l'ampiezza dei modi di risonanza dell'ambiente rendendo meno visibili le zone calde.

Un ambiente si può definire riverberante se ha un numero di modi di risonanza superiori a 60. La formula di seguito permette di calcolare tutte le risonanze modali:

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2}$$

f = frequenza

c = velocità del suono (344 metri al secondo)

a = lunghezza della stanza

b = larghezza della stanza

d = altezza della stanza

m = indice modale lungo l'asse della dimensione a

n = indice modale lungo l'asse della dimensione b

p = Indice modale lungo l'asse della dimensione d

All'interno della camera riverberante si considera un'antenna trasmittente, che inietta il segnale all'interno del corpo biologico nel punto dove si vorrà effettuare la focalizzazione.

Inserendo un corpo biologico si aumentano i modi, quindi aumenta l'effetto caotico, ma si attenua il segnale a causa della bassa conducibilità dei tessuti come pelle, grasso e muscoli che non hanno una conducibilità elevata come i metalli.

4. FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN (FDTD)

È un algoritmo numerico che dà la possibilità di calcolare il campo elettromagnetico in zone in cui sono presenti oggetti, di cui si vuole studiare gli effetti provocati dalle onde.

La tecnica di calcolo è stata introdotta dal matematico Yee, difatti l'algoritmo dell'FDTD viene anche denominato algoritmo di Yee. Prevede di trovare soluzioni dirette delle equazioni di Maxwell nel dominio del tempo

È un metodo relativo al time-domain, le soluzioni della FDTD offrono diversi vantaggi:

- Si basa su equazioni semplici.
- Si fonda sul Time Domain, quindi lavora nel dominio del tempo.
- È trascurabile la geometria del sistema da studiare.
- È indipendente dalle caratteristiche fisiche del corpo analizzato.
- La risposta ricopre un ampio spettro di frequenze con una singola simulazione, quindi, non risulta necessario ripetere la simulazione per specifiche frequenze.
- Permette di calcolare la risposta impulsiva di un sistema elettromagnetico, in maniera diretta.

Risulta conveniente e fruttuoso l'utilizzo di calcolatori per l'analisi che è favorito da equazioni semplici le quali, purtroppo, richiedono discrete prestazioni da parte dei calcolatori utilizzati.

La richiesta di prestazioni aumenta in maniera significativa alla richiesta di precisione, dato che della FDTD si conoscono gli errori ed è possibile creare modelli parecchio precisi per un gran numero di problemi, con la necessità di attuare approssimazioni per le simulazioni che lavorano a basse frequenze.

Un altro aspetto che può incidere sulla richiesta di prestazioni da parte del calcolatore è la griglia su cui si sceglie di lavorare, ampie griglie richiedono prestazioni più alte di griglie piccole.

4.1. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN

La tecnica Finite-difference time-domain (FDTD) sfrutta le equazioni di Maxwell in forma differenziale e integrale. Kane Yee, nel 1966, teorizzò un modo per risolvere suddette equazioni.

Le quattro equazioni sono legge di Faraday, la legge di Ampere-Maxwell, la legge di Gauss per il campo elettrico e per il campo magnetico.

Name	Equation	
	Integral form	Differential form
Faraday's law of induction	$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\iint_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Ampère-Maxwell law	$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_s \vec{J} \cdot d\vec{S} + \iint_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
Gauss' electric law	$\oiint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_v \rho \, dV$	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$
Gauss' magnetic law	$\oiint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$

Fig.4.1.1. Le quattro equazioni nella loro forma integrale e differenziale.

Osservando tali leggi si evince che il vettore densità di corrente ed il vettore densità di campo magnetico possono agire in qualità di sorgenti indipendenti di campi elettrici e magnetici.

La tecnica di calcolo permette di calcolare il campo magnetico all'interno di una regione che deve necessariamente **[2]**:

- Non emettere sorgenti elettriche.
- Non emettere sorgenti elettromagnetiche.
- Essere discreta, ossia deve poter essere suddivisa in molteplici celle elementari cubiche, abbastanza piccole da poter descrivere esaurientemente il corpo.
- Può contenere uno o più corpi assorbenti.

