



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Biomedica

**Studio e valutazione del comfort acustico
nella riproduzione sonora tramite cuffie**

**Study and evaluation of acoustic comfort
in the sound playback through
headphones**

Relatore: Chiar.mo

Prof. **Susanna Spinsante**

Candidato:

Clara Minciaroni

Correlatori:

Prof. **Stefania Cecchi**

Ing. **Alessandro Terenzi**

A.A. 2019 / 2020

Abstract

Negli ultimi anni l'utilizzo delle cuffie e degli auricolari ha avuto un grande incremento. Nella vita di tutti i giorni si è particolarmente diffuso l'impiego di auricolari wireless, sia per la conversazione che per l'ascolto della musica, che possiedono il grande vantaggio per l'utilizzatore di potersi muovere liberamente. Cuffie o auricolari più o meno piccoli, più o meno isolanti, più o meno economici sono diventati un prodotto di largo consumo, spingendo le case produttrici a migliorarne sempre più estetica, comodità e qualità di riproduzione al fine di offrire un prodotto in grado di soddisfare una sempre più ampia platea di consumatori.

La modalità di impiego più esigente, dal punto di vista dei requisiti che le cuffie devono avere, è la misurazione delle prestazioni uditive. In tale ambito è infatti necessario fidarsi del dispositivo stesso, della sua calibrazione e dell'accoppiamento acustico ottimale con il maggior numero possibile di soggetti aventi ognuno un apparato uditivo con caratteristiche peculiari e soggettive. A livello ingegneristico, è desiderabile che le cuffie progettate abbiano una risposta in frequenza completamente piatta, così da poter inviare all'orecchio del soggetto i range di frequenze selezionati senza che la cuffia possa in qualche modo distorcere la frequenza in uscita.

In questo elaborato viene descritta un'attività sperimentale simulata in Matlab, effettuata su quattro cuffie commerciali con l'obiettivo di calcolare la risposta impulsiva dei trasduttori utilizzando varie tecniche di identificazione, valutarne lo spettro in frequenza e modellare risposte impulsive inverse al fine di ottenere una risposta in frequenza complessiva piatta e quindi cuffie equalizzate.

Indice

INDICE.....	5
1. INTRODUZIONE.....	6
1.1 L'ORECCHIO UMANO	6
1.2 CONCETTI DI ACUSTICA E DI PSICOACUSTICA	10
1.3 COMFORT ACUSTICO	14
1.4 VIRTUALIZZAZIONE DEL SUONO	16
1.5 TIPI DI CUFFIE.....	17
1.6 RISPOSTA IN FREQUENZA	19
2. MATERIALI E METODI.....	20
2.1 DATASET	21
2.2 LE CUFFIE	22
2.3 MISURA DELLA RISPOSTA ALL'IMPULSO.....	24
2.4 EQUALIZZAZIONE	28
2.5 APPLICAZIONI	31
3. RISULTATI	34
3.1 METODO MLS.....	34
3.2 METODO ESS	35
3.3 CUFFIA AKG-K240.....	36
3.4 CUFFIA SENNHEISER-HD480	46
3.5 CUFFIA RADIO SHACK-NOVA 38.....	56
3.6 CUFFIA SONY-TWINTURBO.....	65
3.7 CONFRONTO	75
4.CONCLUSIONI	78
BIBLIOGRAFIA.....	80
ELENCO DELLE FIGURE.....	81

1. Introduzione

I suoni che arrivano all'orecchio provengono sempre da sorgenti sonore e cioè da corpi elastici messi in vibrazione. Le vibrazioni (onde sonore) si trasmettono all'orecchio, come onde meccaniche di compressione e rarefazione, attraverso un mezzo: l'aria.

1.1 L'orecchio umano

L'apparato uditivo umano (Figura 1.1) è diviso in tre parti contigue che prendono il nome di *orecchio esterno*, *orecchio medio* e *orecchio interno*. L'orecchio umano è il trasduttore acustico per eccellenza, in grado di accogliere l'onda sonora e di inviarla al cervello grazie ai recettori acustici che lo innervano.

1.1.1 L'orecchio esterno

L'orecchio esterno comprende il *padiglione auricolare* ed il *meato acustico esterno*; la sua funzione è quella di accogliere le onde sonore e di convogliarle nella membrana del timpano. Il padiglione è costituito prevalentemente da cartilagine e rivestito da cute. Presenta caratteristici rilievi e numerose depressioni; la maggiore di queste, la *conca*, si trova nella parte centrale e continua direttamente nel meato acustico esterno. Quest'ultimo è un condotto che collega la conca del padiglione all'orecchio medio, terminando in prossimità della membrana. Così come la stanza è il collegamento imprevedibile tra un altoparlante e un ascoltatore, l'orecchio esterno è l'accoppiamento incerto tra cuffia e timpano. Shaw [1],[2],[3] e altri [4] hanno migliorato la nostra conoscenza dell'orecchio esterno e del suo importante ruolo nella rilevazione e localizzazione del suono: l'orecchio esterno è un collettore molto efficiente di suoni sopra i 2 kHz ed ha una notevole direzionalità alle frequenze più alte. È la porta attraverso la quale deve passare il suono e lascia il segno sul suono che arriva al timpano.

Queste conoscenze hanno conseguenze significative sulla progettazione dei dispositivi coinvolti nella riproduzione acustica.

1.1.2 L'orecchio medio

L'orecchio medio comprende il *cavo del timpano*, la *membrana del timpano* e la *catena degli ossicini dell'udito*.

Il cavo del timpano è una cavità ossea posta tra l'orecchio esterno e l'orecchio interno. Accoglie la catena degli ossicini e ha la forma di una lente biconcava.

La membrana del timpano chiude il meato acustico esterno, dividendolo dal cavo del timpano, possiede particolari caratteristiche fisiche ed è in grado di entrare in vibrazione se stimolata da onde sonore. La catena degli ossicini dell'udito è formata da *martello*, *incudine* e *staffa*, tre piccole ossa articolate tra loro. L'orecchio medio è il sistema più efficiente per la trasmissione dei suoni dall'orecchio esterno all'orecchio interno. La membrana del timpano, vibrando, trasmette infatti il suo movimento al martello, questo all'incudine e l'incudine alla staffa.

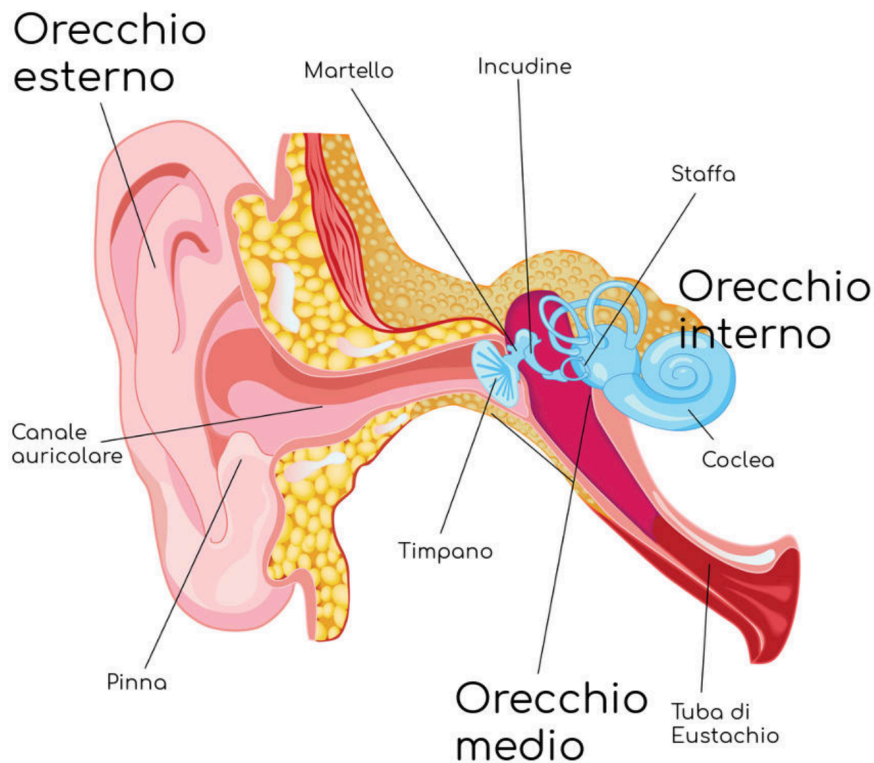


Figura 1.1: Anatomia dell'orecchio. [27]

1.1.3 L'orecchio interno

L'orecchio interno è costituito dal labirinto osseo, complicato sistema di cavità scavate nello spessore della piramide temporale, e dal labirinto membranoso, un insieme di organi cavi rivestiti da epitelio e contenuti nelle cavità del labirinto osseo. Tra di essi si interpone lo spazio perilinfatico nel quale è contenuta la perilinfa. Nel labirinto membranoso si trovano il condotto cocleare e l'organo del Corti che contiene i recettori acustici del labirinto; la sua funzione è quella di analizzare i suoni che vengono trasformati in vibrazioni dalla perilinfa. Le vibrazioni della perilinfa si trasmettono alla membrana basilare, sulla quale si trova l'organo del Corti; suoni ad alta frequenza metteranno in vibrazione la parte basale della membrana mentre suoni a bassa frequenza provocheranno la vibrazione della sua parte apicale. I movimenti della membrana agiscono come sollecitazioni sull'organo del Corti e sono all'origine del potenziale di azione che insorge nelle terminazioni nervose a contatto con le cellule acustiche.

1.1.4 La trasmissione sonora

L'orecchio è formato da un *apparato di trasmissione* che convoglia le onde sonore e le trasmette all'organo del Corti; quest'ultimo trasforma l'energia prodotta dallo stimolo sonoro in impulsi nervosi poi tradotti in sensazioni uditive.

Le onde sonore, che abitualmente arrivano all'orecchio per via aerea, vengono trasmesse alla perilinfa del labirinto attraverso la membrana del timpano e gli ossicini dell'udito. Gli ossicini dell'udito formano un perfetto leveraggio che amplifica la vibrazione del timpano e la trasmette alla finestra ovale: una membrana simile al timpano che trasmette le vibrazioni ricevute dalla staffa all'orecchio interno. Il rapporto di leva amplifica fino a tre volte la vibrazione del timpano; poiché la superficie del timpano è molto più estesa di quella della finestra ovale, a parità di forza la pressione aumenta. La composizione di questi due effetti fa sì che ci sia un'amplificazione della vibrazione del timpano trasmessa all'orecchio interno. Poiché i liquidi labirintici sono incompressibili, i movimenti della base della staffa sono possibili solo grazie all'esistenza della finestra ovale che è occlusa da una membrana estensibile. Questa si

estroflette verso il cavo del timpano ogni volta che la pressione esercitata dalla staffa sulla perilinfa della scala vestibolare della chiocciola si trasmette alla perilinfa della scala timpanica.

Le onde sonore possono essere infine trasmesse ai liquidi labirintici grazie alla vibrazione delle pareti ossee delle cavità dell'orecchio. È la vibrazione dei liquidi labirintici che si trasmette alle pareti del condotto cocleare, provocando la stimolazione dell'organo del Corti [5].

1.2 Concetti di acustica e di psicoacustica

I suoni udibili si estendono dalla frequenza minima di 12 Hz alla massima di 22000 Hz. Convenzionalmente, la banda dei suoni udibili è fissata da 20 Hz (soglia dell'udibile) a 20.000 Hz.

<i>Intensità sonora</i> (W/m^2)	<i>Pressione sonora</i> (Pa)	<i>Livello sonoro</i> (dB)	<i>Esempi</i>
10^2	200	140	Soglia del dolore
1	20	120	Vicino motore aereo
10^{-2}	2	100	Vicino martello pneumatico, urlo
10^{-4}	0.2	80	Ciglio autostrada trafficata, voce alta
10^{-6}	0.02	60	Parlato normale
10^{-8}	0.002	40	Voce bassa, sussurro
10^{-10}	0.0002	20	Respiro
10^{-12}	0.00002	0	Soglia udibile (1-4 kHz)

Figura 1.2: Esempi di fenomeni acustici relativi a intensità sonora, pressione sonora e livello sonoro. [26]

1.2.1 Grandezze acustiche

Le grandezze fisiche più importanti che caratterizzano il fenomeno sonoro sono la pressione sonora p [Pa], la velocità delle particelle v [m/s], la densità di energia sonora D [J/m^3], l'intensità sonora I [W/m^2] e la potenza sonora W [W].

Le potenze e le intensità sonore associate ai fenomeni acustici percepiti dall'orecchio hanno un'ampia gamma dinamica; per questo si utilizza una scala logaritmica, attraverso la quale il valore della grandezza in esame si equipara al logaritmo del rapporto tra la grandezza e una grandezza di riferimento. Utilizzando la notazione in decibel è possibile ridurre ulteriormente il campo di variabilità.

Si definisce livello di pressione sonora L_p la quantità:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_{rif}^2} = 20 \log \frac{p}{p_{rif}} \quad [\text{dB}]$$

Rappresenta la deviazione dalla pressione ambientale provocata da un'onda sonora dove P è il valore misurato e la pressione di riferimento corrisponde alla soglia inferiore di udibilità $20 \mu\text{Pa}$ per un tono puro a 1000 Hz .

Si definisce il livello di velocità sonora L_v :

$$L_v = 10 \log \frac{v^2}{v_{rif}^2} = 20 \log \frac{v}{v_{rif}} \quad [\text{dB}]$$

il logaritmo del rapporto tra la velocità dell'onda sonora e la velocità di riferimento 50 [nm/s] .

Si definisce il livello di densità sonora L_D :

$$L_D = 10 \log \frac{D}{D_{rif}} \quad [\text{dB}]$$

il logaritmo del rapporto della densità sonora rispetto alla densità di riferimento a $3 \times 10^{-15} \text{ [J/m}^3\text{]}$.

Il livello di potenza sonora L_W :

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_{rif}} \quad [\text{dB}]$$

rappresenta l'energia sonora emessa dalla sorgente rispetto alla potenza sonora di riferimento a 10^{-12} [W] .

1.2.2 I parametri della percezione

L'acustica percettiva o psicoacustica descrive come le grandezze fisiche citate nel paragrafo precedente vengano interpretate dal cervello umano. In generale, la percezione risulta dalla combinazione di più grandezze fisiche con contributi differenti.

Le grandezze psicoacustiche utilizzate sono: altezza, intensità e timbro. Tutte dipendono strettamente dalla frequenza e in particolare: dalla frequenza delle vibrazioni; dall'ampiezza; dal numero, e dall'ampiezza e dalle associazioni delle armoniche. L'intensità è legata alla percezione della pressione dell'onda sonora che raggiunge il timpano, determinata a sua volta dall'ampiezza e dalla distanza dalla sorgente. L'altezza permette di classificare i suoni in acuti e gravi, dipende principalmente dalla frequenza e dall'intensità. Il timbro distingue i suoni tra loro, a parità di frequenza, e dipende dalla forma dell'onda sonora, determinata dalla sovrapposizione delle frequenze fondamentali e delle armoniche. In particolare, è influenzato dalla sorgente sonora e dalla sua oscillazione.

Fletcher e Munson hanno rappresentato lo studio statistico di individui esposti a segnali sonori costituiti da toni puri ottenendo l'Audiogramma normale (Figura 1.3) che comprende una serie di curve di uguale sensazione. La grandezza utilizzata per valutare la isosensazione è la *Loudness* (intensità soggettiva). Queste curve costituiscono un modello della risposta acustica dell'orecchio umano standard grazie alle curve isofoniche; ciascuna di queste curve di uguale sensazione uditiva, costituisce una isofonica (curva ad uguale valore di Phon). Il Phon è un'unità di misura psicoacustica che fornisce il valore della percezione, uguagliando il valore in Phon al valore in decibel a 1000 Hz. Le curve isofoniche utilizzate attualmente, sono state standardizzate nel 1987 nella norma ISO 226, poi revisionata nel 2003.

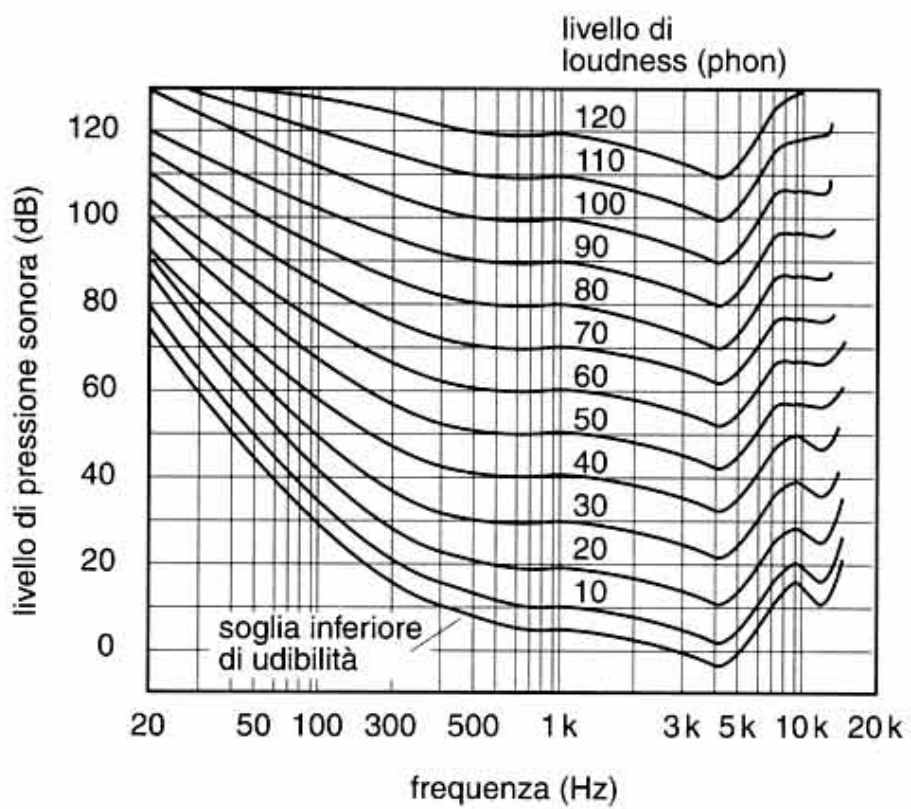


Figura 1.3: Audiogramma normale di Fletcher e Munson. [28]

1.3 Comfort acustico

Il comfort acustico è definito come la condizione di benessere psicofisico di un individuo immerso in un campo sonoro [6]. Il comfort acustico è influenzato, oltre che dalle caratteristiche particolari dell'individuo, dalla sua percezione e condizione psichica, anche dalla particolare attività che l'individuo sta svolgendo mentre è sottoposto al suono o rumore. Per valutare la qualità di un ambiente, non è sufficiente considerare il livello di rumorosità generale, perché, al fine di creare le condizioni di comfort, occorre valutare con attenzione anche le caratteristiche spettrali del suono stesso.

Per l'acustica degli ambienti, è possibile agire con degli interventi di acustica architettonica aggiungendo e/o prediligendo materiali fonoassorbenti che possano migliorare la qualità sonora dell'ambiente.

Per realizzare una condizione di comfort sonoro tramite l'utilizzo di cuffie, occorre selezionare e prediligere cuffie che garantiscano: la cancellazione del rumore, la protezione dell'udito e l'isolamento acustico.

1.3.1 Il rumore

Nel campo della misura, il rumore è associato ad effetti indesiderati perché si comporta come un ingresso interferente e modificatore ed è una delle principali cause di incertezza di misura. Quando l'interesse è valutare le prestazioni di uno strumento, è auspicabile conoscere il segnale di input al fine di valutare gli effetti sul segnale di output, per questo si utilizzano due suoni standardizzati a larga banda in cui sono presenti tutte le frequenze dell'udibile così da poter distinguere le frequenze in cui il trasduttore non riproduce fedelmente l'ingresso: il rumore bianco e il rumore rosa.

Il primo ha un'ampiezza costante su tutto lo spettro di frequenza, il secondo ha un'ampiezza spettrale che va come $1/f$, con caduta di 3dB per ottava e quindi possiede uguale energia per ogni ottava.

Nel caso della percezione, si ha generazione di rumore quando le frequenze secondarie che si sovrappongono non sono multipli interi della principale. Dal punto di vista fisiologico, gli effetti del rumore possono essere suddivisi in:

- danno: alterazioni irreversibile dell'apparato uditivo.
- disturbo: alterazione reversibile delle condizioni psicofisiche dei soggetti esposti al rumore che impedisce il normale svolgimento delle attività, come nel caso del sonno.

1.4 Virtualizzazione del suono

1.4.1 Audio trans-aurale

Per la riproduzione del suono, viene utilizzato un sistema di altoparlanti multicanale. L'implementazione è quella prevista, ad esempio, per il Dolby Surround. Le limitazioni di questa tecnica sono due: affinché possa essere garantita una qualità audio elevata, deve essere utilizzata in ambienti neutri senza riverberazioni; la virtualizzazione del suono è ottima solo nella posizione predisposta all'ascolto, producendo risultati distorti se l'ascoltatore si sposta.

1.4.2 Audio binaurale

Quando le cuffie sostituiscono l'altoparlante, cambia sia la conversione elettroacustica effettuata dall'altoparlante, sia la trasmissione. La trasmissione attraverso l'ambiente aggiunge due fenomeni che non sono presenti nel caso delle cuffie per effetto del loro design: diafonia e onde riflesse dall'ambiente circostante. La diafonia definisce il suono dall'altoparlante sinistro che raggiunge l'orecchio destro e viceversa. Le onde sonore riflesse sono versioni filtrate e ritardate del segnale sonoro emesso dall'altoparlante. In letteratura sono stati descritti sistemi che aggiungono diafonia e riflessioni simulate al segnale elettrico [7]-[8].

Se alle cuffie viene fornito lo stesso segnale elettrico dell'altoparlante, le cuffie non sono in grado di fornire all'ascoltatore la stessa riproduzione di una configurazione di altoparlanti in una stanza. La cuffia dovrebbe fornire lo stesso *timbro* del suono riprodotto dagli altoparlanti, cioè l'ampiezza della risposta in frequenza dovrebbe essere la stessa per il suono prodotto dalla cuffia e per il suono prodotto dall'altoparlante. Oltretutto le cuffie, tendono a conferire alla sorgente una vicinanza eccessiva e sono afflitte da un problema detto non esternalizzazione: l'ascoltatore ha l'impressione che la fonte sonora sia posizionata all'interno della sua testa.

1.5 Tipi di cuffie

Nel contesto di audio virtuale, le configurazioni possibili sono numerose: alcune servono a scopi specifici, altre sono orientate all'estetica o al comfort. Anche nelle prestazioni ci sono molte differenze. Le cuffie utilizzate in audiometria sono prodotte con cura per garantire la coerenza e la stabilità delle prestazioni a poche frequenze standardizzate. Le cuffie per la comunicazione devono essere progettate per migliorare l'intelligibilità del parlato e dei segnali codificati in presenza di rumore. Le cuffie stereofoniche devono essere progettate per l'accuratezza della riproduzione del suono, enfatizzando la risposta in frequenza ampia e uniforme, e la bassa distorsione.

Le proprietà acustiche delle cuffie dipendono dalla loro configurazione strutturale e esistono grandi differenze tra i vari modelli.

La raccomandazione ITU-T P.57 [9] definisce i seguenti tipi di cuffie:

- circumaurale che racchiudono il padiglione auricolare, a seconda della pressione che esercitano sulla testa possono sigillare l'orecchio così da isolarlo dai rumori esterni.
- sovraurale che poggiano sulle creste della cavità conca, sono di dimensioni inferiori rispetto le circumaurali e offrono una minore attenuazione ai rumori ambientali.
- auricolare che poggiano all'interno della cavità conca dell'orecchio. Non hanno significative capacità di isolamento dai rumori esterni e spesso la fedeltà di riproduzione viene compromessa a favore della portabilità e del contenimento dei costi.
- intraurale che entrano parzialmente o completamente nel condotto uditivo. Sono auricolari di ridotte dimensioni che vengono però inseriti direttamente nel canale uditivo. Questo design offre un isolamento dai rumori esterni superiore agli auricolari.

1.5.1 Prestazioni

Le proprietà acustiche dell'orecchio esterno non solo definiscono gli obiettivi di prestazione delle cuffie, ma devono essere incorporate in qualsiasi dispositivo utilizzato per misurare le prestazioni delle cuffie. Le cuffie ad alta fedeltà sono state valutate per anni utilizzando accoppiatori e orecchie artificiali, destinate all'uso come standard di riferimento in audiometria.

