UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Tecnica di inversione temporale per la focalizzazione di campi elettromagnetici sul corpo umano in funzione della polarizzazione del segnale ricevuto

Time reversal technique for focusing of electromagnetic fields on human body, as function of the polarization of the sona signal

Relatore:

Prof. Valter Mariani Primiani

Tesi di Laurea di:

Cristina Lamenza

Correlatore:

Prof. Franco Moglie

A.A. 2021/2022

Indice

Introduzione 5

1. Time Reversal 7

1.1. Time Reversal in un sistema lineare tempo-invariante, processo di ricostruzione 9

1.2. Time Reversal in ambiente caotico: camera riverberante..... 11

2. Finite-Differences Time-Domain 14

3. Mappa di Ella 16

4. Simulazioni effettuate 18

4.1. Simulazioni sulla di Testa Ella 20

4.1.1. Simulazione 119 - Segnale ricevuto lungo z 20

4.1.2. Simulazione 124 - Segnale ricevuto lungo x 23

4.1.3. Simulazione 125 - Segnale ricevuto lungo y..... 26

4.1.4. Simulazione 126 - Segnale ricevuto considerando somma delle tre componenti x, y e z. 28

4.2. Simulazioni sul ginocchio di Ella 31

4.2.1. Simulazione 131 - Segnale ricevuto lungo x 33

4.2.2. Simulazione 132 - Segnale ricevuto lungo y..... 36

4.2.3. Simulazione 133 - Segnale ricevuto lungo z..... 38

4.2.4. Simulazione 134 - Segnale ricevuto dato dalla somma di x, y e z... 40

5. Conclusioni 43

Bibliografia 44

Indice figure

Figura 1: Rappresentazione funzionamento sistema lineare 9
Figura 2: Rappresentazione segnale inviato e segnale ricevuto 10
Figura 3: Ricostruzione del segnale Original Pulse 10
Figura 4: Input Pulse 11
Figura 5: Camera Riverberante 12
Figura 6: Rappresentazione della caoticità nella camera riverberante 12
Figura 7: Schema set-up camera riverberante 12
Figura 9: Sonda di campo circolare in aria 14
Figura 10: Sonda campo circolare posizionata nella soluzione salina 14
Figura 11: Cella di Yee 15
Figura 12: Mappa di Ella 18
Figura 13: Testa di Ella 20
Figura 14: segnale originale inviato 20
Figura 15: Segnale ricevuto considerando componente z 21
Figura 16: Segnale inviato e segnale ricostruito 21
Figura 17: Segnale inviato sovrapposto al segnale ricostruito 22
Figura 18: animazione simulazione 118_119, frame 1246 22
Figura 19:animazione simulazione 118_119, frame 1247 23
Figura 20: Segnale ricevuto considerando componente x 24
Figura 21: Segnale inviato e segnale ricostruito 24
Figura 22: Segnale ricostruito sovrapposto al segnale originale 25
Figura 23: frame 900, animazione simulazione 125 25
Figura 24: ingrandimento frame 900, animazione simulazione 125 26
Figura 25: Segnale ricevuto considerando componente y 26
Figura 26: Segnale ricevuto considerando componente x 27
Figura 27: Sovrapposizione del segnale originale con il segnale ricostruito 27
Figura 28: frame 900 simulazione 126 con segnale lungo y 28
Figura 29: ingrandimento frame 900, simulazione 126 28
Figura 30: Segnale originale e segnale ricevuto 29
Figura 31: Segnale originale e segnale ricostruito 29
Figura 32: Sovrapposizione segnale originale e segnale ricostruito 30
Figura 33: Simulazione 126, frame 900 30
Figura 34: Ingrandimento frame 900, simulazione 126 31
Figura 35: Gamba di Ella 32
Figura 36: Frame 900, simulazione 130 33
Figura 37: Segnale originale e segnale ricevuto 33
Figura 38: Segnale originale e segnale ricostruito 34
Figura 39: Segnale originale sovrapposto al segnale ricostruito 34
Figura 40: Simulazione 131, frame 949 35
Figura 41: Ingrandimento frame 949, simulazione 131 35
Figura 42: Simulazione 131, frame 1100 35
Figura 43: Segnale originale e segnale ricevuto 36
Figura 44: Segnale originale e segnale ricostruito 36
Figura 45: Segnale ricostruito sovrapposto al segnale originale 37
Figura 46: Simulazione 132, frame 926 37
Figura 47: Ingrandimento frame 926 38

Figura 48: Segnale originale e segnale ricevuto 38
Figura 49: Segnale originale e segnale ricostruito 39
Figura 50: Segnale ricostruito sovrapposto al segnale originale 39
Figura 51: Simulazione 133, frame 700 40
Figura 52: Ingrandimento frame 700, simulazione 133 40
Figura 53: Segnale originale 41
Figura 54: Segnale originale e segnale ricostruito 41
Figura 55: Segnale ricostruito sovrapposto a segnale originale 42
Figura 56: Simulazione 134, frame 700 42
Figura 57: Ingrandimento frame 700, simulazione 134 43

Introduzione

L'onda elettromagnetica è una perturbazione di natura simultanea elettrica e magnetica che si propaga nello spazio e che può trasportare energia da un punto all'altro, ed è dovuta alla vibrazione contemporanea del campo elettrico e del campo magnetico attorno alla loro posizione di equilibrio, in cui si ha assenza di perturbazione.

Il processo di focalizzazione delle onde elettromagnetiche trova importanti applicazioni nel campo medico. Una di queste è il trattamento dei tumori in quanto l'aumento di temperatura è efficace unita alla radioterapia e chemioterapia, come meglio spiegato nei capitoli che seguono.

Questa tesi si pone l'obiettivo specifico di trattare la focalizzazione delle onde elettromagnetiche in un punto all'interno della testa e nel ginocchio con la tecnica del Time Reversal TR (inversione temporale).

Rispetto ai lavori precedenti questa tesi analizza l'influenza della polarizzazione del segnale ricevuto nel punto interno al corpo umano che poi sarà rovesciato e ridato in ingresso all'antenna trasmittente. In precedenza, si usava solo la componente cartesiana diretta lungo z, E_z. Questa tesi analizza tutte e tre le componenti cartesiane di campo e la loro somma.

Più precisamente come il Time Reversal influenza fortemente la focalizzazione delle onde elettromagnetiche nel corpo umano, andando a migliorare la sua efficienza. Infatti, l'inversione del segnale ricevuto migliora la forma del segnale ricostruito, rendendo la sua forma più fedele a quella del segnale originale e permettendo di concentrare il campo elettromagnetico in una specifica posizione e in uno specifico istante di tempo.

Si osserveranno poi delle simulazioni che mostrano, tramite animazione, l'interazione del campo elettromagnetico con il corpo umano. Simulazioni ottenute mediante l'applicazione del metodo numerico Finite-Differences Time-Domain.

È un metodo il cui algoritmo viene scritto sotto forma di codice in linguaggio C ed eseguito su un computer ad elevate prestazioni che si trova in Francia al CEA.

1. Time Reversal

Il Time Reversal, o inversione temporale, è la tecnica utilizzata per migliorare la focalizzazione delle onde elettromagnetiche. Tale tecnica sfrutta la contro-propagazione delle onde per focalizzare l'energia della stessa in una specifica posizione e in un determinato istante temporale [1].

L'effetto delle interazioni delle onde elettromagnetiche, di appropriata frequenza e lunghezza d'onda, con il corpo umano, trova applicazione nella medicina, in particolare, nell'ipertermia, che consiste nel riscaldamento del tessuto malato.

Come noto [2], la massa tumorale è caratterizzata da una scarsa circolazione sanguigna, che limita la dispersione di calore. Il surriscaldamento dei tessuti indotta dalle onde elettromagnetiche opportunamente focalizzate provoca di conseguenza il danneggiamento e distruzione della cellula tumorale.

Risulta pertanto evidente la necessità di migliorare la capacità di focalizzare le onde elettromagnetiche così da non danneggiare il tessuto sano e colpire esclusivamente quello malato.

La tecnica del Time Reversal nasce in realtà nel campo dell'acustica, ma si è dimostrato con successo la possibilità di applicarlo anche nel campo dell'elettromagnetismo. Tuttavia, la condizione necessaria per la sua applicazione è l'invarianza al Time Reversal delle equazioni fisiche che governano l'elettromagnetismo.

L'utilizzo del Time Reversal prevede l'applicazione dell'operatore invertente.

$$t \rightarrow -t$$

Invertendo la direzione temporale dell'onda si ha:

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t) \rightarrow \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},-t)$$
$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t) \rightarrow -\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},-t)$$
$$\rho(\boldsymbol{r},t) \rightarrow \rho(\boldsymbol{r},-t)$$
$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{r},t) \rightarrow -\boldsymbol{J}(\boldsymbol{r},-t)$$

Dove:

H: vettore campo magnetico [A/m]

E: vettore campo elettrico [V/m]

ρ: densità di carica elettrica [C/m^2]

J: densità di corrente elettrica [A/m^2]

Un'equazione è detta invariante al Time Reversal se la versione "invertita" della sua soluzione è anche una soluzione valida delle equazioni fisiche [3].

Le equazioni di Maxwell in un mezzo lineare con permettività $\varepsilon(\boldsymbol{r})$ e permeabilità $\mu(\boldsymbol{r})$ possono essere scritte come:

$$\nabla\big(\varepsilon(\boldsymbol{r})\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)\big) = \rho(\boldsymbol{r},t)$$

$$\nabla(\mu(\boldsymbol{r})\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t) = 0$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t) = -\mu(\boldsymbol{r})\frac{\partial \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t) = \varepsilon(\boldsymbol{r})\frac{\partial \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} + \boldsymbol{J}(\boldsymbol{r},t)$$

Applicando l'operatore del Time reversal, (formula 1), si ottiene:

$$\nabla\big(\varepsilon(\boldsymbol{r})\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},-t)\big) = \rho(\boldsymbol{r},-t)$$

$$-\nabla(\mu(\boldsymbol{r})\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},-t) = 0$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},-t) = -\mu(\boldsymbol{r})\frac{-\partial \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},-t)}{-\partial t}$$

$$-\nabla \times \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},-t) = \varepsilon(\boldsymbol{r})\frac{\partial \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},-t)}{-\partial t} - \boldsymbol{J}(\boldsymbol{r},-t)$$

Si è dimostrato matematicamente che le ultime quattro equazioni sono identiche alle quattro precedenti [3].

1.1. Time Reversal in un sistema lineare tempo-invariante, processo di ricostruzione

Per descrivere il processo di inversione temporale elettromagnetica consideriamo un sistema lineare tempo invariante (sistema LTI): l'uscita è proporzionale all'ingresso fornito al sistema, sia nel dominio del tempo (t) e nella pulsazione (ω).

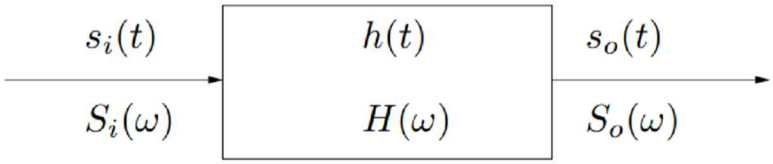

Figura 1: Rappresentazione funzionamento sistema lineare

Dal punto di vista applicativo il processo di ricostruzione del segnale avviene in due fasi.

Prima di procedere alla descrizione è importante sapere che un'antenna è un apparato in grado di captare o irradiare onde elettromagnetiche da o verso lo spazio libero, nel primo caso si parla di antenna ricevente, nel secondo di antenna trasmittente [4].