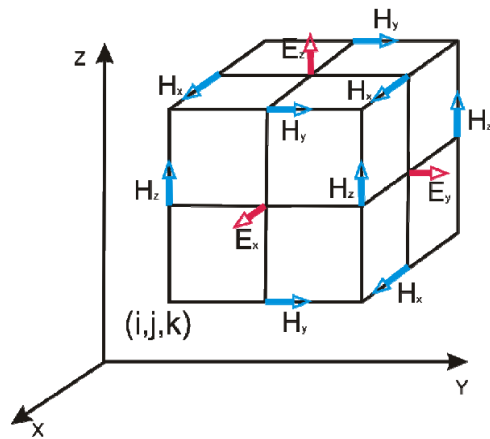


Fig.4.1.2. Cella di Yee e distribuzione del campo elettrico E e del campo magnetico H

Si discretizza il corpo, quindi, va scomposto in molteplici celle di cui, per ognuna si deve definire il materiale. All'interno delle celle si suppone che il materiale rimanga sempre lo stesso, quindi la singola cella è omogenea.

Nella regione, dalle caratteristiche descritte sopra, si possono discretizzare le equazioni di Maxwell per ottenere sei coppie di equazioni differenziali parziali che serviranno per l'analisi delle onde elettromagnetiche in corpi tridimensionali.

4.2. CONDIZIONI DI ASSORBIMENTO

Il metodo FDTD riesce a calcolare il campo magnetico in tutti i punti del dominio; quindi, l'interazione tra onde elettromagnetiche avviene in regioni aperte, per le quali il dominio in cui va effettuato lo studio del campo è illimitato.

Il dominio viene elaborato dai calcolatori i quali necessitano di un numero finito di valori da salvare in RAM per calcolare il campo magnetico, questa necessità dell'hardware ci impone di creare dei limiti.

Questi limiti vengono imposti aggiungendo alle superfici esterne delle condizioni denominate condizioni al contorno o condizioni di assorbimento.

Esistono due tipologie di condizioni al contorno:

- le RBCs acronimo di Radiation Boundary Conditions
- le ABCs acronimo di Absorbing Boundary Conditions.

Le ABC sono le più utilizzate per l'analisi dalla FDTD.

5. DESCRIZIONE DELLA GEOMETRIA ANALIZZATA

“The Zubal Phantom, Voxel-made Anthropomorphic Phantoms” è stato utilizzato come modello anatomico tridimensionale per ricavare il modello del braccio utilizzato durante le simulazioni al computer. [3]

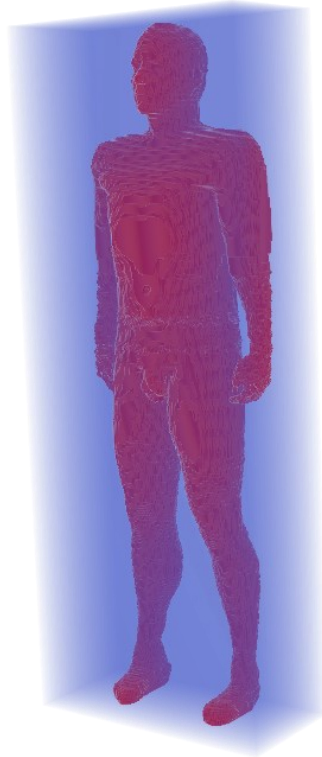


Fig.5.1 Modello tridimensionale integrale

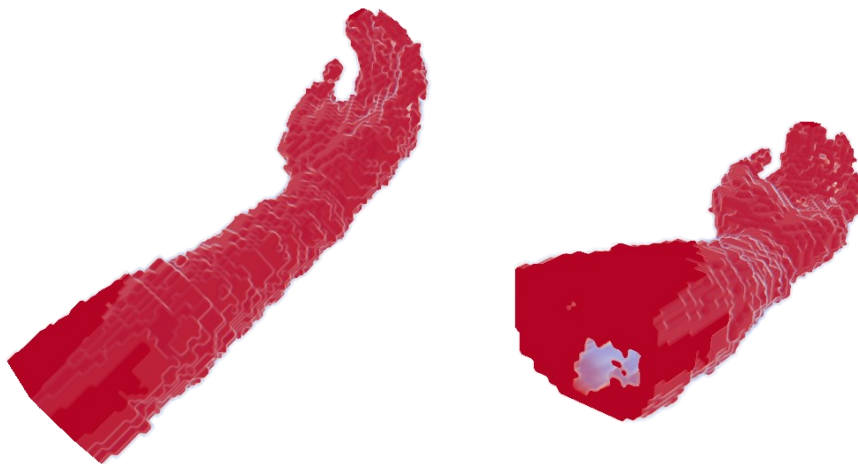


Fig.5.2. Due viste differenti del modello tridimensionale del braccio, in quella a destra è visibile una sezione dell'osso.

