



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Biomedica
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

**Analisi numerica della focalizzazione di campi
elettromagnetici all'interno della testa umana**

Numerical analysis of the electromagnetic focusing inside the human head

Relatore: Chiar.mo
Prof. Franco Moglie

Tesi di Laurea di:
Lago Andrea

Correlatore: Chiar.mo
**Prof. Valter Mariani
Primiani**

A.A. 2021/2022

Sommario

Iconografia	2
Introduzione	3
Time-Reversal	5
<i>Applicazione nell'esperimento</i>	6
<i>Principio di funzionamento del Time Reversal</i>	7
Camere Riverberante	16
<i>Formule Camera Riverberante</i>	18
Simulazioni	20
<i>Prima simulazione:</i>	22
<i>Seconda simulazione:</i>	27
Conclusioni	33
Bibliografia:	34

Iconografia

Immagine 3: sistema lineare stazionario sul quale si è applicato il Time Reversal nel dominio del tempo.

Immagine 4: Sistema lineare stazionario nel dominio della frequenza sul quale si è applicato il Time Reversal .

Immagine 5: Esempio di una Camera Riverberante.

Immagine 6: Esempio di due Stirrer “Z Folder”, uno lungo l’asse verticale ed uno lungo l’asse orizzontale.

Immagine 7: elemento di una cella di Yee.

Immagine 8: vista laterale della testa del soggetto di studio (immagine ottenuta con l’impiego del software Paraview).

Immagine 9: segnale originale confrontato con quello ricostruito.

Immagine 10: Segnale originale e ricostruito.

Immagine 11: segnale ricevuto confrontato con quello originale.

Immagine 12: inizio della prima simulazione senza inversione dell’impulso.

Immagine 13: il campo elettromagnetico è al massimo livello di caoticità.

Immagine 14: inizio della simulazione in cui l’impulso è stato rovesciato temporalmente con la tecnica del Time Reversal.

Immagine 15: fine della simulazione nella quale il campo elettromagnetico è generato dall’impulso rovesciato temporalmente ed è al massimo livello di caoticità.

Immagine 16: segnale ricevuto nella seconda simulazione confrontato con quello originale.

Immagine 17: Segnale originale e ricostruito della seconda simulazione.

Immagine 18: segnale originale della seconda simulazione confrontato con quello ricostruito.

Immagine 19: inizio della seconda simulazione senza inversione dell’impulso.

Immagine 20: il campo elettromagnetico è al massimo livello di caoticità durante la seconda simulazione prima che il segnale venga ricostruito.

Immagine 21: inizio della seconda simulazione in cui l’impulso è stato rovesciato temporalmente con la tecnica del Time Reversal.

Immagine 22: fine della seconda simulazione nella quale il campo elettromagnetico è generato dall’impulso rovesciato temporalmente ed è al massimo livello di caoticità.

Introduzione

Nel campo medico, da relativamente pochi anni, si è riscontrato un ampio interesse per lo studio tra l'interazione del corpo umano con i campi elettromagnetici.

Inizialmente, questa relazione, sembrava essere di natura più o meno dannosa per l'uomo, in particolare a seconda dell'intensità e della frequenza dei campi elettromagnetici. Successivamente, gli studi si sono concentrati sulla peculiarità fisica delle onde elettromagnetiche stesse di attraversare la materia senza emettere radiazioni ionizzanti (contrariamente a ciò che accade con i Raggi X); le ricerche scientifiche hanno iniziato ad evidenziare come, quest'ultime, interagiscono con i diversi tessuti del corpo umano, anche in relazione ai diversi stati patologici, aprendo così molteplici nuove frontiere in campo medico: dalle metodologie diagnostiche e terapeutiche, al fine di diagnosticare in maniera più accurata e precoce, al trattamento più efficace di determinate patologie.

Un esempio opportuno di strumentazione diagnostica in tale senso, che sfrutta l'interazione tra i principi fisici delle onde elettromagnetiche sul corpo umano, è la risonanza magnetica: mediante la generazione di un campo magnetico, compreso tra 0.5 e 3 [T], assieme all'emissione di impulsi a radiofrequenza che investono il paziente, si riescono a recepire i segnali emessi dagli atomi di idrogeno; essendo il corpo umano composto per la sua maggior parte d'acqua, l'idrogeno al suo interno è più che sufficiente per (a seconda dell'intensità del campo magnetico e della frequenza degli impulsi che si scelgono) generare un'immagine più o meno dettagliata dei tessuti non visibili quali ossa, organi, ecc.

Come le onde elettromagnetiche si possano focalizzare all'interno di un determinato distretto anatomico, vedendone l'interazione con i tessuti che incontrano, è uno studio di cruciale interesse. Si è evidenziato, infatti, come tale interazione comporti un aumento delle temperature dei tessuti coinvolti dagli impulsi

elettromagnetici; sfruttare questo riscaldamento, unitamente agli altri strumenti terapeutici, quali la chemioterapia e la radioterapia, risulta essere particolarmente propizio nel trattamento dei tumori.

L'intento di questa tesi è di mettere in luce ed analizzare numericamente come sia possibile concentrare all'interno di uno specifico distretto anatomico (in questo caso all'interno del cranio di un bambino di cinque anni) un impulso elettromagnetico; ed anche di vederne graficamente più o meno l'efficacia nella sua capacità di riscaldare la zona di interesse, tenendo conto della localizzazione del punto stesso nella quale si vuole concentrare l'impulso elettromagnetico.

Per studiare quanto sopra citato, si è scelta di utilizzare la tecnica del Time-Reversal, attraverso le simulazioni FDTD (Finite-Difference Time-Domain).

Time-Reversal

La tecnica del Time-Reversal è una procedura in campo fisico che consiste nell'invertire l'esecuzione cronologica in cui viene creato un segnale, acustico o elettromagnetico. Venne inizialmente impiegata e sviluppata per indagare, come fosse possibile concentrare, l'energia prodotta dalle onde acustiche in un punto specifico all'interno di uno spazio tridimensionale e solo successivamente, la sua attuazione, è stata ampliata anche alle onde elettromagnetiche. Questo processo sfrutta la proprietà distintiva delle onde acustiche di propagarsi attraverso un mezzo fisico fluido, tipicamente l'aria, con lo scopo di riuscirne a focalizzare l'energia in una coordinata definita.

La prima applicazione della tecnica del Time Reversal venne fatta da Parvulescu e Clay nel 1965. I loro esperimenti consistevano nella semplice trasmissione di un segnale, il quale dopo essere stato ricevuto, veniva invertito temporalmente e ritrasmesso.

Con il tempo, tale tecnica si è scoperta essere facilmente applicabile anche alle onde di natura elettromagnetica: nello specifico, il metono del Time-Reversal nella sua attuazione all'elettromagnetismo, ritrova un suo impiego pratico grazie al Teorema della Reciprocità, il quale dimostra, come le proprietà elettromagnetiche di un sistema siano le stesse indipendentemente dalla direzione di propagazione dell'onda. In altre parole, il principio afferma che in un sistema causa-effetto reciproco, il risultato non si modifica se si scambiano tra loro la posizione della causa e quella dell'effetto.

Nella pratica, tale tecnica, si applica registrando l'impulso di un'onda elettromagnetica emessa da un'antenna Logperiodica e ricevuta da una antenna Loop ricevente; i dati vengono poi riprodotti, ma con l'ordine temporalmente inverso

rispetto a quello di espansione. Così facendo, le onde che vengono riflesse, sono convergenti in un unico punto e generano conseguentemente un impulso elettromagnetico di discreta intensità convogliato nel suddetto punto.

L'impulso elettromagnetico che viene prodotto può essere impiegato in diversi scenari, con molteplici finalità, tra le quali, per esempio: la ricerca di oggetti nascosti, la comunicazione wireless e, in campo medico, nell'imaging diagnostico o per aumentare appositamente la temperatura, mediante l'effetto Joule, in uno specifico distretto anatomico che, come abbiamo precedentemente anticipato, può essere estremamente utile nel trattamento di stadi tumorali quando affiancato a una terapia specialistica.

Applicazione nell'esperimento

Nell'applicazione reale di tale procedimento però, il punto in cui si desidera focalizzare l'onda, è immerso in un mezzo che, per sua natura intrinseca, presenta delle perdite. Per questo motivo, è necessario utilizzare uno strumento che sia in grado di accentuare e amplificare l'intensità del campo elettromagnetico generato in modo appropriato.

Per l'esposizione di questa tesi si è preso in esame il caso nel quale si vuole convogliare l'impulso elettromagnetico all'interno di un cervello di un soggetto di cinque anni di età.

Per arginarne le perdite dovute al mezzo preso in esame (il corpo umano), esso viene posto all'interno di un ambiente altamente riflettente, nello specifico dentro ad una Camera Riverberante (che verrà dettagliatamente illustrata nei capitoli successivi). Grazie alla congiunzione tra questa operazione ed altre accortezze, le perdite vengono compensate tramite l'esaltazione e l'intensificazione del campo elettromagnetico generato dalle onde emesse dall'antenna Log periodica.