Per produrre risposte in frequenza piatte, sono stati progettati e valutati innumerevoli tipi di cuffie. Shaw iniziò nel 1974 a effettuare misurazioni delle prestazioni delle cuffie con una replica mbber di un orecchio esterno e un microfono da 1/4 di pollice (Briel e Kjaer 4136) situato all'apertura del condotto uditivo bloccandolo. Questo tipo di misurazione, nella condizione di meato ostruito, preserva le funzioni acustiche dell'orecchio esterno, senza la complicazione aggiuntiva di un condotto uditivo simulato e di una terminazione acustica dell'orecchio medio.

1.5.2 Orecchie artificiali, orecchie replicate e orecchi reali

Le orecchie artificiali sono sistemi comunemente usati per le misurazioni della risposta in frequenza delle cuffie. La combinazione del metodo di misurazione e degli obiettivi di prestazione [10] ha prodotto un sistema di valutazione oggettiva in accordo sia con i requisiti scientifici fondamentali sia con le valutazioni soggettive. Tuttavia, ci sono dei problemi relativi all'utilizzo della replica in gomma dell'orecchio umano, perchè risulta diversa meccanicamente da un vero orecchio esterno e non si piega facilmente come quello reale. I risultati presentati al MAC-78 [11] mostrano l'importanza dell'utilizzo di dispositivi di misurazione anatomicamente e acusticamente corretti.

1.6 Risposta in frequenza

Il problema della risposta in frequenza è stato ampiamente studiato in letteratura, ad esempio da Toole [12], Theile [13] o Møller[14].

1.6.1 Preferenze degli ascoltatori e valutazione soggettiva

Studi condotti tramite ascoltatori e cuffie hanno rivelato che, ignorando le variazioni causate dalle perdite di aria, c'era la tendenza per gli ascoltatori a preferire cuffie con uscita nella gamma di 2-10 kHz. I risultati non erano così precisi come quelli che si possono ottenere con i metodi attuali, tuttavia c'era un accordo sufficiente per dividere la popolazione dei prodotti in quelli che: erano preferiti, e quelli che venivano rifiutati. Completati i test di ascolto, sono state effettuate misurazioni dell'orecchio replicato sui prodotti. Più recentemente Sank [15] ha svolto uno studio indipendente e, utilizzando orecchie vere e tecniche diverse, è arrivato a risultati simili. L'unione dei Consumatori [16] ha utilizzato il *manichino KEMAR* per valutare le cuffie stereo.

2. Materiali e Metodi

L'attività sperimentale è stata eseguita per via telematica e simulata, utilizzando le misurazioni delle risposte impulsive effettuate nella camera anecoica del MIT nel 1994 su quattro cuffie applicate al manichino KEMAR (figura 2.1). In quella occasione, le risposte impulsive furono calcolate con un manichino testa e busto modello DB-4004 (che include la testa modello DB-062 e il busto modello DB-127). Le risposte all'impulso furono ottenute utilizzando sequenze MLS. La lunghezza delle sequenze era $N = 16383$ campioni, a una frequenza di campionamento di 44,1 kHz.



Figura 2.1: Manichino Kemar.

2.1 Dataset

Il dataset è costituito da otto segnali corrispondenti alle risposte impulsive per:

- La cuffia destra modello AKG-K240
- La cuffia sinistra modello AKG-K240

- La cuffia destra modello Sennheiser-HD480
- La cuffia sinistra modello Sennheiser-HD480

- La cuffia destra modello Radio Shack-Nova 38
- La cuffia sinistra modello Radio Shack-Nova 38

- La cuffia destra modello Sony-TwinTurbo
- La cuffia sinistra modello Sony-TwinTurbo

2.2 Le cuffie

2.2.1 modello AKG-K240

Sono cuffie (Figura 2.2.1) semi-aperte con design circumaurale e coprono l'intero orecchio.



Figura 2.2.1: Cuffia AKG-K240.

2.2.2 modello Sennheiser-HD480

La Sennheiser HD480 (Figura 2.2.2) è una cuffia dal design sovraurale. La struttura rigida consente di premere contro il padiglione auricolare.



Figura 2.2.2: Cuffia Sennheiser HD480.

2.2.3 modello Radio Shack-Nova 38

La Radio Shack Nova (Figura 2.2.3) è un cuffia sovraurale retrò stile walkman, con piccoli cuscini in schiuma.



Figura 2.2.3: Cuffia Radio Shack Nova 38.

2.2.4 modello Sony-TwinTurbo

Gli auricolari Sony (Figura 2.2.4) sono cuffie intraurali, cioè si inseriscono direttamente nell'orecchio e il trasduttore proietta il suono nel canale uditivo. È l'unico modello, tra le altre, a non avere un supporto strutturale.



Figura 2.2.4: Auricolari Sony Twin Turbo

2.3 Misura della Risposta all'impulso

Per analizzare il comportamento di un sistema acustico, elettroacustico o vibrazionale che possa essere schematizzato come sistema LTI (Lineare Tempo Invariante), occorre determinare sperimentalmente la sua risposta all'impulso (IR). Essa è definita come il segnale di output del sistema quando si applica in input un segnale impulsivo. Il metodo impulsivo prevede di applicare un impulso unitario all'ingresso del sistema da misurare e osservarne l'uscita. Utilizzando un impulso ideale, l'uscita sarà la risposta all'impulso del sistema. Il metodo però, può causare diversi problemi tra cui un cattivo rapporto segnale/rumore, generazione di fenomeni non lineari e presenza nel segnale di test di frequenze molto alte o molto basse che potrebbero danneggiare i trasduttori.

Per questo, sono stati sviluppati metodi di misura che utilizzano segnali di eccitazione diversi come il segnale di rumore bianco pseudo-casuale e il segnale sinusoidale esponenziale.

2.3.1 Metodo MLS

Nel metodo MLS (Maximum Length Sequence) il segnale sorgente utilizzato è una sequenza di lunghezza massima, ovvero una sequenza binaria pseudo-casuale periodica. Con il metodo MLS è possibile misurare la risposta all'impulso con una grande precisione e ripetibilità sia con la tradizionale tecnica FFT sia con il metodo della correlazione.

Dalla teoria dei segnali sappiamo che la cross correlazione tra l'ingresso $x(k)$ e l'uscita $y(k)$ di un sistema lineare, è data dalla convoluzione tra l'autocorrelazione dell'input con la risposta impulsiva del sistema:

$$R_{XY}(k) = R_{XX}(k) * h(k)$$

Una proprietà importante di qualsiasi MLS è che la sua funzione di autocorrelazione è essenzialmente un impulso (figura 2.3.1). Questo impulso è rappresentato dalla funzione delta di Dirac:

$$R_{xx}(k) \approx \delta(k)$$

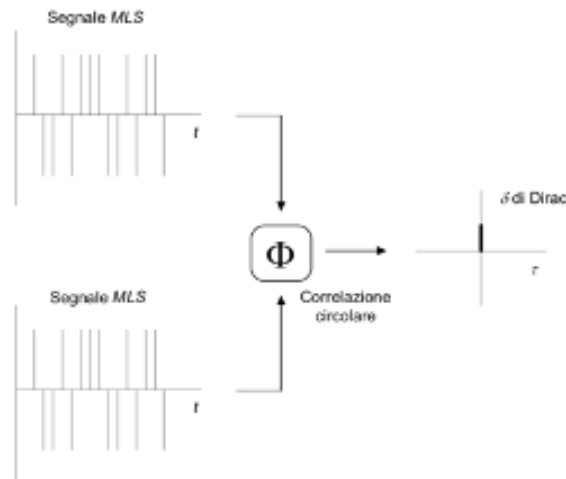


Figura 2.3.1: La correlazione di un segnale MLS con sé stesso è una delta di Dirac

Il risultato della convoluzione di una sequenza con una funzione delta di Dirac è la sequenza stessa. Pertanto la risposta all'impulso $h(k)$ può essere trovata correlando in modo incrociato l'ingresso di rumore $x(k)$ con l'uscita $y(k)$ del sistema (Figura 2.3.2):

$$R_{xy}(k) \approx \delta(k) * h(k) = h(k)$$

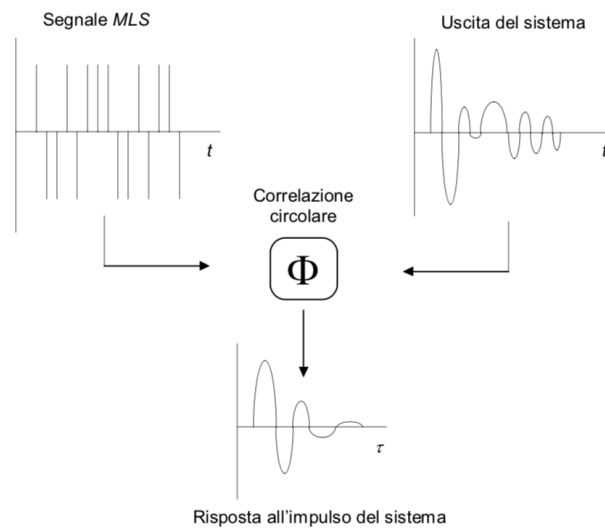


Figura 2.3.2: La correlazione circolare tra input e output fornisce la risposta all'impulso.

Quindi è possibile misurare la risposta all'impulso di sistemi lineari calcolando la correlazione circolare tra l'MLS e il segnale di uscita del sistema. Poiché $x(k)$ è una sequenza pseudocasuale nota, esiste un modo efficiente e molto veloce per calcolare la funzione $R_{xy}(k)$, tramite la Fast Hadamard Transform (FHT), (Figura 2.3.3).

Un vantaggio della FHT è che richiede, come la FFT, solo operazioni $n = \log_2(n)$. Poiché il segnale MLS è una sequenza binaria, l'FHT consiste solo in addizioni e sottrazioni. Per misurare la risposta all'impulso di un sistema, si applica il segnale *MLS* al suo ingresso. Il segnale di uscita viene correlato con il segnale di ingresso, e si ricava così la risposta all'impulso del sistema. Il segnale *MLS* utilizzato deve essere lungo almeno quanto il tempo di riverbero dell'ambiente da misurare.

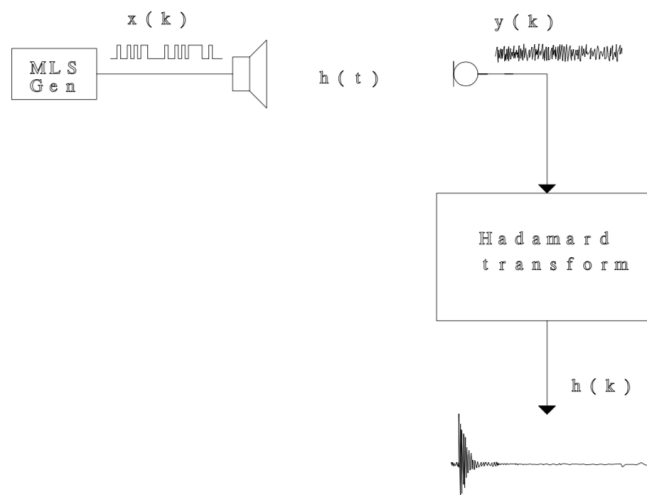


Figura 2.3.3: Elaborazione del segnale di input con FHT.

2.3.2 Metodo ESS

Il metodo di sweep prevede l'utilizzo di un segnale di eccitazione in cui la frequenza varia linearmente nel tempo. Invece, l'Exponential Sine Sweep (ESS), ha forma sinusoidale e frequenza che cresce in maniera esponenziale con il tempo. Il suo spettro è rosa il che significa che la sua ampiezza diminuisce di 3 dB per ottava.

Nella misura tramite sweep, per ottenere la risposta impulsiva IR (Impulse Response) si può effettuare una convoluzione lineare rimanendo nel dominio del tempo, oppure è possibile applicare la moltiplicazione delle trasformate.

Nel dominio del tempo, l'operazione di filtraggio comporta una convoluzione tra l'ingresso e la risposta all'impulso del filtro. Nel dominio della frequenza, l'operazione di filtraggio prevede la moltiplicazione della trasformata di Fourier dell'input e della trasformata di Fourier della risposta all'impulso.

Il filtro inverso può essere determinato dal segnale di test stesso (sweep invertito) in modo tale che esso, convoluto con il segnale originale, fornisca un impulso unitario ideale (delta di Dirac). Oppure utilizzando un filtro nel dominio della frequenza basato sulla trasformata veloce di Fourier (FFT).

2.4 Equalizzazione

Le cuffie possono fornire un'esperienza di ascolto ottimale in base alle loro prestazioni. Il carattere timbrico di una cuffia è la componente più importante della qualità percepita e quindi la misurazione e l'ottimizzazione della risposta in frequenza sono aspetti chiave nella progettazione delle cuffie.

L'equalizzazione è una tecnica di trattamento dei segnali audio e rappresenta il procedimento di filtraggio a cui è sottoposto un segnale audio per variarne il contenuto timbrico. Il dispositivo che attua l'equalizzazione è detto *equalizzatore* che altro non è che un filtro elettronico che ripristina la *fedeltà* del segnale in input.

L'obiettivo dell'equalizzazione è creare una curva che compensa quelli che sono “i difetti della cuffia” per cui, per come questa è costruita meccanicamente e tecnicamente, se in frequenza vado a plottare la risposta impulsiva della cuffia, vedremo che ci sono delle frequenze che vengono attenuate e altre che vengono amplificate troppo. Quindi, la curva di equalizzazione serve per appiattire la risposta impulsiva della cuffia.

2.4.1. Realizzazione del filtro inverso

L'algoritmo utilizzato per eseguire il filtraggio inverso è implementato nella funzione *invFIR.m* [23]-[24]. In particolare, la funzione permette di invertire un filtro Finite Impulse Response (FIR) a fase lineare, dando origine ad un filtro Infinite Impulse Response (IIR) che non è a fase lineare. Affinché i filtri siano realizzabili deve essere assicurata la causalità, ma questo ha delle importanti conseguenze sul comportamento in frequenza del filtro.

Di seguito uno schema riassuntivo (Figura 2.4.1) dell'elaborazione del segnale in cui $X(Z)$ è il segnale in ingresso e $Y(Z)$ l'output di un filtro $B(Z)$ che rappresenta il filtraggio effettuato dal trasduttore, $A(Z)$ è il filtro inverso che ne elimina gli effetti e restituisce il segnale di ingresso originale. I segnali sono espressi in funzione della frequenza complessa tramite la variabile Z .

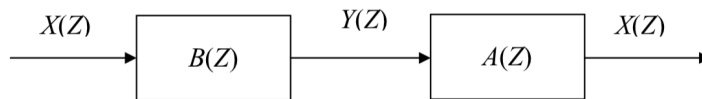


Figura 2.4.1: Schema del filtro $B(Z)$ e del filtro inverso $A(Z)$.

2.4.2 Creazione del filtro di equalizzazione

L'interfaccia grafica (Figura 2.4.2.) per la generazione della funzione inversa, permette di fornire in ingresso la risposta impulsiva da invertire, di selezionare il tipo di filtro da applicare, la lunghezza della FFT e del filtro, di selezionare l'intervallo di frequenza da invertire e di scegliere la regolarizzazione in dB all'interno e all'esterno della quale si può regolare il guadagno massimo ottenibile. L'algoritmo prende in ingresso la risposta impulsiva, tramite la Trasformata di Fourier la trasforma nel dominio della frequenza, la inverte e la restituisce nel dominio del tempo come variabile nel *Workspace*. Selezionando un filtro a fase lineare, l'algoritmo costruisce una risposta bilaterale che compensa l'ampiezza mantenendo le informazioni di fase originali; il filtro a fase minima, invece, permette di generare una risposta impulsiva inversa con il minimo sfasamento per ogni frequenza; il filtro complesso fornisce una risposta inversa che compensa ampiezza e fase. È possibile selezionare un filtro in terzi di ottava per ottenere una risposta inversa più liscia e levigata. A causa della natura periodica della Trasformata discreta di Fourier (DFT) , l'inversione causa componenti sovrapposte da ripetizioni periodiche che provocano time aliasing. Per limitare questo fenomeno, è possibile applicare il windowing che sopprime l'aliasing ai margini ma non garantisce che la risposta complessiva ne sia totalmente priva. Infatti, l'inversione di risposte a fase non minima causa sempre un ritardo temporale e questo può essere ridotto scegliendo brevi risposte impulsive in ingresso, utilizzando filtri inversi più lunghi aumentando la FFT evitando l'inversione delle componenti spettrali con picchi a banda stretta. In aggiunta, occorre scegliere i parametri per ridurre al minimo la parte sinistra della risposta del filtro per limitare il pre-squillo di disturbo percettivo [23]-[24].

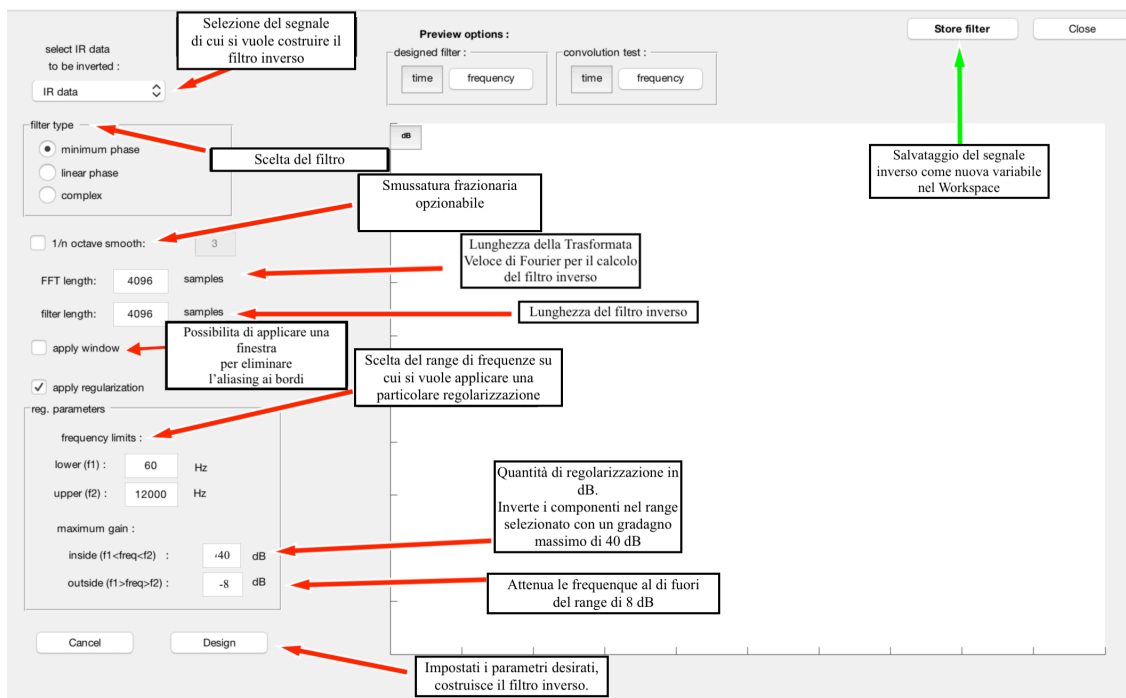


Figura 2.4.2: Interfaccia grafica per la costruzione della funzione inversa.

2.4.3 La scelta del filtro a fase minima

La risposta all'impulso di un filtro nel dominio della frequenza ha ampiezza e risposta di fase che sono entrambe funzioni della frequenza.

Ogni risposta all'impulso possiede una rappresentazione di fase minima avente la stessa ampiezza di risposta del filtro originale ma, risposta di fase minimizzata in modo tale che la fase minima del filtro abbia il minor tempo possibile di irregolarità. Questo fa sì che i filtri di fase minima si compattano nel tempo, e quindi sono efficienti dal punto di vista computazionale per ottenere una risposta in ampiezza desiderata. Inoltre, è possibile calcolare la risposta di fase di un filtro di fase minima dalla risposta in ampiezza. Infine, i filtri di fase minima hanno una proprietà importante riguardante l'invertibilità: sono invertibili utilizzando un filtro causale.

2.5 Applicazioni

2.5.1 Audiometro

L'audiometro (Figura 2.5.1) è uno strumento medico utilizzato per indagare le capacità uditive del paziente e diagnosticare eventuali carenze. È composto dal corpo audiometrico, che è il vero strumento di misura, e dalle cuffie che si collegano ad esso. Le cuffie servono ad inviare gli impulsi sonori, selezionati dal medico attraverso l'interfaccia grafica dello strumento, alle orecchie del paziente e valutarne le capacità uditive. Durante l'esame, il paziente deve alzare la mano o schiacciare il tasto del *patient responder* per confermare di avere percepito il suono.

Con l'audiometro è possibile eseguire diversi tipi di test:

- audiometria tonale: consente di determinare la sensibilità uditiva, l'esame inizia con un test sulla percezione delle frequenze acute (da 2.048 Hz fino a 8.192 Hz) e poi delle frequenze gravi (da 512 Hz a 128 Hz).
- audiometria vocale: consente di individuare la capacità del paziente di comprendere parole pronunciate dall'esaminatore oppure registrate e inviate in cuffia.
- audiometria ad alte frequenze: serve per individuare la soglia uditiva del paziente per suoni ad alte frequenze, quindi superiori ai 8.192 Hz.
- test di Weber: serve a riconoscere la presenza di una diversa sensibilità tra i due padiglioni auricolari.



Figura 2.5.1: audiometro portatile 400-AOM. [21]

È fondamentale che le cuffie implementate per l'audiometro siano correttamente equalizzate così da poter inviare al paziente il range di frequenze selezionato dal medico, e cioè che non attenuino o amplifichino determinate frequenze, piuttosto che altre, per assicurare che la misura venga effettuata correttamente e possa essere confrontata con i valori di riferimento.

2.5.2 Apparecchi acustici digitali

Gli apparecchi acustici sono dispositivi medici implementati dall'audioprotesista per correggere le disfunzioni del sistema uditivo. Le componenti principali (Figura 2.5.2) sono un microfono, un amplificatore, circuiti accessori di filtraggio passa-alto o passa-basso posizionati tra di essi e una batteria.



Figura 2.5.2: Componenti di un apparecchio acustico.

Il microfono è la componente che rileva il suono nell'ambiente, sostituisce l'orecchio umano quando esso ha perso le sue capacità uditive, trasducendo i segnali acustici in segnali elettrici. Attraverso l'amplificatore, i suoni rilevati vengono inviati direttamente nel condotto uditivo del paziente. Nella progettazione degli apparecchi acustici, il trasduttore inserito parzialmente o completamente nel condotto uditivo, deve assicurare alta fedeltà di riproduzione delle frequenze che fisiologicamente non vengono più percepite del paziente e che vengono selezionate dal tecnico su misura per ogni paziente, in seguito alla valutazione audiometrica. In particolare, gli apparecchi acustici digitali, consentono di migliorare l'esperienza di ascolto e non solo di amplificare il volume; sono configurabili con i dispositivi quali smartphone e tablet; sono quasi invisibili.

3. Risultati

3.1 Metodo MLS

Per stimare la risposta all'impulso delle cuffie, utilizzando l'eccitazione MLS (Figura 3.1), si genera un segnale di eccitazione MLS con la funzione *mls* imponendo che sia più lungo della risposta all'impulso nota dal dataset.

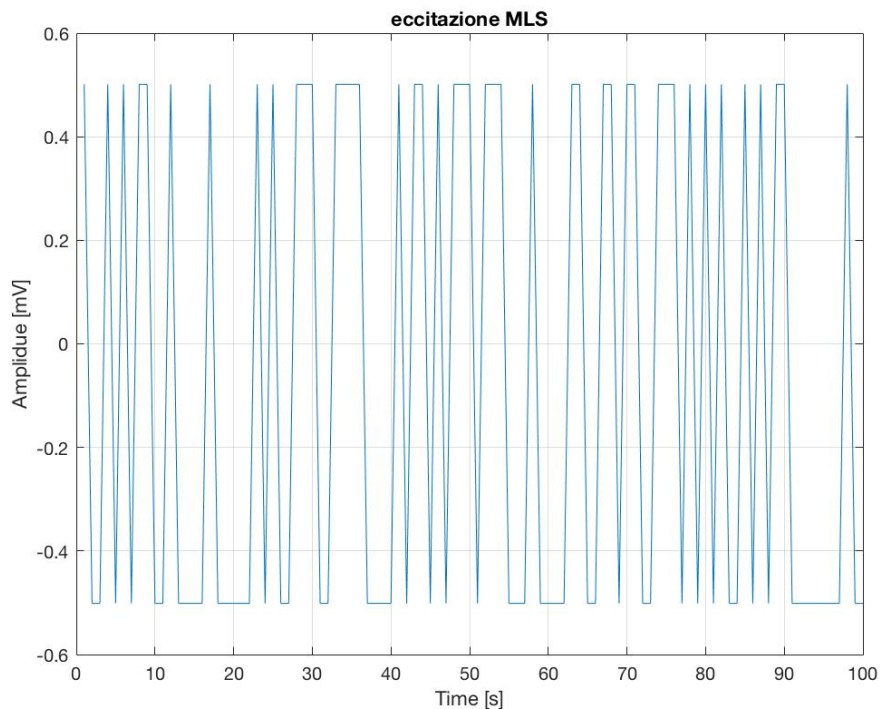


Figura 3.1: Treno di impulsi MLS.

