



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**Corso di Laurea in Ingegneria Biomedica**

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

***Simulazione numerica della focalizzazione di campi  
elettromagnetici su arti del corpo umano***

*Numerical simulation of electromagnetic fields focusing in human  
limbs*

RELATORE:

Prof. **Franco Moglie**

TESI DI LAUREA DI:

**Pablo Cecchini**

CORRELATORE:

Prof. **Valter Mariani Primiani**

Anno accademico 2020-2021

# INDICE

## 1. INTRODUZIONE

## 2. TIME REVERSAL

- 2.1 Principio di funzionamento
- 2.2 Sistema lineare

## 3. FDTD

- 3.1 Caratteristiche principali
- 3.2 Implementazione algoritmo di Yee

## 4. CARATTERISTICHE DIELETTRICHE DEI TESSUTI AL VARIARE DELLA FREQUENZA

## 5. RISULTATI

- 5.1 Geometria del corpo e degli arti
- 5.2 Simulazione della gamba
- 5.3 Simulazione del braccio

## 6. CONCLUSIONI

## 7. BIBLIOGRAFIA

# CAPITOLO 1

## **INTRODUZIONE: interazione di campi elettromagnetici con il corpo umano**

Quotidianamente il nostro organismo viene esposto a campi elettromagnetici presenti nell'ambiente circostante (ad esempio campi prodotti dai nostri cellulari, elettrodotti, antenne televisive e antenne radio, elettrodomestici, ...), i quali sono caratterizzati da frequenze e intensità diverse. Gli effetti sul corpo umano, dovuti ad un'esposizione a campi elettromagnetici esterna, dipendono soprattutto dalla loro frequenza, la quale costituisce il parametro che determina maggiormente i meccanismi di interazione tra campo elettromagnetico ed organismo.

Nonostante tali effetti possano essere più o meno pericolosi e il possibile rischio biologico dovuto all'esposizione prolungata debba ancora essere determinato, negli ultimi anni l'impiego di campi elettromagnetici applicato al corpo umano ha trovato molte applicazioni in ambito medico: sia da un punto di vista terapeutico sia da un punto di vista prettamente diagnostico. Tra le principali applicazioni figurano:

- Risonanza magnetico nucleare(NMR): tecnica diagnostica impiegata per ricavare immagini dell'interno del corpo umano e anche per evidenziare funzionalità di movimento di organi interni.
- Radarterapia: tecnica utilizzata in medicina riabilitativa che consiste nel trattamento con microonde al fine di ottenere attraverso calore prodotto un effetto antidolorifico. Le

microonde riescono a penetrare in profondità nei tessuti biologici e sono in grado di provocare un riscaldamento selettivo di una regione di interesse. Gli strumenti utilizzati per la radarterapia sono solitamente costituiti da generatori di campi elettromagnetici alla frequenza di 2.45GHz. Tale tecnica è impiegata soprattutto nel trattamento di malattie reumatiche, con particolare attenzione alle articolazioni.

- Ipertermia oncologica: trattamento che utilizza diverse tecnologie per innalzare selettivamente la temperatura interna di un tessuto neoplastico fino a circa 43-44°C. A questa temperatura infatti le cellule tumorali subiscono un danno irreversibile che gradualmente ne provocherà la morte mediante un meccanismo noto come apoptosi. Questa tecnica, applicata in associazione ai convenzionali trattamenti antitumorali (radioterapia, chemioterapia), determina una regressione del tumore. La strumentazione è costituita essenzialmente da un generatore di radiofrequenze (13.56 MHz, 433MHz) dotato di un set di piastre relative a diverse situazioni di utilizzo e a diversi organi da trattare.

Dunque, risulta di particolare interesse applicativo lo studio relativo alla focalizzazione di campi elettromagnetici sul corpo umano, in diverse regione di interesse.

Questa tesi si pone lo scopo di valutare numericamente (simulazioni FDTD) la possibilità di focalizzare onde

elettromagnetiche nei vari settori e tessuti del corpo, ciò sfruttando la tecnica del Time-Reversal.

## CAPITOLO 2

### TIME-REVERSAL

Il time reversal è una tecnica che sfrutta l'inversione temporale per focalizzare nel tempo onde e segnali in un determinato punto dello spazio. Nonostante tecniche time-reversal vennero introdotte inizialmente per applicazioni nel campo dell'acustica, esse hanno trovato ampio impiego in elettromagnetismo.