Principio di funzionamento del Time Reversal

Le precedenti tesi dei laureandi iscritti presso l'Università Politecnica delle Marche, che trattavano il medesimo campo di studi, erano state stese durante l'emergenza Covid-19 e lo studio era stato fatto, a causa della situazione, solo a livello puramente sperimentale.

Nonostante questo, grazie proprio a tali studi, è stato possibile analizzare la trattazione dell'argomento della tesi da un punto di vista numerico e grafico nei successivi anni, come dimostrato dalla stesura della presente.

Per lo studio di questa elaborato abbiamo utilizzato un sistema lineare a tempo invariante, e ne abbiamo calcolato la funzione di trasferimento numericamente e non più solamente a livello sperimentale sul quale applicare la tecnica del T-R, ovvero un sistema sottoposto ad un determinato ingresso $x(t)$ che ha prodotto una uscita $y(t)$; [1]

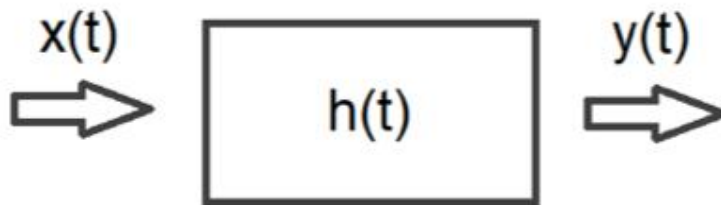


Immagine. 1: Sistema dinamico lineare a tempo invariante nel dominio del tempo

Ogni sistema a tempo invariante, è caratterizzato da una propria risposta impulsiva $h(t)$, che non è altro che la rappresentazione dell'uscita di esso $y(t)$ prodotta dal sistema se sottoposto all'ingresso $x(t) = \delta(t)$ (delta di Dirac la quale è una distribuzione);

Pertanto possiamo enunciare che l'uscita $Y(t)$ è:

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

Con:

⊗ operatore di convoluzione;

Trovata l'uscita del sistema nel dominio del tempo, si passa successivamente a calcolare la risposta impulsiva del sistema nel dominio della frequenza.

Quando si è nel dominio della frequenza, si può applicare il teorema della convoluzione, il quale enuncia:

“Fare una convoluzione nel dominio del tempo è equivalente a fare il prodotto di due segnali nel dominio della frequenza”

Pertanto:

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

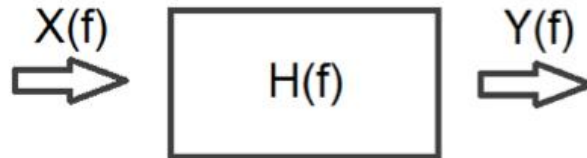


Immagine 2: Sistema dinamico lineare nel dominio della frequenza

I segnali trovati nel dominio della frequenza sono dei numeri appartenenti al campo complesso e non sono quindi numeri appartenenti al campo dei reali come lo è invece il segnale nel dominio del tempo.

Per trovare la risposta impulsiva $h(t)$ occorre pertanto dare un ingresso $x(t)$ al sistema e calcolare la risposta d'uscita $y(t)$ e successivamente, utilizzando la trasformata di Fourier (la quale ci permette di passare dal dominio del tempo al

dominio della frequenza), si ottengono i segnali nel dominio della frequenza: $X(f)$ e $Y(f)$.

Per trasformare, l'ingresso e l'uscita, dal dominio del tempo a quello della frequenza e viceversa, basterà dunque applicare la trasformata di Fourier (FFT) e l'antitrasformata di Fourier (IFFT):

$$x(t) \rightarrow FFT \rightarrow X(f)$$

$$X(f) \rightarrow IFFT \rightarrow x(t)$$

Come specificato precedentemente, le precedenti tesi [3] analizzavano, a livello sperimentale utilizzando uno strumento nel dominio della frequenza che è l'analizzatore vettoriale di reti (VNA), l'efficacia di tale studio e dunque, una volta trovati i risultati di interesse nel dominio della frequenza, si era ritornati nel dominio del tempo applicando l'IFFT; questo approccio non è stato replicato per gli studi del seguente testo, nel quale si è voluto dare maggiore risalto in prima fase allo studio numerico e, successivamente, a livello grafico sull'efficienza della focalizzazione delle onde elettromagnetiche in uno specifico punto della testa, rimanendo pertanto a studiare tale funzione solamente nel dominio della frequenza.

Una volta trovati l'ingresso e l'uscita nel dominio della frequenza, si può calcolare la "funzione di trasferimento" $H(f)$, che non è altro che la risposta impulsiva del sistema nel dominio della frequenza, la quale caratterizza completamente il comportamento del sistema dinamico lineare stazionario, come il rapporto tra la risposta nel dominio della frequenza e l'ingresso nel dominio della frequenza:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

Arrivati a questo punto si deve procedere applicando la tecnica del Time Reversal, quindi dando in ingresso al sistema questa volta non più il segnale $x(t)$ ma bensì il segnale $y(t)$ invertito nel tempo quindi: $y(-t)$.

Facendo ciò otteniamo il segnale (s_r) che precedentemente generava l'uscita $y(t)$.

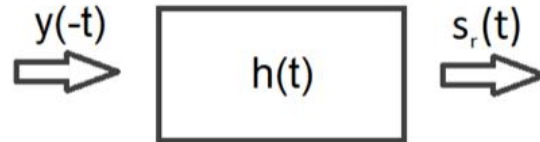


Immagine 3: sistema lineare stazionario sul quale si è applicato il Time Reversal nel dominio del tempo

Quindi s_r viene ottenuto mediante la relazione:

$$s_r = y(-t) \otimes h(t)$$

Utilizzando ora la trasformata di Fourier si ottiene:

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

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

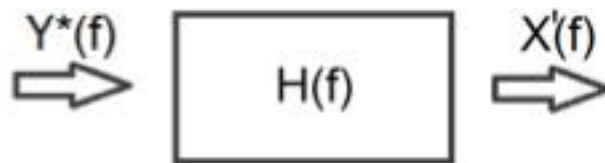


Immagine 4: Sistema lineare stazionario nel dominio della frequenza sul quale si è applicato il Time Reversal

Una volta trovato $X'(f)$, utilizzando l'IFFT si ripassa nel dominio del tempo e si ottiene il segnale $s_r(t)$ che non è altro che l'ingresso $x(t)$ rovesciato nel tempo.

L'insieme dei processi sopra descritti esprimono l'applicazione matematica della tecnica del Time Reversal e sono quindi i procedimenti matematici che consentono di focalizzare in uno specifico punto l'impulso elettromagnetico e di generare così l'effetto termico localizzato voluto.

Vi sono però alcune osservazioni da fare per poter utilizzare la tecnica del Time Reversal. La prima condizione necessaria, affinché tale tecnica possa essere impiegata, è che il campo elettromagnetico sia sufficientemente caotico, meglio se il più caotico possibile. Per ottenere ciò, viene utilizzato un ambiente che consenta di ottenere tale condizione e, come citato anche precedentemente, tale ambiente prende il nome di Camera Riverberante. Un'altra condizione necessaria, per impiegare il Time Reversal con successo, è l'invarianza delle equazioni fisiche, ovvero che, detto in altre parole, le versioni delle soluzioni delle equazioni invertite temporalmente devono essere valide anche come soluzioni delle equazioni fisiche non invertite temporalmente.

Per verificare quest'ultima condizione si applica la tecnica del Time Reversal alle Equazioni (o leggi) di Maxwell, le quali descrivono un campo elettromagnetico:

$$\nabla D = \rho$$

$$\nabla B = 0$$

$$\nabla \wedge H = J_e + \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$\nabla \wedge E = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

Con:

D = Vettore di induzione elettrica [C/m^2];

B = Vettore di induzione magnetica [W_b/m^2];

H = Vettore campo magnetico [A/m];

E = Vettore campo elettrico [V/m];

J_e = Densità di corrente elettrica [A/m^2];

ρ = Densità di carica elettrica [C/m^2];

Definiamo con $t \rightarrow -t$ l'operatore di Time Reversal (si basa sul capovolgimento della direzione del tempo).

Invertendo il tempo quindi:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) \rightarrow \vec{E}(\vec{r}, -t)$$

$$\vec{\rho}(\vec{r}, t) \rightarrow \vec{\rho}(\vec{r}, -t)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) \rightarrow -\vec{H}(\vec{r}, -t)$$

$$\vec{J}(\vec{r}, t) \rightarrow -\vec{J}(\vec{r}, -t)$$

Per i vettori H e J si è dovuto mettere il segno negativo davanti ad essi, dopo aver applicato l'operatore di Time Reversal, in quanto per questi due vettori si è prodotta un'inversione della direzione.