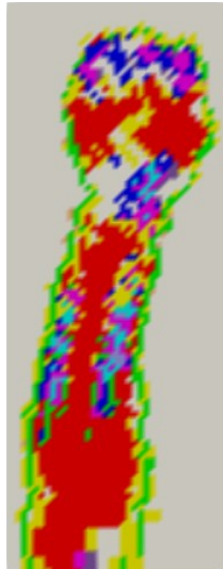


Fig.5.3. Modello bidimensionale del braccio

Dimensioni dell'ambiente riverberante in cui si sono svolte le simulazioni:

- Lunghezza lungo X paria a 820.8 mm
- Lunghezza lungo Y paria a 860.4 mm
- Lunghezza lungo Z pari a 1076 mm

Qui di seguito è riportata la vista la sezione orizzontale, vista dall'alto, della camera persa come riferimento per le simulazioni.

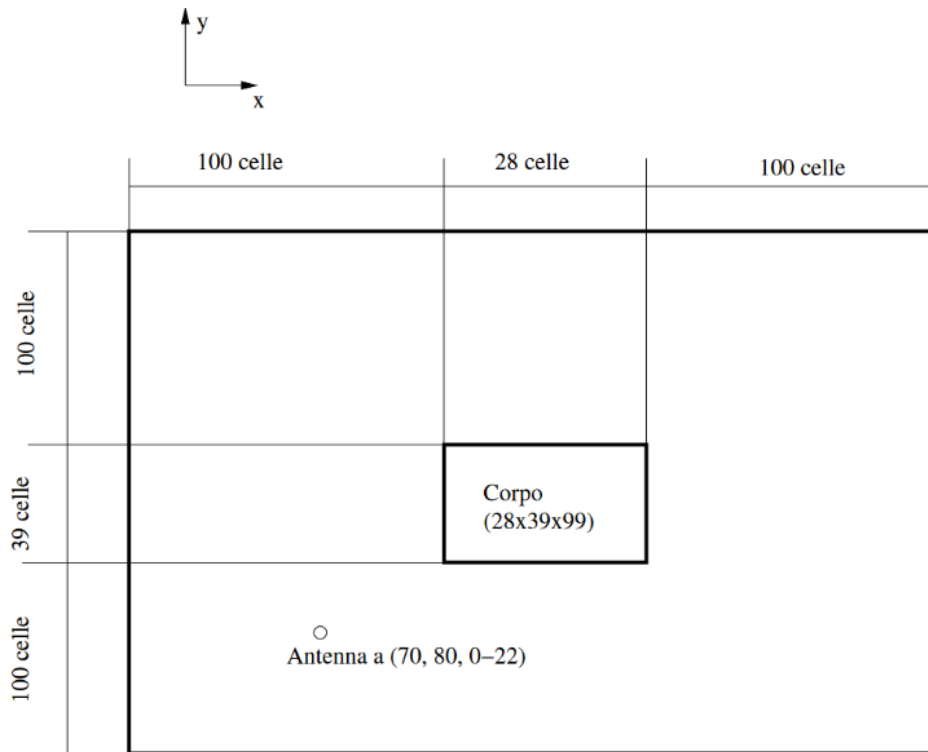


Fig.5.4. Schema dell'ambiente.

L'antenna scelta è un monopolo, orientata lungo l'asse z, asse che si sviluppa dal pavimento verso il soffitto data l'orientazione degli assi scelta.

Il monopolo utilizzato è detto monopolo a quarto d'onda, in cui l'antenna è circa un quarto della lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche.

Come un'antenna a dipolo, un monopolo ha uno schema di radiazione omnidirezionale: irradia con uguale potenza in tutte le direzioni azimutali perpendicolari all'antenna.