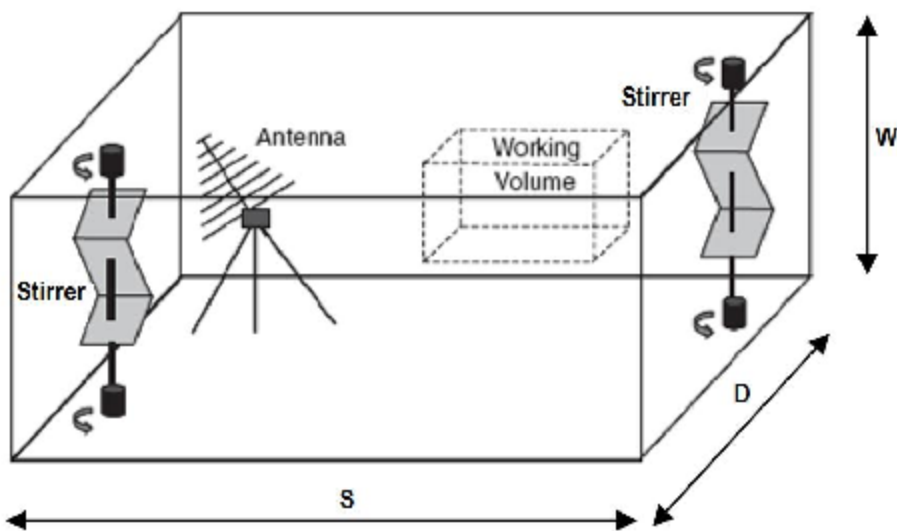
La capacità di tale tecnica viene analizzata nel caso in cui il punto di focalizzazione si trova in un mezzo con perdite all'interno di un ambiente altamente riflettente quale una camera riverberante (Reverberation Chamber RC), ciò consente di generare livelli di campo elettrico ad alta intensità.

Inoltre è richiesta la presenza di sonde in grado di registrare la forma d'onda del campo elettrico all'interno dell'ambiente riverberante.

Nel nostro caso il mezzo con perdite è impiegato per simulare il comportamento di un tessuto biologico, dove le perdite svolgono un ruolo importante (ad esempio per identificare possibili localizzazioni di impianti medicali) [1].

## 2.1 Principio di funzionamento

All' interno dell'ambiente riverberante (Fig.1) è possibile identificare un'antenna log-periodica che permette la trasmissione del segnale di input, che viene poi ricevuto da un'antenna a spirale posizionata all' interno del mezzo. Time reversal può dunque essere considerata come una contro-propagazione delle onde elettromagnetiche all'interno della RC al fine di focalizzare il segnale in un punto dell'ambiente di lavoro.



Structure of reverberation chamber

Fig.1

Si parla di inversione temporale in quanto si fa riferimento alla proprietà di reciprocità dell'equazione d' onda, sfruttata affinché

l'onda si ripropaghi all' interno del mezzo e si rifocalizzi nella posizione iniziale della sorgente.

## 2.2 Sistema Lineare

Il set-up della misurazione può essere rappresentato da un sistema lineare(Fig.2)

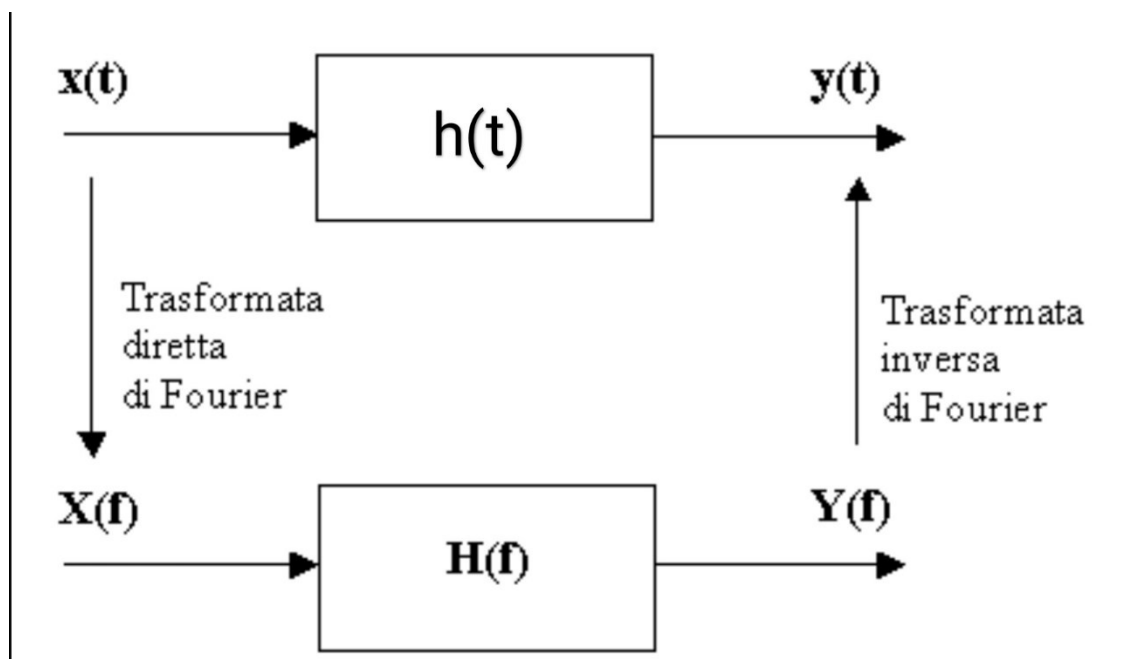


Fig.2

Dove:

$x(t)$  è il segnale di input trasmesso dall'antenna log-periodica

$y(t)$  segnale ricevuto

$$y(t)=x(t)*h(t)$$

applicando il segnale ricevuto invertito  $\mathbf{y}(-\mathbf{t})$  all'antenna di trasmissione possiamo ottenere il segnale ricostruito  $\mathbf{y}_{\text{ric}}$  come

$$\mathbf{y}_{\text{ric}} = \mathbf{y}(-\mathbf{t}) * \mathbf{h}(\mathbf{t})$$

Ciò che ci interessa è la funzione di trasferimento  $\mathbf{H}(\mathbf{f})$  nel dominio della frequenza, ottenuta applicando la trasformata di Fourier alla funzione  $\mathbf{h}(\mathbf{t})$ . La conoscenza della funzione  $\mathbf{H}(\mathbf{f})$  ci permette di conoscere la risposta del sistema a qualsiasi forma d'onda in ingresso.

Possiamo dunque effettuare misure sia nel tempo che nella frequenza e tramite la trasformata di Fourier passare dall'uno all'altro dominio.

## CAPITOLO 3

### ALGORITMO FDTD:

#### Finite-Difference Time-Domain

La tecnica FDTD o metodo di Yee è una tecnica di analisi numerica che permette di trovare soluzioni approssimate di sistemi di equazioni differenziali. In particolare è applicata alle equazioni di Maxwell ai rotori e ciò consente di realizzare algoritmi per le simulazioni di fenomeni elettromagnetici complessi.



## 3.1 Caratteristiche principali

Il metodo numerico FDTD si pone come approccio alternativo all' utilizzo delle equazioni di Maxwell in forma integrale e permette di modellare la propagazione del campo elettromagnetico all' interno del corpo umano in funzione delle caratteristiche morfologiche dei tessuti.

Tale tecnica presenta diversi punti di forza:

- Il metodo FDTD è accurato e robusto, ovvero le sorgenti di errore sono note e possono essere limitate
- Il metodo con cui il campo viene modellato è semplice ed intuitivo
- È un approccio sistematico
- Calcola direttamente la risposta impulsiva di un sistema elettromagnetico
- Lo spazio di calcolo è suddiviso in tante piccole celle e ciò consente di specificare, per ognuna di esse, le caratteristiche del materiale che le costituisce. All' interno di ogni cella i tessuti e i campi elettromagnetici sono approssimati come omogenei.

Ovviamente celle di dimensioni più contenute garantiscono risultati più precisi

- Il metodo FDTD non utilizza l'algebra lineare, quindi consente di superare le limitazioni imposte da essa che richiedono risorse di computer che generalmente dipendono dal quadrato del numero delle celle[2]

## 3.2 Implementazione algoritmo di Yee

Introdotta per la prima volta da Kane S. Yee nel 1966 e sviluppata poi in seguito da Taflovey a metà degli anni '70, l'algoritmo di Yee è un metodo numerico che permette il calcolo del campo all'interno di un corpo discretizzato in piccole celle cubiche (celle di Yee), all'interno delle quali sono supposte costanti le componenti del campo.

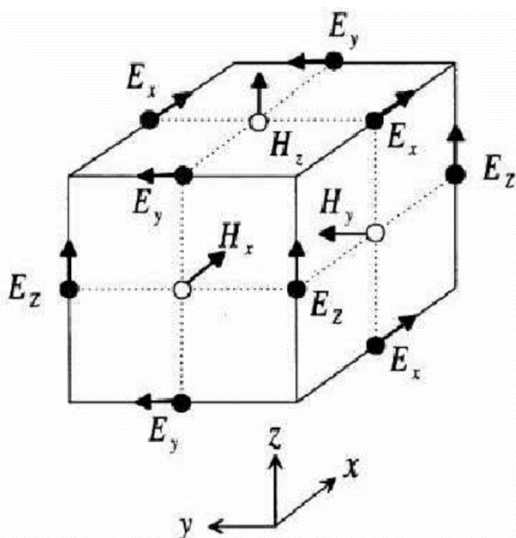


Fig.3 Cella di Yee in cui le componenti del campo elettrico E e del campo magnetico H sono distribuite.