Quindi applicando il Time Reversal alle equazioni di Maxwell si ottiene:

$$\nabla(\epsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}, t)) = \vec{\rho}(\vec{r}, t) \rightarrow \nabla(\epsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}, -t)) = \vec{\rho}(\vec{r}, -t)$$

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

$$\nabla \wedge \vec{E}(\vec{r}, t) = -(\mu(\vec{r})) \frac{\partial \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t} \rightarrow \nabla \wedge \vec{E}(\vec{r}, -t) = -(\mu(\vec{r})) \frac{-\partial \vec{H}(\vec{r}, -t)}{\partial t}$$

$$\nabla \wedge \vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{\varepsilon(\vec{r}, t) \partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t + \vec{J}(\vec{r}, t)} \rightarrow -\nabla \wedge \vec{H}(\vec{r}, -t) = \frac{\varepsilon(\vec{r}, -t) \partial \vec{E}(\vec{r}, -t)}{-\partial t - \vec{J}(\vec{r}, -t)}$$

Quindi la seconda condizione necessaria per poter applicare il Time Reversal è verificata. Inoltre, la tecnica del Time Reversal, può essere applicata a qualsiasi banda di frequenza che rispetti la condizione di caoticità, cioè che la lunghezza d'onda sia molto minore rispetto al volume di calcolo.

Per l'analisi numerica della tecnica del Time Reversal si è applicata la Trasformata di Fourier per poter passare dal dominio del tempo a quello della frequenza; pertanto, di seguito, vediamo nel dettaglio come si opera con questo tipo di trasformazione.

Come risaputo, il contenuto in frequenza ($F(\omega)$) di un segnale nel dominio del tempo viene dato dalla sua trasformata di Fourier, quindi applicando a $f(t)$, che è la funzione nel dominio del tempo la trasformata di Fourier:

$$(F(\omega)) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

Applico ora l'operatore di Time Reversal:

$$(F(\omega)) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(-t) e^{-i\omega t} dt$$

E svolgendo i calcoli si ottiene infine che:

$$f(-t) = F(\omega)$$

La quale non è altro che la funzione ($F(\omega)$) invertita nel tempo.

La trattazione numerica sopraesposta era applicata al caso di una funzione a valori reali continua nel tempo, ma come sappiamo quando passiamo nel dominio delle frequenze si passa a funzioni con valori complessi con parte reale pari e parte immaginaria dispari.

Generalizzando prendiamo $h(t)$ una funzione a valori complessi e sia h^* il suo coniugato (la sua inversione);

Applicando la trasformata di Fourier a tali funzioni si ottiene:

Funzione a valori complessi	Funzione trasformata con Fourier
$h(t)$	$H(\omega)$
$h^*(-t)$	$H^*(\omega)$
$h^*(t)$	$H^*(-\omega)$
Quindi	
$h(t)$	$H(\omega)$

Ciò risulta vero se:

$$h^*(t) = h^*(-(-t)) \leftrightarrow H^*(-\omega)$$

Definito ciò ci resta solamente di esplicitare come il Time Reversal agisce su un sistema lineare a tempo invariante.

Per potersi applicare la tecnica del Time Reversal ad un sistema lineare a tempo invariante devono essere verificate due proprietà:

1. Il sistema deve essere lineare cioè si deve poter applicare su esso il principio di sovrapposizione degli effetti:

Siano α e β costanti;

Sia indicato con $x(t)$ l'ingresso del sistema e con $y(t)$ l'uscita di esso.

A tale sistema così definito deve valere che:

$$x(t) = \alpha x_1(t) + \beta x_2(t)$$

$$y(t) = T[x(t)] = \alpha y_1(t) + \beta y_2(t)$$

2. Invarianza nel tempo, cioè che ad un ingresso $x(t-t_0)$ corrisponda un'uscita $y(t-t_0)$:

$$y(t) = T[x(t)]$$

$$T[x(t-t_0)] = y(t-t_0)$$

Quindi, se al sistema lineare a tempo invariante sono verificate entrambe le condizioni, allora si può adoperare la tecnica del Time Reversal.

Nelle precedenti tesi si sono dimostrate entrambe le condizioni, pertanto, si è potuto procedere a studiare analiticamente la focalizzazione delle onde elettromagnetiche, come in seguito.

Camere Riverberanti

Le camere riverberanti sono ambienti pensati per i test di compatibilità elettromagnetica (EMC), che consistono in esperimenti sull'emissione, immunità o suscettibilità elettronica degli apparati; vengono impiegate anche per verificare la schermatura di cavi, connettori, ecc. Idealmente, è un spazio nel quale non vi è alcun assorbimento di energia elettromagnetica e le pareti riflettono perfettamente tutte le onde incidenti ad esse generando così un'ambiente caotico (condizione necessaria per poter eseguire la tecnica del Time Reversal). Questa mancanza totale di assimilazione energetica è utopica e non attuabile completamente, tuttavia grazie alla comunque debole capacità di assorbimento delle pareti, è possibile generare campi di elevata intensità partendo segnali di moderata potenza.



Immagine 5: Esempio di una Camera Riverberante

All'interno di essa, vengono posizionati diversi strumenti atti a generare un campo elettromagnetico il più caotico possibile, denominati Stirrer, le antenne dedicate ad emettere gli impulsi (antenne Logperiodiche) e le antenne che ricevono e registrano l'impulso (antenne Loop riceventi). Gli stirrer non sono altro che lamine, altamente riflettenti, collegate ad un motore che ne permette la continua rotazione; Il loro movimento è volto a creare una distribuzione il più caotica possibile del campo elettromagnetico all'interno delle stesse camere riverberanti.

Non a caso, generalmente le antenne vengono posizionate proprio sopra gli Stirrer. Inoltre, grazie alla loro funzione di rimescolare continuamente il campo elettromagnetico, garantiscono di poter effettuare misurazioni riproducibili e consistenti, permettendo di testare equivalientemente dei dispositivi posizionati in aree diverse all'interno dello spazio della camera. La loro accuratezza ne assicura dati attendibili e, come precedentemente detto, riproducibili; qualità essenziali nell'ambito della ricerca. Nello studio di questa tesi, l'utilizzo di una camera riverberante è stato impiegato in forma virtuale.



Immagine 6: Esempio di due Stirrer "Z Folder", uno lungo l'asse verticale ed uno lungo l'asse orizzontale.

Formule Camera Riverberante

Un altro fattore, questa volta non di presenza fisica, ma di merito e di elevata importanza all'interno delle camere riverberanti è il Gauge Factor, o fattore di merito, (Q). Il fattore Gauge indica la relazione che sussiste tra l'energia immagazzinata all'interno della camera riverberante (U) e la sommatoria delle Potenze Dissipate: assorbita dalle pareti, dagli oggetti all'interno della camera e potenza fuoriuscita dai pertugi della camera, unitamente alla quella dissipata dai carichi delle antenne (P_d); pertanto, più il fattore Q è elevato meno perdite di energia ci saranno nella camera riverberante (descrive in buona sintesi la capacità della cche ha la camera riverberante di immagazzinare l'energia).

$$Q = \omega \left(\frac{U}{P_d} \right)$$

Con:

Q = fattore di merito;

ω = Pulsazione;

U = Energia immagazzinata nella camera riverberante;

P_d = Sommatoria delle Potenze dissipate;

Per le camere riverberanti il calcolo del Fattore di Merito si ottiene con la seguente formula empirica:

$$Q = \frac{3V}{(2\delta A\mu_r)}$$

Con:

V = Volume della Camera riverberante;

δ [m] = profondità di penetrazione per Effetto Pelle.

μ_r = Permeabilità relativa del materiale;

A = Area delle pareti;

A sua volta per poter calcolare δ basta utilizzare la relazione classica valida per buoni conduttori come le pareti metalliche della camera riverberante:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi f \mu_\omega \sigma_\omega}}$$

Con:

μ_ω = Permeabilità magnetica assoluta del materiale
conduttore [H/m];

σ_ω = Conducibilità elettrica del materiale [S/m];

f = Frequenza [Hz];

A sua volta μ_ω è data dal prodotto della permeabilità magnetica del vuoto (μ_0) e della permeabilità magnetica relativa del materiale (μ_r).

Il fattore di merito risulta di primaria importanza per l'ottenimento di un risultato utile ai fini della ricerca sulla focalizzazione delle onde elettromagnetiche all'interno di un mezzo, poichè più è elevato il fattore di merito, più l'impulso rimbalzerà a lungo nel tempo e seguendo un'andamento caotico (implicando quindi cammini d'onda ancora più lunghi).

Per poter utilizzare la tecnica del Time Reversal è necessario: che il fattore di merito sia il più elevato possibile e che il campo elettromagnetico sia il più caotico

possibile, è per tale motivazione che vengono utilizzati gli stirrer che sono tenuti fermi ed operano da diffusori.

Simulazioni

Come detto precedentemente, in questa tesi si è voluto dare maggiore risalto sia allo studio analitico e numerico della focalizzazione del campo elettromagnetico applicando la tecnica del Time Reversal, discussa e spiegata nei precedenti capitoli, sia a un impulso generato da un'antenna monopolare e di graficarne i risultati trovati per costruire un modello grafico, in 2-D, riportante la mappa della regione anatomica di interesse con l'intensità del campo elettromagnetico focalizzato.