FASE 1: Generazione Sona Signal

Nel caso del Time Reversal si usa chiamare il segnale di ingresso, trasmesso da un'antenna trasmittente, Original Pulse, il quale viene raccolto da un'antenna ricevente e il segnale ricevuto prende il nome di Sona Signal (dalle applicazioni di questa tecnica alle ricostruzioni di immagini sonar). La Figura 2 descrive il processo di invio e di ricezione delle due antenne con le relative forme d'onda del segnale trasmesso e del segnale ricevuto.

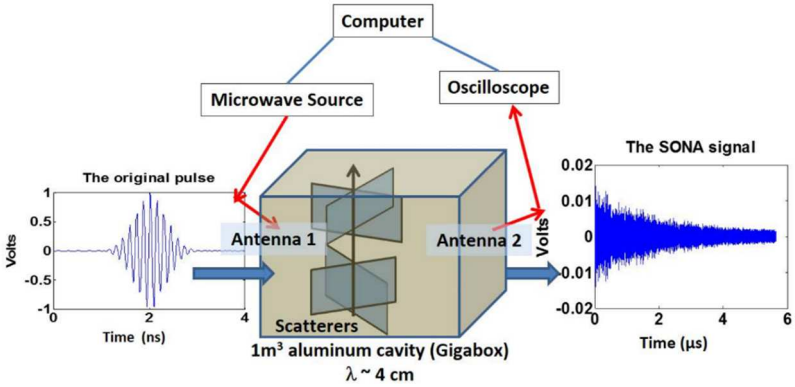

Figura 2: Rappresentazione segnale inviato e segnale ricevuto [5]

Original Pulse è il segnale input, in questo caso rappresentato da $s_i(t)$ e il segnale output, Sona Signal, è rappresentato da $s_i(t)$.

$$s_o(t) = s_i(t) \otimes h(t)$$

$$h(t) = IFT[S_{21}]$$

Dove $h(t)$ è la risposta all'impulso e "$\otimes$" indica la convoluzione del tempo [6].

IFT indica l'inversa della trasformata di Fourier, e S_{21} è il coefficiente di trasmissione tra l'antenna ricevente e l'antenna trasmittente.

<u>FASE 2:</u>

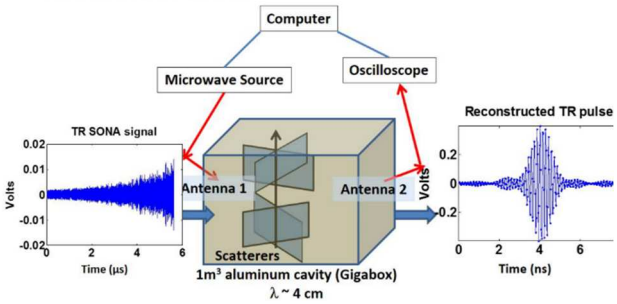

Figura 3: Ricostruzione del segnale Original Pulse [5]

La Figura 3 illustra il processo di ricostruzione del Original Pulse attraverso l'operatore di inversione temporale $-t$.

Il segnale ottenuto nella fase uno, Sona Signal, viene invertito mediante l'applicazione dell'operatore di inversione temporale $-t$. Otteniamo quindi $s_o(-t)$, cioè il Time Reversed Sona Signal.

Quest'ultimo viene trasmesso dall'antenna 1 rappresentata in Figura 4 e ricevuto dall'antenna 2. Il segnale output dell'antenna ricevente è il segnale ricostruito dell'Original Pulse [7], sr(t), rappresentato dalla seguente relazione:

$$s_r(t) = s_o(-t) * h(t)$$

1.2. Time Reversal in ambiente caotico: camera riverberante

Il Time Reversal è effettuato nelle nostre simulazioni in una camera riverberante. Una camera schermata le cui pareti non assorbono, bensì riflettono, le onde incidenti. Questo fenomeno amplifica l'intensità del campo elettromagnetico a partire da un segnale input di moderata potenza [7].

La Figura 4 illustra la forma d'onda del segnale inviato nel corso delle simulazioni. Trattasi di un segnale sinusoidale modulato da un impulso Gaussiano con una frequenza centrata a 2.45 GHz.

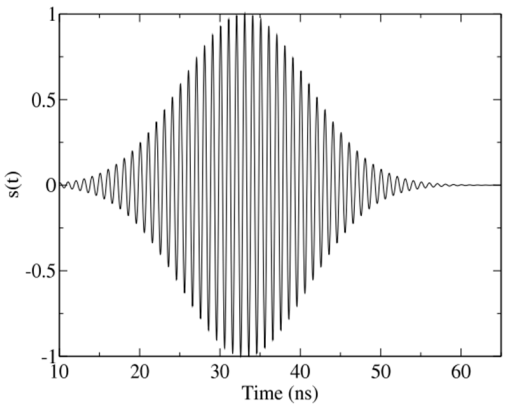

Figura 4: Input Pulse

La Figura 5, di seguito riportata, mostra la camera riverberante. La peculiarità di questa camera è quella di generare un campo elettromagnetico statisticamente uniforme, isotropo

e depolarizzato. Conseguenza diretta della “caoticità” creata dalla capacità di riflessione elevata delle pareti.

Figura 5: Camera Riverberante

Una rappresentazione della “caoticità” creata dalla capacità di riflessione elevata delle pareti della camera riverberante è schematizzata nella figura seguente

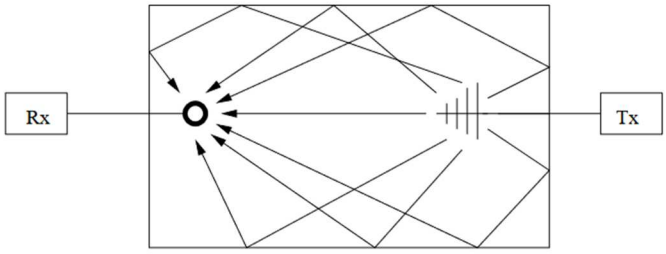

Figura 6: Rappresentazione della caoticità nella camera riverberante

Di seguito viene illustrato lo schema funzionale della camera riverberante (Figura 7).

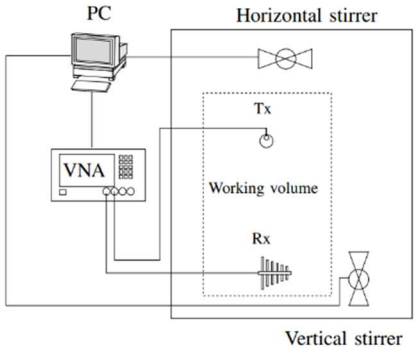

Figura 7: Schema set-up camera riverberante

Si possono individuare i seguenti componenti principali:

- volume di lavoro: un ambiente distinto le cui dimensioni variano da camera a camera, dipendendo dalle frequenze, dalla posizione degli Stirrer e delle antenne. L'importante è mantenere una distanza maggiore di $\lambda/4$ da tutti questi oggetti metallici.

- uno Stirrer verticale e uno orizzontale: una grande lamina metallica piegata la cui funzione è quella di cambiare le condizioni al contorno e rendere l'ambiente elettromagnetico statisticamente uniforme e isotropo all'interno del volume di lavoro [1]. Tale dispositivo può anche essere fatto ruotare. Nel nostro caso è presente un solo Stirrer che rimane fermo e opera come diffusore.

- Un computer utilizzato per l'acquisizione dei dati misurati ed il controllo dell'eventuale motore dello Stirrer.

- Un VNA: dispositivo per l'acquisizione del coefficiente di trasmissione S_{21}, menzionato nel paragrafo precedente.

- L'antenna trasmittente: un'antenna a monopolo di tipo lineare, composta da un solo elemento verticale che esce da una delle pareti della scatola (Figura 8).

Figura 8: Antenna monopolo usata in uno schermo di piccole dimensioni [8]

- L'antenna ricevente: sonda di campo circolare, indicata anche come loop, (Figura 9). Ha un diametro 6 cm ETS-Lindgren 7405 ed è una sonda passiva a campo vicino progettata come ausilio diagnostico per localizzare e caratterizzare le sorgenti di emissioni di campo elettrico e di campo magnetico e per essere utilizzata con un dispositivo di analisi del segnale come un oscilloscopio o un analizzatore di spettro [1]. La sua frequenza di risonanza è di 790 MHz [1].

Figura 9: Sonda di campo circolare in aria

Nella Figura 9 l'antenna è localizzata in aria, mentre durante la simulazione la stessa, è inserita in una soluzione salina, che serve a simulare un mezzo biologico e quindi che comporta perdite [7]. (Vedi Figura 10).

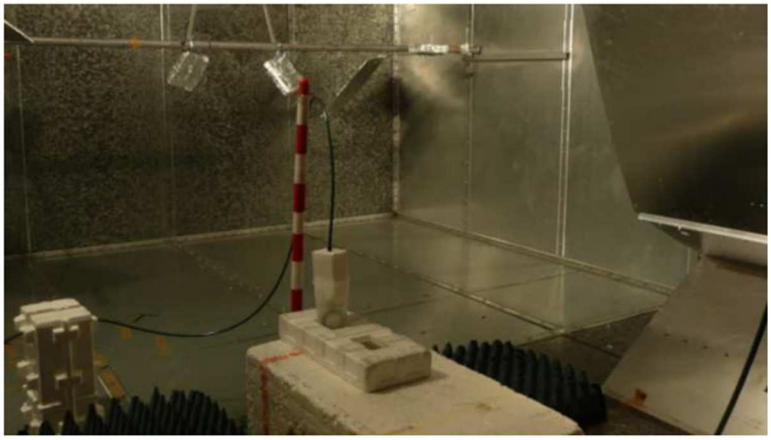

Figura 10: Sonda campo circolare posizionata nella soluzione salina

2. Finite-Differences Time-Domain

Per effettuare le nostre simulazioni e analizzare il Time Reversal come tecnica di focalizzazione delle onde elettromagnetiche dobbiamo sfruttare uno dei possibili metodi numerici.

Essi permettono, infatti, di fare una valutazione teorica accurata della distribuzione del campo elettromagnetico e consentono di valutare molteplici situazioni di esposizione in maniera relativamente semplice.

Uno dei metodi numerici più utilizzati e che abbiamo utilizzato nelle simulazioni è il metodo del Finite-Differences Time-Domain, indicato con il suo acronimo FDTD, usato quando si ha un campo elettromagnetico radiato da un'antenna in presenza di dielettrici complessi.

Il Finite-Differences Time-Domain si basa sulla soluzione, nel dominio del tempo, delle equazioni di Maxwell, delle quali si riporta un esempio di seguito:

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\mu \frac{d\boldsymbol{H}}{dt}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \varepsilon \frac{d\boldsymbol{E}}{dt} + \sigma \boldsymbol{E}$$

Questo metodo numerico è anche conosciuto con il nome di "metodo di Yee". Esso sfrutta infatti l'algoritmo di Yee, descritto nella tesi di Francesco Dragano [9], che rende il metodo del FDTD semplice anche in caso di geometrie complesse.

In particolare, queste equazioni vengono discretizzate nello spazio e la loro soluzione consiste nella divisione della regione di analisi in una griglia di nodi, dal quale scaturisce il principio della cella di Yee:

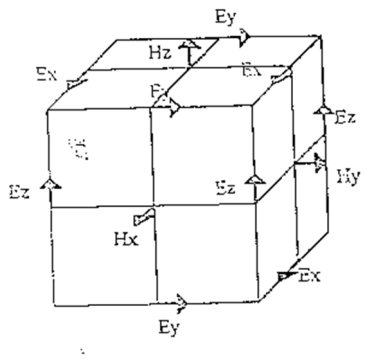

Figura 11: Cella di Yee

Il metodo FDTD è un codice scritto in linguaggio C e la sua esecuzione richiede un computer ad elevate prestazioni, nel nostro caso, è estato eseguito nel supercomputer IRENE-KNL del "Commissariat à l'energie atomique et aux energies alternatives" (CEA), France.