Le equazioni di Maxwell sono poi discretizzate nel dominio del tempo ed ogni derivata è sostituita con il corrispondente rapporto incrementale centrato.

Per implementare tale metodo è dunque necessario stabilire un dominio computazionale, ovvero la regione fisica in cui verrà realizzata la simulazione. In tale regione, sarà necessario specificare il materiale (in genere un dielettrico) di ogni cella elementare. Devono dunque essere specificate permeabilità magnetica, costante dielettrica e conducibilità di ogni singola cella.

Una volta definito il dominio computazionale e il materiale delle varie celle bisogna specificare una fonte, che può consistere in corrente o in un campo elettrico applicato.

Dato che il campo elettrico e magnetico è calcolato direttamente, l'uscita delle simulazioni è di solito il campo E oppure il campo H calcolato in un punto specifico o in una serie di punti. La simulazione permette dunque di valutare l'evoluzione nel tempo dei campi E ed H.

## CAPITOLO 4

# CARATTERISTICHE DIELETTRICHE DEI TESSUTI AL VARIARE DELLA FREQUENZA

Al fine di effettuare simulazioni FDTD su diversi arti del corpo umano, è necessario definire modelli 2D o 3D del corpo umano in cui ciascun elemento (nel nostro caso celle elementari 3D) rappresenti un particolare tessuto biologico e che abbia quindi proprietà dielettriche uniche. Per il calcolo di queste proprietà ci siamo avvalsi dei risultati del lavoro del gruppo coordinato da Camelia Gabriel [3] e di un'applicazione software sviluppata dall'IFAC, Institute for Applied Physics (disponibile online) che permette di calcolare le proprietà dielettriche di tessuti del corpo umano esposti a campi elettromagnetici, per un intervallo di frequenze 10 Hz-100 GHz [4].

In particolare, tali proprietà dielettriche consistono in una coppia di valori: uno per la permittività relativa e uno per la conduttività elettrica ad ogni frequenza d'interesse.

Abbiamo scritto una funzione che, dato il tipo di tessuto e la frequenza, gestisce un database dei parametri (14 parametri sono assegnati a ciascun tessuto) ed è responsabile del calcolo delle proprietà dielettriche.

Queste proprietà comprendono anche diverse quantità derivate: tangente dell'angolo di perdita, la lunghezza d'onda e profondità penetrazione. Maggiori informazioni sul sito IFAC e anche sulla tesi di Alessandro Gravina [5].

# CAPITOLO 5

## RISULTATI

### 5.1 GEOMETRIA DEL CORPO E DEGLI ARTI

Per i modelli 3-D del corpo umano abbiamo fatto riferimento ad un modello che prende il nome di “ The Zubal Phantom, Voxel-made Anthropomorphic Phantoms”. Nel sito di Zubal Phantoms sono forniti diversi set di immagini 3-D del corpo umano [6].