I risultati numerici utili al fine di costruire la mappa in 2-D sono stati ottenuti applicando al modello matematico sopra descritto il metodo FDTD (Finite Difference Time Domain), il quale è una tecnica che permette di rappresentare una struttura espressa sottoforma di equazioni di tipo matematico; nel nostro caso, essa viene espressa mediante le equazioni di Maxwell, all'interno di un computer tramite una campionatura spaziale e temporale. [4]

Il programma contenente il codice applicativo del metodo FDTD, che abbiamo utilizzato per il seguente studio, è stato interamente scritto all'interno dell'Università Politecnica delle Marche. Le equazioni di Maxwell sono state campionate per caratterizzare il campo elettromagnetico nel volume di interesse.

Per prima cosa, tali equazioni vengono discretizzate nello spazio che è suddiviso in celle dotate di un volume consono ad essere computazionalizzate, senza generare una richiesta di memoria troppo elevata, in quanto, più la cella elementare è piccola più celle saranno necessarie e più potenza computazionale sarà richiesta con conseguente incremento della quantità di tempo. Invece più la cella elementare è grande, meno attendibile saranno i risultati ottenuti.

Per poter campionare spazialmente il campo elettromagnetico, viene impiegato a sua volta l'algoritmo di Yee, il quale descrive come trasformare le equazioni di Maxwell e di calcolare le sue componenti rispetto al tempo.

Il campo elettromagnetico viene discretizzato rispetto i tre assi cartesiani principali x , y e z .

La trattazione numerica di questo algoritmo non verrà riportata all'interno di questo elaborato accademico in quanto non è l'oggetto voluto di questo studio ma si possono trovare molte dimostrazioni di discretizzazione del campo elettromagnetico mediante l'algoritmo di Yee sulle precedenti tesi svolte dai miei colleghi iscritti presso la medesima facoltà. [2] [3] [5]

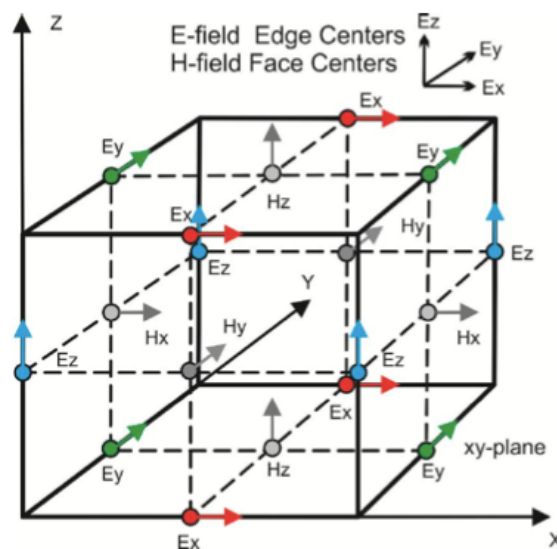


Immagine 7: elemento di una cella di Yee.

I risultati che di seguito verranno esposti sono stati ottenuti a seguito di due diverse simulazioni effettuate sul medesimo soggetto: nella prima simulazione abbiamo fatto in modo che un impulso da 2.45 GHz si focalizzasse nel centro della testa ($x = 220$, $y = 120$, $z = 70$); nella seconda, abbiamo fatto in modo che l'impulso mandato, sempre di 2.45 GHz, si focalizzasse sopra l'orecchio destro del soggetto ($x = 270$, $y = 120$, $z = 100$), pertanto mantenendo identica la coordinata y (altezza) spostando solamente più verso l'esterno il punto di focalizzazione.

Abbiamo portato il codice FDTD scritto sopra all'interno del supercomputer IRENE, che è situato al CEA in Francia, con il fine di ottenere sfruttando il suo potere computazionale, i risultati numerici da cui abbiamo generato i grafici utilizzando il software opensource Paraview.

I valori delle specifiche elettromagnetiche dei tessuti umani necessari per effettuare i calcoli sono stati presi dal Virtual Family Project (VFP) presso il sito web: <https://itis.swiss/virtual-population/virtual-population/overview/>. Il VFP sono modelli anatomici ad alta risoluzioni ricavati da immagini di risonanze magnetiche di volontari sani.

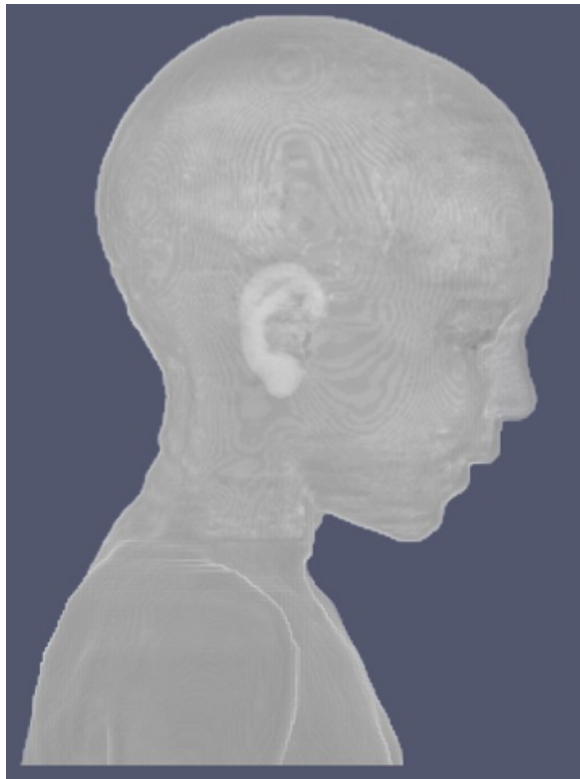


Immagine 8: vista laterale della testa del soggetto di studio (immagine ottenuta con l'impiego del software Paraview).

Prima simulazione:

Per la prima simulazione è stato generato un impulso Gaussiano da un'antenna monopolare da 2.45GHz e registrato nel centro della testa ($x = 220$, $y = 120$, $z = 70$). Questo segnale è stato rovesciato e dato in ingresso allo stesso programma.

Di seguito sono riportate le immagini che correlano il segnale generato e il segnale ricostruito:

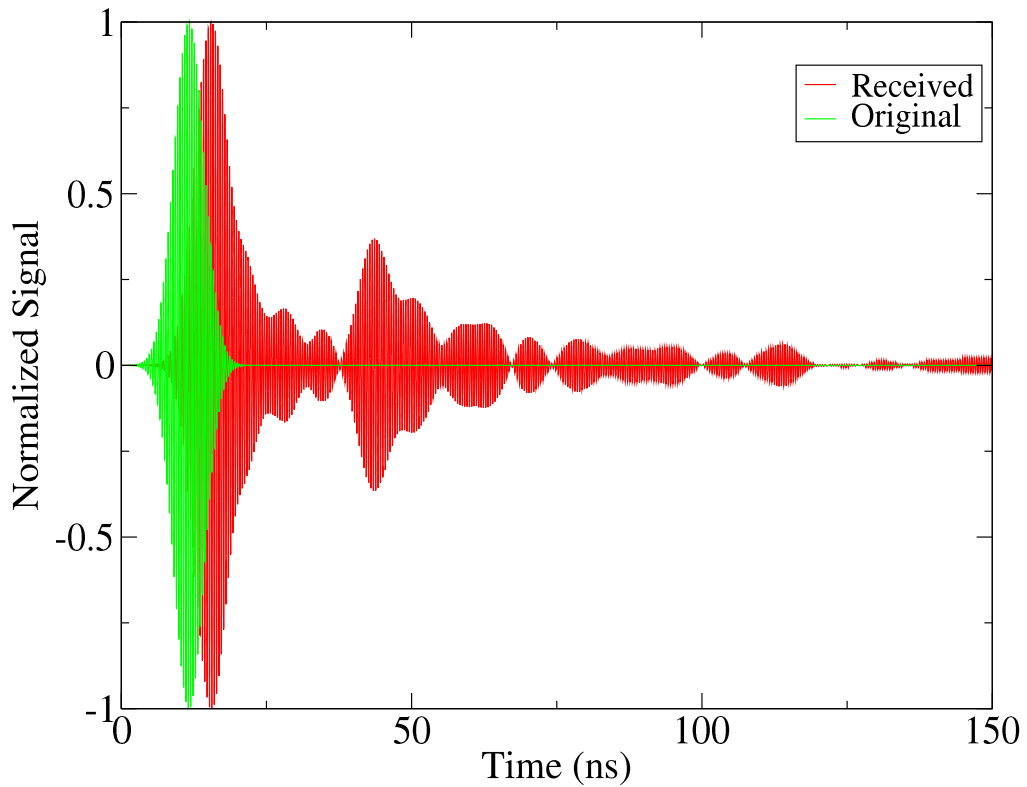


Immagine 9: segnale ricevuto confrontato con quello originale.