Si crea un oggetto *dsp.FrequencyDomainFIRFilter* per implementare il filtro nel dominio della frequenza utilizzando la risposta all'impulso contenuta nel dataset. Nel dominio del tempo, l'operazione di filtraggio comporta una convoluzione tra l'ingresso e la risposta all'impulso del filtro Finite Impulse Response (FIR). Nel dominio della frequenza, prevede la moltiplicazione della trasformata di Fourier dell'input e della trasformata di Fourier della risposta all'impulso. Il filtraggio nel dominio della frequenza diventa più efficiente del filtraggio nel dominio del tempo perchè quello che in frequenza è un prodotto, nel dominio del tempo è una convoluzione che richiede

prodotti e somme. A partire da un segnale MLS e registrando, nel caso di un setup reale, il segnale rilevato dai microfoni posti alle orecchie del manichino è possibile stimare la risposta all'impulso della cuffia sinistra e della cuffia destra.

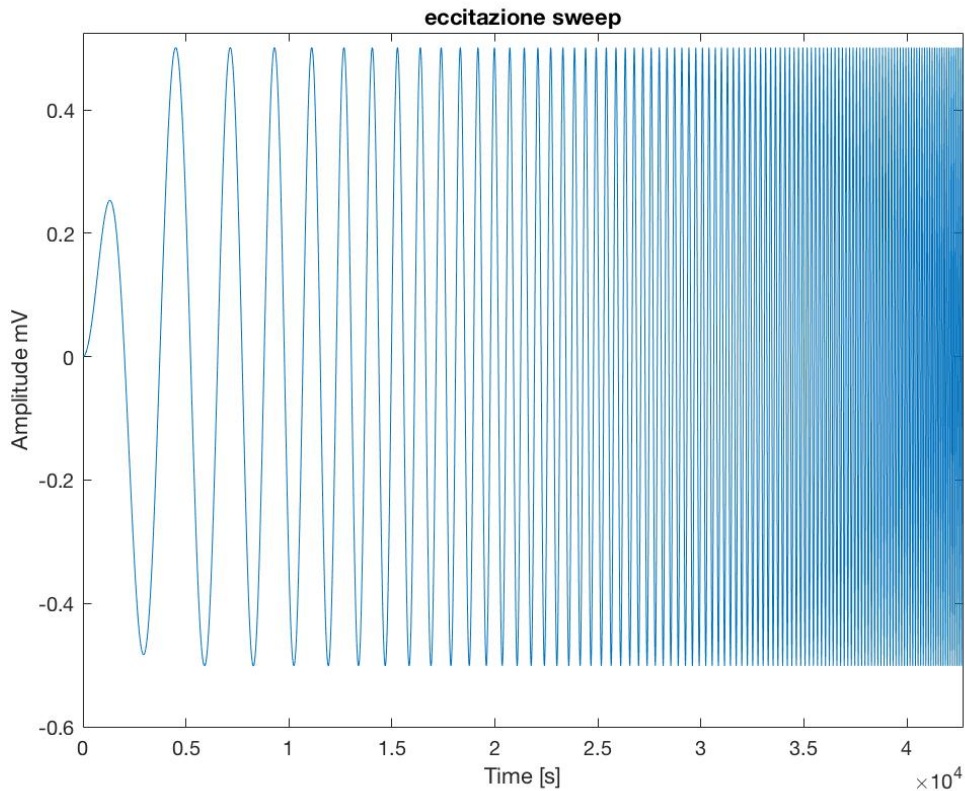


Figura 3.2: Segnale sinusoidale esponenziale.

3.2 Metodo ESS

Per identificare la risposta all'impulso, si genera un segnale ESS (Figura 3.2.) attraverso la funzione *sweeptone*, dopodiché si passa il segnale di eccitazione attraverso un filtro Infinite Impulse Response (IIR), per simulare la registrazione del segnale e si calcola la risposta impulsiva attraverso la funzione *impzest*.

Di seguito i risultati ottenuti per ogni modello di cuffia.

3.3 Cuffia AKG-K240

Il filtraggio eseguito sulle risposte impulsive presenti all'interno del dataset, mediante il filtro nel dominio della frequenza, restituisce il segnale acquisito dai ricevitori e modellato dalle cuffie per un'eccitazione MLS (Figura 3.3.1) e per un'eccitazione ESS (Figura 3.3.2) nel dominio del tempo. La registrazione è ottenuta tramite simulazione, ma corrisponde al segnale che, in un setup reale, verrebbe registrato dai microfoni posti alle orecchie del manichino.

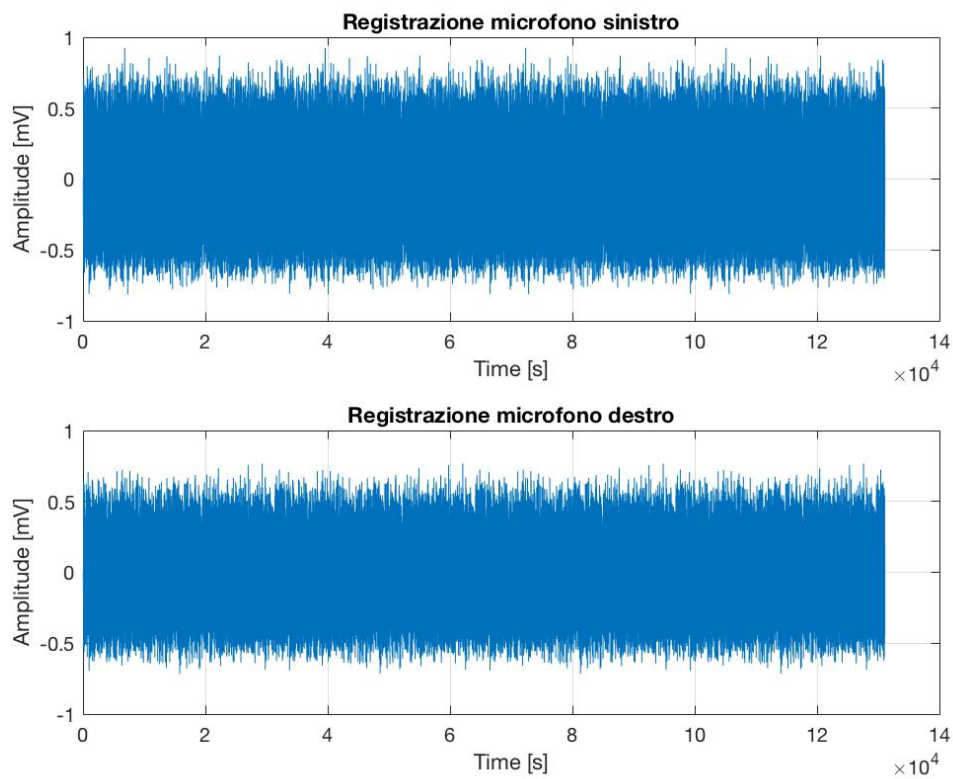


Figura 3.3.1: Simulazione del segnale di output fornendo in input un'eccitazione MLS-Cuffia AKG-K240.

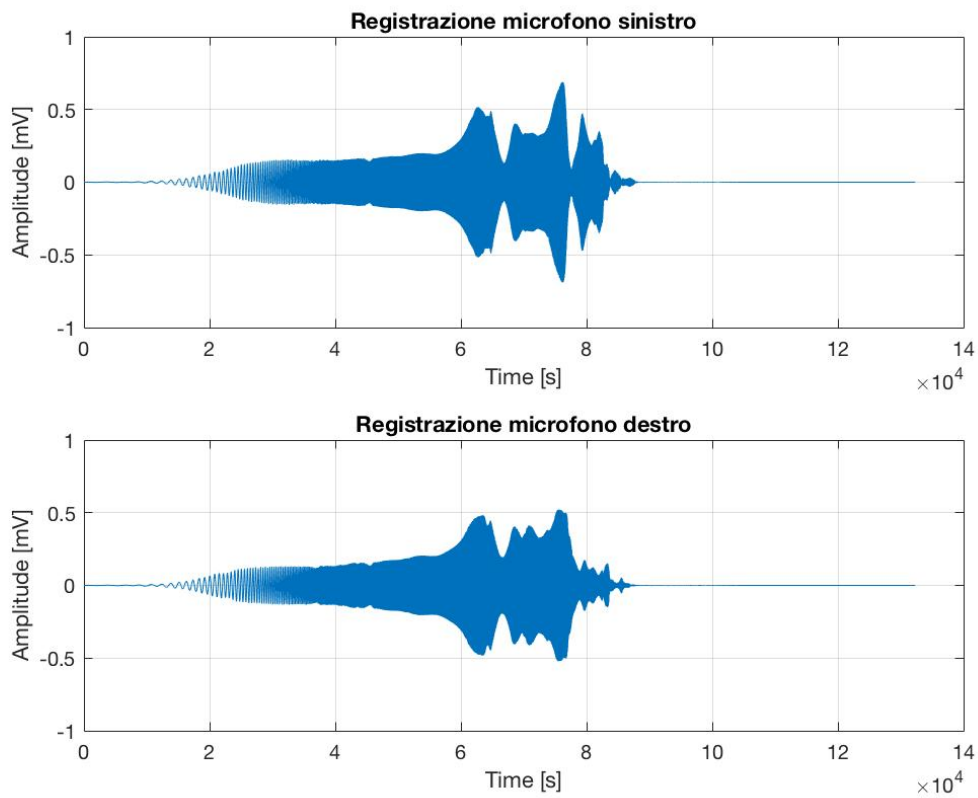


Figura 3.3.2: Simulazione del segnale di output fornendo in input un'eccitazione ESS Cuffia AKG-K240.

Nonostante il segnale di eccitazione sia lo stesso per i due trasduttori, le due acquisizioni sono differenti a causa del diverso filtraggio eseguito dalla cuffia destra e dalla cuffia sinistra.

Dopo aver stimato le risposte impulsive ottenute con i due metodi di stimolazione, la sovrapposizione (Figura 3.3.3) verifica che l'identificazione è riuscita. Infatti i tre segnali: risposta impulsiva stimata con MLS, con ESS e risposta impulsiva del dataset, coincidono. In verde la risposta impulsiva ad un segnale di test ESS, in rosso la risposta impulsiva ad un segnale MLS e in blu la risposta impulsiva originale.

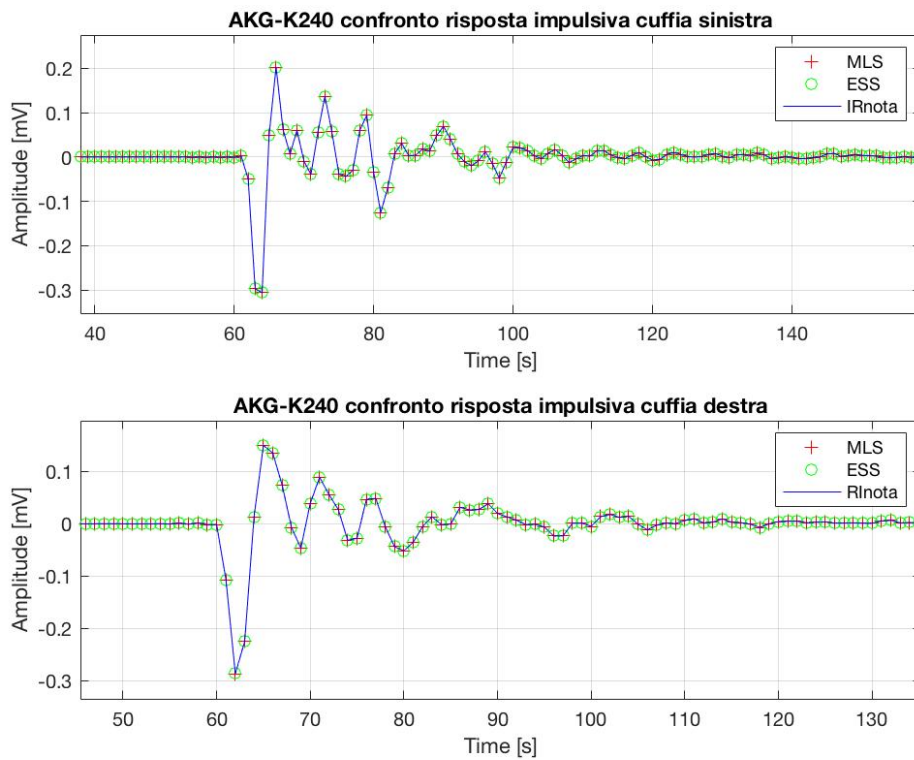


Figura 3.3.3: Confronto delle risposte impulsive ottenute per la Cuffia AKG-K240.

La sovrapposizione delle risposte impulsive di cuffia destra e cuffia sinistra nel dominio del tempo (Figura 3.3.4) dimostra che non c'è differenza di tempo interaurale (DTI).

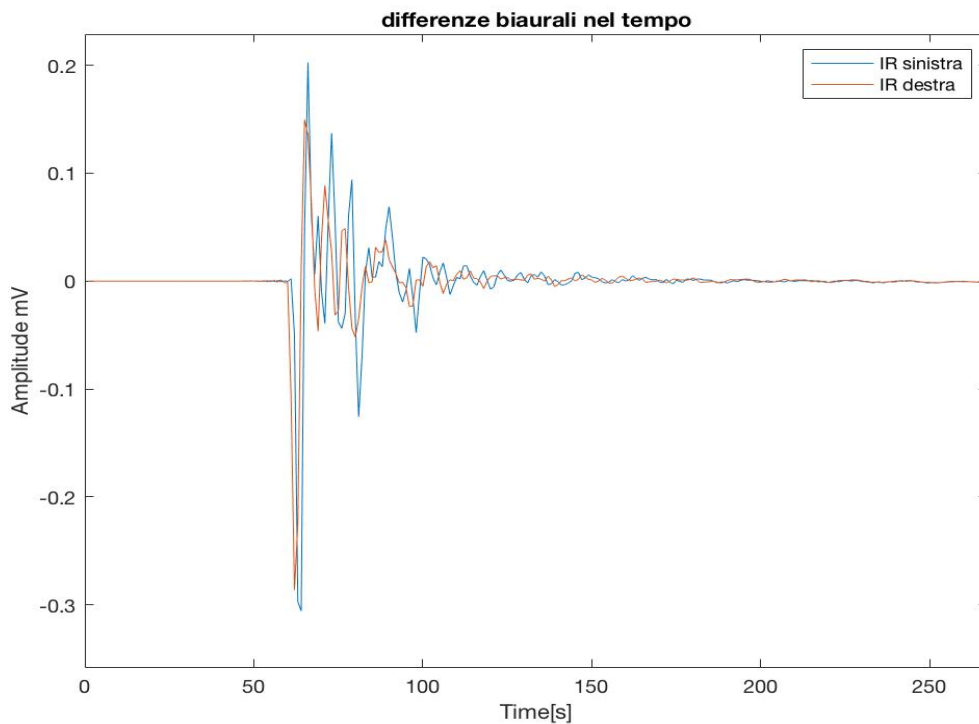


Figura 3.3.4: Differenze binaurali nel dominio del tempo Cuffia AKG-K240.

Di seguito viene visualizzato l'andamento in frequenza normalizzata dei due trasduttori, attraverso la funzione *freqz*. La funzione permette di graficare la funzione di trasferimento di un filtro che in questo caso è rappresentato dai due trasduttori destro e sinistro. La frequenza va da 0 a 1, la parte superiore è il modulo in dB della funzione di trasferimento, la parte inferiore è l'andamento in fase. Vediamo che la fase è lineare e che l'andamento delle fasi coincide. L'andamento dei moduli invece, mostra spiccate differenze tra i due trasduttori soprattutto nelle medie e nelle alte frequenze.

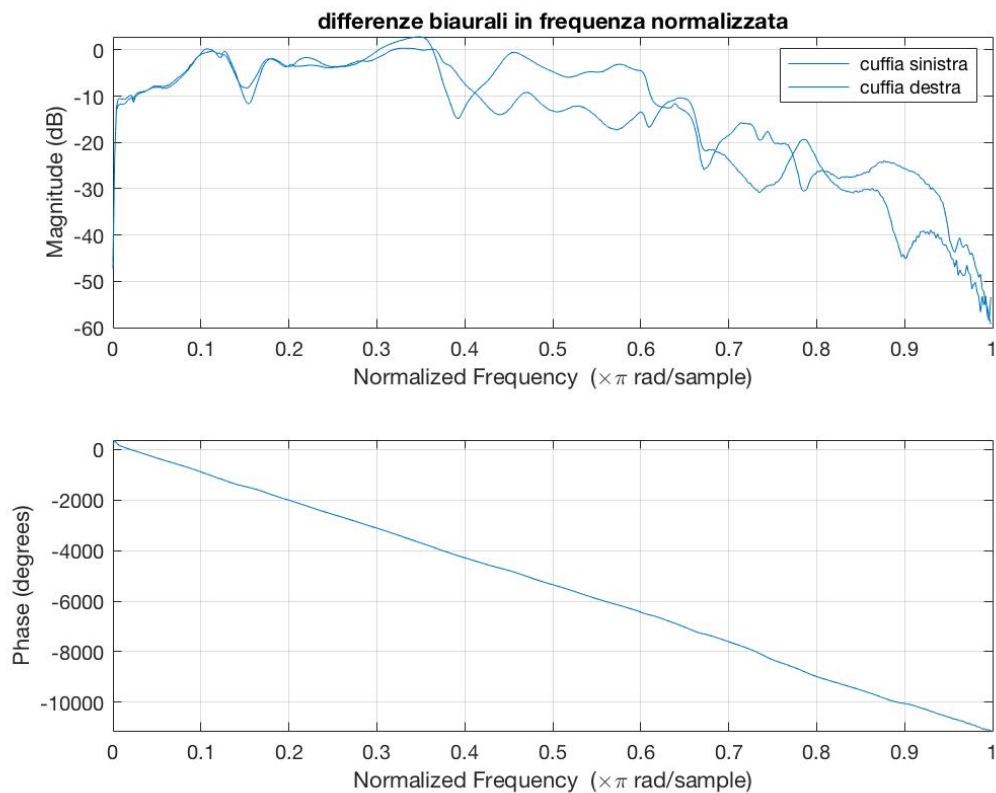


Figura 3.3.5: Differenze binaurali in frequenza normalizzata.

Per valutare effettivamente quali siano le differenze tra i due trasduttori al variare delle frequenze, si calcola la FFT delle risposte impulsive con una frequenza di campionamento pari a 44100 Hz, tracciandola nel dominio della frequenza e riportando il modulo in dB.

L'asse delle ordinate va da 0 Hz a 25000 Hz ma gli spettri di potenza delle due cuffie sono rappresentati nel range da 0 Hz a 22050 Hz che corrisponde alla metà della frequenza di campionamento. In blu lo spettro di potenza della cuffia sinistra e in rosso quello della cuffia destra.

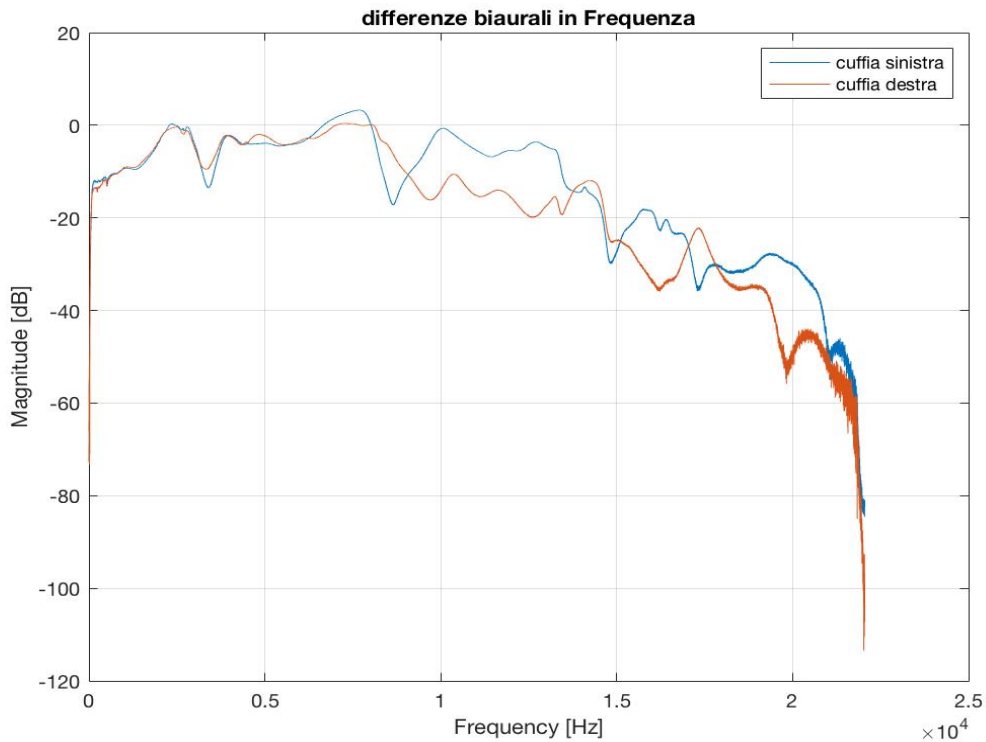


Figura 3.3.6: Spettri di potenza.

Dopo aver modellato il filtro inverso per la risposta impulsiva destra e sinistra, si riporta il confronto in frequenza normalizzata (Figura 3.3.7.). Il primo grafico è relativo al modulo della risposta destra e della relativa inversa, nel terzo sono visibili gli andamenti in dB della risposta impulsiva sinistra e dell'inversa progettata. L'ultimo e il secondo grafico riportano l'andamento complessivo della fase.

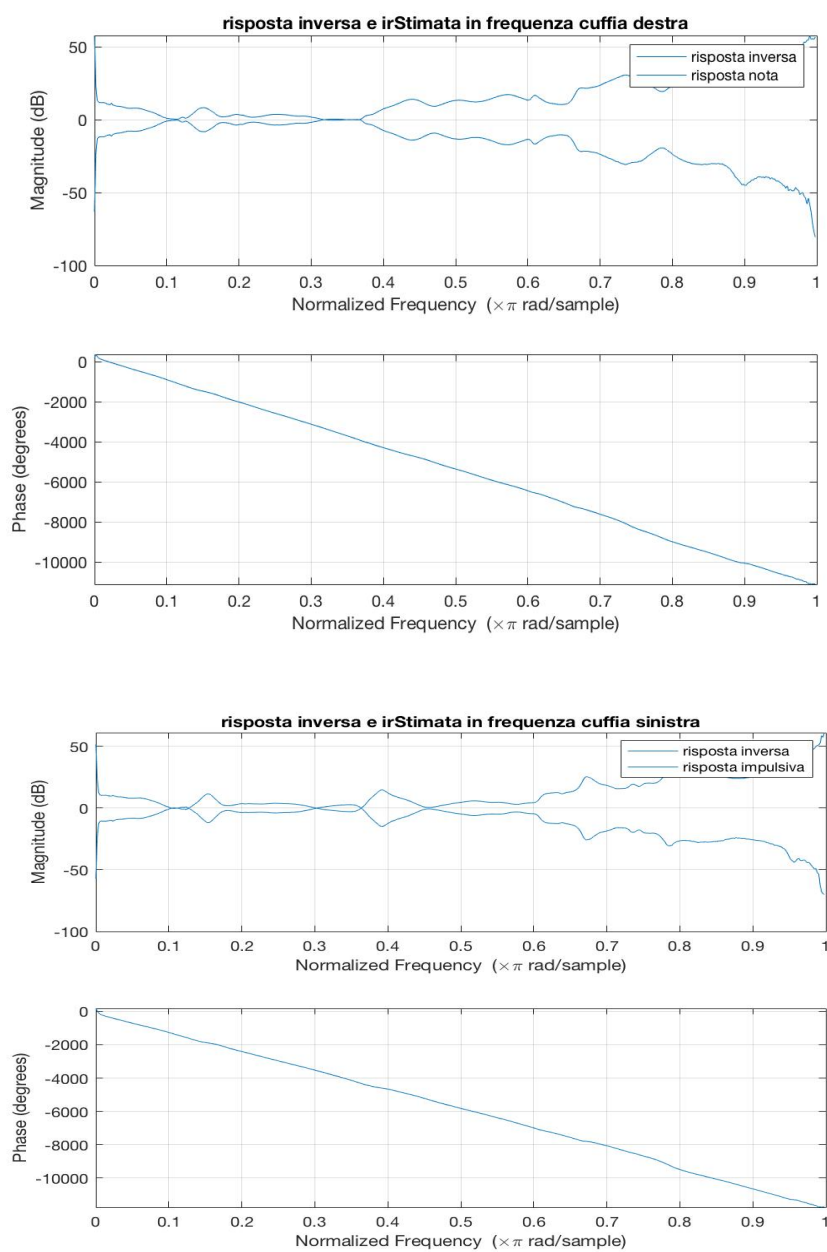


Figura 3.3.7: Confronto delle risposte impulsive destra e sinistra e delle relative inverse con la funzione *freqz*.