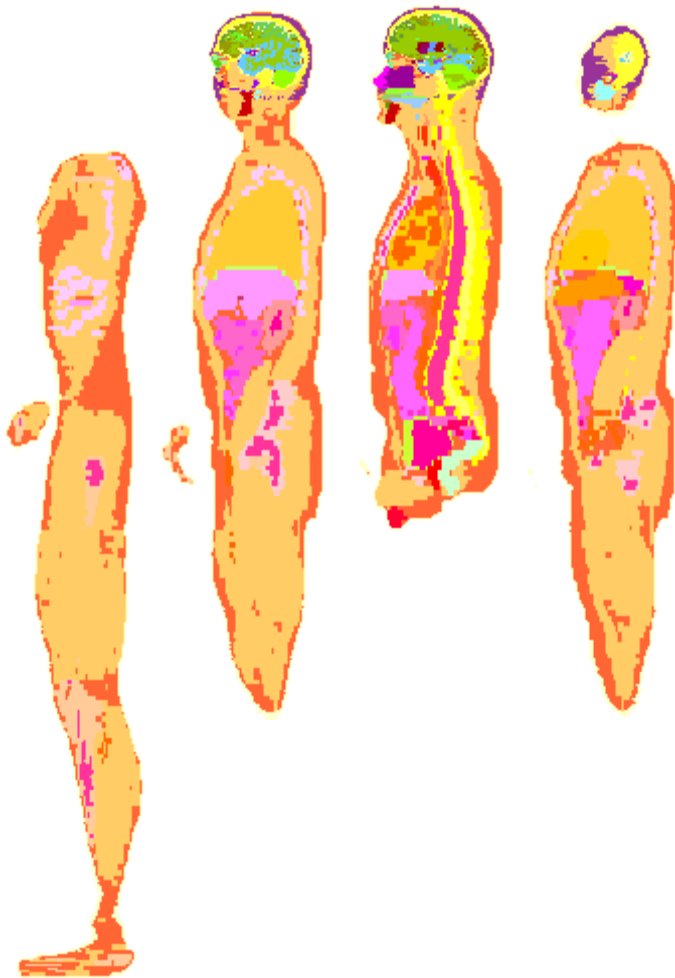


Fig.4 visione nel piano sagittale del modello 3-D

Dal sito citato in precedenza è possibile reperire dunque dati scaricabili per effettuare simulazioni. E' necessario tenere in considerazione che ad ogni tessuto è associato un numero (far attenzione che i numeri cambiano in base alla mappa del corpo presente sul sito e a cui facciamo riferimento).

Da questi modelli 3-D dell'intero corpo umano abbiamo poi estratto i modelli geometrici di braccio e gamba.

Immagine del braccio:

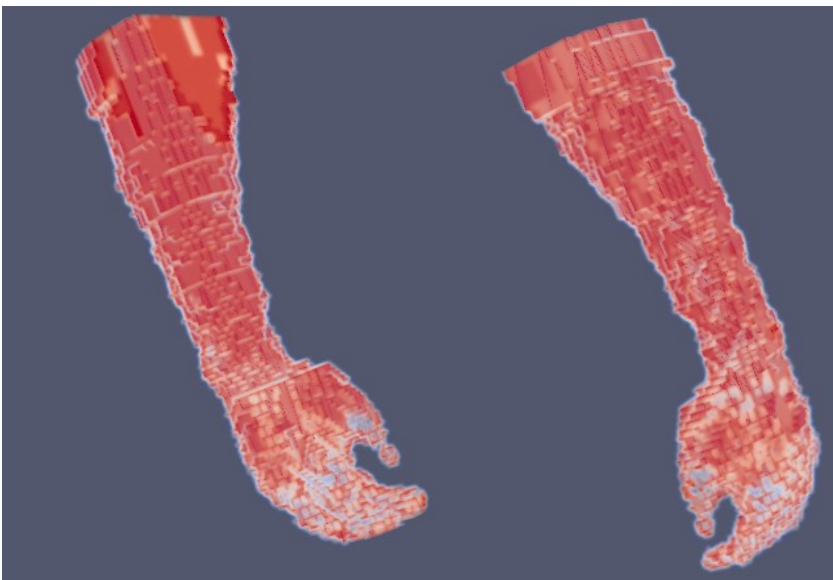


Fig.5 Viste diverse della

parte del braccio simulata

Dimensioni del braccio lungo assi x-y-z rispettivamente 28-39-99 celle. Intorno alla dimensione del braccio sono state poi aggiunte altre 200 celle per completare il dominio di calcolo.

L'antenna, che è un monopolo lungo 22 celle, si trova in posizione x:70 y:80 z:0 (in celle) all'interno del dominio di calcolo.

Immagini della gamba:



Fig.6 Viste

diverse della parte di gamba simulata

Dimensioni gamba lungo assi x-y-z rispettivamente 36-68-91 celle, a cui vanno aggiunte altre 200 celle per definire il nostro dominio di calcolo, in cui la gamba è posta al centro.

L'antenna, analogamente a quanto visto per il braccio, si trova in posizione x:70 y:80 z:0 (in celle) all'interno del dominio di calcolo.

Queste geometrie così definite sono fornite in ingresso per effettuare simulazioni FDTD. Il programma, attraverso la funzione descritta nel capitolo 4 , assegna ad ogni cella FDTD le corrispondenti costanti dielettriche e conducibilità.

## 5.2 SIMULAZIONI DELLA GAMBA

Di seguito il risultato della simulazione FDTD effettuata per focalizzare onde elettromagnetiche in un punto all'interno del braccio (il cui modello geometrico è descritto precedentemente).

Per aumentare lo spessore di penetrazione e rendere più evidente la focalizzazione abbiamo modificato la conducibilità calcolata precedentemente dividendola per 100. Inoltre per aumentare la lunghezza elettrica del dominio e quindi aumentare il numero dei modi e la caoticità, esternamente invece dell'aria abbiamo usato un materiale con costante dielettrica relativa  $\epsilon_r=9$  e conducibilità nulla.

Nella figura 7 è rappresentata la mappa del modulo del campo elettrico in una sezione orizzontale applicando l'impulso diretto e nella figura 8 applicando in ingresso la componente lungo z del segnale rovesciato presa nel punto dove si vuole focalizzare.