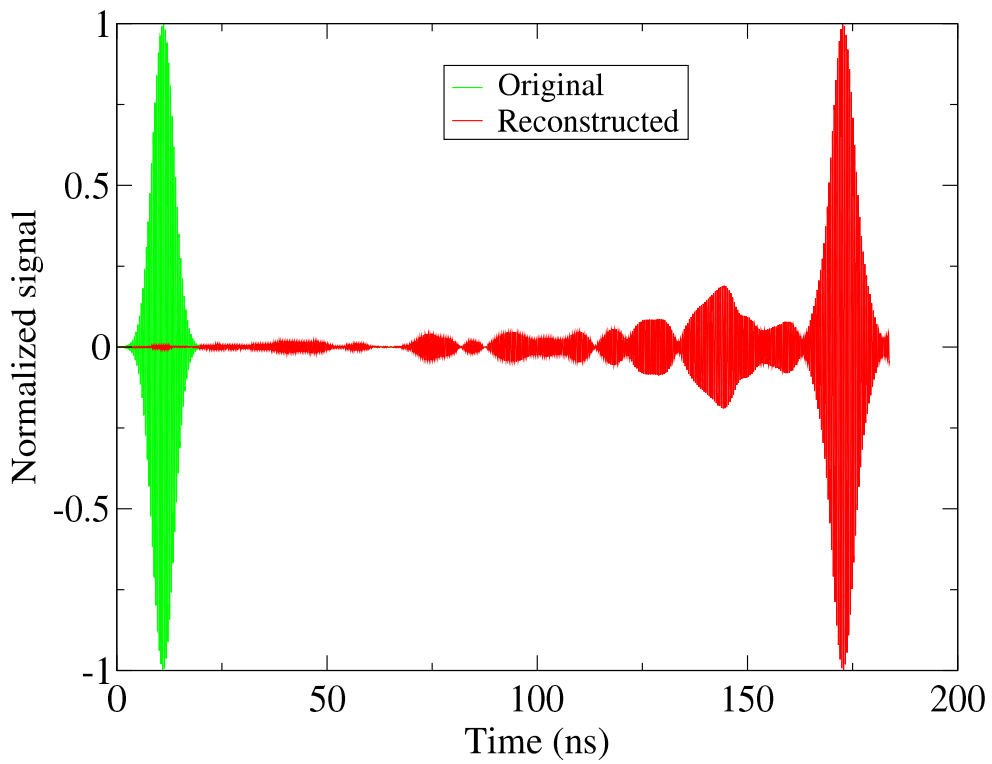


Immagine 10: Segnale originale e ricostruito.

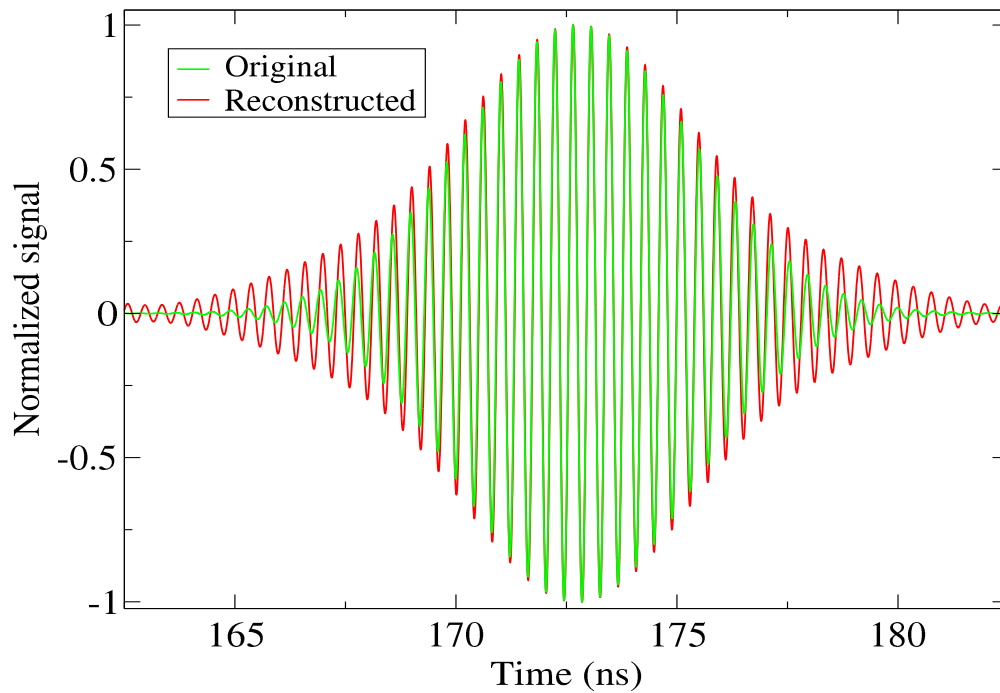


Immagine 11: segnale originale confrontato con quello ricostruito.

Come si può evincere dalle immagini il segnale ricostruito è più intenso rispetto al segnale originale, anche se non in maniera troppo significativa.

Si vedranno di seguito le immagini riportanti gli effetti generati dall'impulso originale prima che la tecnica del Time Reversal venga applicata cioè quelli relativi alla propagazione dell'impulso iniziale.

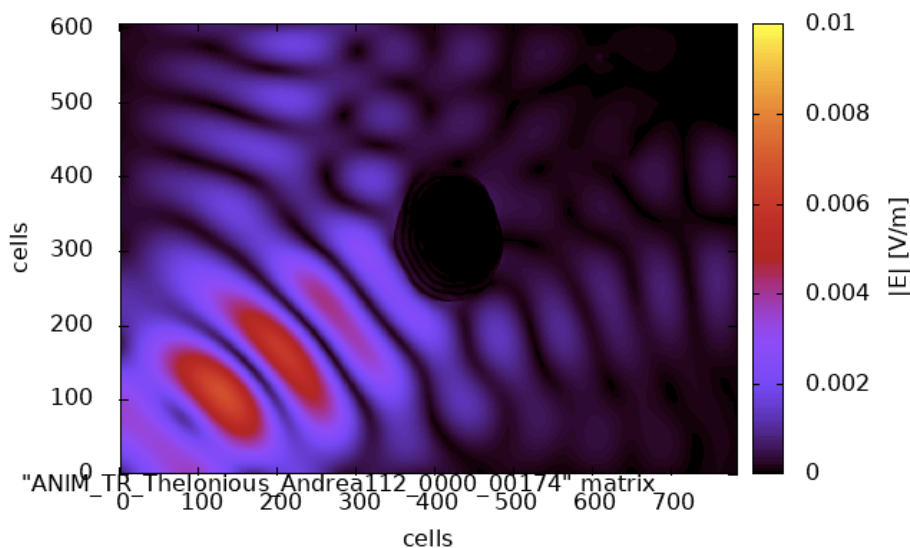


Immagine 12: inizio della prima simulazione senza inversione dell'impulso.

All'inizio della prima simulazione si può nitidamente vedere come l'antenna monopolare posizionata nell'origine del piano (posizione (0,0)), emetta l'impulso da 2.45 GHz e che all'inizio della simulazione il campo elettromagnetico generato è di scarsa entità e non vi è nessun riscaldamento della zona di interesse.

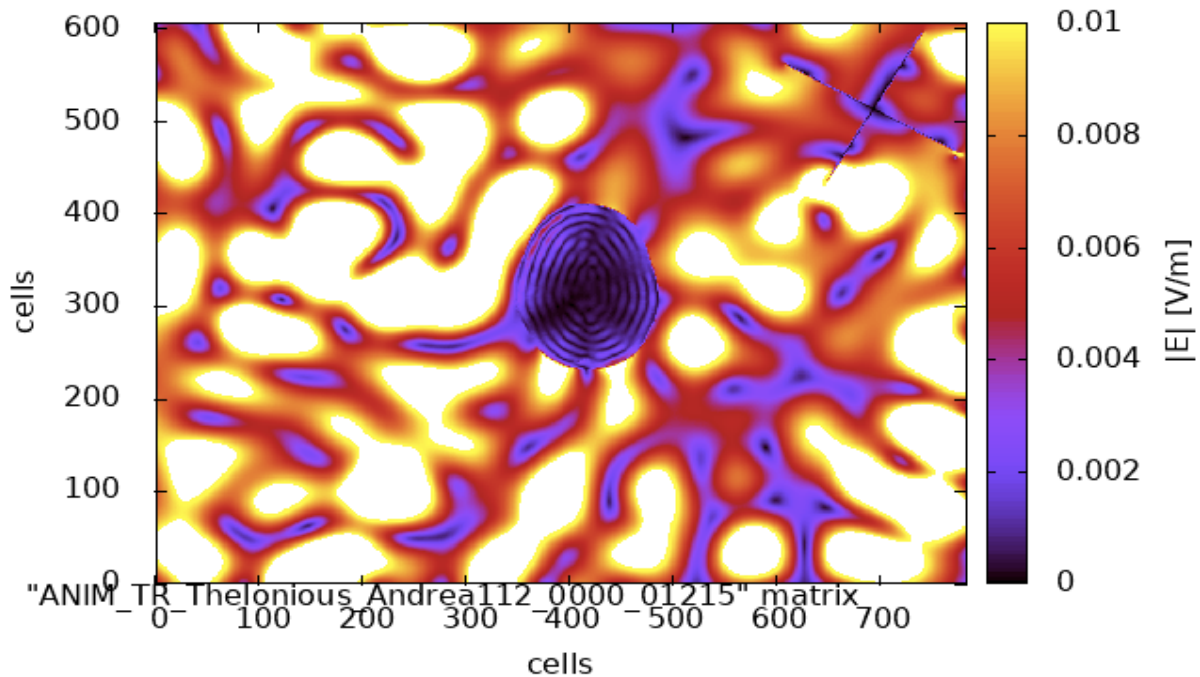


Immagine 13: il campo elettromagnetico è al massimo livello di caoticità.