Per applicare l'algoritmo del metodo FDTD è necessario, sempre secondo la stessa fonte, definire:

a. il dominio computazionale, ovvero la regione fisica di dove avviene la simulazione, nel nostro caso coincide con l'ambiente riverberante in cui andiamo a inserire il corpo in cui focalizzare il campo elettromagnetico.

b. le caratteristiche del materiale che vi è in ogni cella di questo dominio (es. permeabilità, permettività e i parametri di conducibilità).

c. sorgente del campo elettromagnetico.

Infine, si riportano di seguito i vantaggi e gli svantaggi del metodo del Finite-Differential Time-Domain [10]:

Vantaggi

- Concettualmente semplice
- Matematica semplice
- Indipendente dalle caratteristiche geometriche e fisiche
- Analisi nel dominio del tempo
- Simulazioni abbastanza veloci

Svantaggi

- Richiede un computer ad elevata prestazioni
- Difficile da sintetizzare
- Sono necessarie approssimazioni in presenza di simulazioni a basse frequenze

3. Mappa di Ella

Le simulazioni FDTD su specifiche porzioni di corpo umano sono effettuate mediante modelli della Virtual Population, ViP, sviluppati dalla Foundation for Research on

Information Technologies in Society (IT'IS) [11]. Con tali modelli risulta possibile una precisa descrizione delle proprietà dielettriche dei tessuti interessati e le pose relative.

Le proprietà dei tessuti sono indispensabili, come menzionato nel paragrafo precedente, per l'esecuzione del codice FDTD.

Per quanto riguarda i modelli delle famiglie virtuali, sono utilizzabili le seguenti generazioni: V1.x, V2.x, V3.x and V4.x [12].

Per le nostre simulazioni abbiamo utilizzato la prima generazione i cui componenti sono quattro: Duke, Ella, Thelonious e Billie. La tabella di seguito riportata illustra le informazioni generali dei suddetti componenti.

Informazioni Generali	**Sesso**	**Tipo**	**Età (Anni)**	**Altezza**	**Peso**
Thelonious	Maschio	Bambino	6	1.16	18.6
Billie	Femmina	Pre-Adolescente	11	1.49	34
Ella	Femmina	Giovane Adulta	26	1.63	57.3
Duke	Maschio	Giovante Adulto	34	1.77	70.2

Tabella 1: Informazioni generali sulla prima generazione della famiglia virtuale

Nel prossimo capitolo si discuterà, in particolare, delle simulazioni effettuate su Ella, o meglio, in un punto all'interno della sua testa e della regione del ginocchio in cui abbiamo scelto di focalizzare il campo elettromagnetico.

Durante l'esecuzione del codice del FDTD, è stata utilizzata l'equazione di dispersione di Cole Cole, con i parametri interpolanti per ogni tessuto così da ottenere le costanti dielettriche dei tessuti nel range di frequenza voluto [13]:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty + \sum_{m=1}^{4} \frac{\varepsilon_{sm} - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_m)^{1-\alpha_m}} - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}$$

I parametri interpolanti sono disponibili sono già forniti sul sito IT'IS [11] e ottenuti sperimentalmente dal lavoro del gruppo di Camelia Gabriel [14] [15] [16].

Come spiegato nella tesi scritta da Greta Silla [12], dopo aver effettuato determinati passaggi su MATLAB è possibile, tramite il software Paraview, visualizzare il modello in 3D dei personaggi della famiglia virtuale (ViP) ed effettuare la sua segmentazione.

ParaView è un codice open-source, che può essere eseguito su più sistemi operativi per applicazione interattiva di analisi di dati e per la visualizzazione scientifica, rilasciato nel 2002 dalla Kitware software company (https://www.paraview.org/).

La Figura 12 mostra il risultato della elaborazione dalla quale si evince la mappa di Ella relativa alla donna virtuale utilizzata nelle simulazioni.

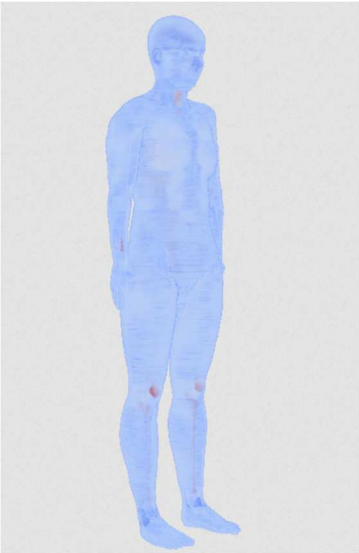

Figura 12: Mappa di Ella

4. Simulazioni effettuate

Nei paragrafi seguenti vengono rappresentati i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate. In particolare, sono state effettuate in totale 7 simulazioni di cui 3 con la testa e 4 con il ginocchio.

Inizialmente ci si è concentrati sulle forme d'onda dei segnali, quindi il confronto tra il segnale originale e il segnale ricevuto. Successivamente è stato confrontato il segnale originale con il segnale ricostruito.

Quest'ultimo è il segnale ricevuto dal "bersaglio" usato per focalizzare le onde elettromagnetiche.

Importante sottolineare che tutti i segnali sono stati normalizzati rispetto al massimo valore assunto dalla gaussiana del segnale originale che vogliamo ricostruire.

Come illustrato nel capitolo 2 dell'FDTD, la focalizzazione è il risultato di una serie di fasi che trasformano i segnali elettromagnetici trasmessi e ricevuti dalle antenne ed elaborati tramite l'applicazione di speciali algoritmi. Al termine del processo è possibile verificare la corretta focalizzazione delle onde elettromagnetiche tramite le animazioni, costituite da 1250 frame, restituite dalle elaborazioni del supercomputer IRENE.

Il segnale è inviato dall'antenna trasmittente, le coordinate della posizione in cui si trova l'antenna sono le seguenti:

```
monopolo_probe->i_a = 70;

monopolo_probe->j_a = 80;

monopolo_probe->k_a = 0;
```

E la posizione rimane invariata anche per le simulazioni in altre parti del corpo.

La posizione dell'antenna ricevente è invece propria di ogni simulazione, e in questo caso le coordinate del punto nella testa di Ella in cui è posizionata l'antenna sono:

```
probed_points[0].i = BCINX + 262;

probed_points[0].j = BCINY + 120;

probed_points[0].k = BCINZ + 60;
```

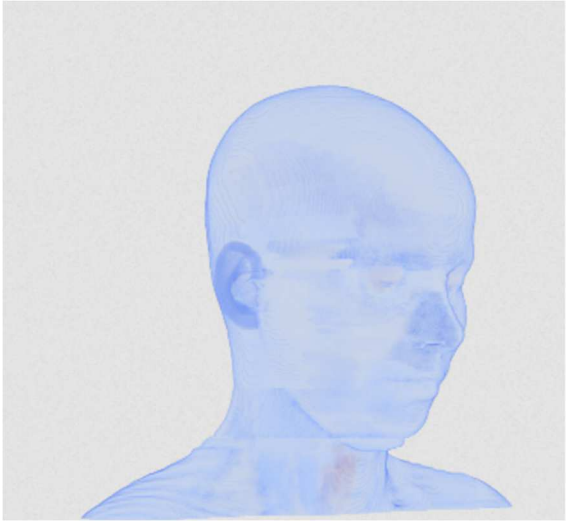

Figura 13: Testa di Ella

In questo quarto capitolo si osserverà come la direzione considerata del segnale ricevuto influenza la focalizzazione delle onde elettromagnetiche nel corpo umano.

4.1. Simulazioni sulla di Testa Ella

Il segnale inviato alla testa di Ella, è stato denominato “Signal_118”.

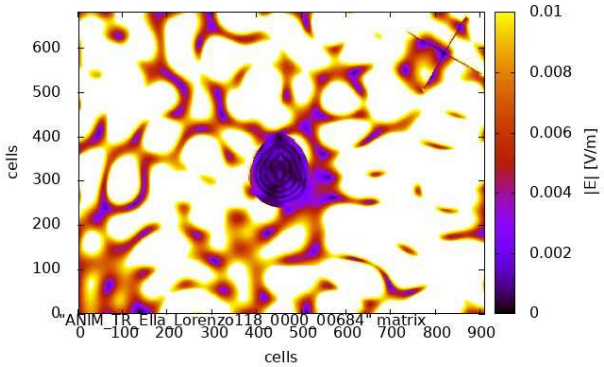

Figura 14: segnale originale inviato

Questo segnale non ha l’obiettivo di focalizzare all’interno della testa, in quanto prima deve essere ricostruito e poi trasmesso.

4.1.1. Simulazione 119 - Segnale ricevuto lungo z

Inizialmente è stato considerato, nel tirocinio svolto da Lorenzo Belà, il segnale lungo z (Fig. 15).

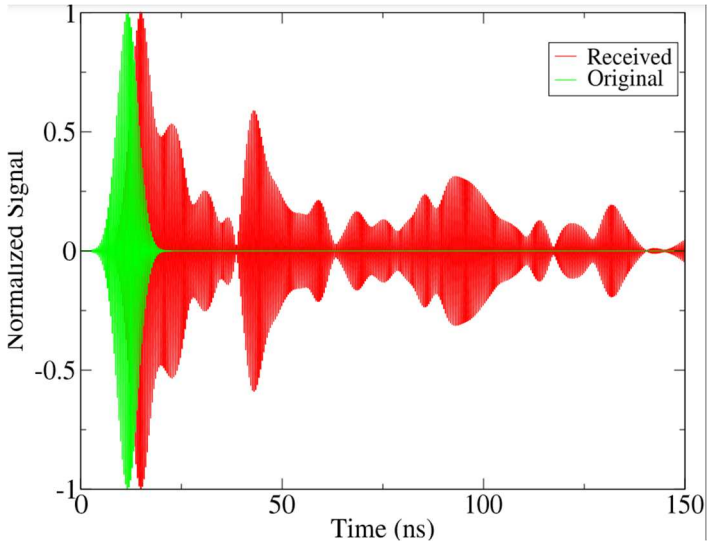

Figura 15: Segnale ricevuto considerando componente z

La Figura 16 riporta invece il segnale originale confrontato con il segnale ricostruito.

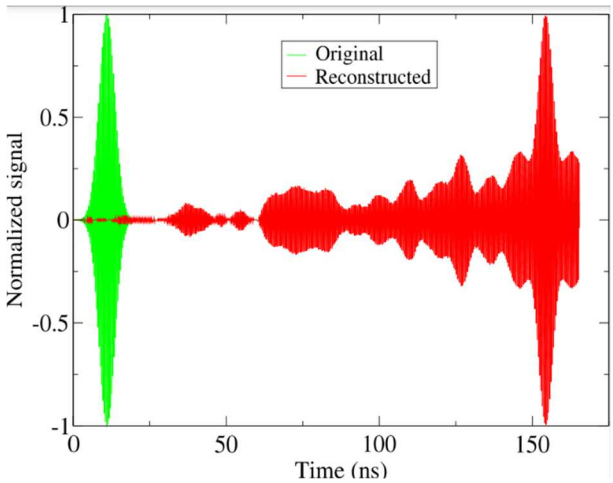

Figura 16: Segnale inviato e segnale ricostruito

La Figura 17 illustra la sovrapposizione del segnale originale con il segnale ricostruito.