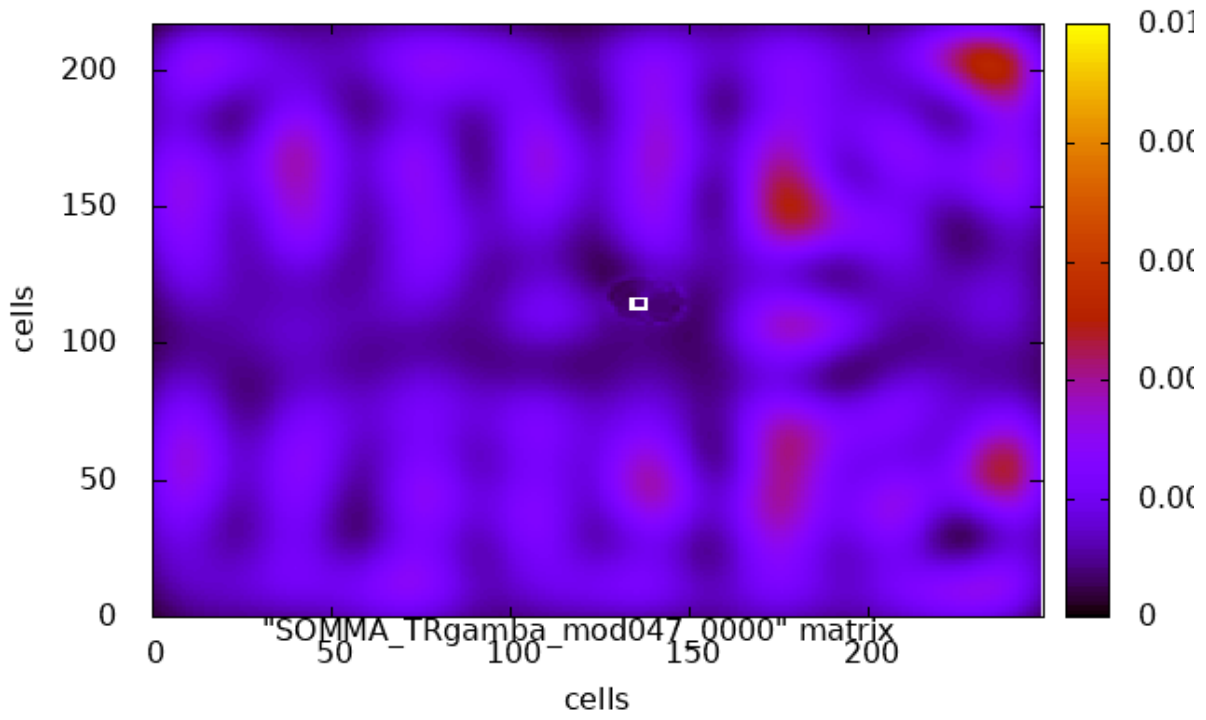


Fig.7

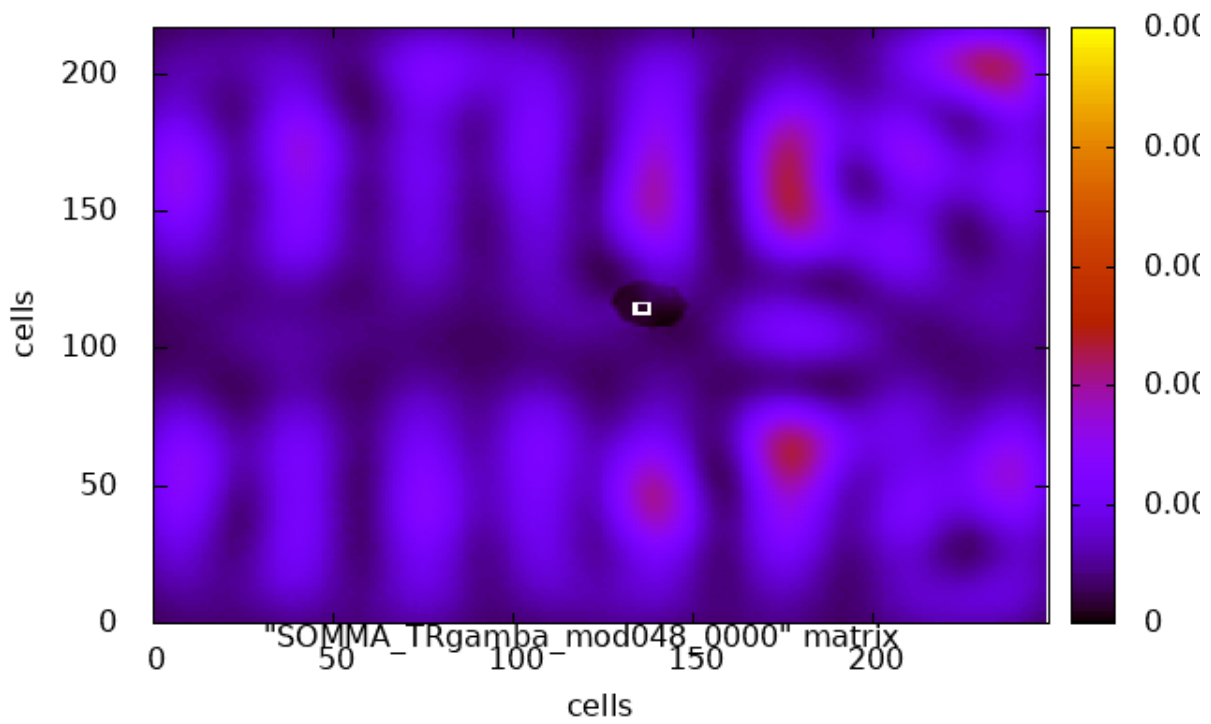


Fig.8

## 5.3 SIMULAZIONI DEL BRACCIO

Di seguito il risultato della simulazione FDTD effettuata per focalizzare onde elettromagnetiche in un punto all'interno del braccio (il cui modello geometrico è descritto precedentemente).

Per aumentare lo spessore di penetrazione e rendere più evidente la focalizzazione abbiamo modificato la conducibilità assegnando a tutti i tessuti il valore di  $\sigma=5 \times 10^{-5}$  S/m. Inoltre per aumentare la lunghezza elettrica del dominio e quindi aumentare il numero dei modi e la caoticità, esternamente invece dell'aria abbiamo usato un materiale con costante dielettrica relativa  $\epsilon_r=9$  e conducibilità nulla.

Nella figura 9 è rappresentata la mappa del modulo del campo elettrico in una sezione orizzontale applicando l'impulso diretto e nella figura 10 applicando in ingresso la componente lungo z del segnale rovesciato presa nel punto dove si vuole focalizzare.