Eseguendo la FFT (Figura 3.3.8), con frequenza di campionamento pari a 44100 Hz, vengono mostrati gli andamenti in frequenza per valutare a quali frequenze il filtro inverso (curva blu) compensa e attenua effettivamente i buchi della risposta impulsiva (curva rossa). Il primo grafico è relativo al trasduttore destro e di seguito quello relativo al trasduttore sinistro. Le curve si intersecano a 0 dB e hanno andamenti uguali ma opposti al variare della frequenza.

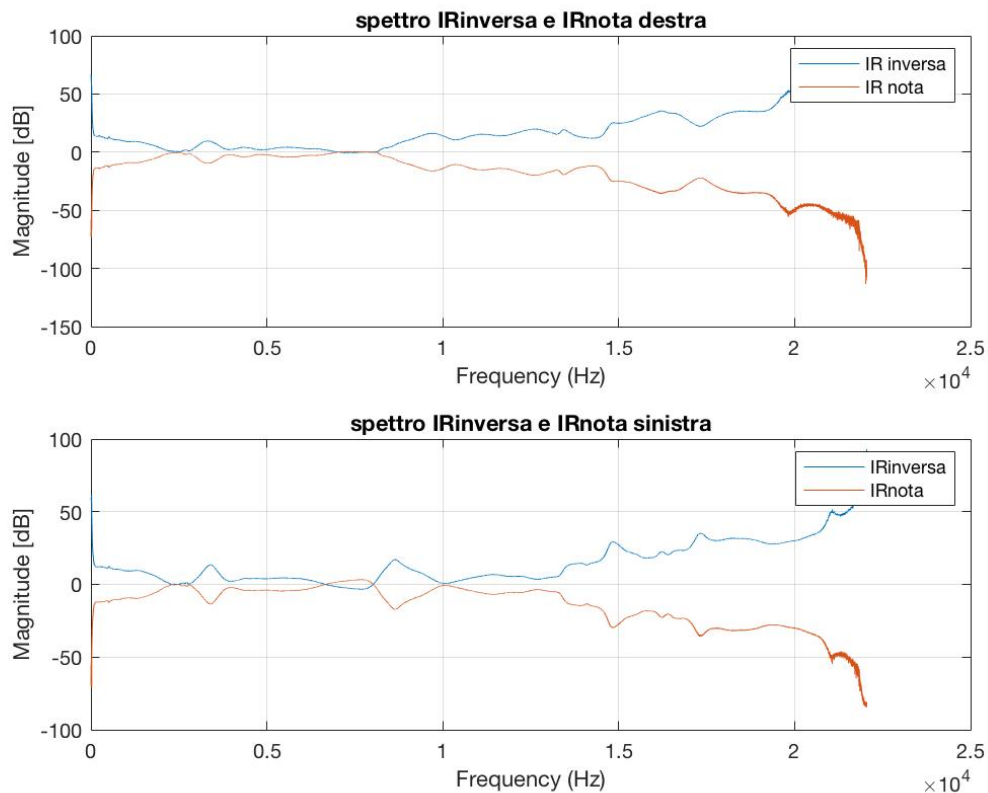


Figura 3.3.8: Spettri di potenza della risposta impulsiva e dell'inversa.

Dopo aver assegnato a una variabile ir_tot_L il risultato della convoluzione tra la risposta impulsiva nota e la sua inversa sinistra e alla variabile ir_tot_R il risultato della convoluzione tra la risposta impulsiva destra e la sua inversa utilizzando la funzione

freqz viene rappresentato l'andamento della convoluzione in frequenza normalizzata (Figura 3.3.9.).

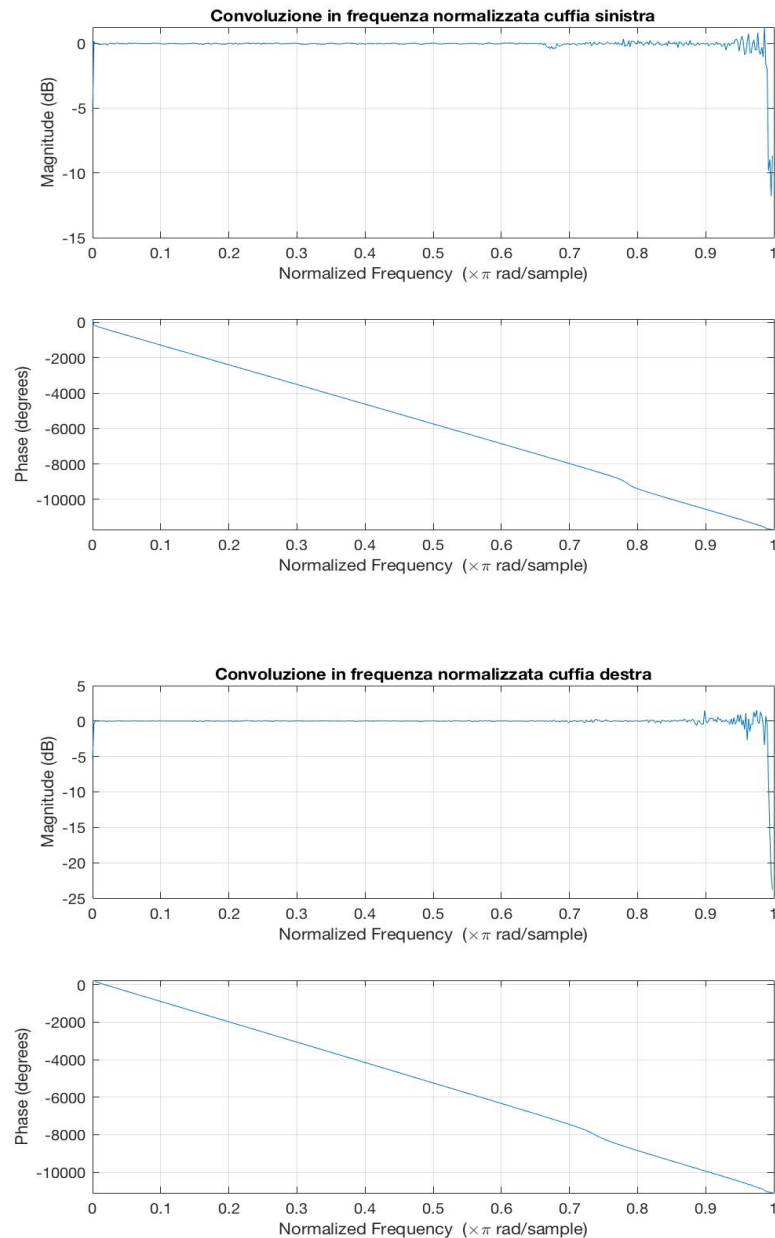


Figura 3.3.9: Convoluzione in frequenza normalizzata.

Le curve dei moduli dovrebbero essere completamente piatte su 0 dB per avere cuffie perfettamente equalizzate; in realtà, a causa delle limitazioni imposte dall'algoritmo per il filtro inverso, alle alte frequenze il filtro costruito non annulla completamente gli effetti della risposta impulsiva, provocando distorsioni.

La Figura 3.3.10 riporta il confronto tra la trasformata di Fourier della convoluzione tra la risposta impulsiva e la sua inversa, e il prodotto delle loro trasformate per la cuffia sinistra e per la cuffia destra.

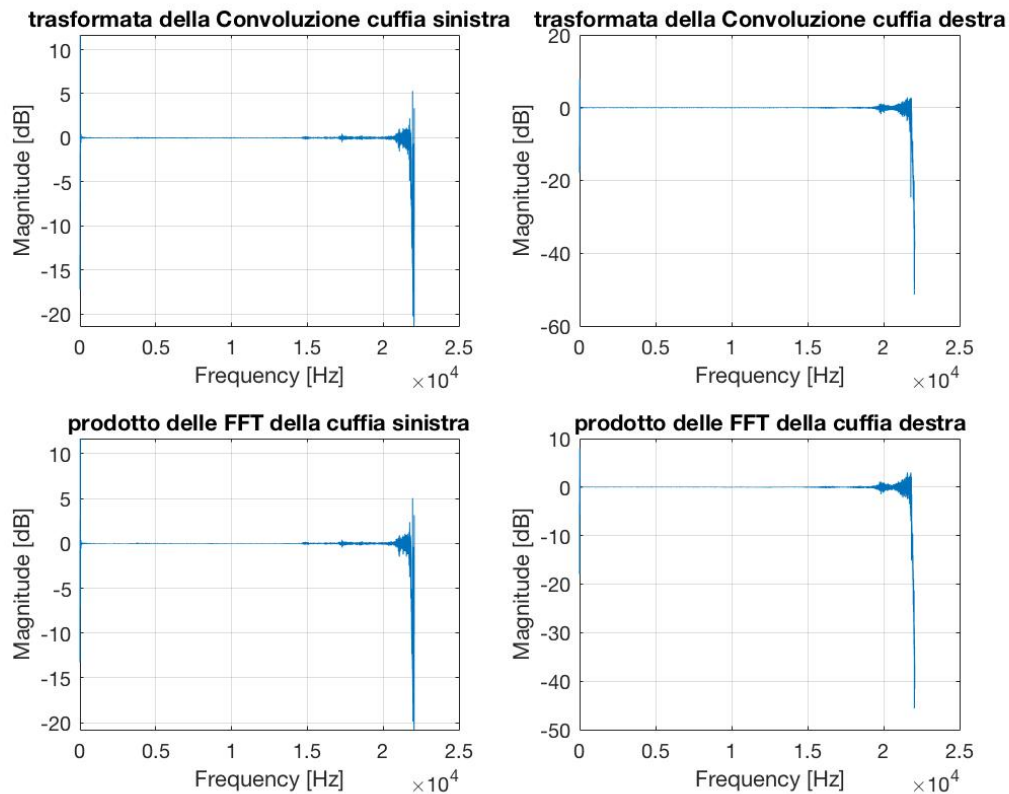


Figura 3.3.10: Confronto tra le trasformate della convoluzione e il prodotto delle trasformate.

In particolare, nei quattro grafici sono visibili le frequenze in cui il filtro inverso non ha annullato gli effetti del trasduttore sull'uscita del sistema. Per la cuffia sinistra (parte sinistra) la curva è piatta a 0 dB fino a 15000 Hz, nelle frequenze superiori iniziano le prime distorsioni fino al valore di 22050 Hz in cui la curva raggiunge -20 dB e +5 dB.

Per la cuffia destra l'equalizzazione risulta completamente riuscita fino a 20000 Hz, poi l'andamento decade fino a -45 dB.

3.4 Cuffia Sennheiser-HD480

Il primo grafico (Figura 3.4.1) mostra i risultati della simulazione dell'acquisizione della risposta all'impulso da parte dei microfoni di orecchio destro e orecchio sinistro in risposta alla stimolazione con il segnale MLS nel dominio del tempo.

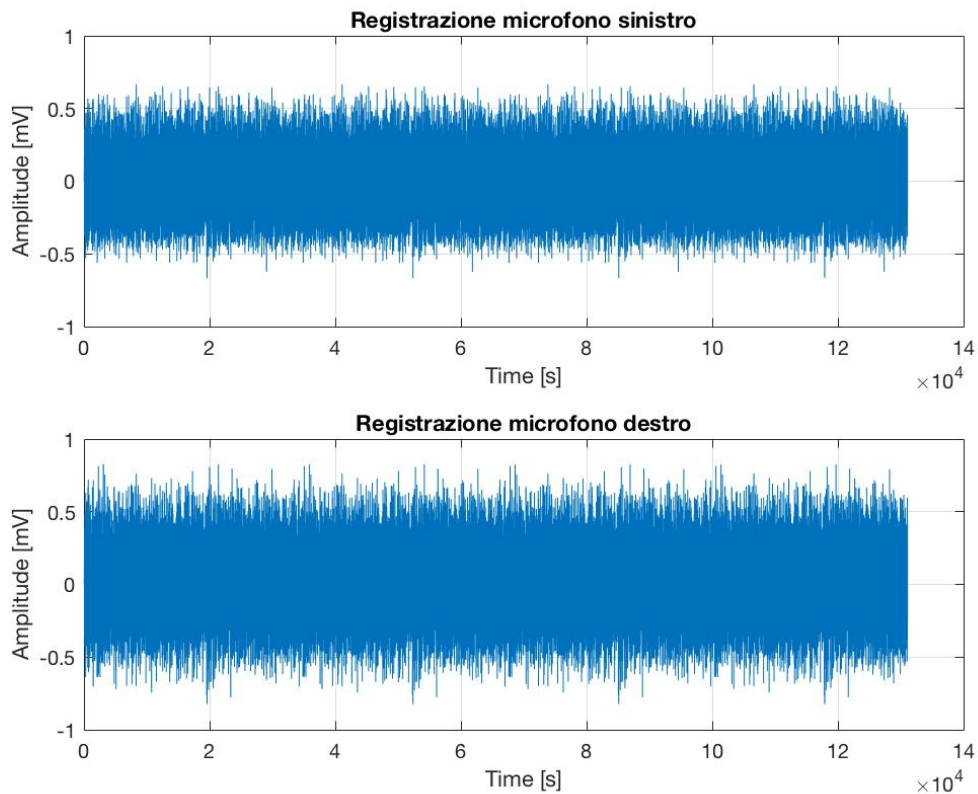


Figura 3.4.1: Simulazione del segnale di output fornendo in input un'eccitazione MLS - Cuffia Sennheiser HD480.

Di seguito viene riportata la risposta del sistema nel dominio del tempo per effetto del segnale di test ESS (Figura 3.4.2). Per entrambi i metodi di stimolazione, nonostante il segnale di test inviato alle due cuffie sia equivalente, le due acquisizioni non coincidono perchè la diversa realizzazione fisica dei trasduttori provoca segnali di uscita differenti.

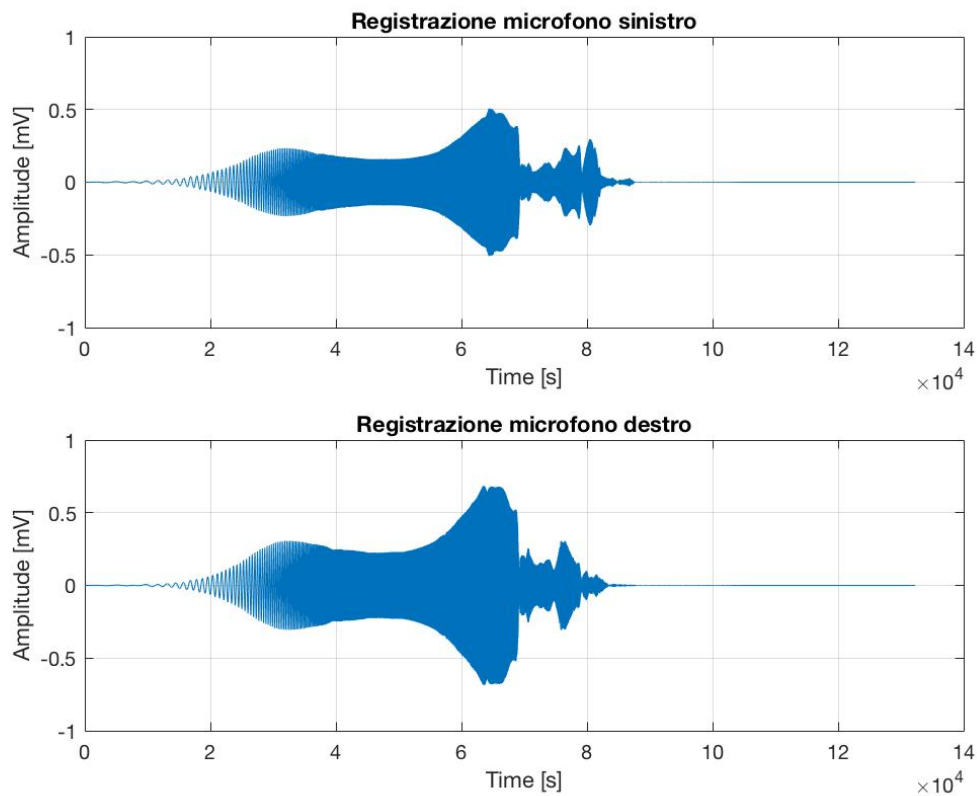


Figura 3.4.2: Simulazione del segnale di output ad un input ESS
Cuffia Sennheiser HD480.

La funzione *impzest* alla quale vengono passate l'eccitazione MLS e la registrazione simulata per il trasduttore sinistro, restituisce la risposta impulsiva del sistema cuffia destra al segnale di test. Passando alla funzione il segnale acquisito con la cuffia destra, restituisce la risposta impulsiva della cuffia destra.

Allo stesso modo può essere fatto con il segnale di test ESS e le relative acquisizioni (Figura 3.4.2).

La sovrapposizione delle risposte impulsive calcolate (Figura 3.4.3) consente di verificare che le risposte impulsive stimate con i due metodi e quelle originali coincidano. Nella parte superiore quelle relative al trasduttore sinistro; in basso quelle relative al trasduttore destro. In rosso le risposte impulsive generate dal segnale MLS, in verde quelle generate dal segnale ESS e in blu la risposta impulsiva fornita dalle misure effettuate nel 1994 nella camera anecoica del MIT.

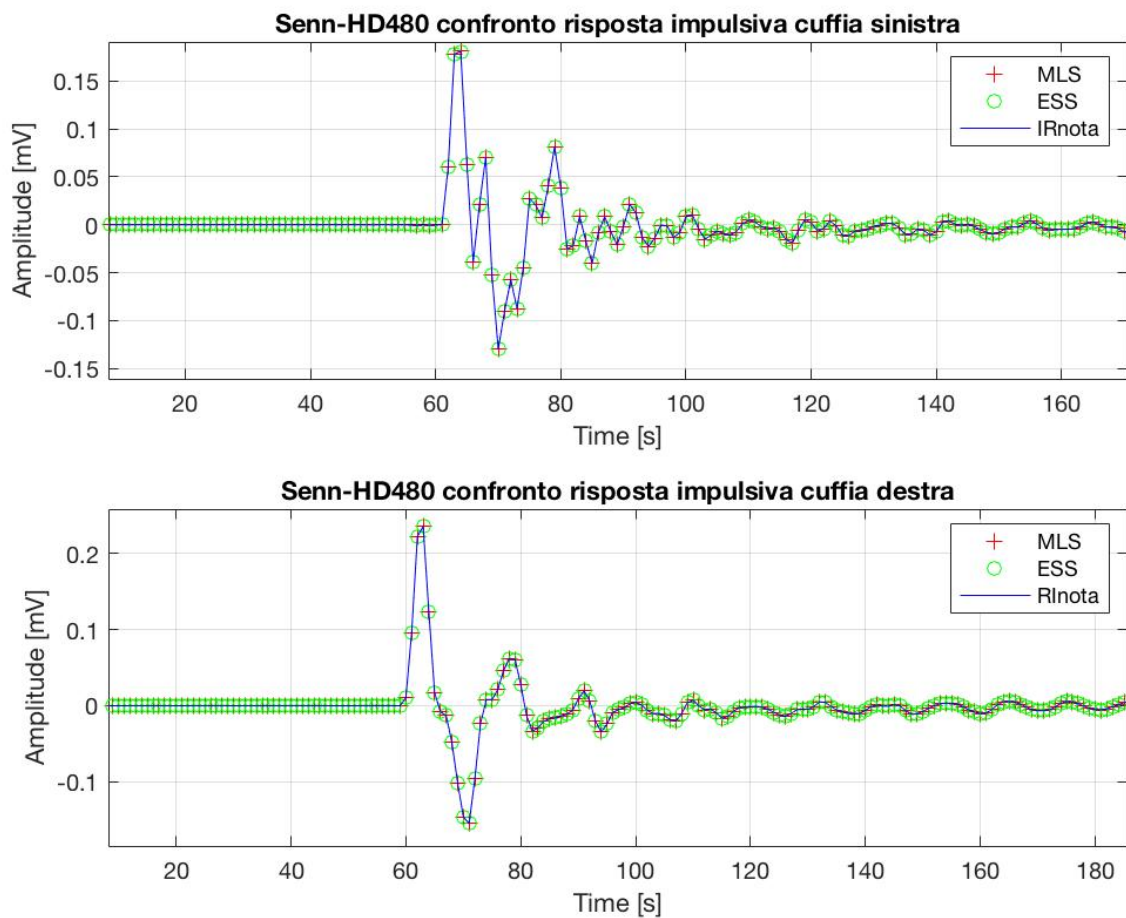


Figura 3.4.3: Confronto delle risposte impulsive ottenute Cuffia Sennheiser HD480.

Il grafico sottostante rappresenta la sovrapposizione delle risposte impulsive: in blu la risposta impulsiva del trasduttore sinistro, in rosso quella del trasduttore destro nel dominio del tempo. Entrambe le funzioni iniziano nel medesimo istante in corrispondenza di 60 s.

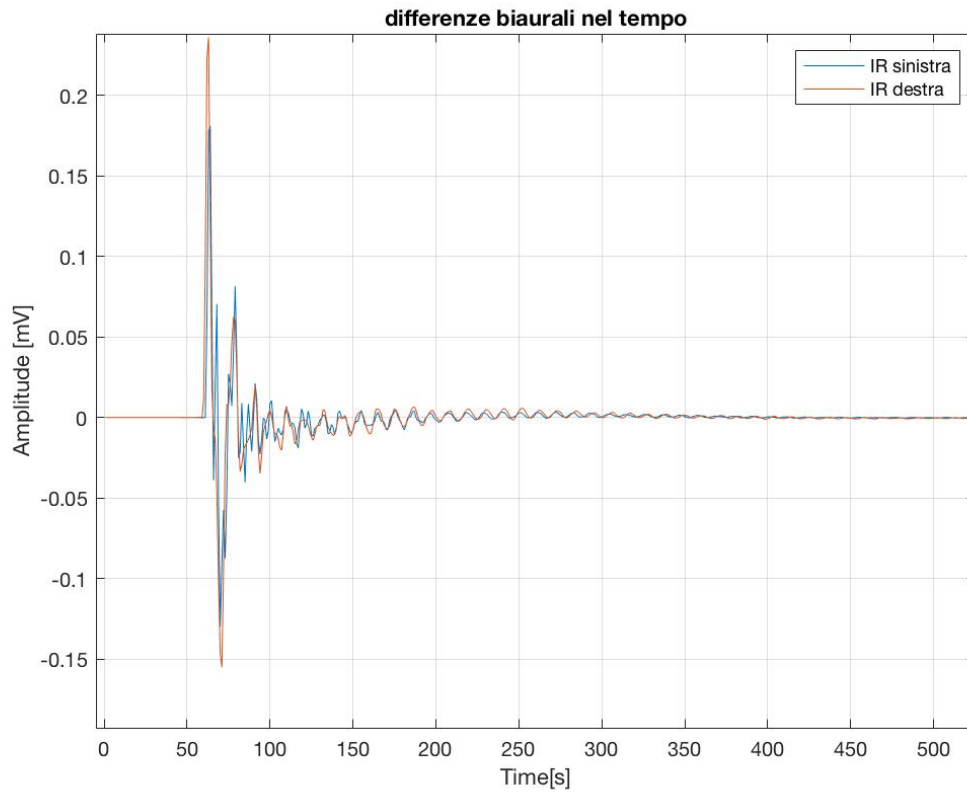


Figura 3.4.4: Sovrapposizione delle risposte impulsive nel dominio del tempo Cuffia Sennheiser HD480.

Procedendo con l'analisi in frequenza, è possibile rappresentare la sovrapposizione delle risposte impulsive in frequenza normalizzata passando alla funzione *freqz* le risposte impulsive calcolate nel dominio del tempo. La funzione restituisce l'andamento dei moduli in dB (parte alta) e delle fasi (parte bassa) da 0 a 1. Dal grafico dei moduli si deduce che le risposte impulsive non coincidono e che nella prima parte hanno un andamento simile che poi si discosta completamente al crescere delle frequenze.