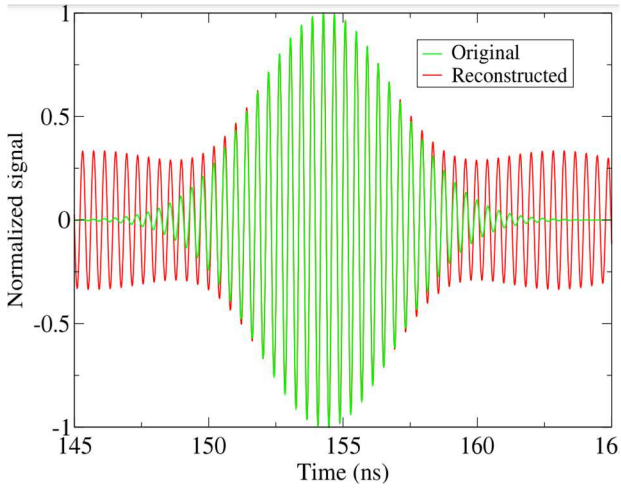

Figura 17: Segnale inviato sovrapposto al segnale ricostruito

.

Come evidenziano le figure qui sopra, in particolare la Figura 17, la forma del segnale ricostruito rispecchia maggiormente quella del segnale originale rispetto a quella del segnale ricevuto.

Le due immagini riportate di seguito corrispondo a due frame estratti dal risultato della simulazione 119.

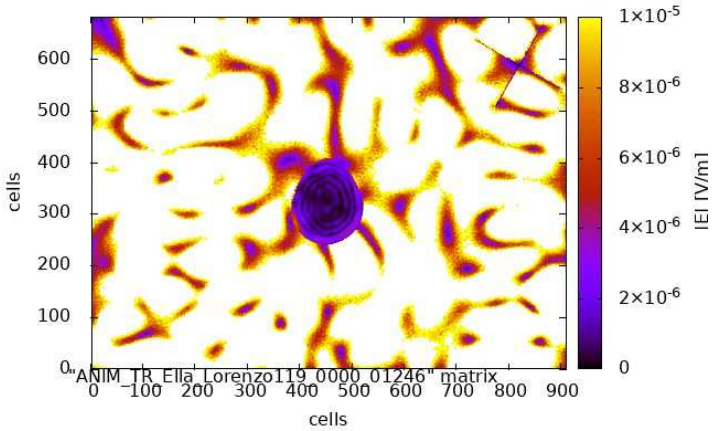

Figura 18: animazione simulazione 118_119, frame 1246

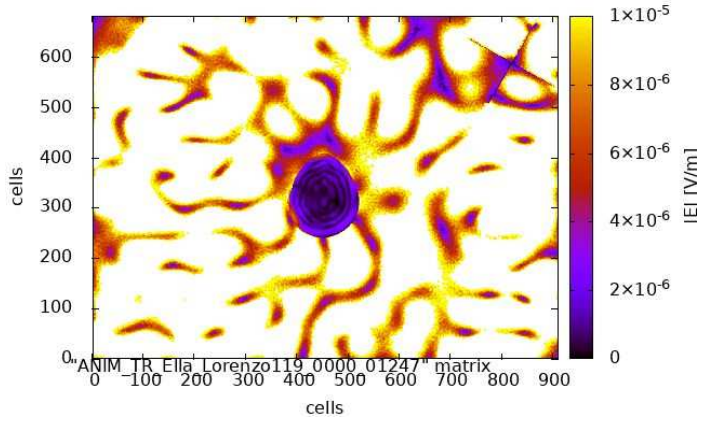

Figura 19:animazione simulazione 118_119, frame 1247

Nelle Figure 18 e 19, è osservabile come il segnale ricostruito non riesca, nonostante la ricostruzione del segnale originale sia buona, a focalizzare adeguatamente nel punto scelto come bersaglio.

Per migliorare quindi la focalizzazione abbiamo iniziato a considerare anche le direzioni x, y del segnale ricostruito e infine la somma di tutte e tre le componenti x, y e z del segnale.

4.1.2. Simulazione 124 - Segnale ricevuto lungo x

A questo punto viene considerata solo la direzione x del segnale ricevuto dall'antenna ricevente.

La Figura 20 sotto riportata illustra il segnale originale e la componente x del segnale ricevuto.

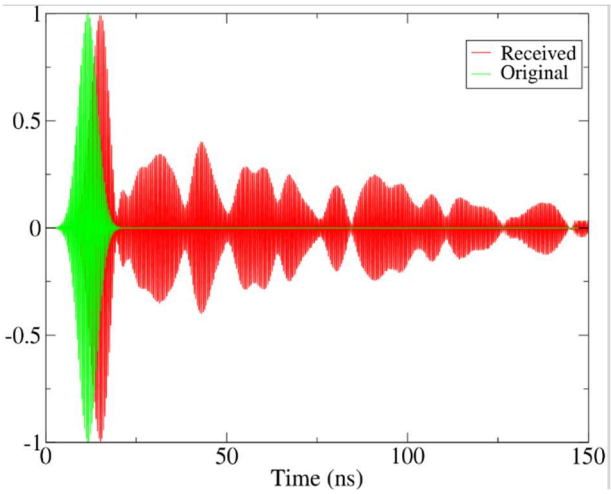

Figura 20: Segnale ricevuto considerando componente x

Si nota come la forma d'onda del segnale ricevuta lungo la componente x (Fig. 20) sia migliore di quella ricevuta lungo la componente z (Fig. 15, paragrafo 4.1.1)

La Figura 21 illustra invece il segnale originale e il segnale ricostruito.

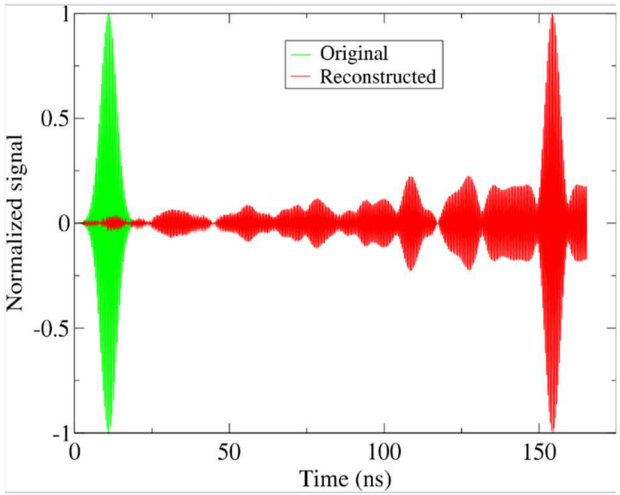

Figura 21: Segnale inviato e segnale ricostruito

La Figura 22 mostra la sovrapposizione del segnale originale e del segnale ricostruito.

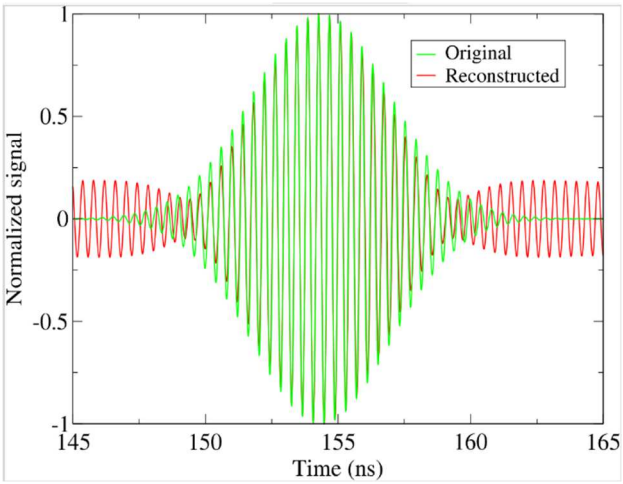

Figura 22: Segnale ricostruito sovrapposto al segnale originale

Si osserva che l'ampiezza dei "lobi" del segnale ricostruiti sono meno ampi rispetto a quelli del segnale ricostruito lungo z (Fig. 17 Paragrafo 4.1.1).

Le Figure 23 e 24 sottostanti corrispondono allo stesso frame estratto dall'animazione relativa alla simulazione 124.

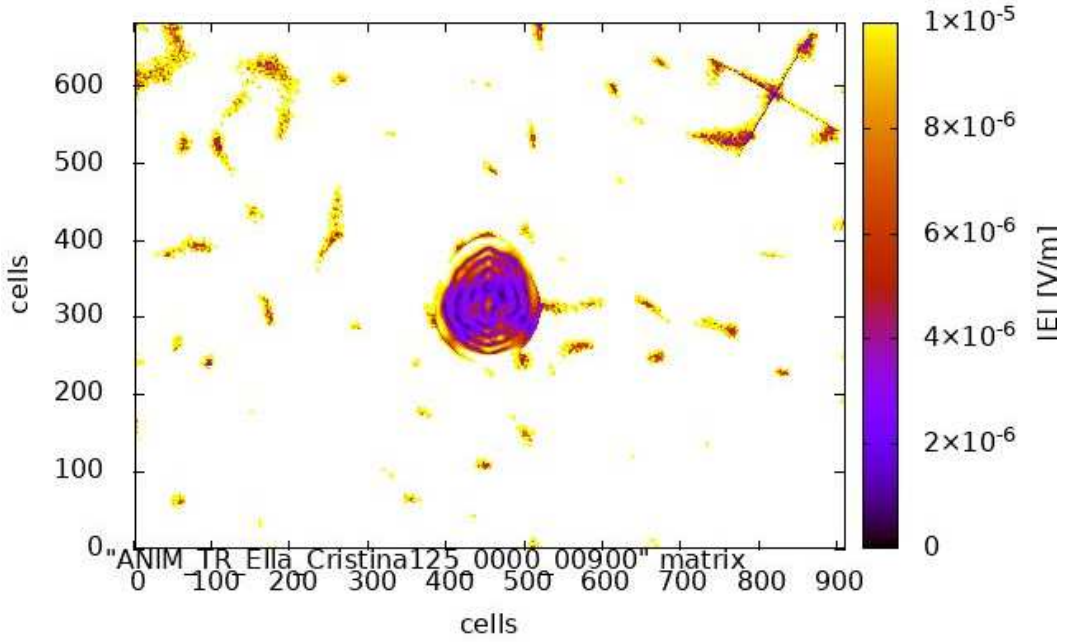

Figura 23: frame 900, animazione simulazione 125

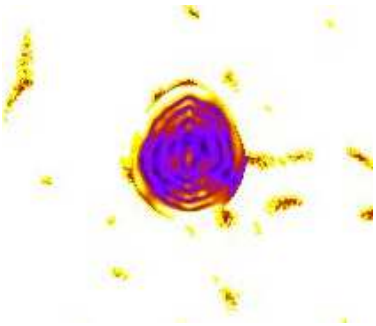

Figura 24: ingrandimento frame 900, animazione simulazione 125

È evidente la differenza tra le simulazioni 119 e 124 come mostrato dalle animazioni. Il segnale ricostruito in questo caso riesce a focalizzare in modo efficace, si nota però come il campo elettromagnetico riscaldi eccessivamente il tessuto superficiale.

4.1.3. Simulazione 125 - Segnale ricevuto lungo y

Si è considerato poi solo la componente y del segnale ricevuto. Di seguito la Figura 25 riporta il segnale originale e il segnale ricevuto.