Nel momento di massima caoticità si può riscontrare come l'impulso elettromagnetico emesso non riesca a penetrare nelle coordinate volute e che non sia in grado di scaldare apprezzabilmente nessun area di interesse.

Di seguito vedremo invece gli effetti provocati dall'impulso ricostruito e focalizzato nelle coordinate di interesse:

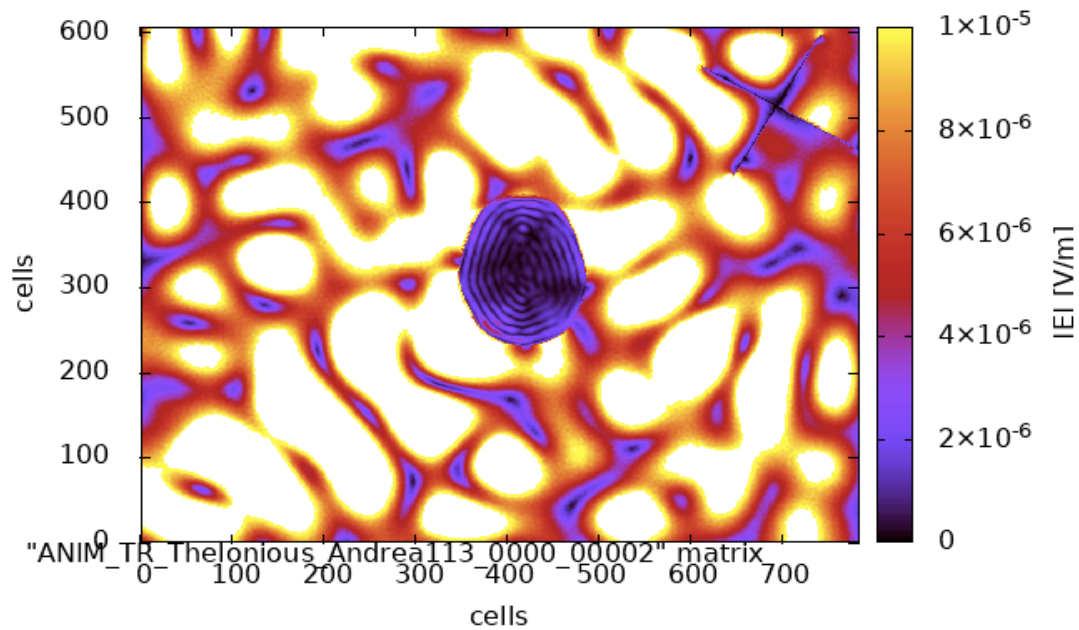


Immagine 14: inizio della simulazione in cui l'impulso è stato rovesciato temporalmente con la tecnica del Time Reversal.

All'inizio della simulazione, nella quale l'impulso è stato ricostruito rovesciando l'impulso originale, si denota come il campo elettromagnetico generato dall'impulso sia evidentemente molto più caotico rispetto al campo elettromagnetico generato iniziale e come, se pur con scarsa rilevanza, inizi a scaldare il perimetro esterno della testa del soggetto.

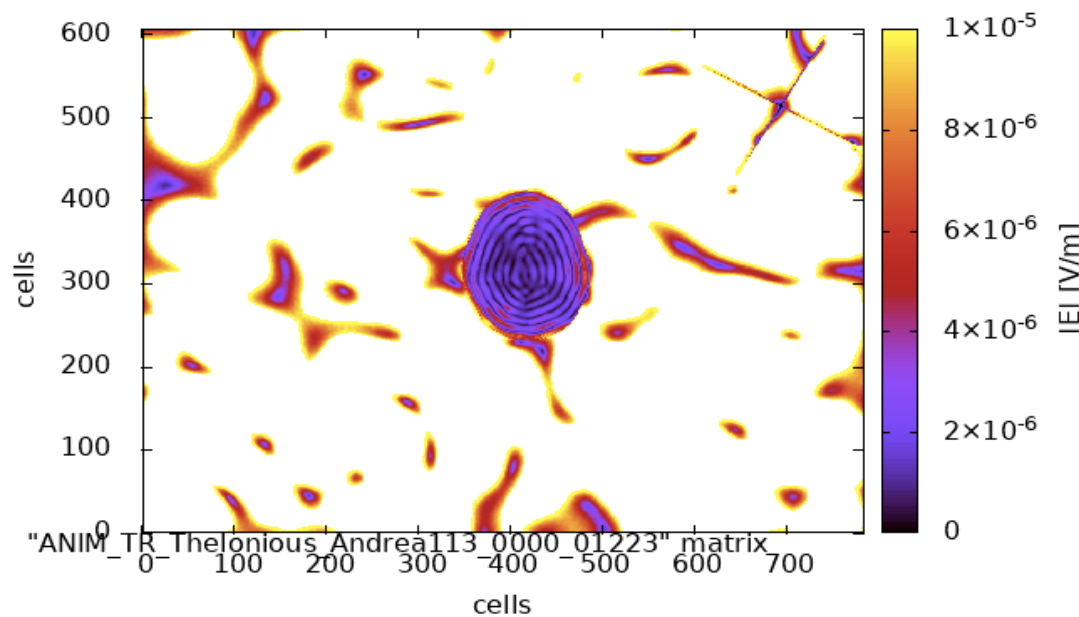


Immagine 15: fine della simulazione nella quale il campo elettromagnetico è generato dall'impulso rovesciato temporalmente ed è al massimo livello di caoticità.

Al termine della simulazione ottenuta dall'inversione temporale del segnale originale, mediante l'applicazione del Time Reversal, si dia evidenza di come, rispetto alla simulazione effettuata usando l'impulso originale non invertito temporalmente, vi sia stata un notevole incremento di riscaldamento della testa del soggetto; tuttavia, non è ancora sufficiente per riuscire a penetrare verso il punto di interesse, anche se è evidente come la focalizzazione in questo caso tenda in maniera molto più marcata ad essere orientata verso il target.

Seconda simulazione:

Per la seconda simulazione è stato generato, come per la prima, un impulso Gaussiano da un'antenna monopolare Logperiodica da 2.45GHz e registrato sopra l'orecchio destro nelle coordinate $x = 270$, $y = 120$, $z = 100$.

Di seguito sono riportate le immagini che correlano il segnale generato e il segnale ricostruito:

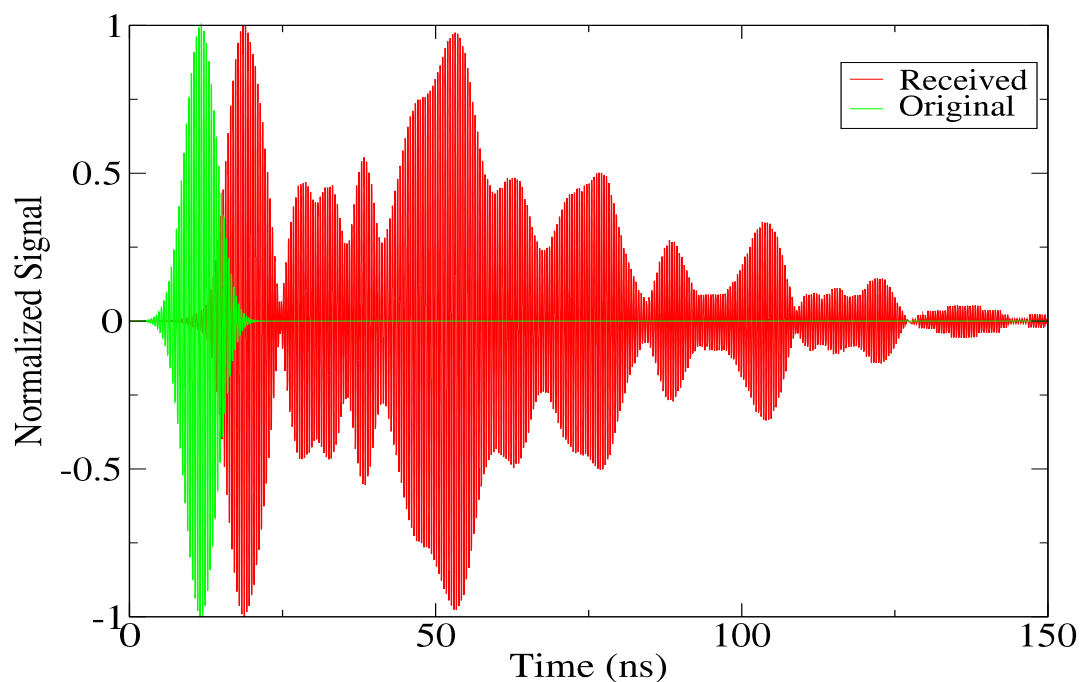


Immagine 16: segnale ricevuto nella seconda simulazione confrontato con quello originale.