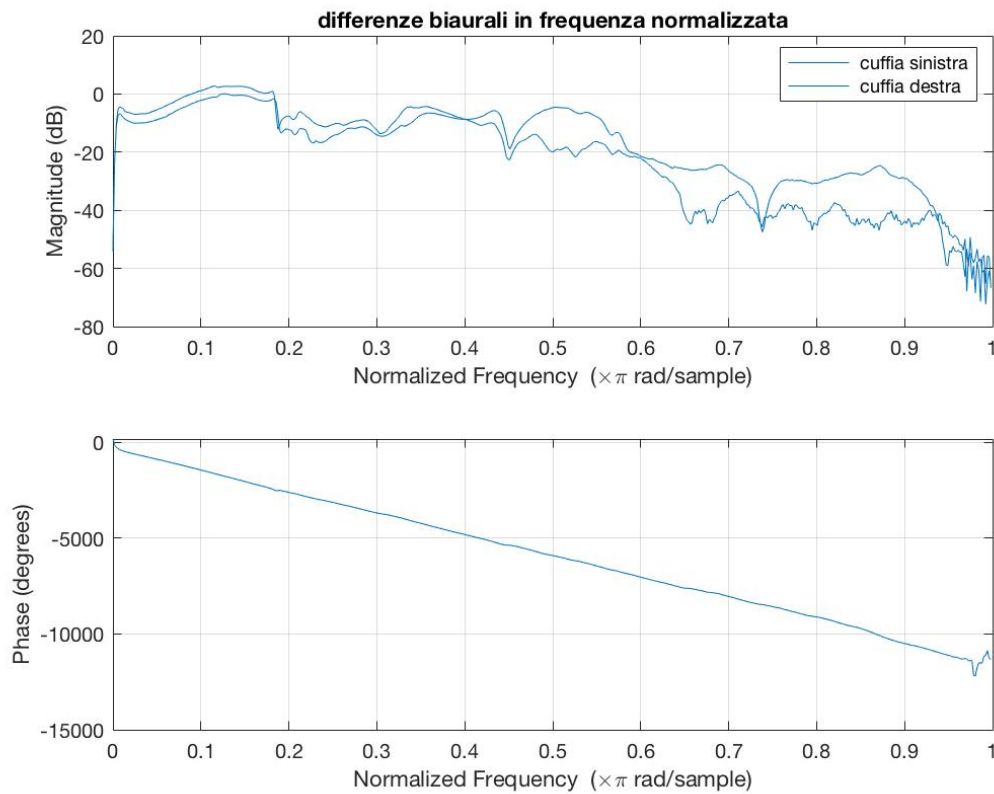


Figura 3.4.5: Sovrapposizione delle risposte impulsive in frequenza normalizzata Cuffia Sennheiser HD480.

Dopo aver calcolato la trasformata di Fourier delle risposte impulsive con l'operatore *FFT* e calcolando i relativi moduli con la funzione *abs*, si può valutare effettivamente quali siano le differenze tra i due trasduttori al variare della frequenza (Figura 4.4.6).

L'asse delle ordinate va da 0 Hz a 25000 Hz ma gli spettri di potenza delle due cuffie sono rappresentati nel range da 0 Hz a 22050 Hz che corrisponde alla metà della frequenza di campionamento. In blu lo spettro di potenza della cuffia sinistra e in rosso quello della cuffia destra.

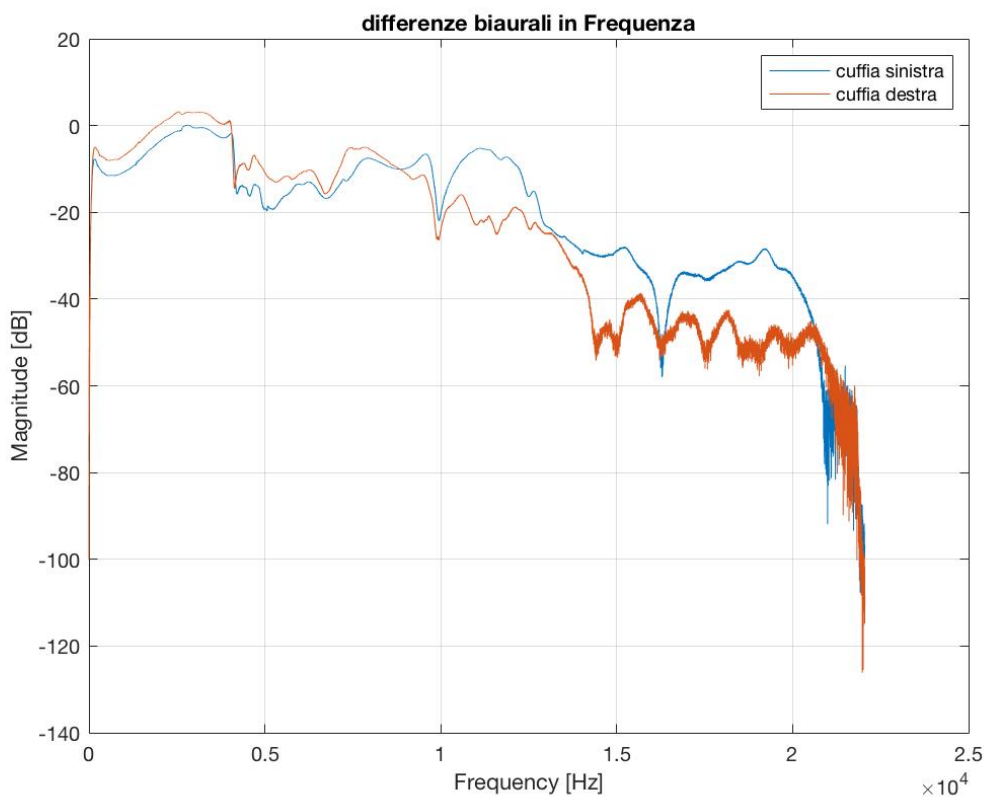


Figura 3.4.6: Spetti di potenza.

La (Figura 3.4.7) è il risultato dell'analisi in frequenza tramite l'operatore *freqz*.

Nell'asse delle ascisse troviamo la frequenza normalizzata da 0 a 1, nell'asse delle ordinate lo spettro del modulo e in fase. Le fasi risultano lineari in tutto il range di frequenze in cui il filtro inverso compensa gli effetti del filtraggio, perde di linearità alle alte frequenze in cui la funzione inversa calcolata non è completamente speculare alla relativa risposta impulsiva.

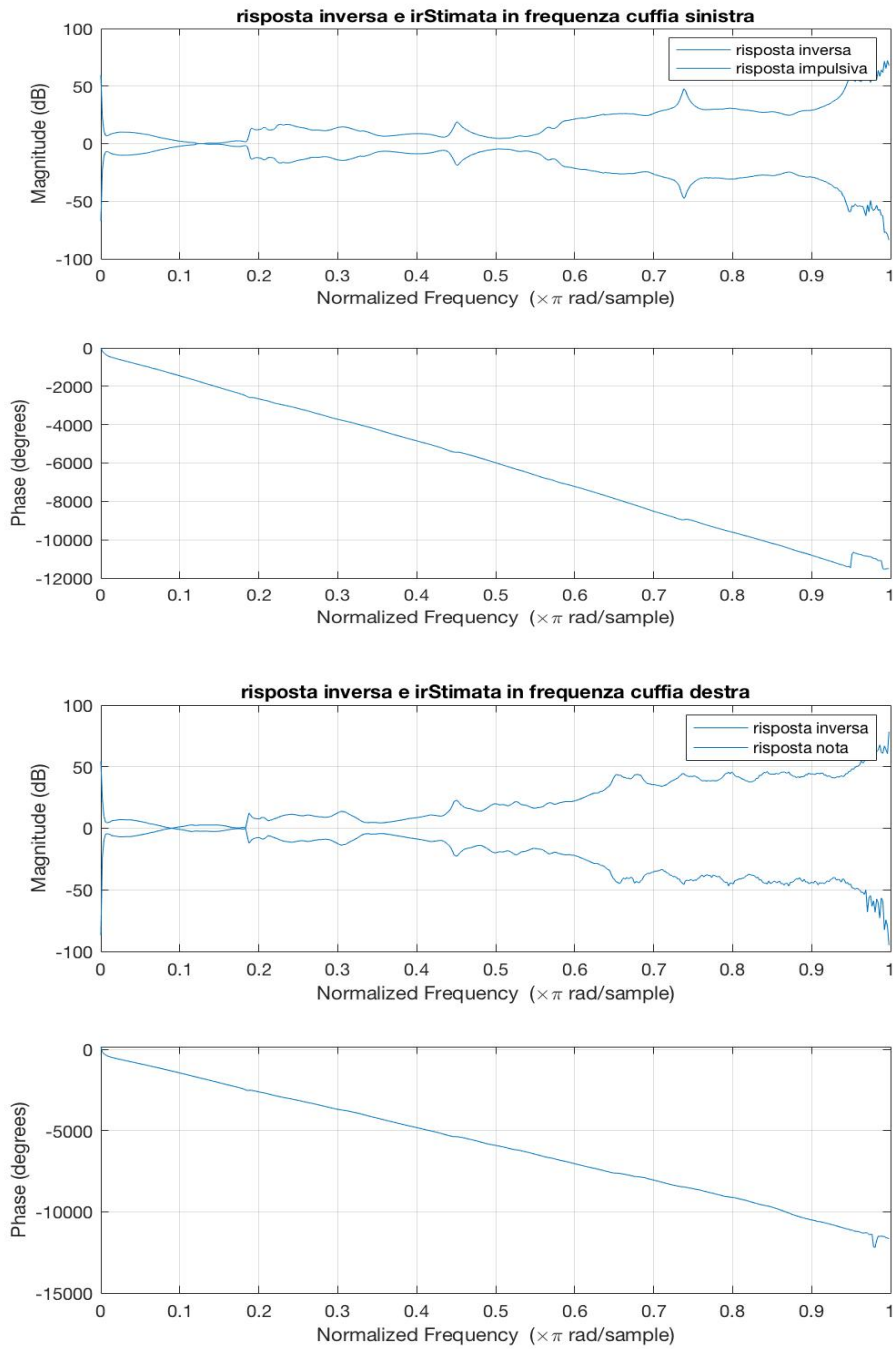


Figura 3.4.7: Confronto delle risposte impulsive destra e sinistra e delle relative inverse in frequenza normalizzata.

L'analisi in frequenza fatta attraverso la trasformata di Fourier dei filtri (curva rossa) e dei filtri inversi (curva blu) permette di rappresentare graficamente gli andamenti delle potenze in dB da 0 Hz a 25000 Hz.

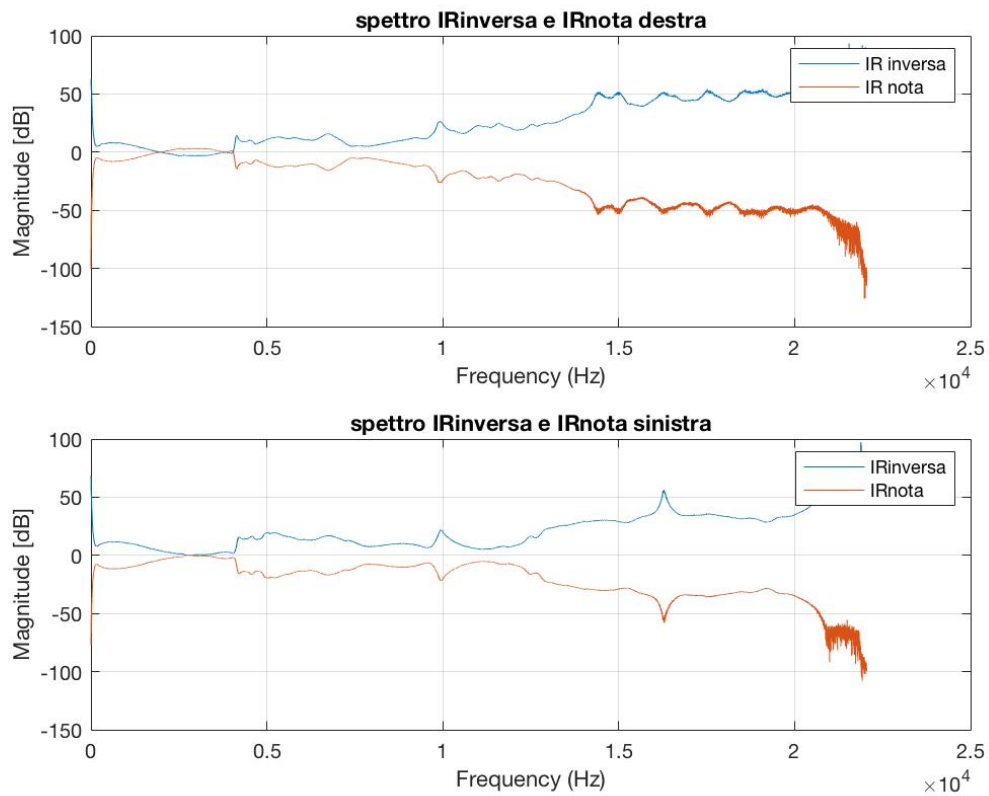


Figura 3.4.8: Spettri di potenza della risposta impulsiva e dell'inversa.

Assegnando a due variabili il risultato della convoluzione tra i due segnali si può visualizzare per quali frequenze le due curve sopracitate non si compensano.

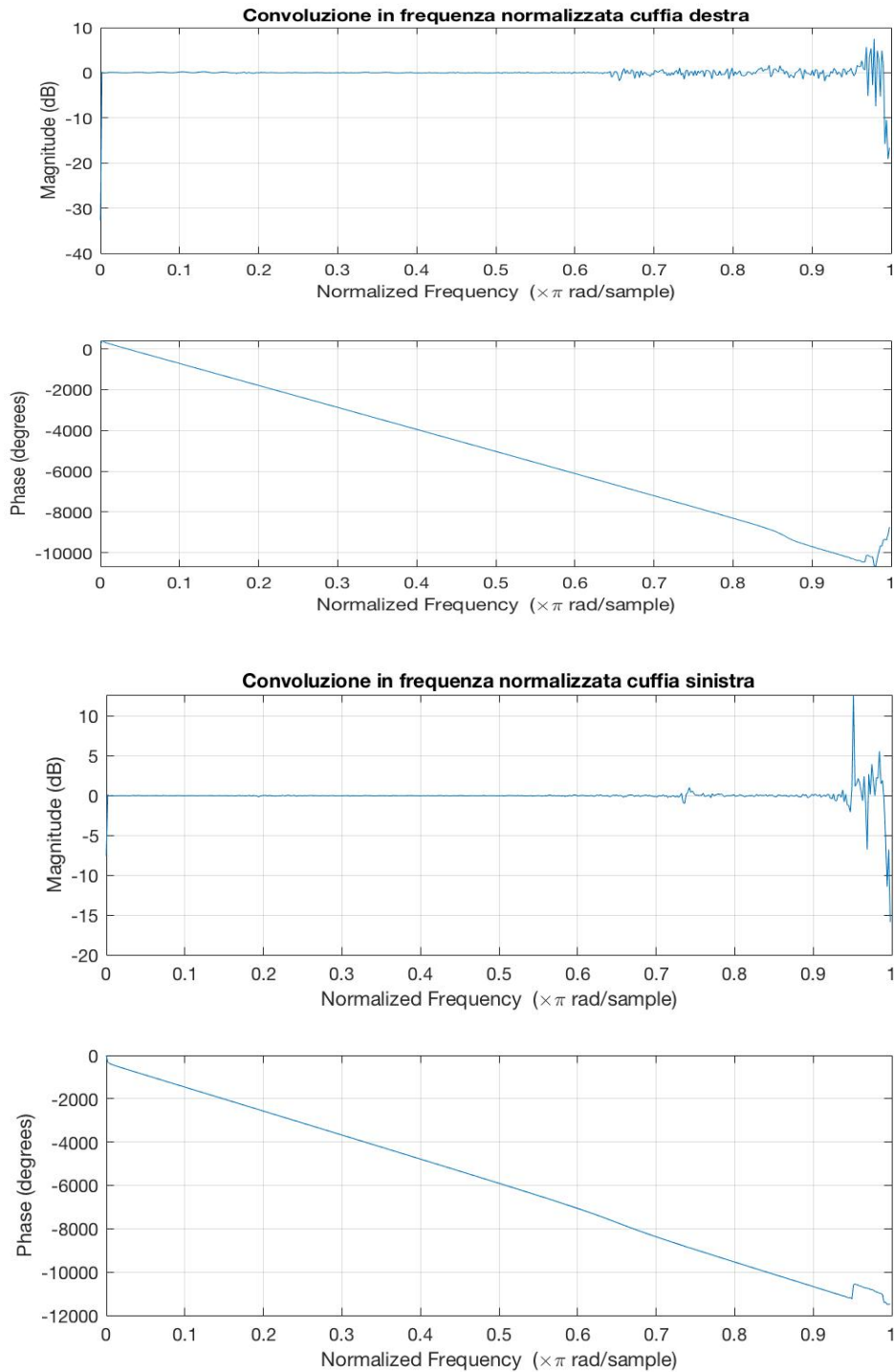


Figura 3.4.9: Convoluzione in frequenza normalizzata.

In (Figura 3.4.9) la convoluzione in frequenza normalizzata mentre in (Figura 3.4.10) lo spettro della convoluzione confrontato con il prodotto delle trasformate dei due segnali. I plot nella parte sinistra sono relativi alla trasformata della convoluzione tra la risposta impulsiva stimata per la il trasduttore sinistro e la sua inversa; i plot di destra sono relativi al traduttore sinistro.

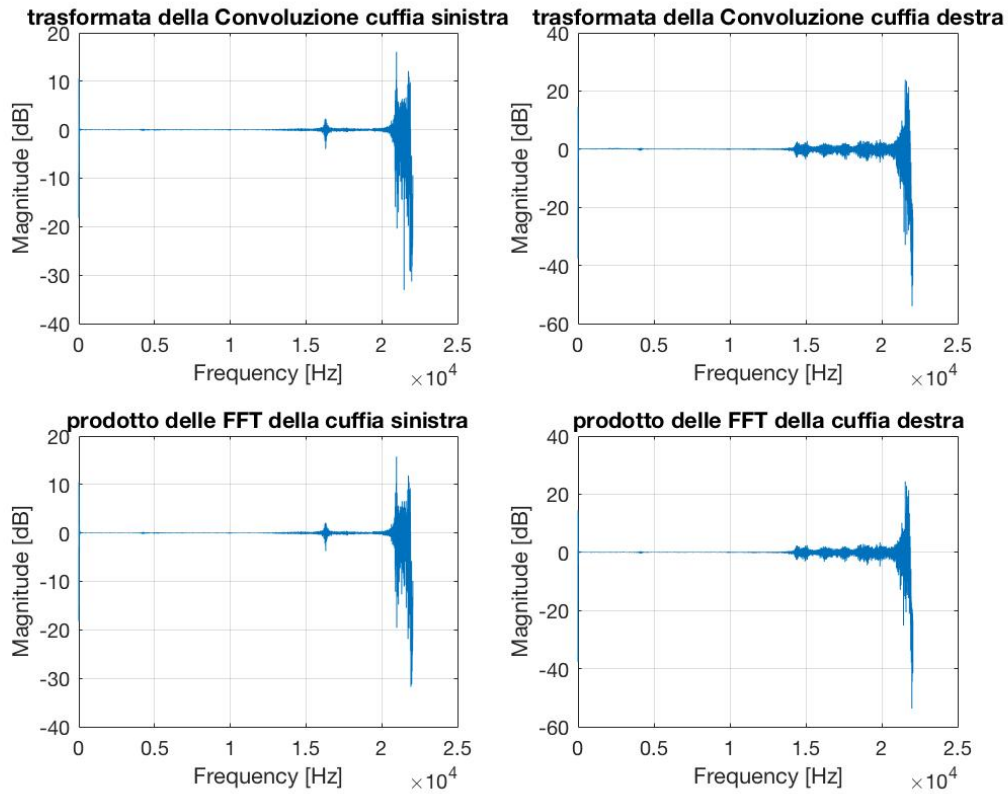


Figura 3.4.10: Confronto tra le trasformate della convoluzione e il prodotto delle trasformate.

3.5 Cuffia Radio Shack-Nova 38

Il filtraggio eseguito sulle risposte impulsive presenti all'interno del dataset, mediante il filtro nel dominio della frequenza, restituisce il segnale acquisito dai ricevitori e modellato dalle cuffie per un'eccitazione MLS (Figura 3.5.1) e per un'eccitazione ESS (Figura 3.5.2) nel dominio del tempo. La registrazione è ottenuta tramite simulazione, ma corrisponde al segnale che, in un setup reale, verrebbe registrato dai microfoni posti alle orecchie del manichino.

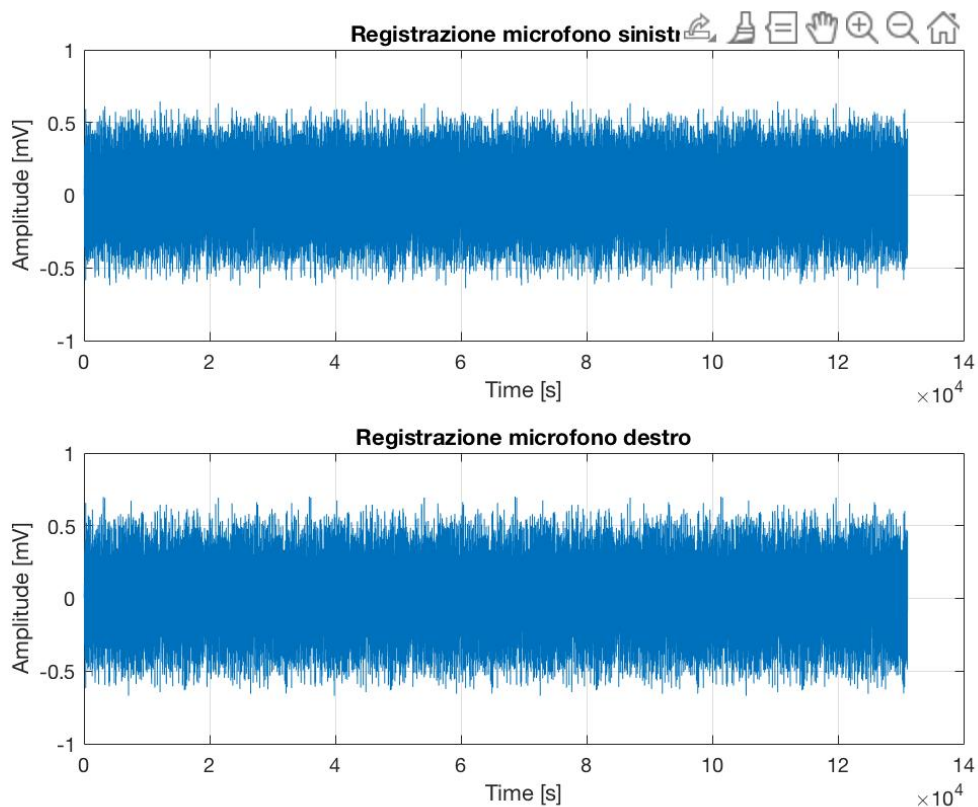


Figura 3.5.1: Simulazione del segnale di output fornendo in input un'eccitazione MLS- Cuffia Radio Shack Nova 38.

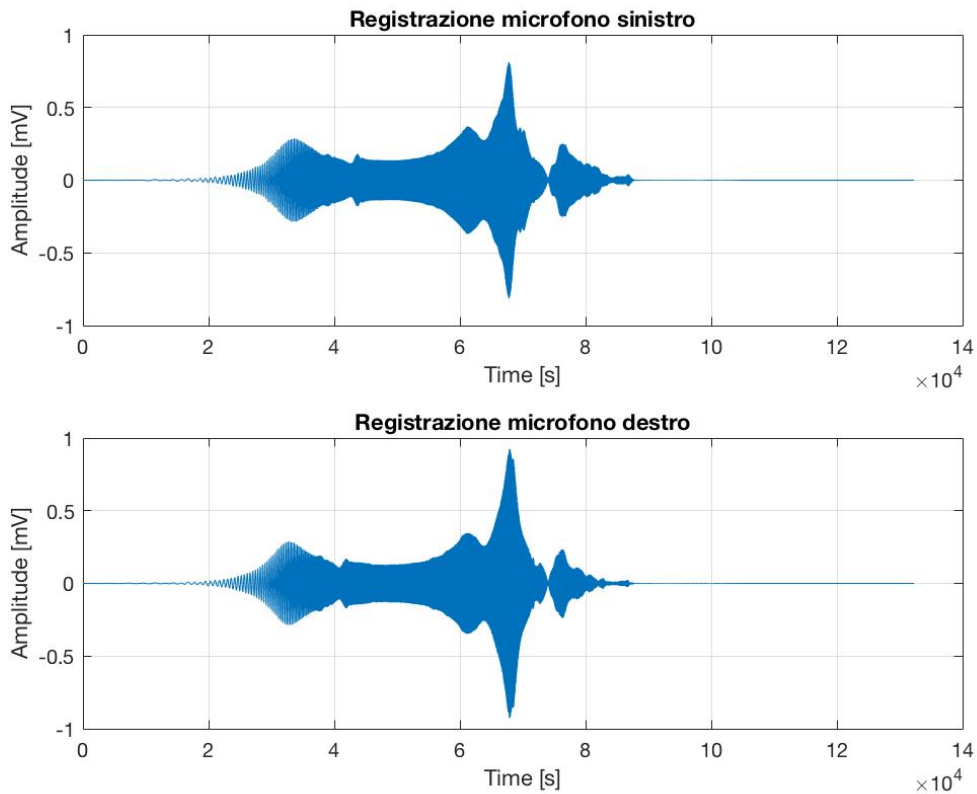


Figura 3.5.2: Simulazione del segnale di output fornendo in input un'eccitazione ESS-Cuffia Radio Shack Nova 38.