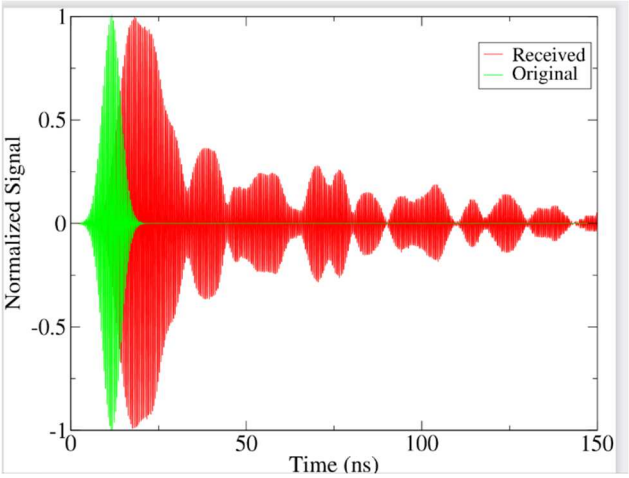

Figura 25: Segnale ricevuto considerando componente y

La forma del segnale ricevuto mostra un'ampiezza nettamente maggiore di quella del segnale originale. Osserviamo nella Figura 26 come il segnale viene ricostruito:

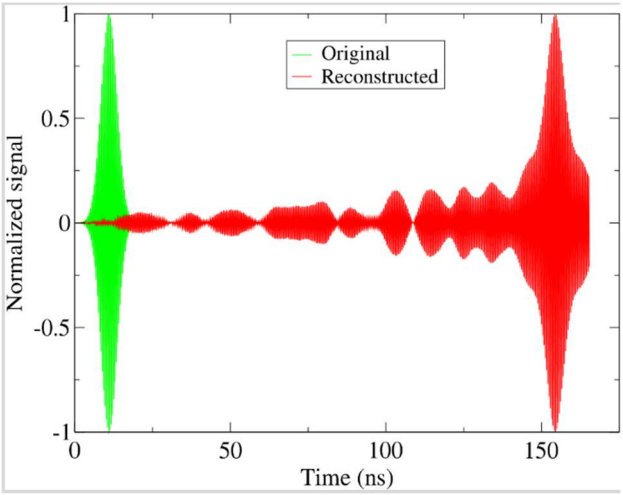

Figura 26: Segnale ricevuto considerando componente x

La Figura 27 mostra sovrapposizione del segnale ricostruito con il segnale originale.

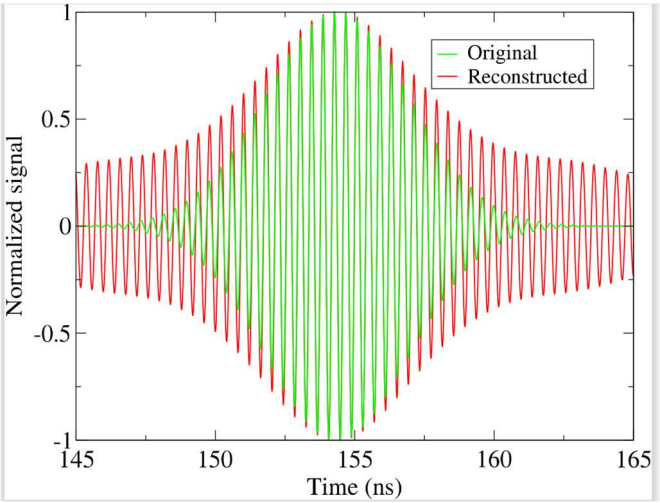

Figura 27: Sovrapposizione del segnale originale con il segnale ricostruito

La ricostruzione del segnale non è accurata come quella ottenuta con il segnale lungo x.

Osservo ora il frame 900 della simulazione 125, Figura 28.

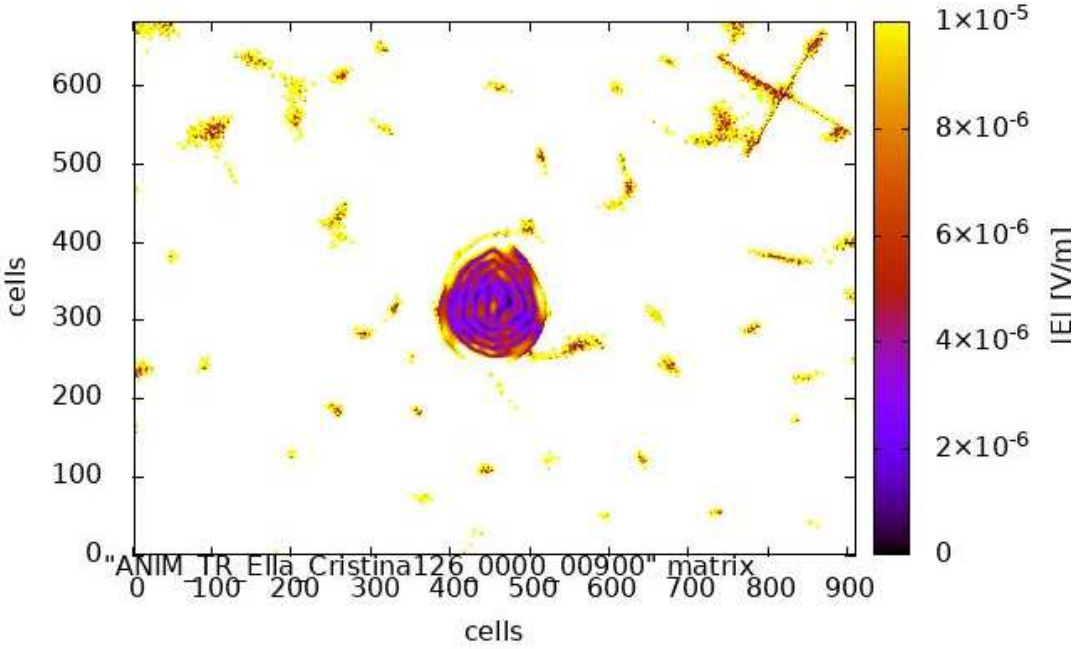

Figura 28: frame 900 simulazione 126 con segnale lungo y

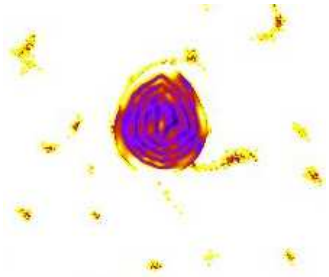

Figura 29: ingrandimento frame 900, simulazione 126

Si osserva che date le animazioni relative alle simulazioni 124 e 125, a parità di frame che considero, il segnale che focalizza meglio è quello lungo y, nonostante la ricostruzione del segnale sia migliore nel caso del segnale lungo x.

Anche in questo caso si nota come il campo elettromagnetico purtroppo riscaldi eccessivamente la parte esterna della testa di Ella.

4.1.4. Simulazione 126 - Segnale ricevuto considerando somma delle tre componenti x, y e z.

Si è considerato poi la somma delle tre componenti x, y e z che costituiscono il segnale. Di seguito la Figura 30 riporta il segnale originale e il segnale ricevuto.

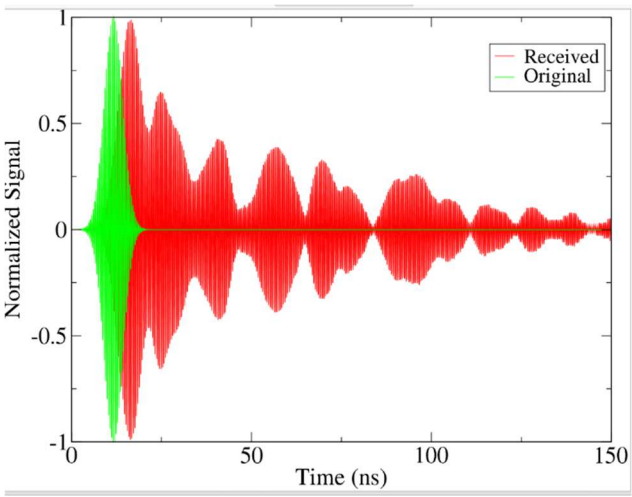

Figura 30: Segnale originale e segnale ricevuto

La Figura 31 mostra il segnale originale e il segnale ricostruito.

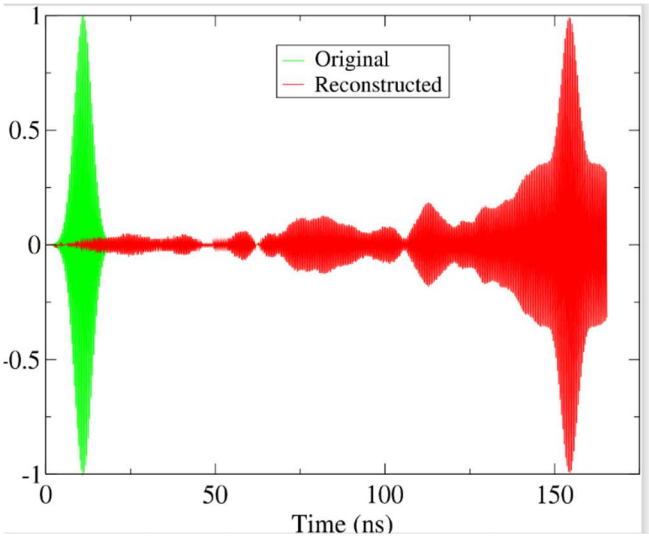

Figura 31: Segnale originale e segnale ricostruito

La Figura 32 mostra la sovrapposizione del segnale ricostruito con il segnale originale.

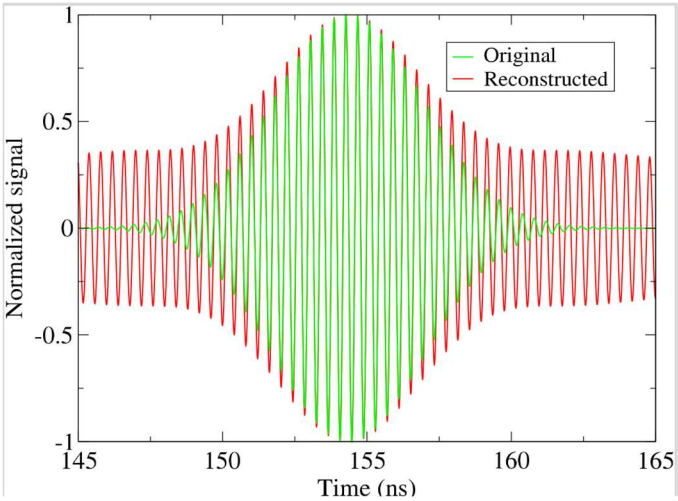

Figura 32: Sovrapposizione segnale originale e segnale ricostruito

Vado a considerare anche in questo caso il frame 900, della simulazione 126 (Fig. 33 e 34).