La differenza sostanziale tra un dipolo e un monopolo è che quest'ultimo necessita di un "piano" riflettente, in modo da risultare per il trasmettitore o per il ricevitore come un elemento doppio; nelle simulazioni questa il piano riflettente sarà una delle pareti metalliche della scatola che genera l'ambiente riverberante.

La potenza irradiata è metà del dipolo equivalente.

6. CARATTERISTICHE DIELETTICHE DEI TESSUTI AL VARIARE DELLA FREQUENZA

Trattandosi di un modello non omogeneo si deve tenere in considerazione delle diverse componenti tissutali con proprietà dielettriche. [4]

Le due proprietà associate ad ogni frequenza d'interesse sono:

- la conduttività elettrica.
- la permittività relativa.

La conducibilità elettrica è calcolata come:

$$\sigma(\omega) = \sigma_{ac}(\omega) + \sigma_{dc} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r''(\omega) + \sigma_{dc}$$

La permittività relativa complessa è data da

$$\varepsilon_r^*_{eff}(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_n \frac{\Delta \varepsilon_n}{1 + (j\omega\tau_n)^{(1-\alpha_n)}} + \frac{\sigma_{dc}}{j\omega\varepsilon_0}$$

Con:

- $\Delta \varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty$
- ε_s permittività a frequenze per le quali $\omega\tau \ll 1$
- ε_∞ permittività a frequenze per le quali $\omega\tau \gg 1$.

Ulteriori informazioni sono presenti sulla tesi di Alessandro Gravina. [5]

7.RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Le simulazioni effettuate sono state svolte utilizzando un programma sviluppato mediante il linguaggio C.

Le simulazioni sono effettuate con una frequenza sinusoidale (modulante l'impulso) di valore 0.4339 GHz ed inoltre sono state usate sia la conducibilità reale dei mezzi biologici e una conducibilità ridotta pari a cento volte più piccola di quella reale.

In tutte le simulazioni è stato scelto di usare basse frequenze in modo da avere poche attenuazioni, però così facendo si ha che cresce la lunghezza d'onda e di conseguenza aumenta la dimensione del punto focalizzato.

Le simulazioni effettuate con una conducibilità ridotta, molto inferiore a quella reale, sono servite come verifica, dell'effettiva focalizzazione nel punto scelto del braccio.

Le simulazioni sono state suddivise in modo da poter analizzare:

- Un segnale diretto e perdite reali nel braccio
- Un segnale rovesciato e perdite reali nel braccio
- Un segnale diretto e perdite ridotte nel braccio
- Un segnale rovesciato e perdite ridotte