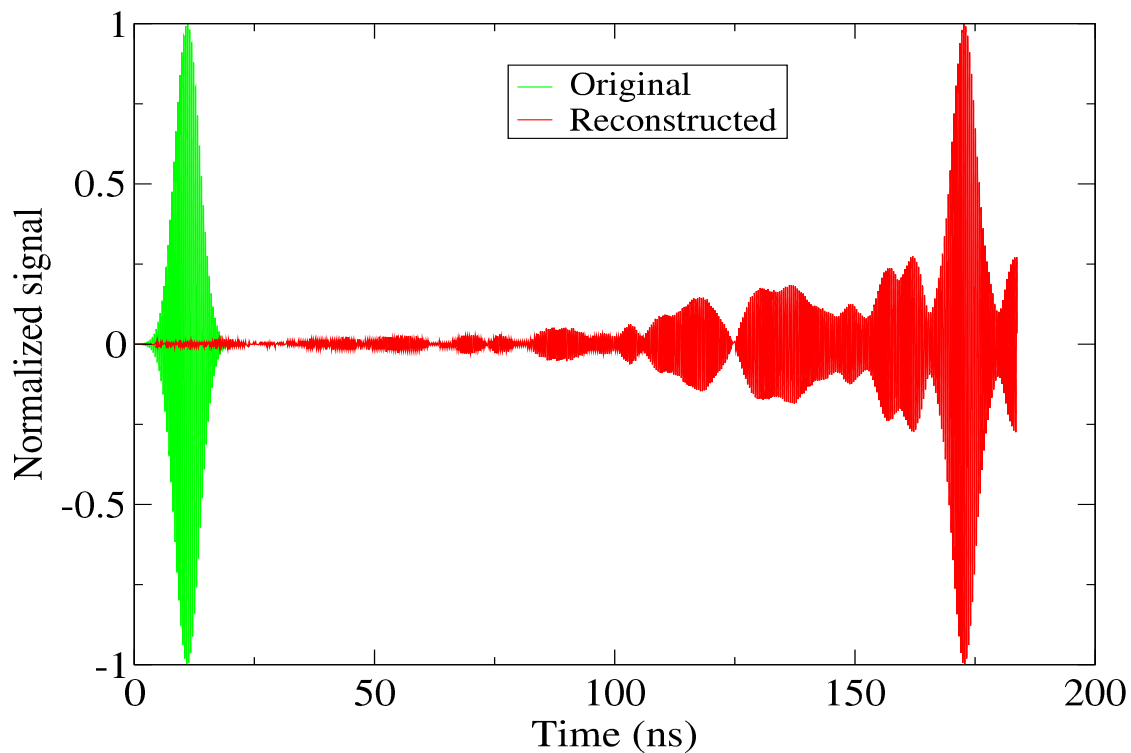


Immagine 17: Segnale originale e ricostruito della seconda simulazione.

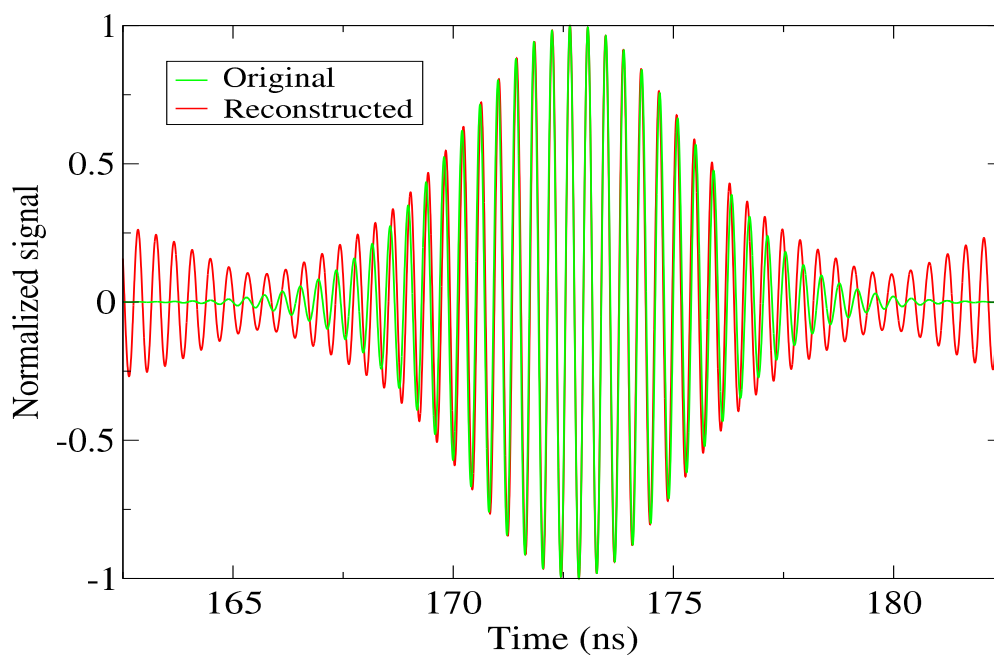


Immagine 18: segnale originale della seconda simulazione confrontato con quello ricostruito

Come riportato dalle immagini, l'impulso ricostruito risulta essere di notevole entità rispetto al segnale originale.

Si vedranno di seguito le immagini riportanti gli effetti generati dall'impulso originale, della seconda simulazione, prima che la tecnica del Time Reversal venga applicata:

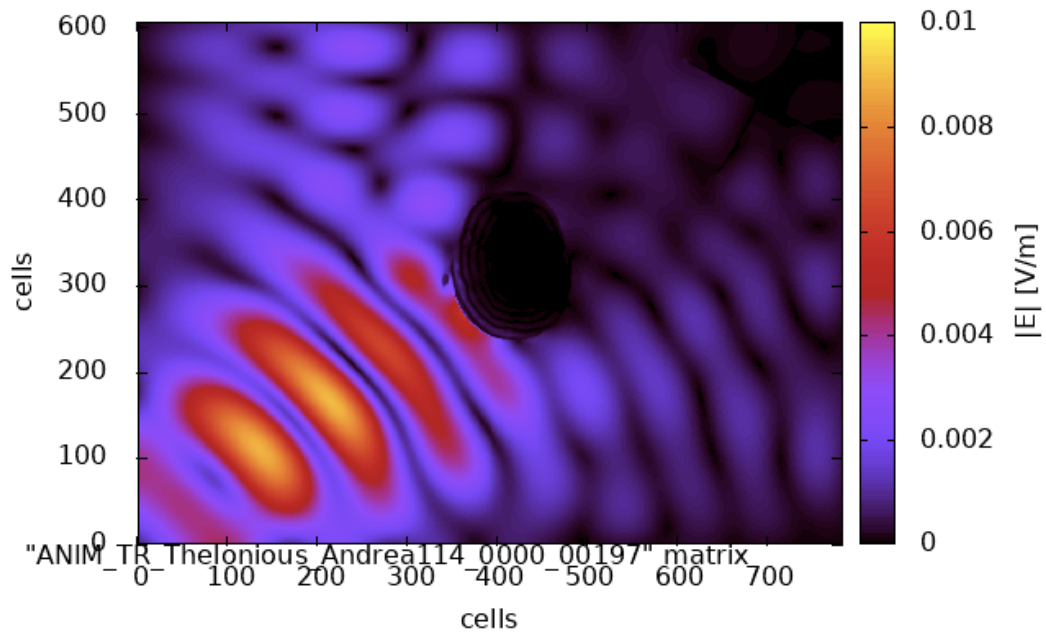


Immagine 19: inizio della seconda simulazione senza ricostruzione dell'impulso.

Come si può vedere dal grafico: all'inizio della seconda simulazione l'impulso viene emesso dall'antenna monopolo, installata come per la prima simulazione nell'origine degli assi, e il campo elettromagnetico è di rilevanza nulla ai fini dello studio.

Con l'avanzare del tempo, come per la prima simulazione, grazie agli stirrer installati all'interno della camera di riverberazione, il campo elettromagnetico crescerà sempre di più diventando sempre più caotico.