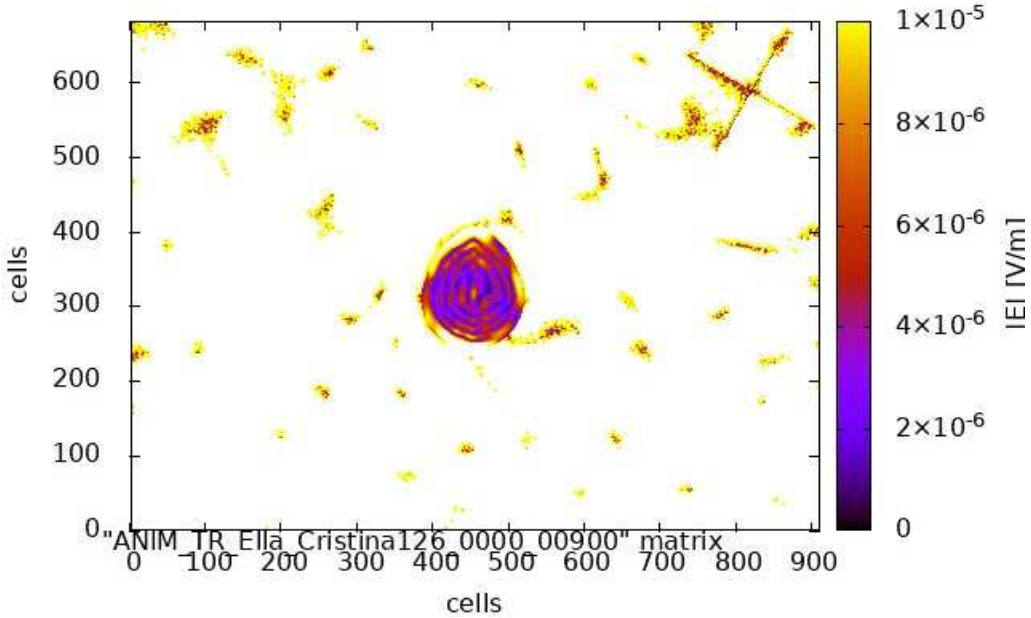

Figura 33: Simulazione 126, frame 900

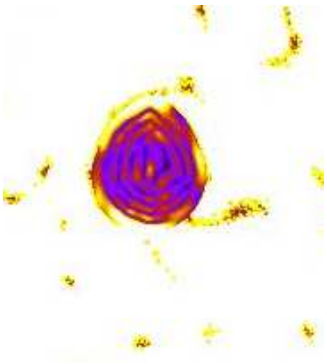

Figura 34: Ingrandimento frame 900, simulazione 126

Il segnale ricostruito quindi focalizza molto bene, anche se si ripresenta lo stesso problema delle precedenti simulazioni, ovvero l'eccessivo riscaldamento della superfice esterna della testa di Ella.

4.2. Simulazioni sul ginocchio di Ella

L'antenna ricevente è posizionata in corrispondenza del punto del ginocchio in cui vogliamo focalizzare il campo elettromagnetico. Le coordinate dell'antenna sono quindi:

probed_points[0].i = BCINX + 149,

probed_points[0]. j = BCINY + 95,

probed_points[0].k = BCINZ + 268;

Figura 35: Gamba di Ella

Così come con la testa abbiamo fatto diverse simulazioni in base alla direzione del segnale ricevuto che prendiamo in esame. In analogia a quanto fatto sulla testa l'approccio prevede di considerare anche in questo caso prima le singole componenti, x, y e z e successivamente la somma delle tre.

La Figura 36 è una rappresentazione di un frame estratto dell'animazione relativa alla simulazione 130, in cui si considera solo il segnale originale. Simulazione che non ha lo scopo di focalizzare.

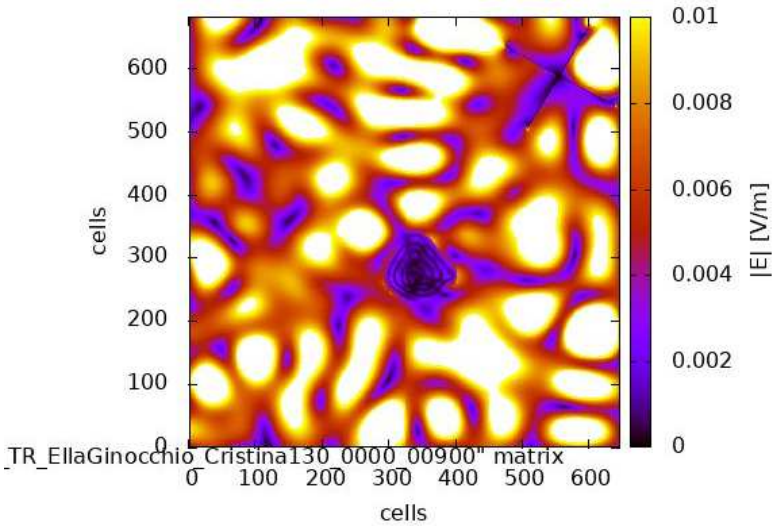

Figura 36: Frame 900, simulazione 130

La mappa in questo caso il ginocchio è più squadrato della testa e le dimensioni della mappa sono differenti.

4.2.1. Simulazione 131 - Segnale ricevuto lungo x

A questo punto viene considerata solo la direzione x del segnale ricevuto dall'antenna ricevente. La Figura 37 illustra il segnale originale e il segnale ricevuto.

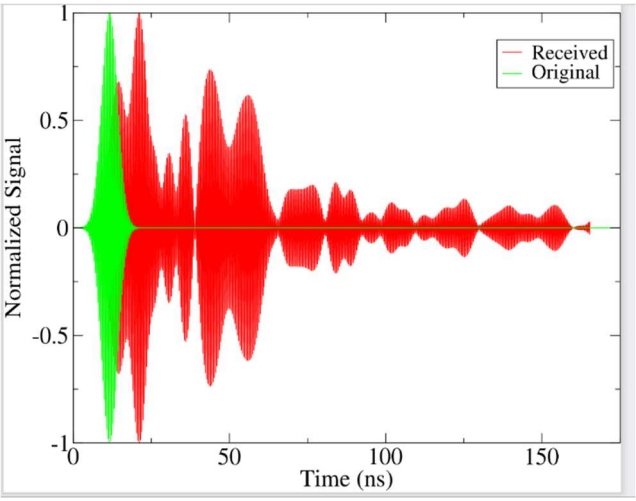

Figura 37: Segnale originale e segnale ricevuto

Il segnale ricostruito è osservabile nella Figura 38 qui sotto riportata.

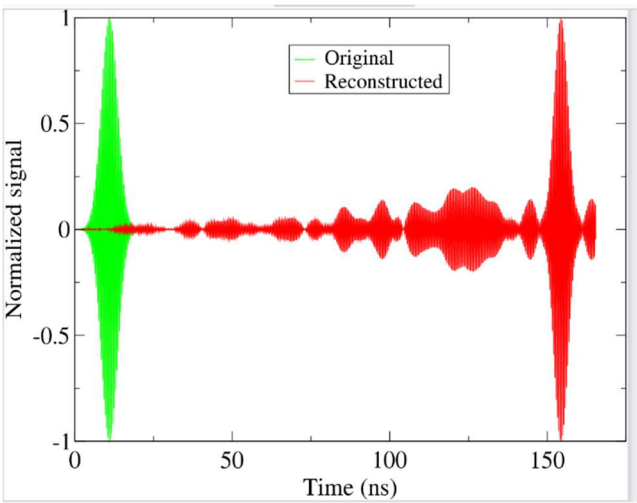

Figura 38: Segnale originale e segnale ricostruito

Figura 39 mostra la sovrapposizione del segnale ricostruito con il segnale originale.

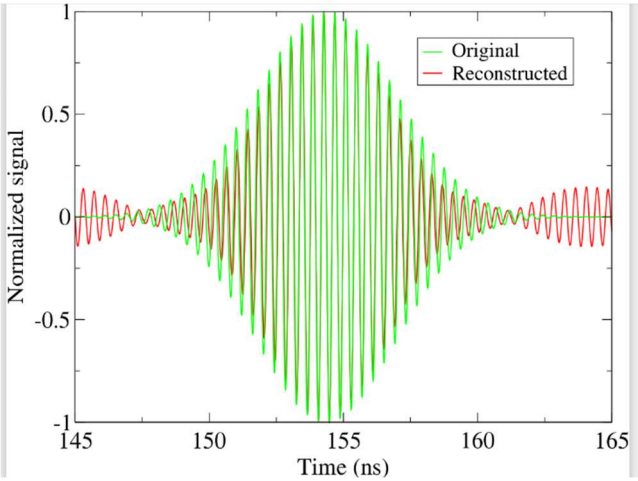

Figura 39: Segnale originale sovrapposto al segnale ricostruito

Si osserva che:

- Il segnale ricostruito è più fedele al segnale originale rispetto a quello ricevuto.
- Il segnale ricostruito presenta quei lobi laterali che vanno a sommarsi al segnale utile.
- Si inizia ad avere una buona focalizzazione del campo elettromagnetico all'incirca dal frame 940 (Fig 40-41).

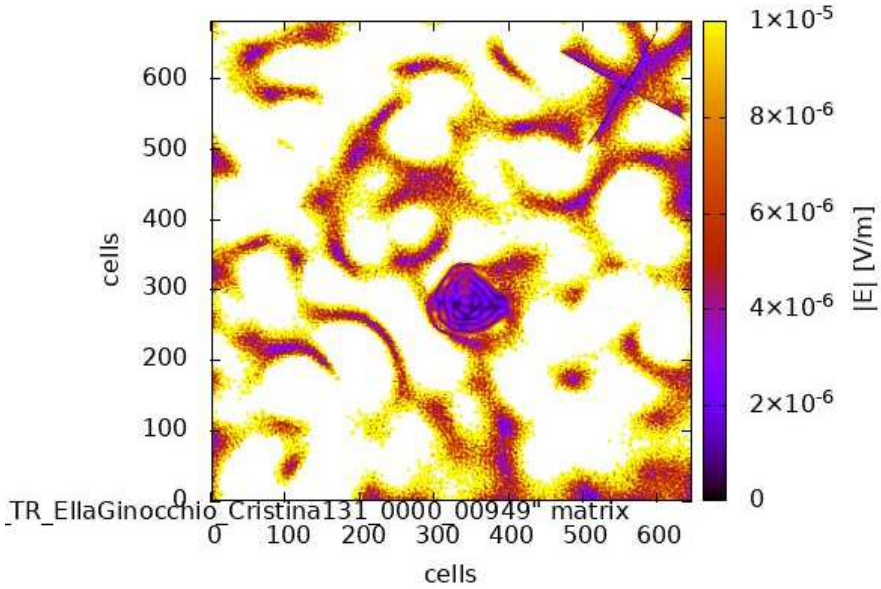

Figura 40: Simulazione 131, frame 949

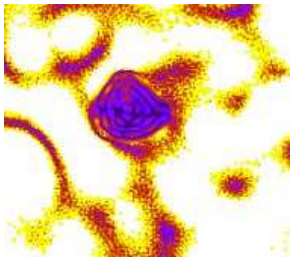

Figura 41: Ingrandimento frame 949, simulazione 131

Ma come si nota in corrispondenza del frame 1100 la il campo elettromagnetico è meno focalizzato.

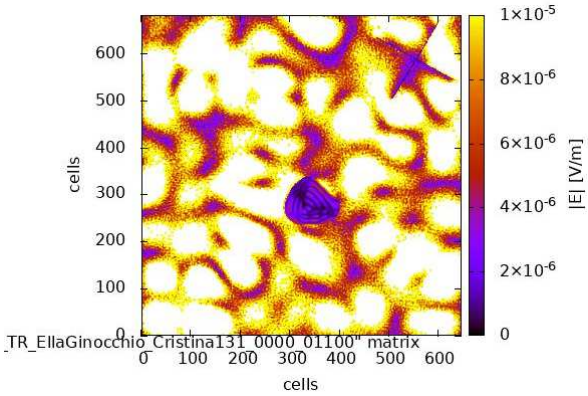

Figura 42: Simulazione 131, frame 1100

4.2.2. Simulazione 132 - Segnale ricevuto lungo y

Si è considerato poi solo la componente y del segnale ricevuto. Di seguito la Figura 25 riporta il segnale originale e il segnale ricevuto.