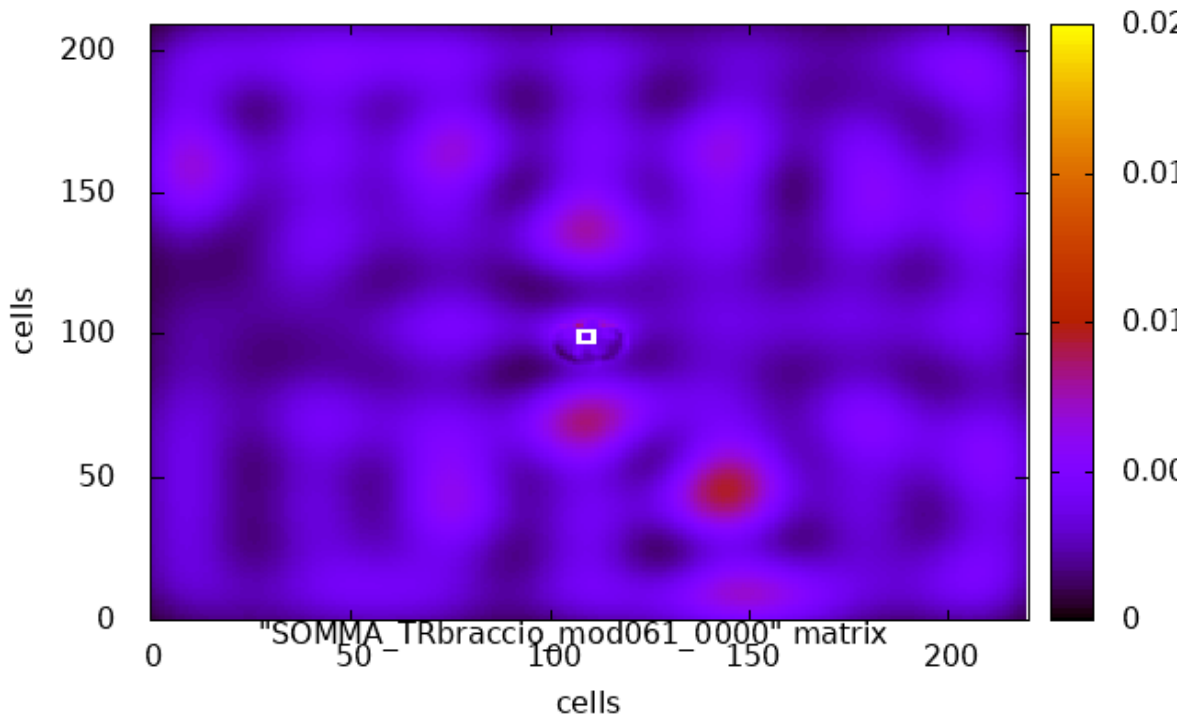


Fig.9

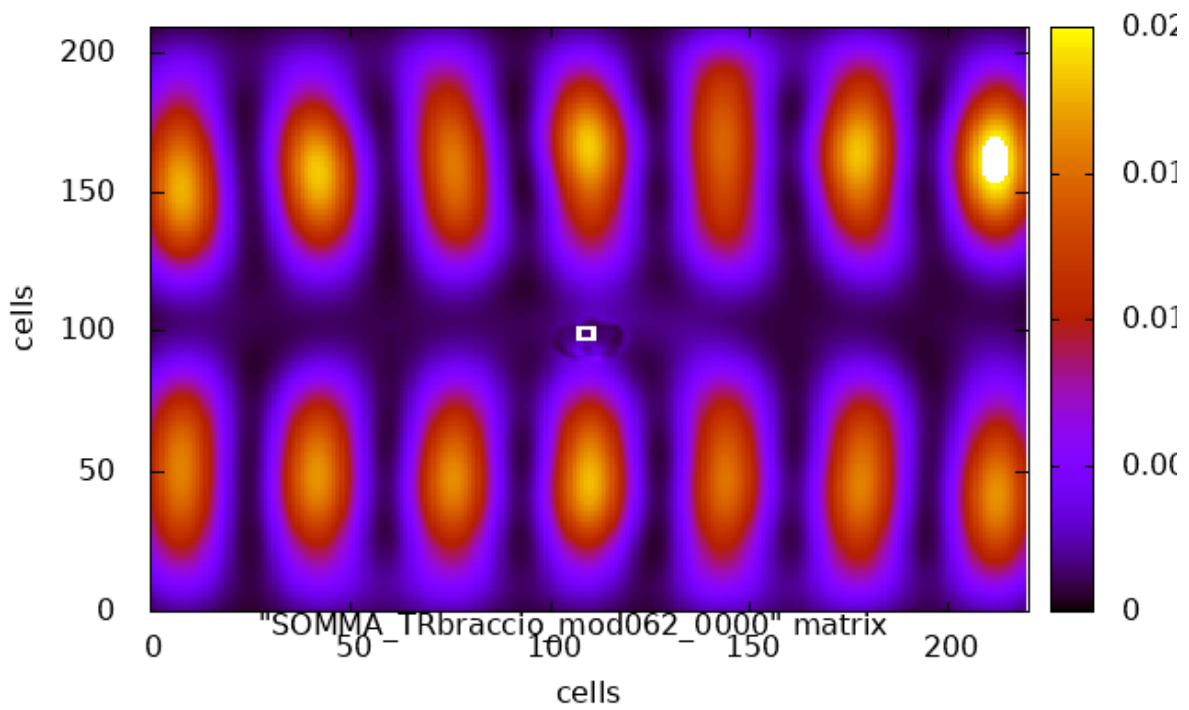


Fig.10

# CAPITOLO 6

## CONCLUSIONI

Notiamo che per entrambe le simulazioni abbiamo una buona focalizzazione e per avere ciò abbiamo ridotto artificialmente la conducibilità per aumentare lo spessore di penetrazione.

Inoltre è possibile osservare che, prendendo una parte di corpo (nel nostro caso parte dell'avambraccio e parte della gamba) più piccola rispetto alla testa, abbiamo riscontrato difficoltà nel focalizzare con conducibilità reale dei tessuti.

Nel complesso abbiamo comunque una buona focalizzazione e il metodo può essere migliorato. Ad esempio, un miglioramento potrà derivare dall'aggiunta di un diffusore posto in maniera obliqua rispetto alle pareti della cavità, in modo da rompere la simmetria dei modi (simmetria evidente nella figura 10) e aumentarne la caoticità.

# CAPITOLO 7

## BIBLIOGRAFIA

[1] “Time Reversal in Reverberation Chambers: Applications to Lossy Media”, A. T. Frisco, L. Bastianelli, F. Moglie, V. Mariani Primiani, Proceeding of IEEE EMCS , Long Beach(CA), 2018

[2] “Elecromagnetic Simulation using the FDTD method”, Dennis M. Sullivan

[3] S.Gabriel, R.W.Lau and C.Gabriel: “The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz”, Phys. Med. Biol. 41 (1996)

[4] D.Andreuccetti, R.Fossi and C.Petrucci: An Internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz - 100 GHz. IFAC-CNR, Florence (Italy), 1997. Based on data published by C.Gabriel et al. in 1996.  
[Online]. Available: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>

[5]” Caratterizzazione elettromagnetica della testa umana per simulazioni FDTD”, Alessandro Gravina, UNIVPM, 2019

[6] 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.