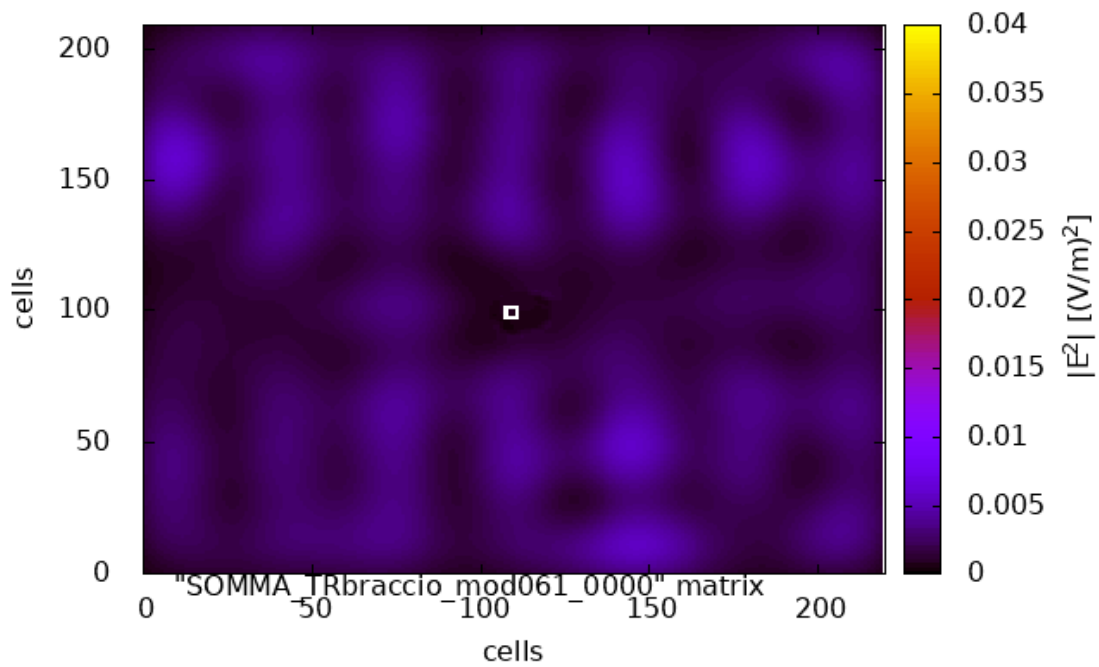


Fig.7.1. Somma quadratica del campo sull'intero intervallo temporale, del segnale diretto, nel caso in cui il braccio ha perdite reali

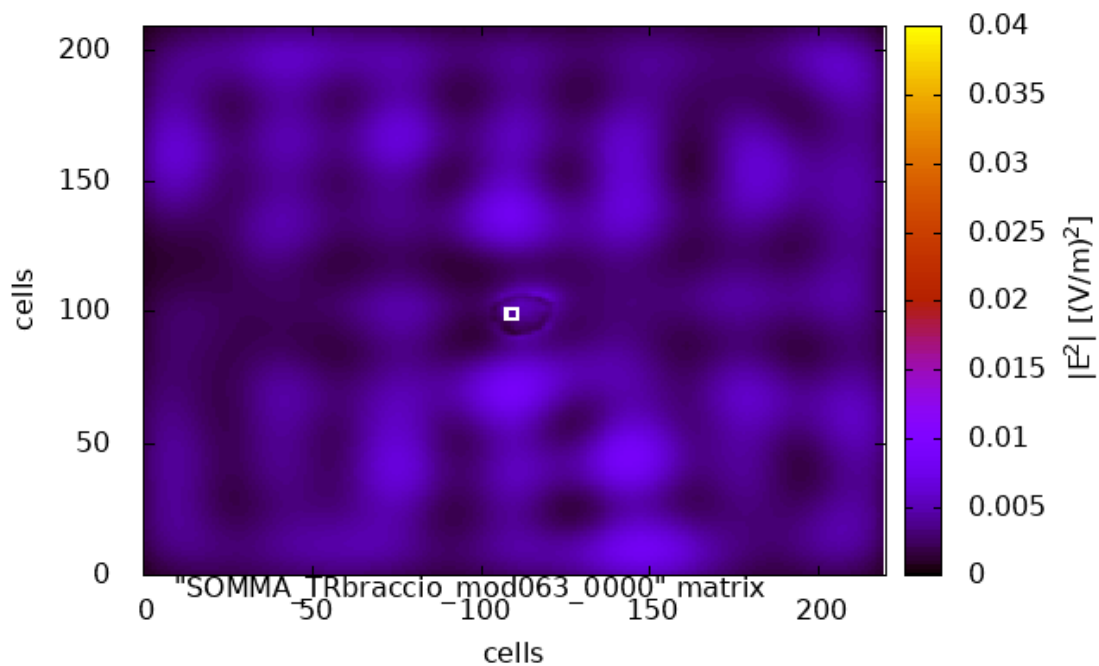


Fig.7.2. Somma quadratica del campo sull'intero intervallo temporale, del segnale diretto, nel caso in cui il braccio ha perdite ridotte.

Osservando le figure 7.1. e 7.2. si nota che i massimi risultano più nitidi, quindi più semplici da rilevare; ecco perché sono state effettuate delle prove con una conducibilità più bassa di quella reale, che ha fatto sì che il braccio dissipi meno energia; come previsto l'onda diretta non focalizza all'interno del braccio.