Dopo aver stimato le risposte impulsive ottenute con i due metodi di stimolazione, la sovrapposizione (Figura 3.5.3) verifica che l'identificazione è riuscita. I tre segnali: risposta impulsiva stimata con MLS, con ESS e risposta impulsiva contenuta nel dataset, coincidono. In verde la risposta impulsiva ad un segnale di test ESS, in rosso la risposta impulsiva ad un segnale MLS e in blu la risposta impulsiva originale.

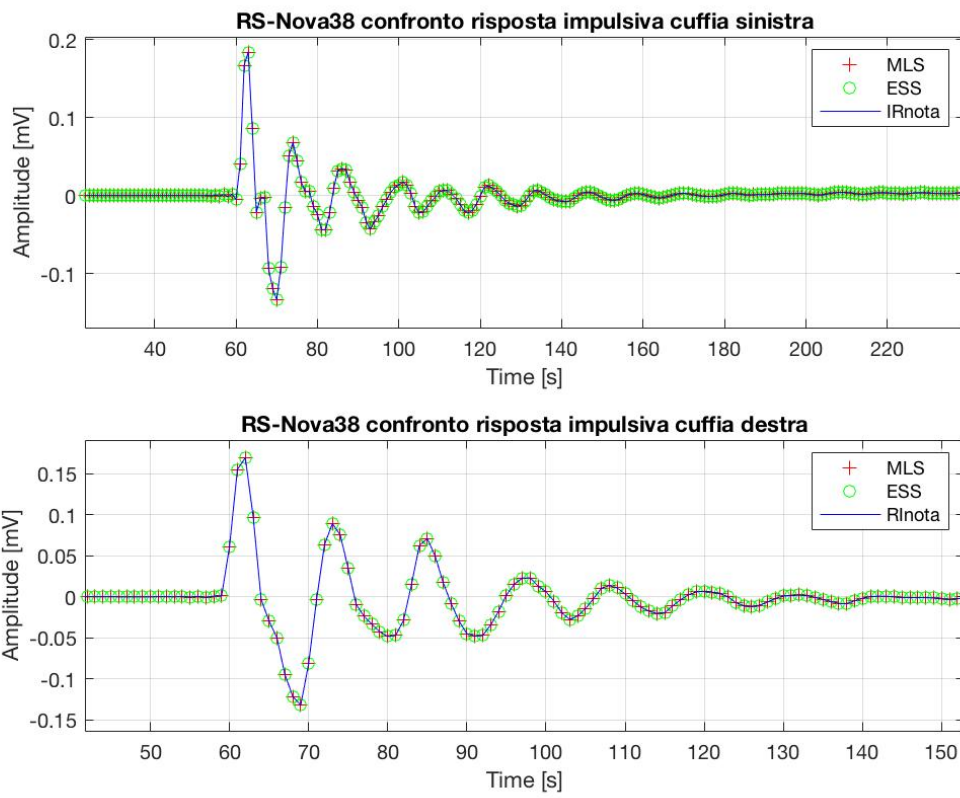


Figura 3.5.3: Confronto delle risposte impulsive ottenute Cuffia Radio Shack Nova38.

Il grafico (Figura 3.5.4) rappresenta la sovrapposizione delle risposte impulsive stimate per il modello Radio Shack Nova 38 nel dominio del tempo. La risposta impulsiva del trasduttore sinistro è tracciata in blu mentre quella del trasduttore destro in rosso.

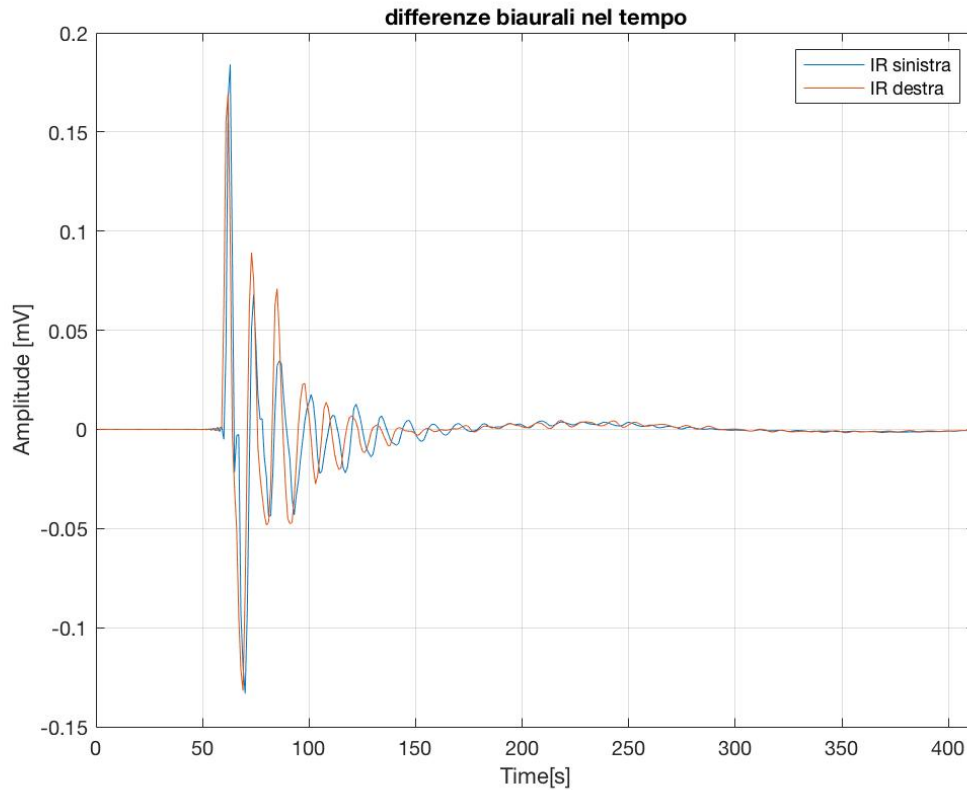


Figura 3.5.4: Sovrapposizione delle risposte impulsive nel dominio del tempo.

L'analisi in frequenza utilizzando la funzione *freqz* (Figura 3.5.5) e attraverso l'operatore FFT (Figura 3.5.6) confronta gli spettri di potenza delle risposte impulsive ricostruite per le cuffie destra e sinistra modello Radio Shack Nova 38.

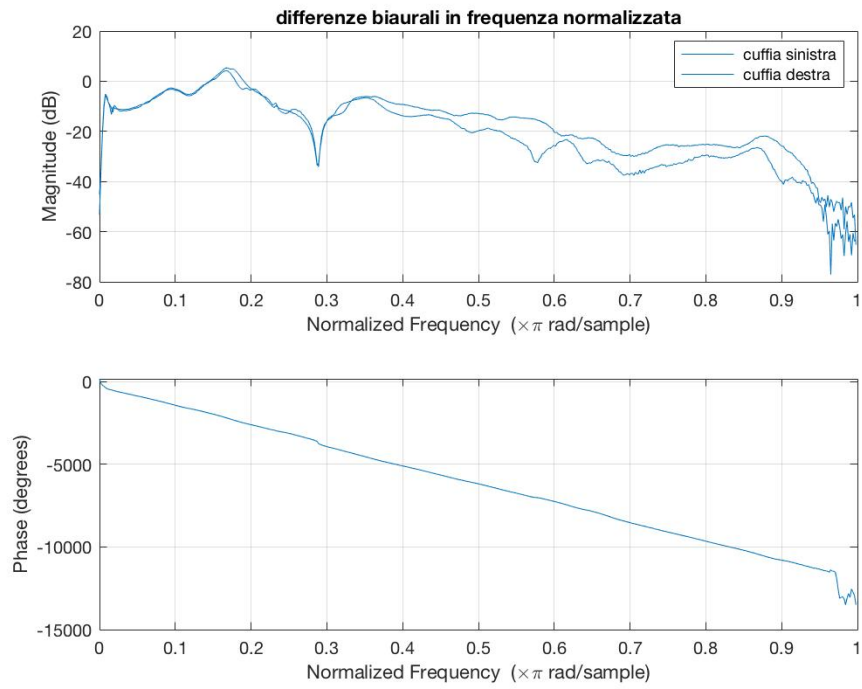


Figura 3.5.5: Modulo e fase delle risposte impulsive in frequenza normalizzata.

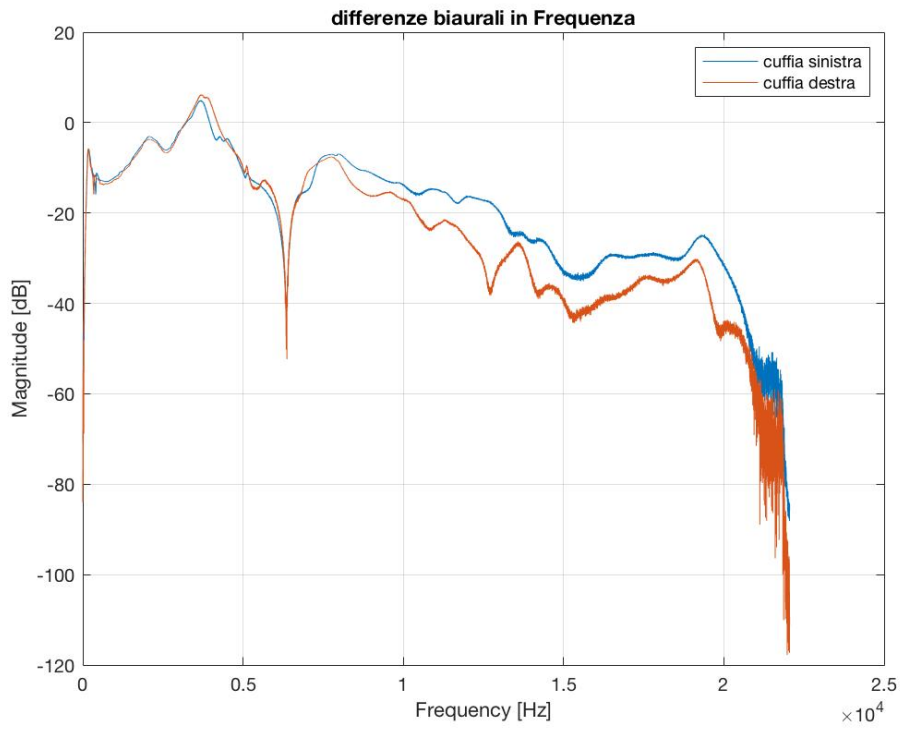


Figura 3.5.6: Modulo degli spettri.

Dopo aver modellato il filtro inverso per la risposta impulsiva destra e sinistra, si riporta il confronto in frequenza normalizzata (Figura 3.5.7). Il primo grafico è relativo al modulo della destra e della relativa inversa, nel terzo sono visibili gli andamenti in dB della risposta impulsiva sinistra e dell'inversa progettata. L'ultimo e il secondo grafico riportano l'andamento complessivo della fase.

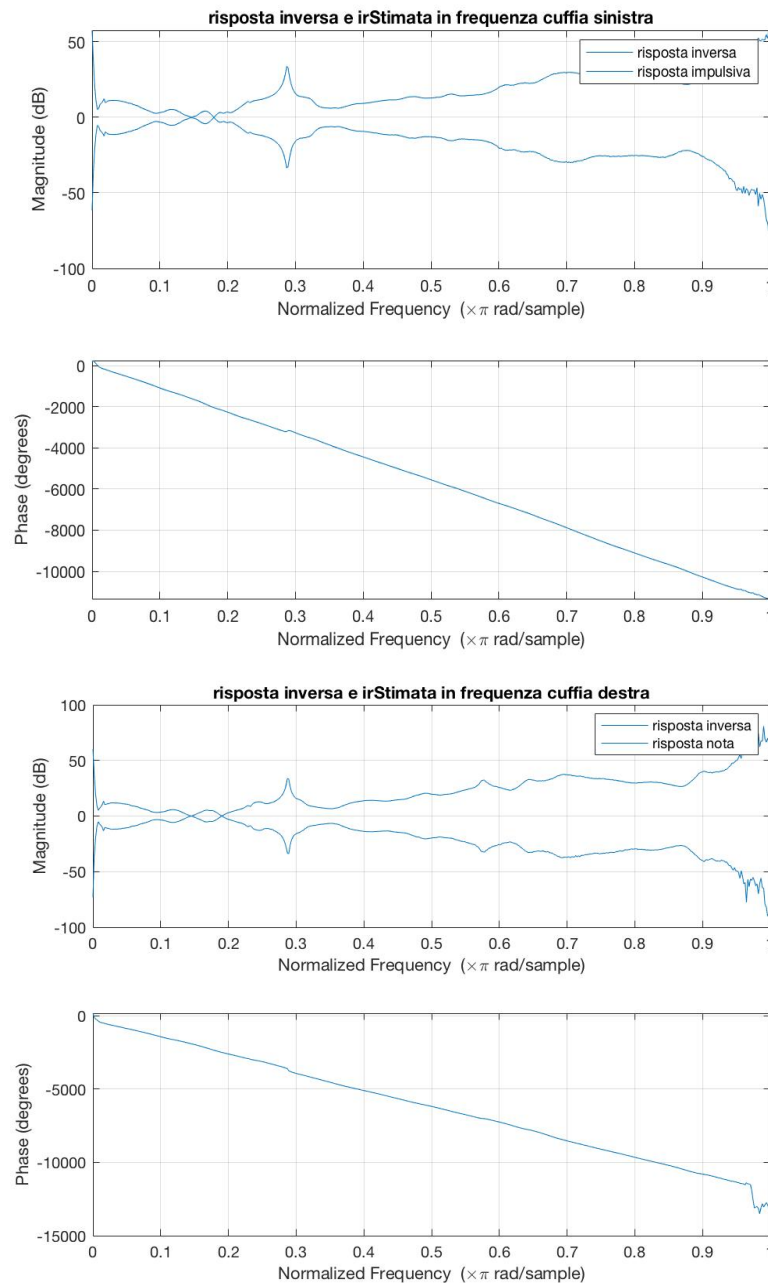


Figura 3.5.7: Modulo e fase delle risposte impulsive e delle relative inverse.

Eseguendo la FFT (Figura 3.5.8), con frequenza di campionamento pari a 44100 Hz, vengono mostrati gli andamenti in frequenza per valutare a quali frequenze il filtro inverso (curva blu) compensa e attenua effettivamente i buchi della risposta impulsiva (curva rossa). Il primo grafico è relativo al trasduttore destro e di seguito quello relativo al trasduttore sinistro. Le curve si intersecano a 0 dB e hanno andamenti uguali ma opposti al variare della frequenza.

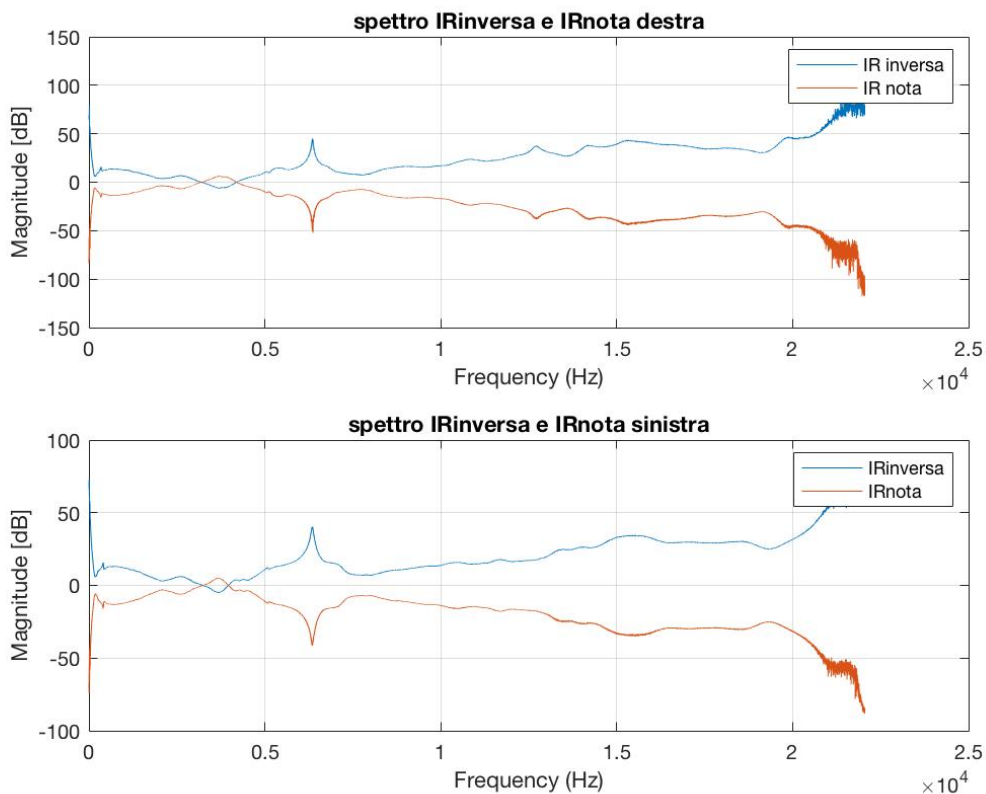


Figura 3.5.8: Confronto dei moduli in frequenza.

Dopo aver assegnato a una variabile ir_tot_L il risultato della convoluzione tra la risposta impulsiva nota e la sua inversa sinistra, e alla variabile ir_tot_R il risultato della convoluzione tra la risposta impulsiva destra e la sua inversa, utilizzando la funzione *freqz* viene rappresentato l'andamento della convoluzione in frequenza normalizzata (Figura 3.5.9.).

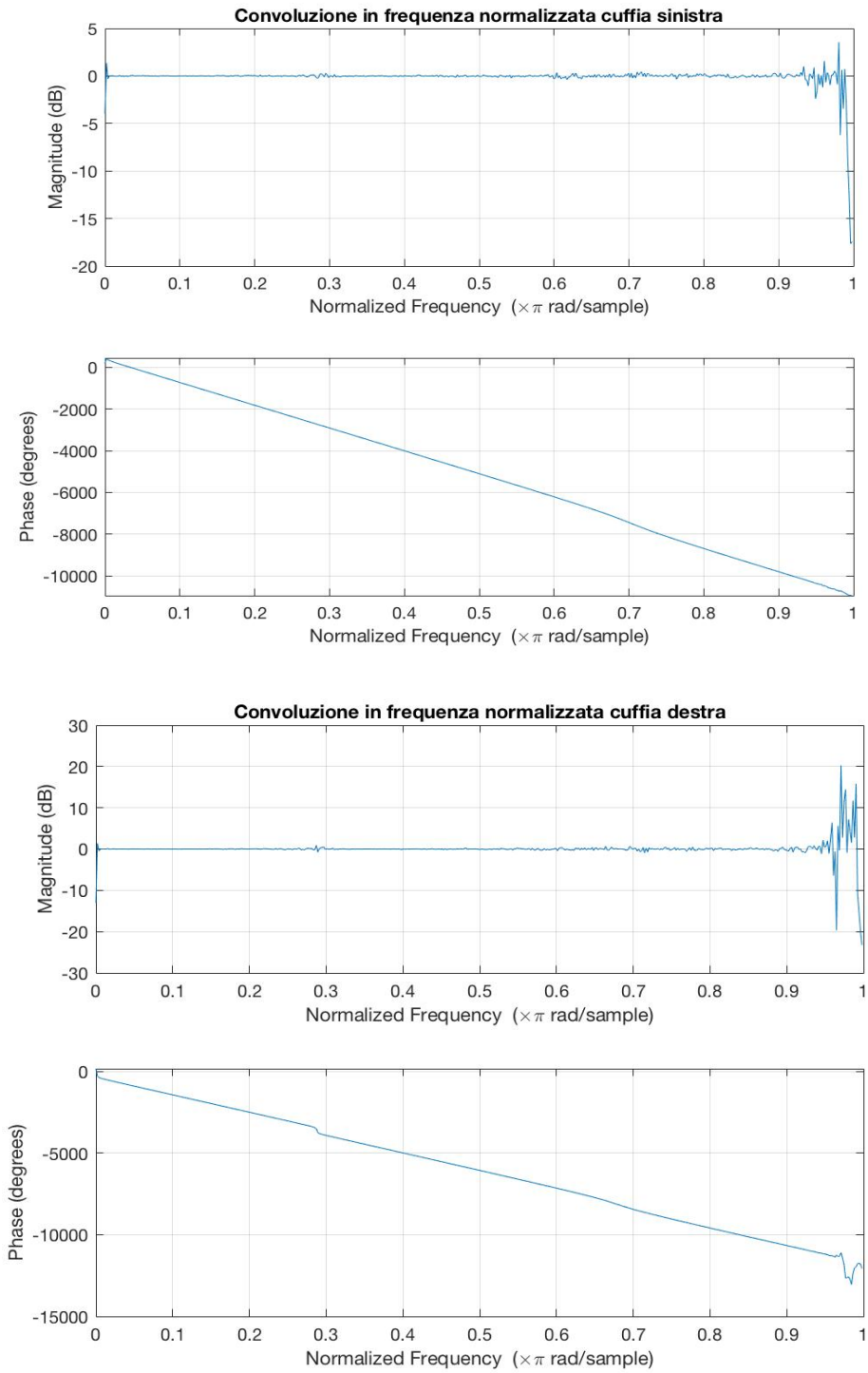


Figura 3.5.9: Convoluzione in frequenza normalizzata.

Le curve dei moduli dovrebbero essere completamente piatte su 0 dB per avere cuffie perfettamente equalizzate, in realtà, a causa delle limitazioni imposte dall' algoritmo per il filtro inverso, alle alte frequenze il filtro costruito non annulla completamente gli effetti della risposta impulsiva, provocando distorsioni.

Figura 3.5.10 riporta il confronto tra la trasformata di Fourier della convoluzione tra la risposta impulsiva e la sua inversa e il prodotto delle loro trasformate per la cuffia sinistra e per la cuffia destra.

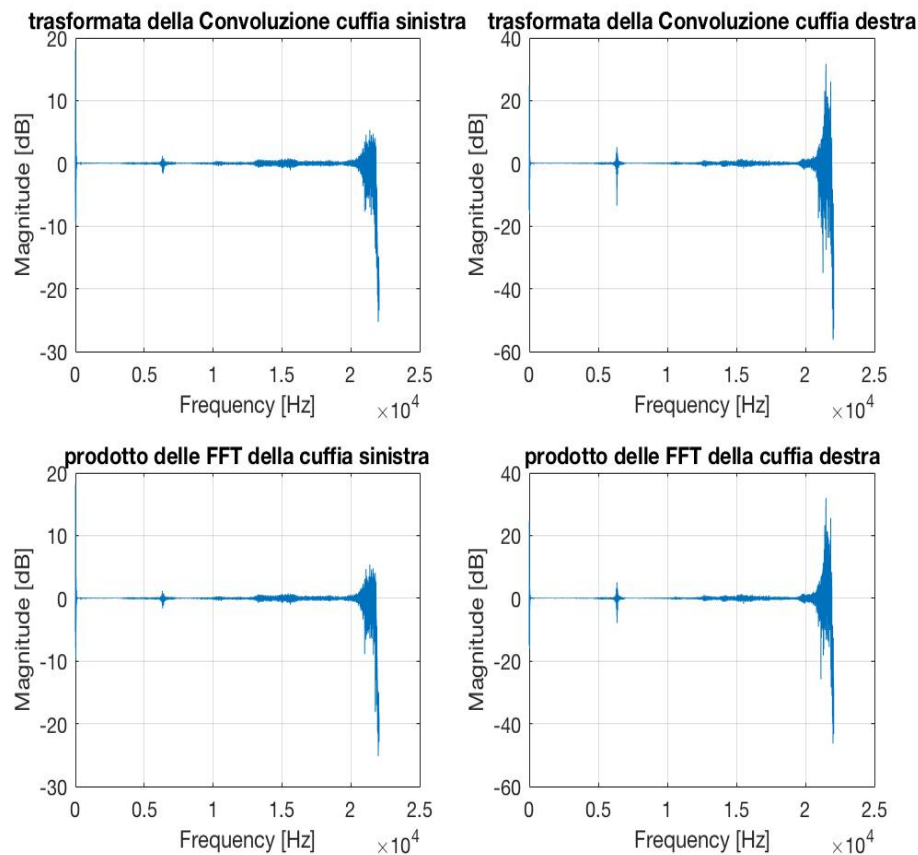


Figura 3.5.10: Confronto tra le trasformate della convoluzione e il prodotto delle trasformate.