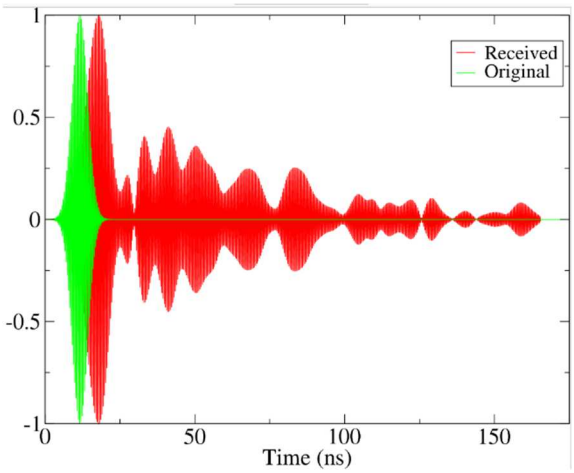

Figura 43: Segnale originale e segnale ricevuto

In questo caso si osserva che la forma del segnale ricevuto è molto simile a quella del segnale originale.

La Figura 44 che segue mostra il segnale ricevuto con il segnale ricostruito.

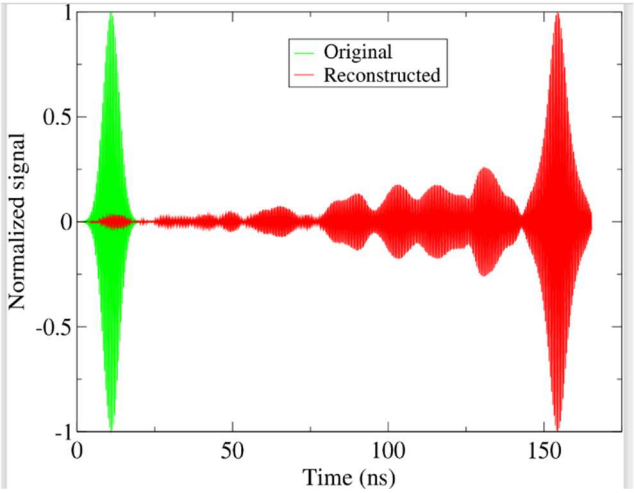

Figura 44: Segnale originale e segnale ricostruito

Nella Figura 45 si osserva invece la sovrapposizione del segnale ricostruito con il segnale originale.

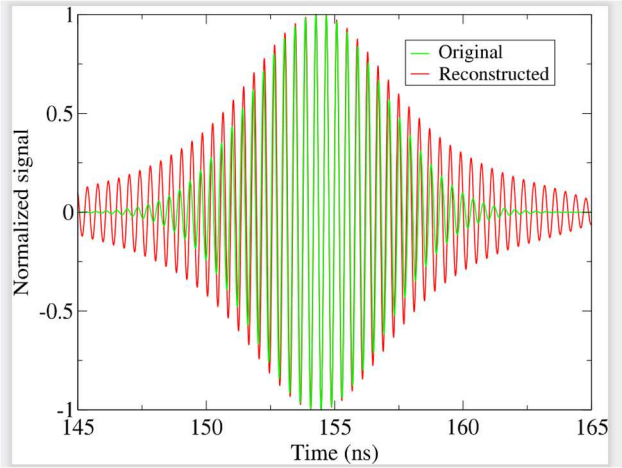

Figura 45: Segnale ricostruito sovrapposto al segnale originale

Il segnale lungo y ricostruito come si osserva dalla Figura 45 non presenta lobi laterali.

Il segnale, come mostrato nelle Figure 46-47, focalizza efficientemente all'interno del ginocchio di Ella, anche se si nota un la superficie esterna del ginocchio si surriscalda molto.

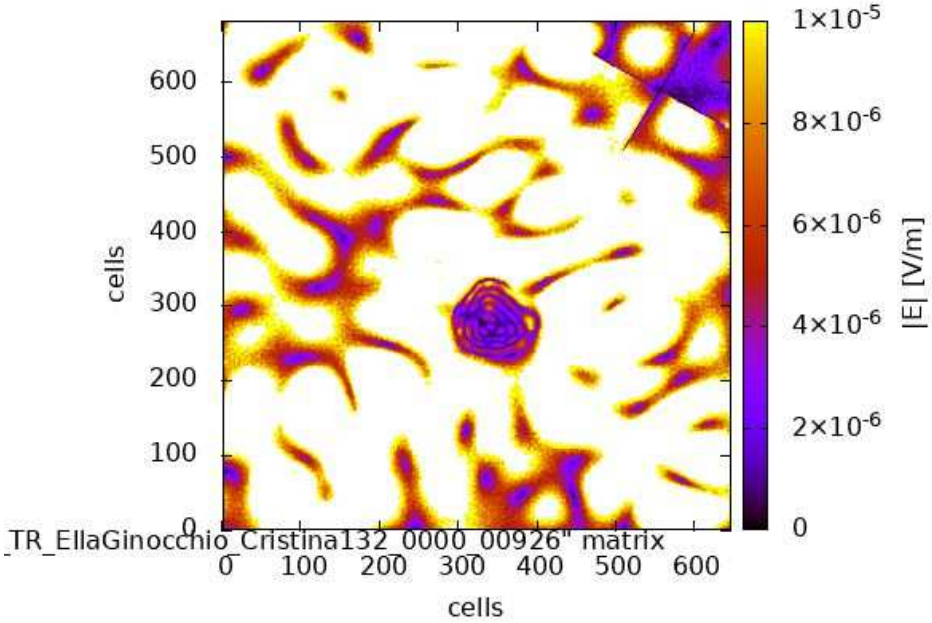

Figura 46: Simulazione 132, frame 926

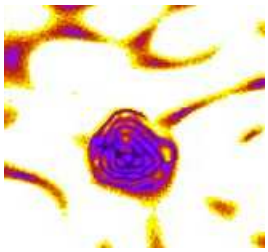

Figura 47: Ingrandimento frame 926

4.2.3. Simulazione 133 - Segnale ricevuto lungo z

Viene considerata ora solo la direzione z del segnale ricevuto dall'antenna ricevente. La Figura 48 illustra il segnale originale e il segnale ricevuto.

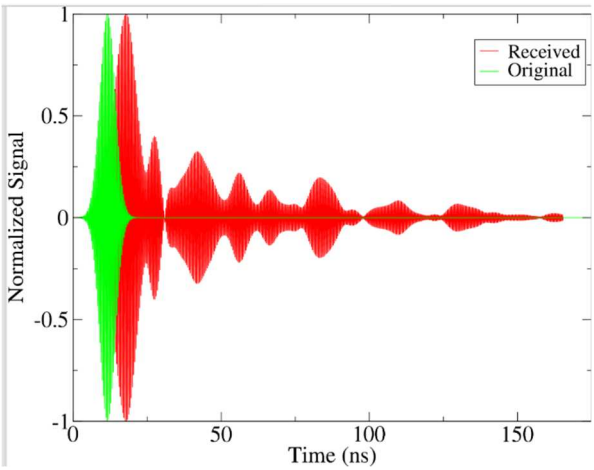

Figura 48: Segnale originale e segnale ricevuto

Di seguito segue la Figura 49 che illustra il segnale ricostruito e il segnale originale.

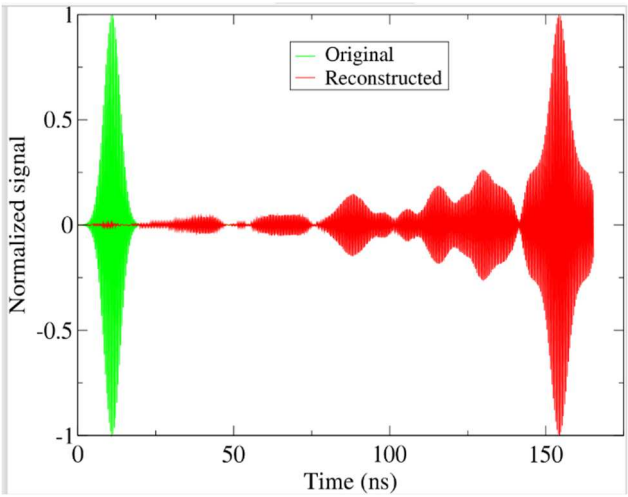

Figura 49: Segnale originale e segnale ricostruito

Si osserva come in questo caso la forma del segnale ricevuto rispecchia maggiormente la forma del segnale originale.

La Figura 50 sottostante illustra la sovrapposizione del segnale originale con il segnale ricostruito.

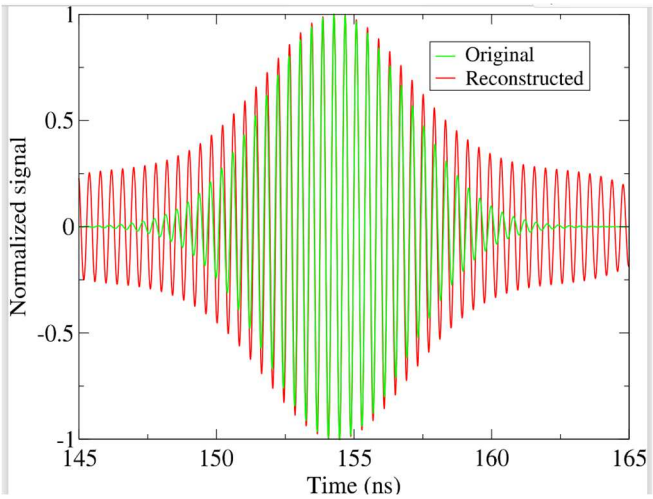

Figura 50: Segnale ricostruito sovrapposto al segnale originale

La ricostruzione del segnale inviato lungo z è simile al segnale ricostruito lungo y; quindi, dalla simulazione 133 ci aspettiamo una buona focalizzazione, in questo caso però il segnale è più ampio. Infatti, come si osserva dalle Figure 51-52 il segnale focalizza bene ma con un eccessivo surriscaldamento dei tessuti.

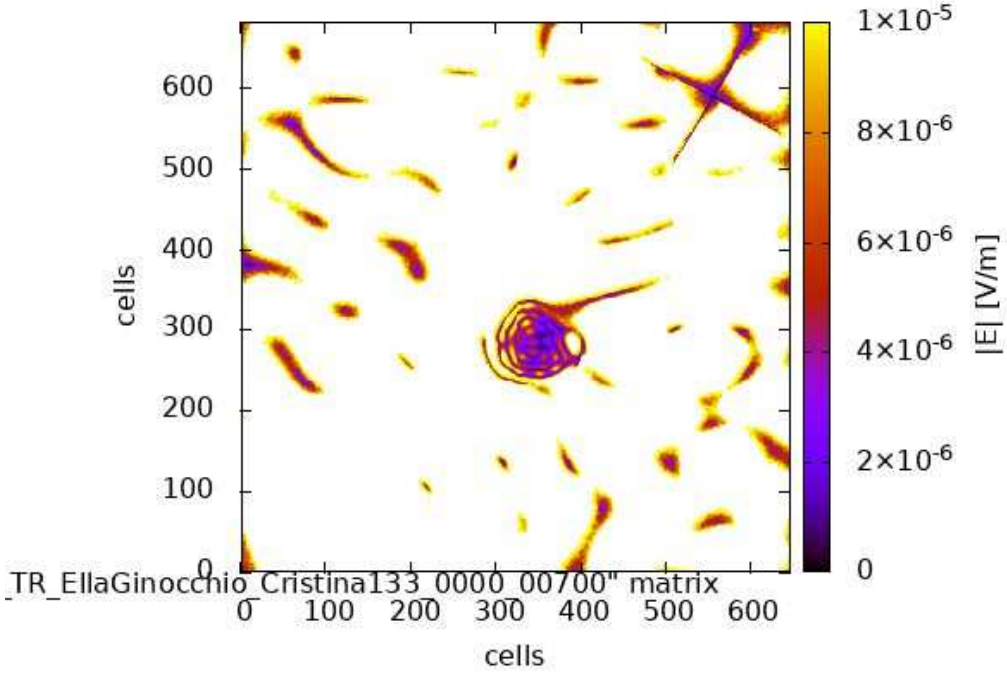

Figura 51: Simulazione 133, frame 700

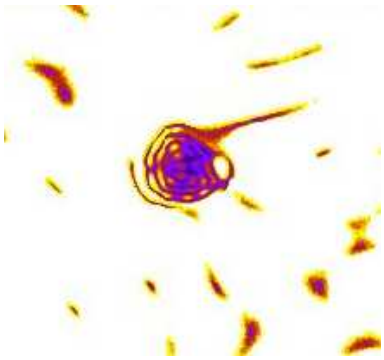

Figura 52: Ingrandimento frame 700, simulazione 133

Già in corrispondenza del frame 700 la focalizzazione del campo elettromagnetico è molto buona, anche se non del tutto omogena.