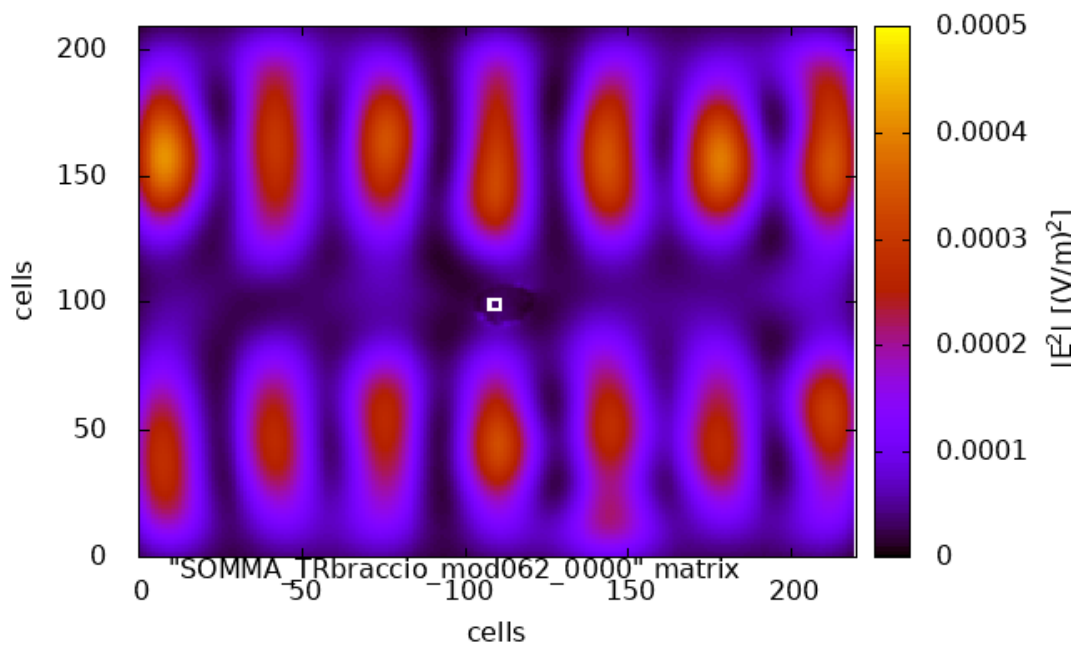


Fig.7.3. Somma quadratica del campo sull'intero intervallo temporale, del segnale rovesciato, nel caso in cui il braccio ha perdite reali

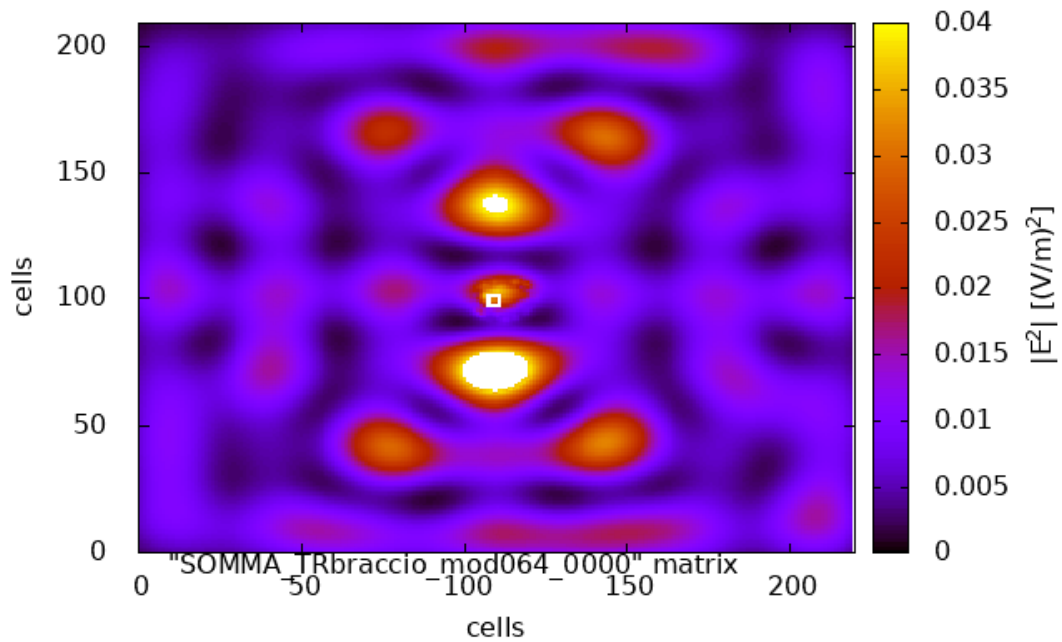


Fig.7.4. Somma quadratica del campo sull'intero intervallo temporale, del segnale rovesciato, nel caso in cui il braccio ha perdite ridotte

Osservando le figure 7.3. e 7.4. si nota che rovesciare il segnale è utile ai fini della focalizzazione, ciò giustifica l'uso della tecnica del time reversal; purtroppo, i modi rimangono simmetrici.