In particolare nei quattro grafici sono visibili le frequenze in cui il filtro inverso non ha annullato gli effetti del trasduttore sull'uscita del sistema. Sia la cuffia sinistra che la destra non sono perfettamente equalizzate. Infatti la curva presenta un picco tra 5000 Hz e 10000 Hz.

3.6 Cuffia Sony-TwinTurbo

Il primo grafico (Figura 3.6.1) mostra i risultati della simulazione dell'acquisizione della risposta all'impulso da parte dei microfoni di orecchio destro e orecchio sinistro in risposta alla stimolazione con il segnale MLS nel dominio del tempo.

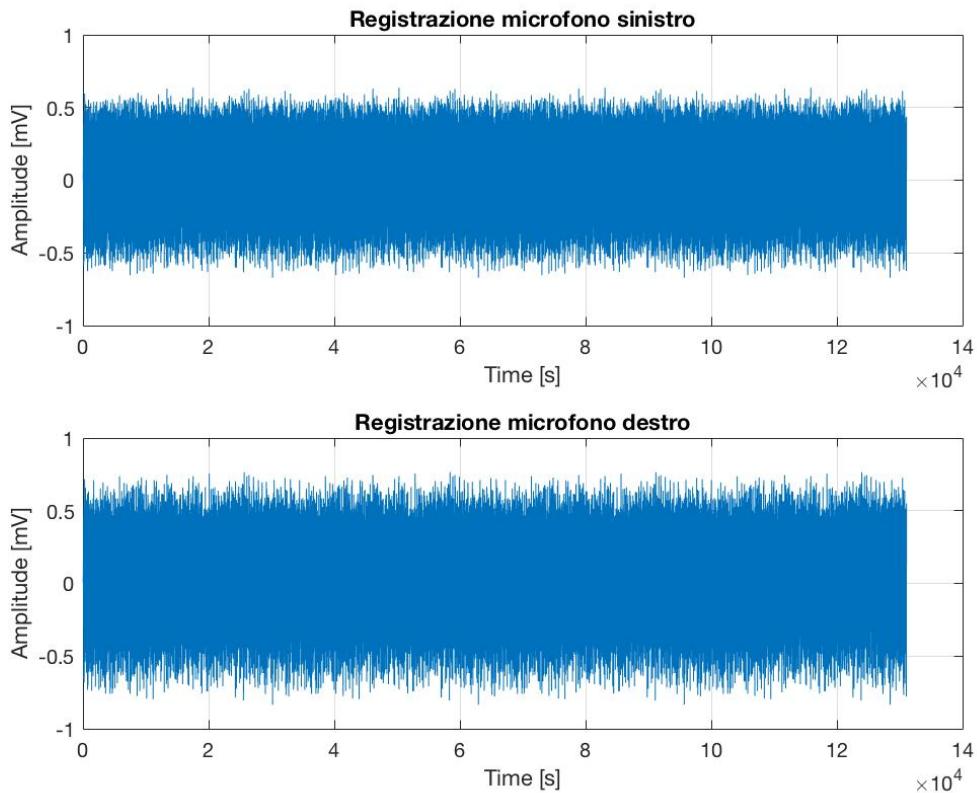


Figura 3.6.1: Simulazione del segnale di output fornendo in input un'eccitazione MLS-Cuffia Sony-Twin Turbo.

Di seguito viene riportata la risposta del sistema nel dominio del tempo per effetto del segnale di test ESS (Figura 3.6.2). Per entrambi i metodi di stimolazione, nonostante il segnale di test inviato alle due cuffie sia equivalente, le due acquisizioni non coincidono perchè la diversa realizzazione fisica dei trasduttori provoca segnali di uscita differenti.

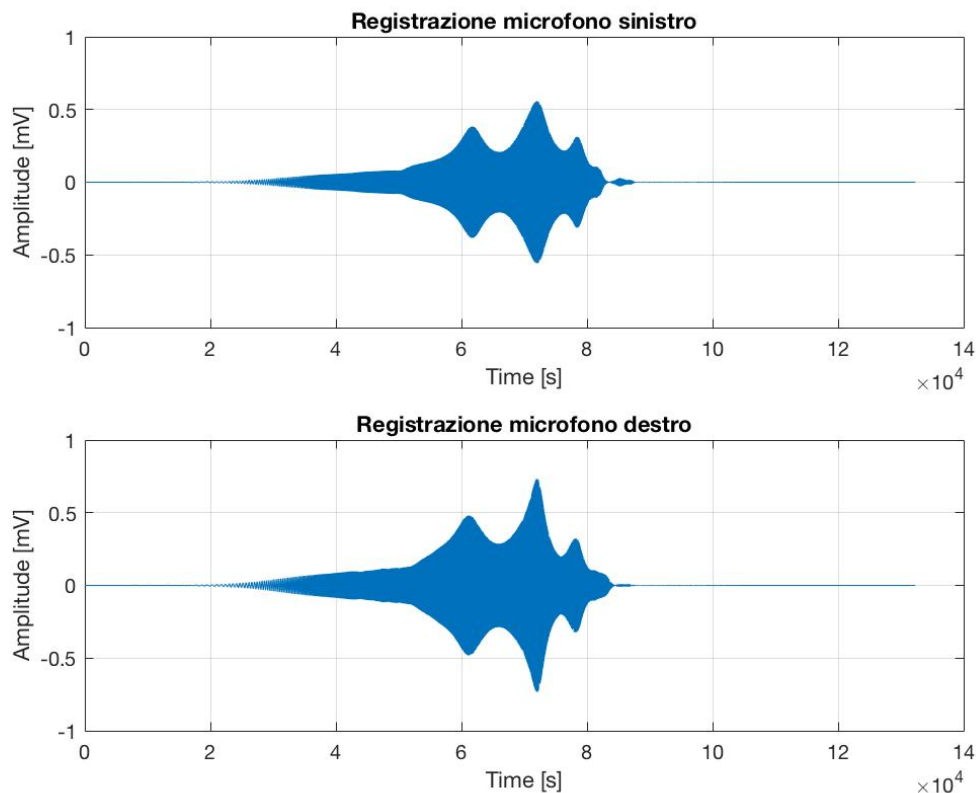


Figura 3.6.2: Simulazione del segnale di output ad un input ESS
Cuffia Sony-Twin Turbo.

La funzione *impzest* alla quale viene passata l'eccitazione MLS e la registrazione simulata per il trasduttore sinistro, restituisce la risposta impulsiva del sistema cuffia destra al segnale di test. Passando alla funzione il segnale acquisito con la cuffia destra, restituisce la risposta impulsiva della cuffia destra.

Allo stesso modo può essere fatto con il segnale di test ESS e le relative acquisizioni (Figura 3.6.2)

La sovrapposizione delle risposte impulsive calcolate (Figura 3.6.3) consente di verificare che le risposte impulsive stimate con i due metodi e quelle originali coincidano. Nella parte superiore quelle relative al trasduttore sinistro; in basso quelle relative al trasduttore destro. In rosso le risposte impulsive generate dal segnale MLS, in verde quelle generate dal segnale ESS e in blu la risposta impulsiva fornita dalle misure effettuate nel 1994 nella camera anecoica del MIT.

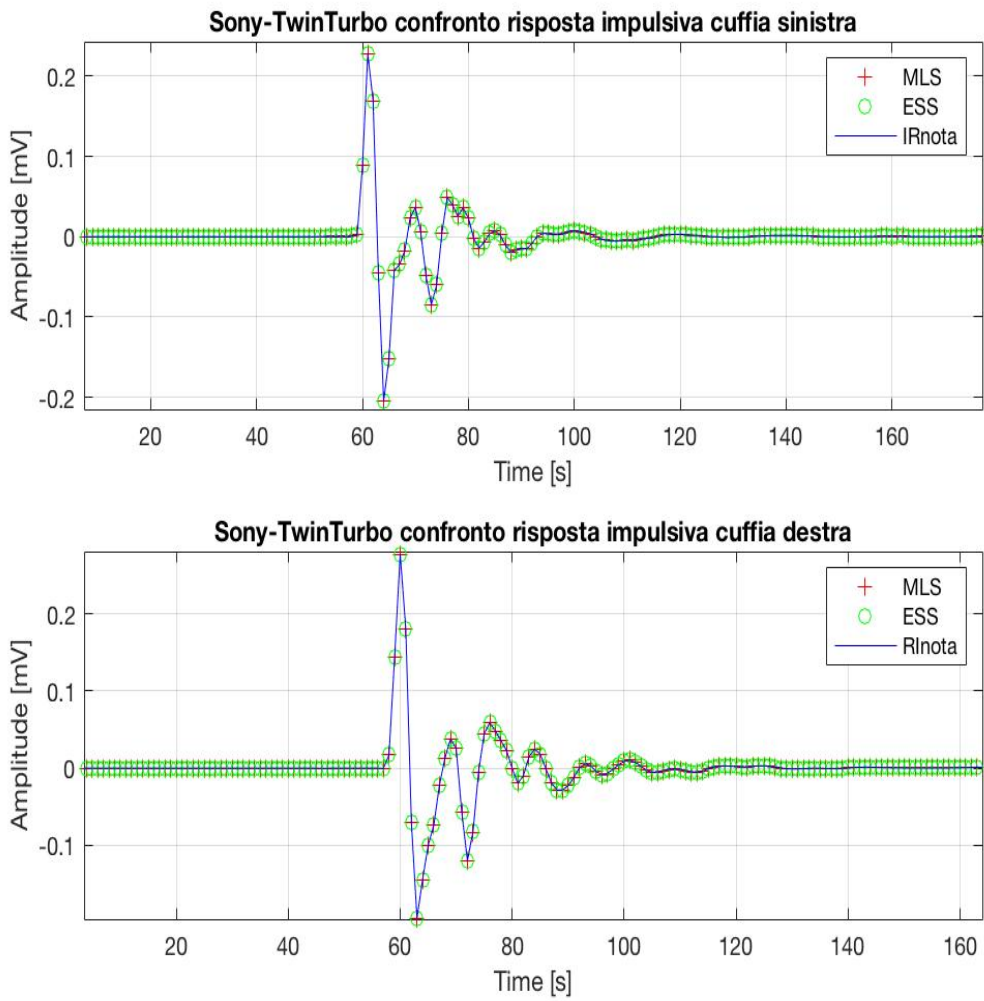


Figura 3.6.3: Confronto delle risposte impulsive ottenute Cuffia Sony-Twin Turbo.

La Figura 3.6.4 rappresenta la sovrapposizione delle risposte impulsive: in blu la risposta impulsiva del trasduttore sinistro, in rosso quella del trasduttore destro nel dominio del tempo per gli auricolari Sony Twin Turbo. Gli impulsi iniziano dopo 60 s dall'inizio delle stimolazioni.

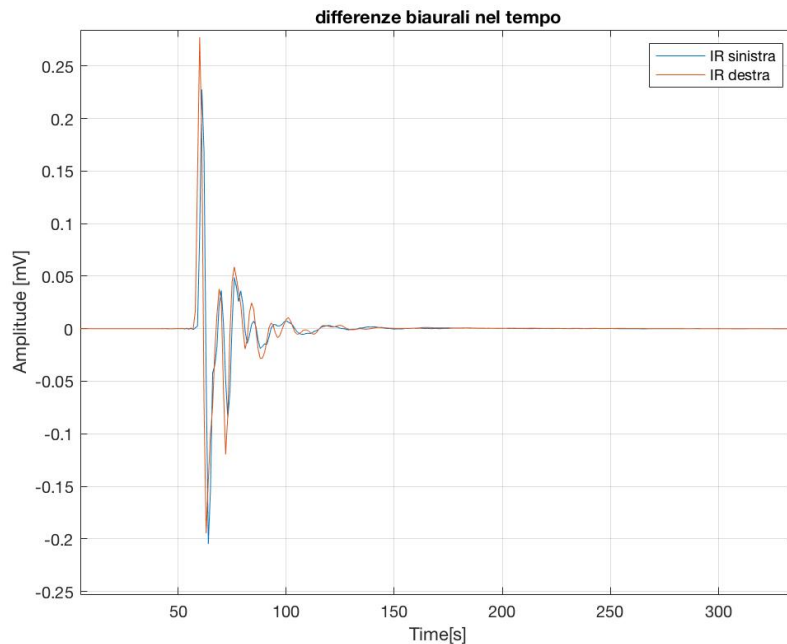


Figura 3.6.4: Sovrapposizione delle risposte impulsive nel dominio del tempo Cuffia Sony-Twin Turbo.

Procedendo con l'analisi in frequenza, è possibile rappresentare la sovrapposizione delle risposte impulsive in frequenza normalizzata passando alla funzione *freqz* le risposte impulsive calcolate nel dominio del tempo. La funzione restituisce l'andamento dei moduli in dB (parte alta) e delle fasi (parte bassa) da 0 a 1. Dal grafico dei moduli si deduce che le risposte impulsive non coincidono e che nella prima parte hanno un andamento simile che poi si discosta completamente al crescere delle frequenze.

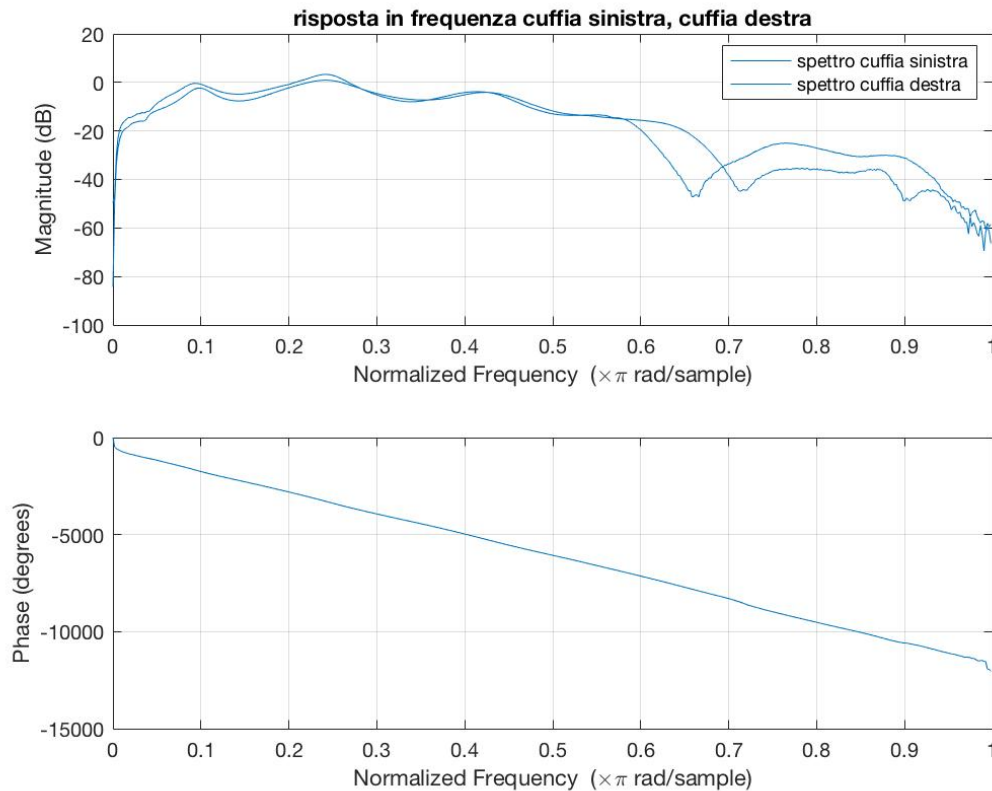


Figura: 3.6.5: Sovrapposizione delle risposte impulsive in frequenza normalizzata Cuffia Sony-Twin Turbo.

Dopo aver calcolato la trasformata di Fourier delle risposte impulsive con l'operatore *FFT* e calcolando i relativi moduli con la funzione *abs*, si può valutare effettivamente quali siano le differenze tra i due trasduttori al variare delle frequenze (Figura 3.6.6).

L'asse delle ordinate va da 0 Hz a 25000 Hz ma gli spettri di potenza delle due cuffie sono rappresentati nel range da 0 Hz a 22050 Hz che corrisponde alla metà della frequenza di campionamento. In blu lo spettro di potenza della cuffia sinistra e in rosso quello della cuffia destra.

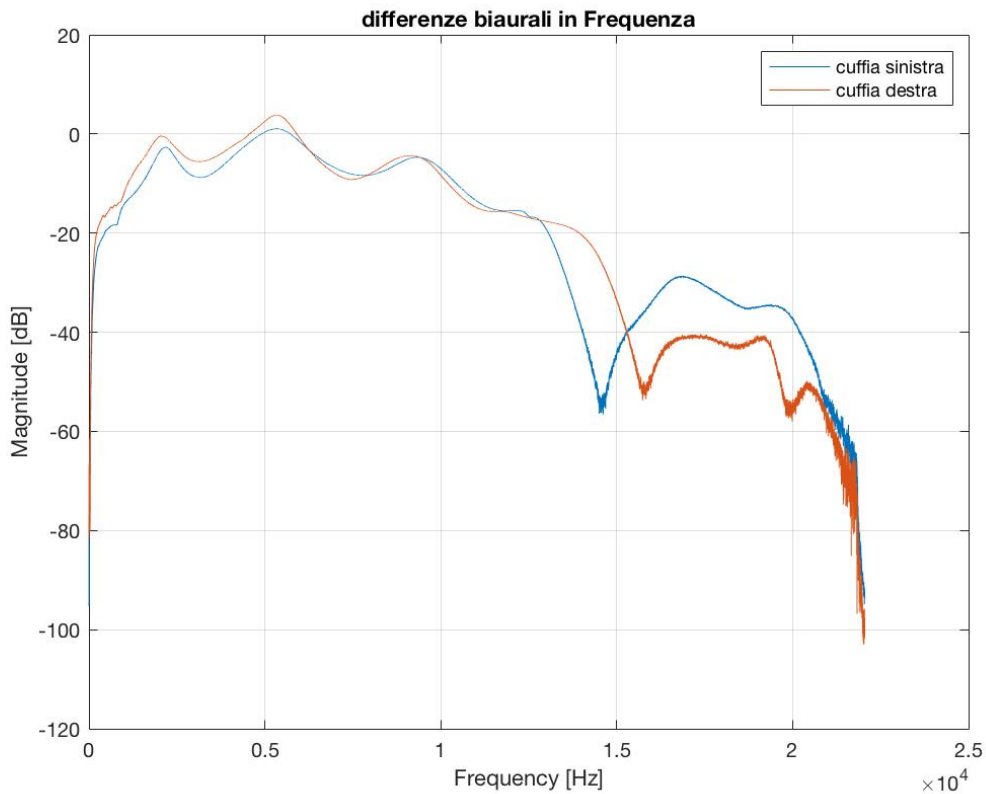


Figura 3.6.6: Spettri di potenza Cuffia Sony-Twin Turbo.

Dopo aver modellato il filtro inverso per la risposta impulsiva destra e sinistra, riporto il confronto in frequenza normalizzata (Figura 3.6.7). Il primo grafico è relativo al modulo della cuffia destra e della relativa inversa, nel terzo sono visibili gli andamenti in dB della risposta impulsiva sinistra e dell'inversa progettata. L'ultimo e il secondo grafico riportano l'andamento complessivo della fase.

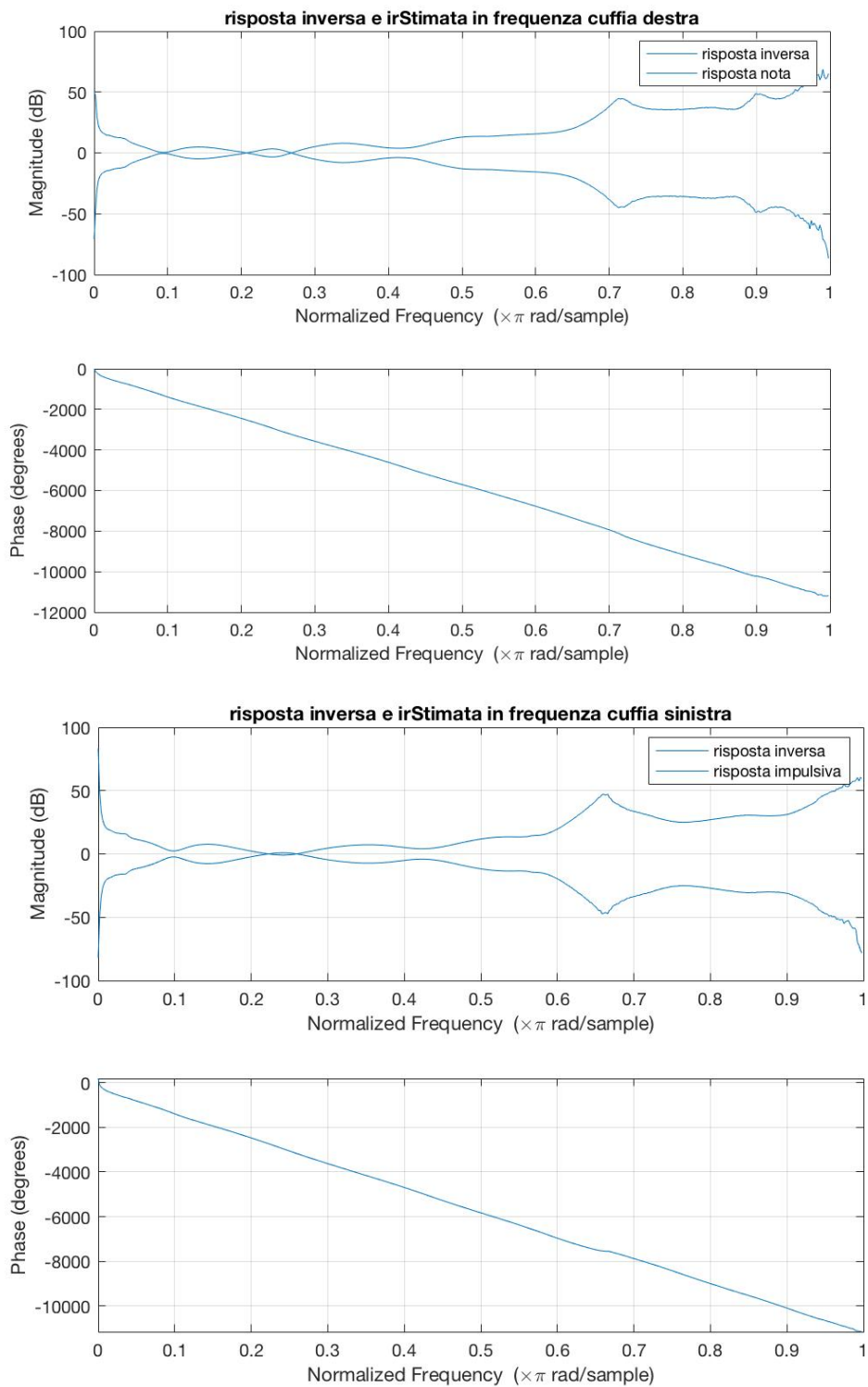


Figura 3.6.7: Confronto delle risposte impulsive destra e sinistra e delle relative inverse con la funzione *freqz* - Auricolari Sony-Twin Turbo.

Eseguendo la FFT (Figura 3.6.8), con frequenza di campionamento pari a 44100 Hz, vengono mostrati gli andamenti in frequenza per valutare a quali frequenze il filtro inverso (curva blu) compensa e attenua effettivamente i buchi della risposta impulsiva (curva rossa). Il primo grafico è relativo al trasduttore destro e di seguito quello relativo al trasduttore sinistro. Le curve si intersecano a 0 dB e hanno andamenti uguali ma opposti al variare della frequenza.