4.2.4. Simulazione 134 - Segnale ricevuto dato dalla somma di x, y e z

In questo paragrafo si considera il segnale ricevuto dato dalla somma di x, y e z.

La Figura 53 sottostante mostra il segnale originale e il segnale ricevuto.

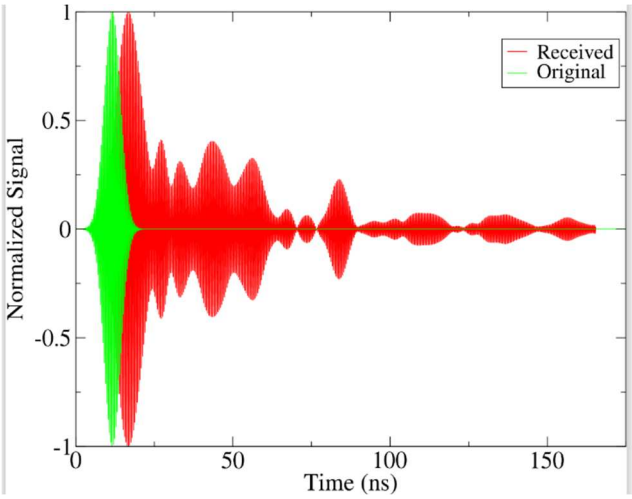

Figura 53: Segnale originale

La Figura 54 sottostante illustra il segnale originale con il segnale ricostruito.

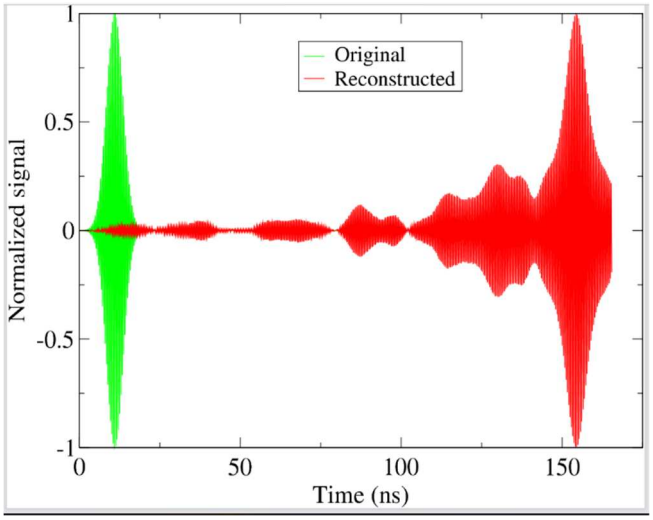

Figura 54: Segnale originale e segnale ricostruito

La Figura 55 mostra la sovrapposizione del segnale ricostruito con il segnale originale.

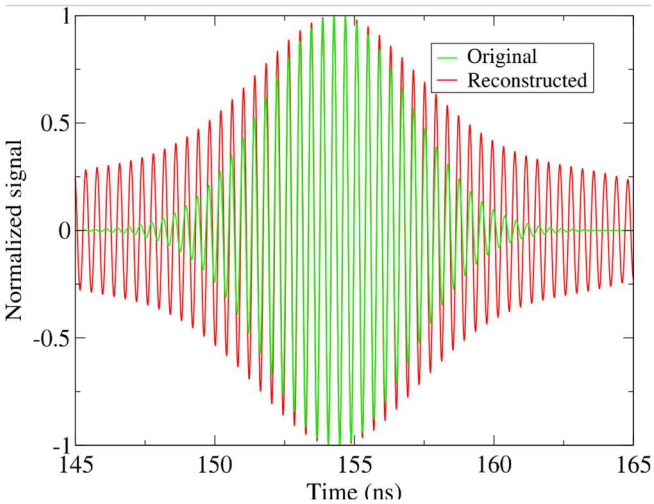

Figura 55: Segnale ricostruito sovrapposto a segnale originale

La ricostruzione del segnale inviato dato dalla somma delle tre componenti x, y e z rispecchia molto la forma del segnale ricostruito lungo y e lungo z, ma ulteriormente più ampio. Come mostrato nelle Figure 56-57 sotto riportate il segnale focalizza bene, ma anche qui si nota un eccessivo riscaldamento.

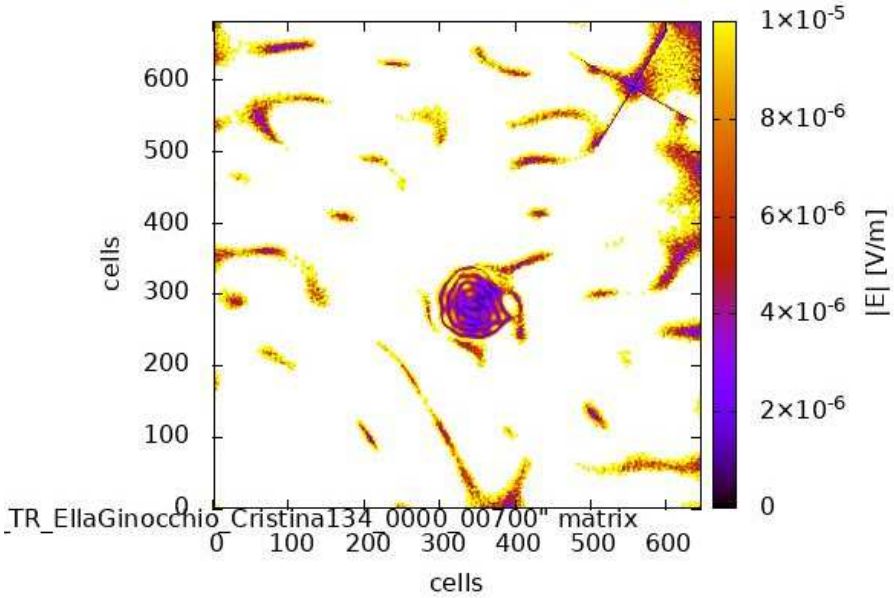

Figura 56: Simulazione 134, frame 700

Figura 57: Ingrandimento frame 700, simulazione 134

5. Conclusioni

Il Time Reversal applicato in un ambiente caotico si è dimostrato efficace, in quanto nella maggior parte delle simulazioni la focalizzazione delle onde elettromagnetiche nel corpo umano avviene con successo.

Si può concludere che la direzione del TR Sona Signal influenza le simulazioni, migliorandole in alcuni casi, ma non è presente, né nel caso della testa né del ginocchio, una direzione nettamente migliore delle altre e a seconda della geometria della simulazione può essere privilegiata una o l'altra componente.

Sicuramente si è osservato come in presenza di un segnale ricostruito con lobi esterni la focalizzazione delle onde elettromagnetiche nel corpo umano sia meno incisiva. Mentre, quando il segnale ricostruito non presenta forti oscillazioni sui lobi laterali pur distanziandosi in estensione dal segnale originale vi è una maggiore penetrazione del segnale.

Laddove la focalizzazione avviene con successo il surriscaldamento eccessivo dei tessuti esterni potrebbe impedire la sua applicazione se non si trova un modo per proteggerli dalle elevate temperature, come ad esempio di ventilazione forzata con aria fredda.

Bibliografia

[1] A. T. Frisco, «Focalizzazione di campi elettromagnetici in mezzi dissipativi mediante tecnica,» UNIVPM, Ancona, 2018.

[2] «Ipertermia profonda: combattere i tumori con il calore,» [Online]. Available: https://www.policlinicocampusbiomedico.it/news/ipertermia-profonda-combattere-i-tumori-con-il-calore.

[3] G. Lugrin, N. M. Parra, F. Rachidi, M. Rubinstein e G. Diendorfer, «On the Location of Lightning Discharges Using».

[4] «Edutecnica,» [Online]. Available: http://www.edutecnica.it/elettronica/antenne/antenne.htm#:~:text=Un'antenna%20%C3%A8%20un%20apparato,nel%20secondo%20di%20antenna%20trasmittente..

[5] B. T. Taddese, G. Gradoni, F. Moglie, T. M. Antonsen, E. Ott e S. M. Anlage, «Quantifying volume changing perturbations in a wave chaotic system,» *New Journal of Physics,* vol. 15, n. 2, p. 023025, 2013.

[6] E. Colella, L. Bastianelli, F. Dragano, V. Mariani Primiani e F. Moglie, «Time Reversal in Reverberating Structures for Deep Focusing in Human Bodies,» 2022.

[7] A. T. Frisco, L. Bastianelli, F. Moglie e V. M. Primiani, «Time Reversal in Reverberation Chambers: Application to Lossy Media,» in *2019 IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat. Signal Power Integrity, EMC+SIPI 2019, pp. 664–669, 2019, doi: 10.1109/ISEMC.2019.8825289.*, 2019.

[8] D. Fedeli, G. Gradoni, V. Primiani Mariani e F. Moglie, «Accurate Analysis of Reverberation Field Penetration Into an Equipment-Level Enclosure,» *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,* vol. 51, n. 2, pp. 170-180, 2009.

[9] F. Dragano, «Finite-Difference Time-Domain Analysis of Time Reversal Technique for Electromagnetic Fields Focusing on Human Head,» Ancona, 2021.

[10] F. Moglie, «FDTD high performance computation of reverberation chambers on Blue Gene machines,» Ancona, 2016.

[11] [Online]. Available: https://itis.swiss/virtual-population/virtual-population/overview/.

[12] G. Silla, «Interaction between wearable devices and human tissues: electromagnetic characterization of a real heart rate monitor using high-resolution body models and FDTD technique,» Ancona, 2021.

[13] G. Silla, L. Bastianelli, E. Colella, F. Moglie e V. Mariani Primiani, «SAR Computation Due to Wearable Devices by Using High-Resolution Body Models and FDTD Numerical Code».

[14] [Online]. Available: http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php.

[15] C. Gabriel, S. Gabriel e E. Corthout, «The dielectric properties of biological tissues: I. literature survey,» *Physics in Medicine and Biology,* vol. 41, n. 11, p. 2231–2249, 1996.

[16] S. Gabriel, R. W. Lau e C. Gabriel, «The dielectric properties of biological tissues: II. measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz,» *Physics in Medicine and Biology,* vol. 41, n. 11, p. 2251–2269, 1996.

[17] «Antenna, Wikipedia,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Antenna.

[18] S. Verzulli, «Effetto della variazione della permittività,» Ancona, 2021.

[19] M. Paolone, R. Razzaghi, H. Karami, G. Lugrin, N. Mora e Z. Wang, «Electromagnetic Time Reversal and Its Application to Electromagnetic Compatibility,» Long Beach, CA, 2018.