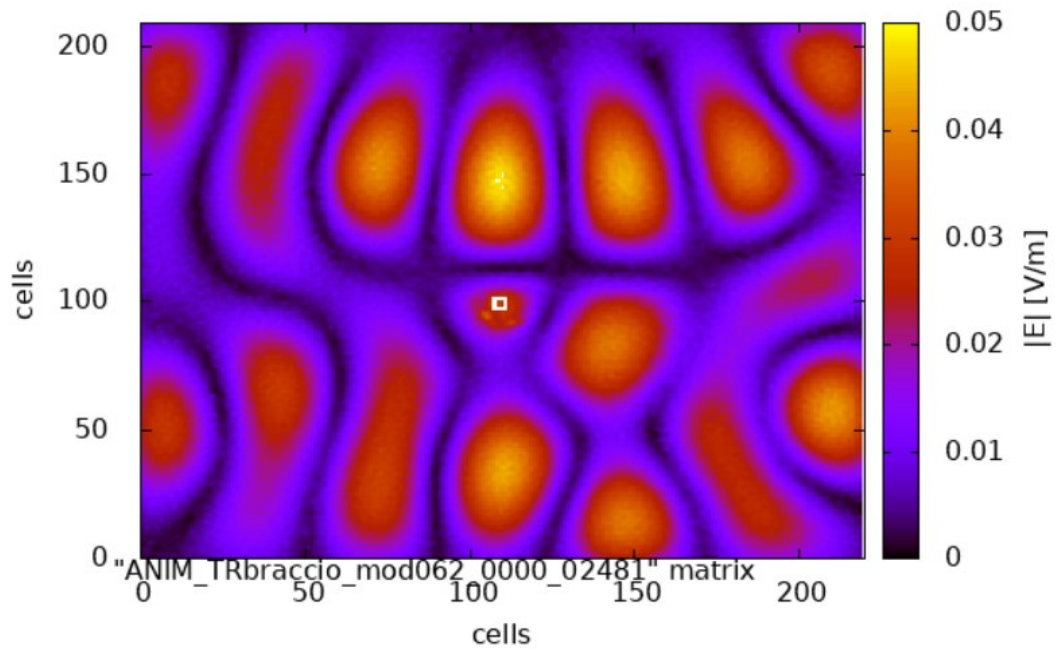


Fig.7.5. Focalizzazione, del segnale rovesciato, all'interno del braccio con perdite reali.