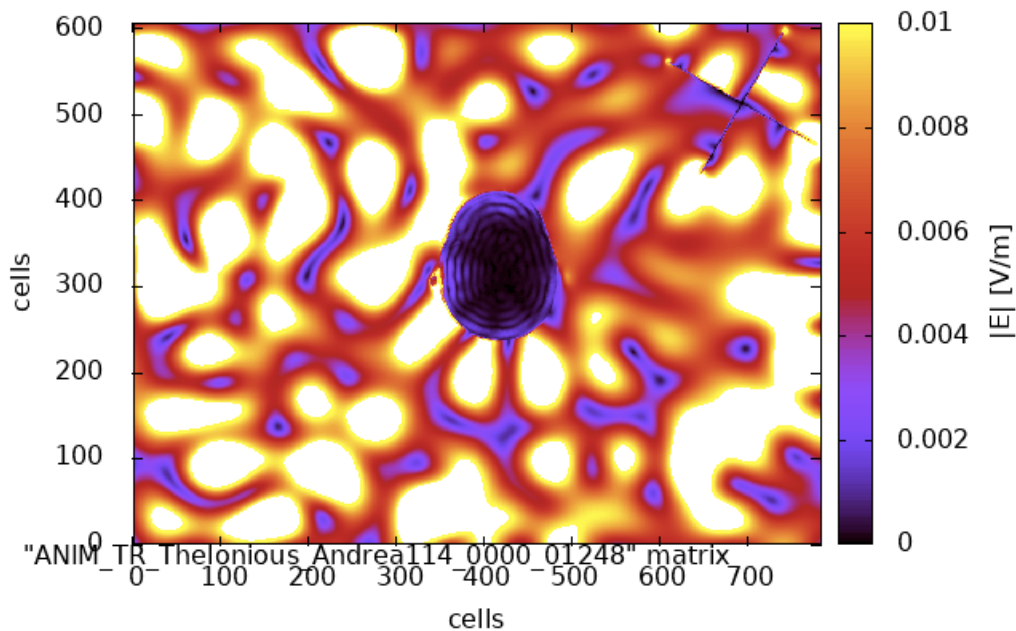


Immagine 20: il campo elettromagnetico è al massimo livello di caoticità durante la seconda simulazione prima che il segnale venga ricostruito.

Alla fine della seconda simulazione, prima che al segnale venga applicata la tecnica del Rime Reversal e che venga pertanto ricostruito, si da evidenza di come l'impulso generato riesca a focalizzare la sua energia sopra l'orecchio sinistro (quindi verso il perimetro della testa del soggetto) senza penetrare verso il centro.

Si può dedurre quindi come prima che il segnale venga ricostruito, a differenza della prima simulazione, l'impulso riesca ad essere focalizzato con maggiore efficacia verso il perimetro cioè ottenendo l'effetto desiderato.

Di seguito vedremo invece gli effetti provocati dall'impulso ricostruito nella seconda simulazione:

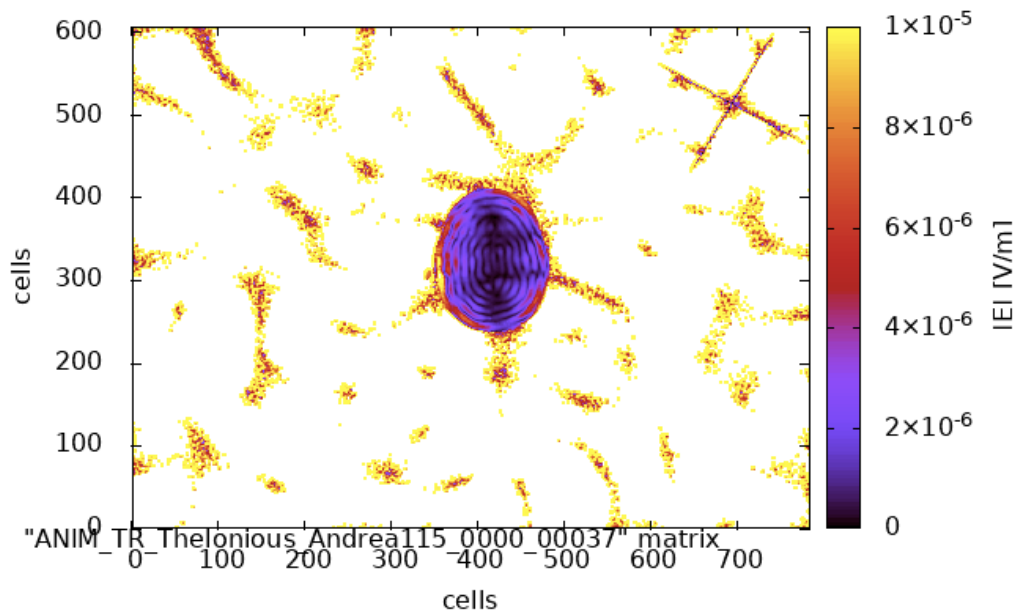


Immagine 21: inizio della seconda simulazione in cui l'impulso è stato rovesciato temporalmente con la tecnica del Time Reversal.

Come si può vedere, all'inizio della seconda simulazione utilizzando l'impulso ricostruito vi è fin da subito una apprezzabile focalizzazione dell'impulso concentrata verso il perimetro della testa del soggetto, in particolare vi è una focalizzazione nella regione dell'orecchio sinistro.

Rispetto alla prima simulazione, era già evidente come il segnale era più potente, nonostante ad esso non fosse ancora stata applicata la tecnica del Time Reversal. Difatti, c'è una notevole penetrazione dell'impulso nel perimetro della testa del paziente oggetto di studio.

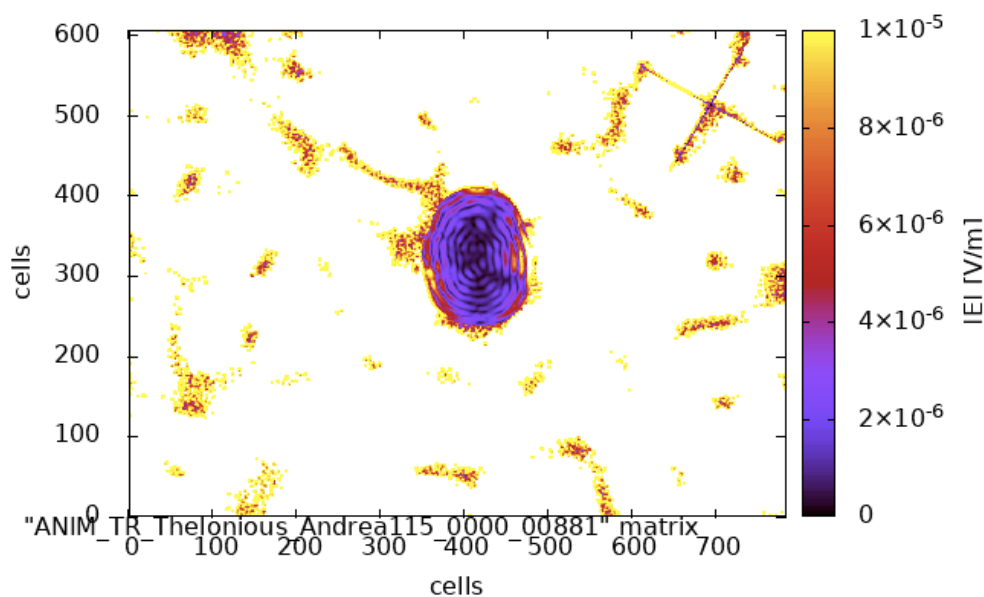


Immagine 22: fine della seconda simulazione nella quale il campo elettromagnetico è generato dall'impulso rovesciato temporalmente ed è al massimo livello di caoticità.

Al termine della seconda simulazione, nella quale è stato applicato l'impulso ricostruito, si evidenzia chiaramente come lo scopo della focalizzazione sia riuscito con un notevole risultato.

Infatti a differenza dell'inizio della seconda simulazione, dove viene utilizzato l'impulso ricostruito, la focalizzazione è proprio nel punto desiderato cioè sopra l'orecchio destro.

Oltre a riuscire a focalizzare l'impulso nel punto designato siamo inoltre stati capaci di dar nota di come tale impulso sia anche di apprezzabile intensità, in quanto, riesca a riscaldare la zona in maniera efficace, riuscendo ad andare in profondità senza però penetrare unicamente verso il centro della testa.

Conclusioni

Al termine delle simulazioni possiamo dimostrare come la propagazione di un impulso elettromagnetico ricostruito, emesso da un'antenna monopolare, si riesca a far concentrare in maniera apprezzabile sul punto voluto; tuttavia per ottenere un risultato scientificamente rilevante, il punto target designato deve trovarsi preferibilmente nella zona perimetrale dell'area anatomica, risulta invece meno efficace riuscire a focalizzare l'impulso se si prova in un punto in profondità.

Siamo arrivati alla conclusione, come tale tecnica si possa sviluppare al fine di raggiungere risvolti futuri estremamente importanti e rivoluzionari. Attualmente, applicare questa tecnica per il trattamento delle patologie situate più in prossimità del derma, risulterebbe essere estremamente giovevole; con studi ulteriori e con una tecnologia in avanzamento continuo, sono certo che un domani si potrà effettuare in tessuti situati sempre più in profondità.

Bibliografia:

- [1] “Focalizzazione di campi elettromagnetici in mezzi dissipativi mediante tecnica dell’inversione temporale in camere riverberanti”, Ausilia Teresa Frisco, UNIVPM.
- [2] “Finite-Difference Time-Domain Analysis of Time Reversal Technique for electromagnetic Fields Focusing on Human Head”, Francesco Dragano, UNIVPM.
- [3] “Influenza della larghezza di banda sulla focalizzazione del campo elettromagnetico in ambienti riverberanti”, Alessia Ortolani, UNIVPM.
- [4] “Metodi di risoluzione nel dominio del tempo”, Paolo Nocito, Sapienza Università di Roma.
- [5] “Performance analysis of point source model with coincident phase centers in FDTD”, Yang Xu, Worcester Polytechnic Institute.