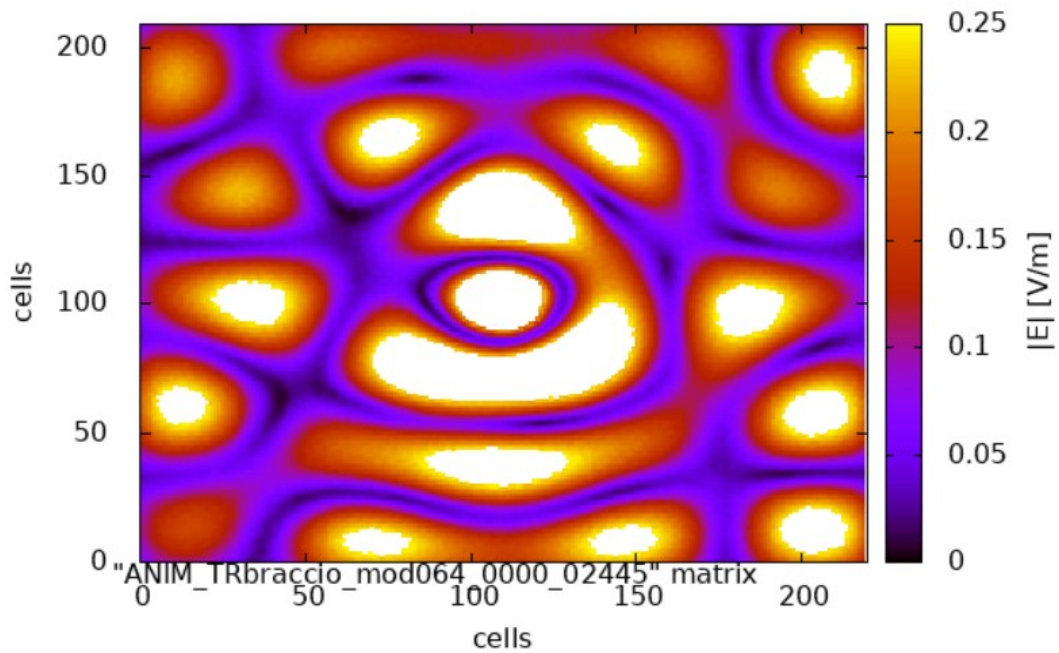


Fig.7.6. Focalizzazione, del segnale rovesciato, all'interno del braccio con perdite ridotte.

Nelle figure 7.5. e 7.6. è possibile osservare la minima focalizzazione nel braccio che avviene negli istanti finali della simulazione.

In questa parte bisogna fare attenzione alle scale di rappresentazione delle lunghezze d'onda che non sono uniformi, è stato scelto di cambiare scala di rappresentazione per poter rendere più agevole osservare le zone focalizzate.

8. CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI

La focalizzazione è una tecnica che è attuabile quando nell'area di lavoro si hanno basse perdite delle onde trasmesse, di conseguenza si hanno molte onde riflesse in una camera molto riflettente, detta camera riverberante. Altrimenti gli effetti di questa tecnica, sui corpi, sono poco percepibili e manovrabili.

L'obiettivo è quello di scaldare in profondità un corpo, in questo caso specifico, un corpo composto di vari tessuti biologici.

I risultati hanno dimostrato la possibilità di una minima focalizzazione all'interno del braccio, ciò significa che l'approccio utilizzato e il codice in C sviluppato sono corretti.

La focalizzazione all'interno del braccio non è scontata in quanto il braccio ha perdite reali che dissipano energia; invece, i modi hanno picchi di energia accumulata che viene sfruttata al meglio quando i modi non sono regolari.

Siccome cavità regolari producono riflessioni regolari, quindi ai fini di migliorare i risultati ed ottenere una maggiore focalizzazione nel corpo, andrebbero inseriti dei diffusori all'interno della camera riverberante.

I diffusori all'interno della camera andrebbero a rompere le simmetrie presenti nelle simulazioni mostrate in precedenza in modo da ottenere dei modi più caotici.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] *Reversal of Electromagnetic Waves and Telecommunication*, G. Lerosey, J. de Rosny, A. Tourin, A. Derode, G. Montaldo and M. Fink and Mrinal K. Sen
- [2] *FDTD high performance computation of reverberation chambers on Blue Gene machines – Seminario Moglie Franco*
- [3] Zubal, I.G., Harrell, C.R, Smith, E.O, Rattner, Z., Gindi, G. and Hoffer, P.B., *Computerized three-dimensional segmented human anatomy, Medical Physics*, 21(2):299-302, 1994.
- [4] Schwan H. P., *Electrical properties of tissue and cells suspensions, Adv. Biol. Med. Phys.* 5 (1957) 147- 209.
- [5] *“ Caratterizzazione elettromagnetica della testa umana per simulazioni FDTD”*, Tesi di Laurea di Alessandro Gravina, UNIVPM, 2019

SOMMARIO

1. INTRODUZIONE	1
-----------------------	---

2. TIME REVERSAL	4
2.1. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL TIME REVERSAL	6
3. CAMERE RIVERBERANTI ELETTROMAGNETICHE.....	8
4. FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN (FDTD)	10
4.1. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN	12
4.2. CONDIZIONI DI ASSORBIMENTO.....	14
5. DESCRIZIONE DELLA GEOMETRIA ANALIZZATA	15
6. CARATTERISTICHE DIELETTRICHE DEI TESSUTI AL VARIARE DELLA FREQUENZA	18
7. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	19
8. CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI.....	25
9. BIBLIOGRAFIA	26