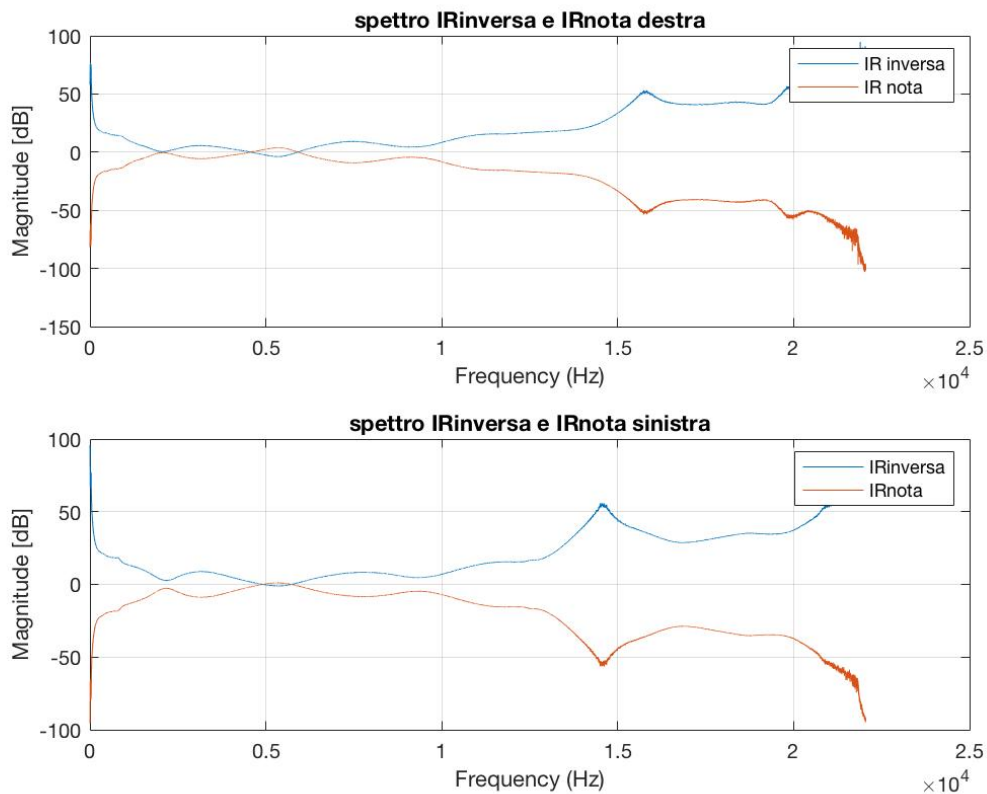


Figura 3.6.8: Spettri di potenza della risposta impulsiva e dell'inversa auricolari Sony-Twin Turbo.

L' andamento della convoluzione tra la risposta impulsiva e la sua inversa di entrambi i trasduttori viene rappresentato in frequenza normalizzata utilizzando la funzione *freqz* (Figura 3.6.9).

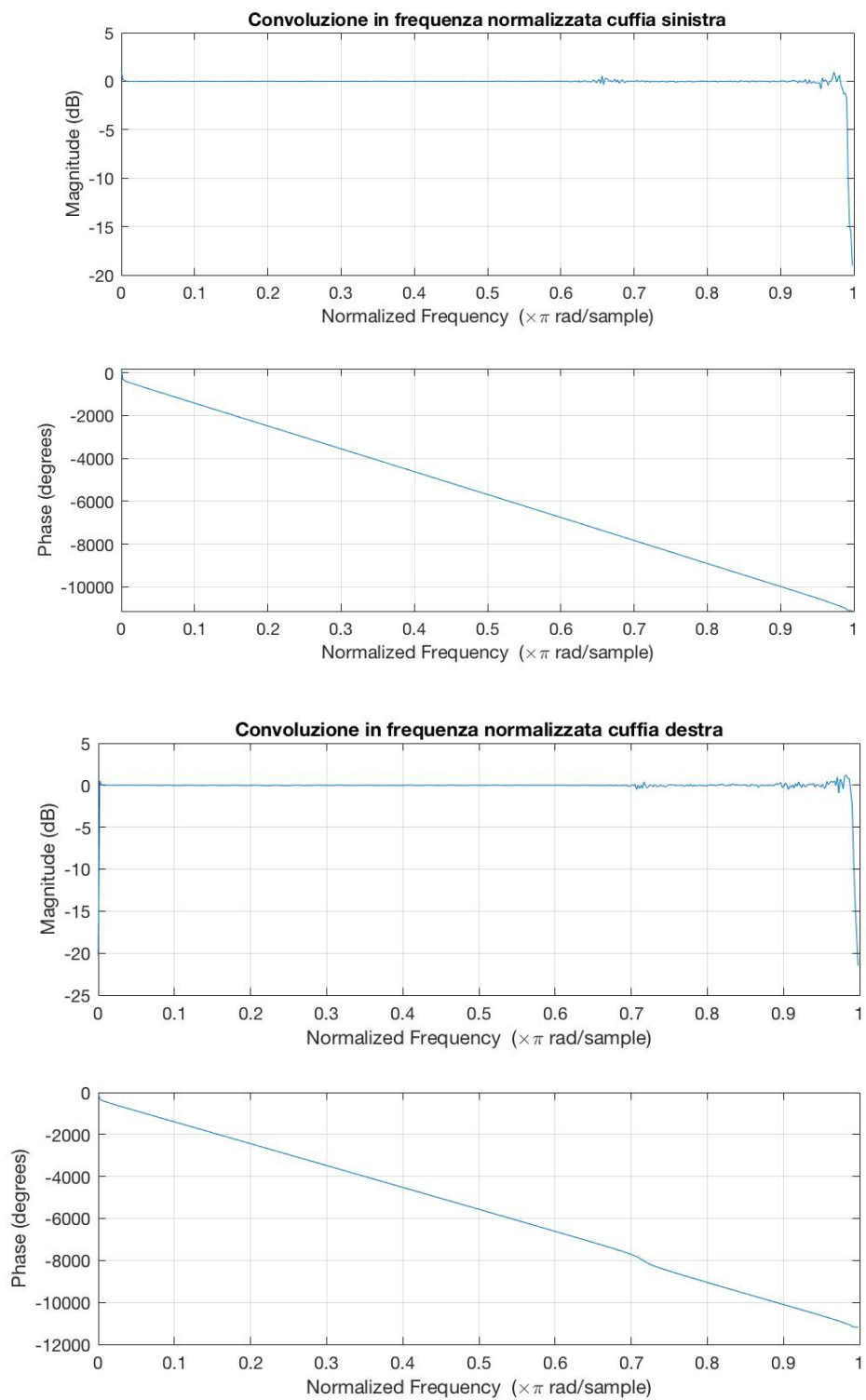


Figura 3.6.9: Convoluzione in frequenza normalizzata Cuffia Sony-Twin Turbo.

Le curve dei moduli dovrebbero essere completamente piatte su 0 dB per avere cuffie perfettamente equalizzate, in realtà, a causa delle limitazioni imposte dall'algoritmo per il filtro inverso, alle alte frequenze il filtro costruito non annulla completamente gli effetti della risposta impulsiva, provocando distorsioni.

La Figura 3.6.10. riporta il confronto tra la trasformata di Fourier della convoluzione tra la risposta impulsiva e la sua inversa e il prodotto delle loro trasformate per la cuffia sinistra e per la cuffia destra.

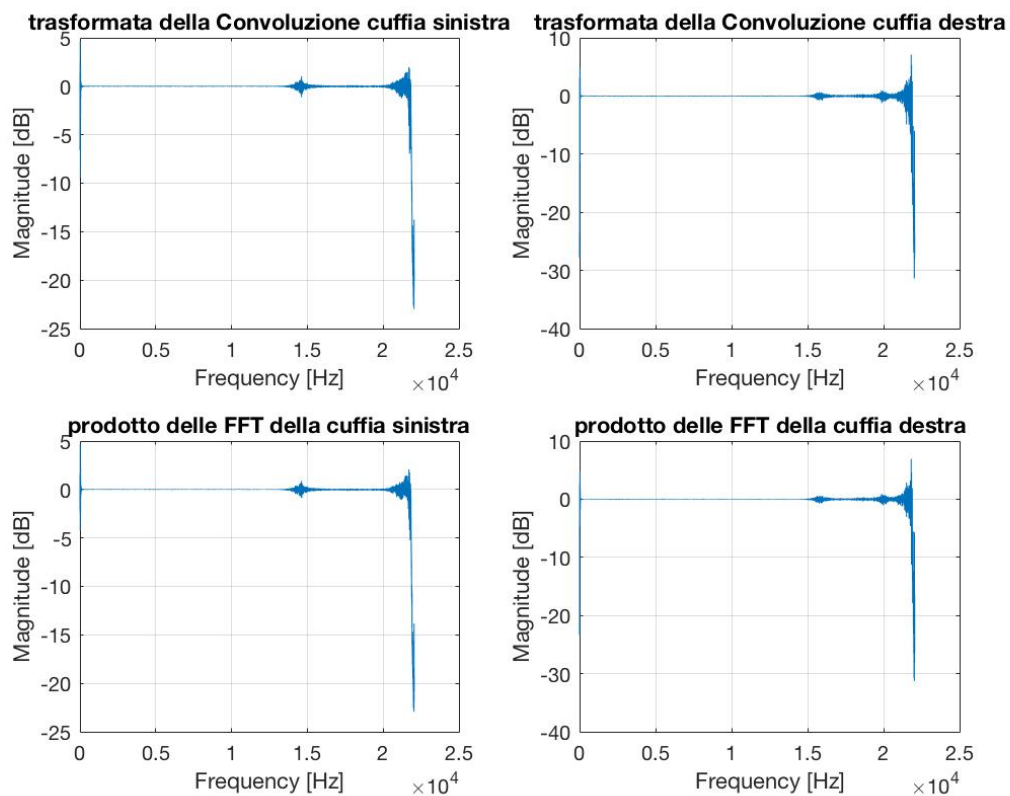


Figura 3.6.10: Confronto tra le trasformate della convoluzione e il prodotto delle trasformate per gli auricolari Sony Twin Turbo.

3.7 Confronto

Le risposte impulsive sono costruite generando un segnale di test (rumore impulsivo) che viene registrato e rappresenta la risposta dell'ambiente di riproduzione. Vediamo che per tutti i modelli di cuffia (Figura 3.7.1.) c'è un picco principale che arriva dopo un certo numero di campioni (60 s) che rappresenta il tempo che impiega il suono a propagarsi dalla sorgente al ricevitore. Dopodiché ci sono tutta una serie di picchi minori che diminuiscono in ampiezza nel tempo e rappresentano le riflessioni secondarie. Prima arriva il suono diretto e poi tutti i suoni riflessi. Ovviamente sia che sia la risposta impulsiva di una stanza o, come nel nostro caso, la risposta impulsiva registrata da un paio di cuffie l'andamento è lo stesso perchè è una rappresentazione temporale che mostra come effettivamente le cuffie riproducono il suono di input.

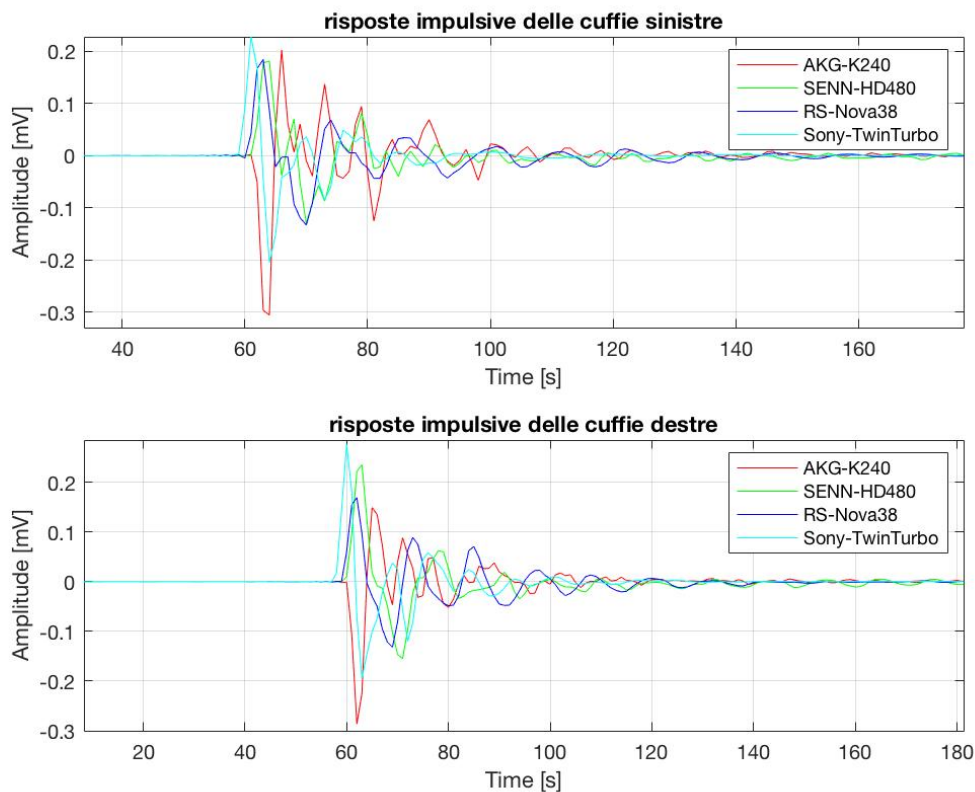


Figura 3.7.1: Confronto delle risposte impulsive ottenute nel dominio del tempo per tutte le cuffie.

La rappresentazione nel dominio della frequenza delle risposte sopra citate può essere ottenuta eseguendo la Trasformata di Fourier di tutte le risposte impulsive (Figura 3.7.2).

Di seguito viene riportato l'andamento delle risposte impulsive nel dominio della frequenza per le cuffie sinistre (parte superiore) e per le cuffie destre (parte inferiore).

In giallo quelle relative al modello Sennheiser HD-480, in azzurro il modello AKG-K240, in arancione il modello Radio Shack Nova 38 e in viola le Sony Twin Turbo. In legenda le lettere L e R corrispondono a Left e Right.

Concentrando l'attenzione sul primo grafico vediamo che lo spettro di potenza della cuffia AKG-K240 non presenta andamenti troppo irregolari. Tra 0 Hz e 5000 Hz si discosta da 0 dB di una decina di dB attenuandoli; tra 5000 Hz e 10000Hz attenua circa 20 dB, poi l'attenuazione aumenta al crescere delle frequenze. Lo spettro di potenza del modello RS Nova 38 ha un picco negativo in corrispondenza delle frequenze comprese tra 5000 Hz e 10000 Hz e raggiunge i -40 dB. La cuffia Sennheiser HD480 si discosta dallo zero per tutto il range di frequenze eccetto che per quelle intorno ai 2500 Hz e presenta un calo più evidente tra 15000 e 20000 Hz fino a -60 dB. L'auricolare sinistro Sony Twin Turbo ha un andamento piuttosto lineare rimanendo sempre tra 0 e -20 dB, ma a circa 15000 Hz decade fino a -60 dB.

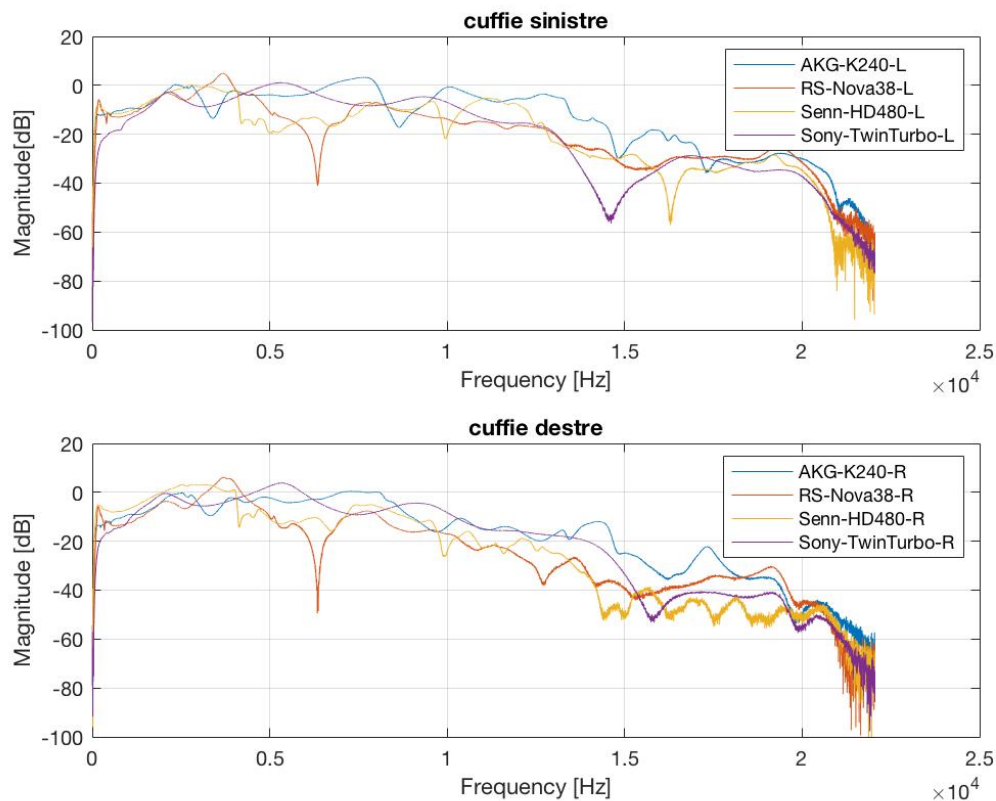


Figura 3.7.2: Spettri di potenza di tutte le cuffie.

Per quanto riguarda le cuffie destinate all'orecchio destro, la cuffia AKG-K240 ha un andamento decrescente piuttosto lineare fino 22050 Hz in cui l'attenuazione è massima. Anche il modello Radio Shack Nova 38 possiede uno spettro decrescente con un picco evidente fino a -50 dB. L'auricolare Sony Twin Turbo non attenua più di 20 dB fino a circa 15000 Hz in cui ha un repentino calo fino a -50 dB per poi attestarsi sui -40 dB. Lo spettro della cuffia destra Sennheiser decresce all'aumentare della frequenza presenta delle fluttuazioni piuttosto variabili di ± 10 dB, senza mai superare un'attenuazione di -50 dB.

4. Conclusioni

Per quanto riguarda il calcolo delle risposte impulsive, all'interno dell'ambiente di calcolo MATLAB e utilizzando le funzioni in esso contenute, ho identificato la risposta all'impulso di ogni modello per la cuffia destra e per la cuffia sinistra, sia con il metodo MLS che con il metodo ESS, attraverso una convoluzione tra la risposta sintetica registrata e il segnale di test. La simulazione di un segnale di test inviato alle cuffie viene poi filtrata e salvata nel *Workspace* come variabile. Essa equivale alla registrazione effettuata dai microfoni di orecchio destro e orecchio sinistro del manichino Kemar, nel caso di un set-up reale.

Dal confronto delle risposte impulsive ottenute con quelle originali, emerge che l'identificazione delle risposte impulsive è andata a buon fine per tutti i modelli di cuffia. La verifica viene effettuata sovrapponendo le tre risposte impulsive nel dominio del tempo: sono completamente sovrapposte.

Valutando le risposte impulsive delle cuffie in frequenza, ho riscontrato per tutti i modelli, delle differenze binaurali tra la cuffia destinata all'orecchio destro e quella destinata all'orecchio sinistro. Questo perché ogni cuffia è costituita da due trasduttori elettroacustici normalmente operanti in modo indipendente, abbinati o non abbinati. In realtà, questi non sono trasduttori ideali e possono verificarsi differenze nelle loro funzioni di trasferimento, anche per trasduttori abbinati. Ciò significa che i segnali di uscita delle cuffie possono differire, anche quando entrambi i trasduttori sono pilotati con la stessa tensione di ingresso.

Quindi, procedendo con l'equalizzazione, è stato necessario applicare due equalizzatori indipendenti: uno per la cuffia destra e uno per la cuffia sinistra. In una implementazione reale, il suono che va alla cuffia destra passerà per l'equalizzatore della cuffia destra e il suono che va alla cuffia sinistra passerà per l'equalizzatore della cuffia sinistra.

Il calcolo della risposta inversa è stato effettuato attraverso l'algoritmo di filtro inverso. Confrontando le risposte impulsive note e le relative inverse, attraverso la loro

convoluzione nel dominio del tempo ho verificato se effettivamente una annulla gli effetti dell'altra. Dai grafici ottenuti in realtà la curva non è perfettamente liscia a 0 dB, questo perchè la costruzione della risposta inversa ha dei limiti alle alte frequenze e quando i picchi hanno un'ampiezza troppo elevata.

Bibliografia

- [1] E.A.G. Shaw, "The External Ear", in "Handbook of Sensory Physiology", Vol. V/i: Auditory System, New York, 1974.
- [2] E.A.G. Shaw, 1979 Rayleigh Medal Lecture: "The Elusive Connection",
- [3] E.A.G. Shaw, "External Ear Response and Sound Localization", "Localization of Sound: Theory and Applications", 1982.
- [4] D.W. Batteau, "The Role of the Pinna in Human Localization", Proc. Roy. Soc. London, Ser. B, Vol. 168 (1967).
- [5] G.C. Balboni, A. Bastianini "Anatomia Umana", vol 3- Milano 1984, Edi-ermes
- [6] <https://www.acustico.com/approfondimenti/il-concetto-di-comfort-acustico.html>
- [7] B. B. Bauer, "Stereophonic Earphones and Binaural Loudspeakers," J. Audio Eng. Soc., vol. 9, 1961
- [8] "Simulation of the Freefield Using Headphones for Investigation of the Spatial Hearing and Speech Intelligibility," *Audiol. Akust.*, vol. 6, 1988.
- [9] ITU-T, Recommendation P.57, Artificial ears, International Telecommunications Union, Telecommunication Standardization Sector, 1996.
- [10] F.E. Toole, "Measuring Headphones", *AudioScene Canada*, Vol. 13, 1976.
- [11] F.E. Toole, "Earphones and Ears: Getting the Act Together", presented at MAC 78, Evanston, Illinois, 1978.
- [12] F.E. Toole, "The Acoustics and Psychoacoustics of Headphones", presented at the AES 2nd International Conference, Anaheim, CA, 1984.
- [13] G. Thiele, "On the Standardization of the Frequency Response of the High-Quality Studio Headphones," *J. Audio Eng. Soc.* vol. 34, 1986 .
- [14] H. Møller, C. B. Jensen, D. Hammershoi, and M.F. Sørensen, "Design Criteria for Headphones," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 43, 1995.
- [15] J.R. Sank, "Improved Real-Ear Tests for Stereophones", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 28, (1980, Apr.).
- [16] Anon, "Stereo Headphones", *Consumers Reports*, Vol. 44, 1979.
- [17] A. Farina, "Advancements in Impulse Response Measurements by Sine Sweeps." Presented at the Audio Engineering Society 122nd Convention, Vienna, Austria, 2007.
- [18] Ole Herman Bjor, M.Sc. Norsonic AS, "Maximum Length Sequence", Norsonic AS 1995-2000
- [19] S. Müller, P. Massarani – "Transfer-Function Measurement with Sweeps", *JAES* Vol. 49, Number 6 pp. 443 (2001).
- [20] F.Völk., J.Encke, J.Kreh, and W. Hemmert "Relevance of Headphone Characteristics in Binaural Listening Experiments: A Case Study" AES Convention Paper 9894 Presented at the 143rd Convention 2017 October 18–21, New York, NY, USA
- [21] <http://www.ippocrateshop.com/blog/audiometro/>
- [22] <https://www.resound.com/it-it/hearing-aids/digital>
- [23] A. Farina, P. Nelson, O. Kirkeby, papers of the AES
- [24] Oppenheim, Schaffer "Discrete-Time Signal Processing"

- [25] <http://www.studiosoundservice.com/it/education/keynote/corso-tecnolive/acustica3.pdf>
- [26] <http://www.osservatoriovaldagri.it/web/guest/rumore>
- [27] <https://www.farmacoecura.it/malattie/orecchie/>
- [28] https://www.itimarconinocera.org/sito/menu/dipartimenti/tecnico_scientifico_informatica/corso_musica_elettronica/14.htm

Elenco delle figure

- 1.1 Anatomia dell'orecchio
- 1.2 Esempi di fenomeni acustici relativi a intensità sonora, pressione sonora e livello sonoro
- 1.3 Audiogramma normale di Fletcher e Munson
- 2.1 Manichino Kemar.
 - 2.2.1 Cuffia AKG-K240
 - 2.2.2 Cuffia Sennheiser HD480
 - 2.2.3 Cuffia Radio Shack Nova 38
 - 2.2.4 Auricolari Sony Twin Turbo
- 2.3.1 La correlazione di un segnale MLS con sé stesso è una delta di Dirac
- 2.3.2 La cross correlazione tra input e output fornisce la risposta all'impulso
- 2.3.3 Elaborazione del segnale di input con FHT
- 2.4.1 Schema del filtro $B(Z)$ e del filtro inverso $A(Z)$
- 2.4.2 Interfaccia grafica per la costruzione della funzione inversa.
 - 2.5.1 Audiometro portatile 400-AOM.
 - 2.5.2 Componenti di un apparecchio acustico.
- 3.1 Treno di impulsi MLS.
- 3.2 Segnale sinusoidale esponenziale.
 - 3.3.1 Simulazione del segnale di output fornendo in input un'eccitazione MLS-Cuffia AKG-K240.
 - 3.3.2 Simulazione del segnale di output fornendo in input un'eccitazione ESS-Cuffia AKG-K240.
 - 3.3.3 Confronto delle risposte impulsive ottenute per la Cuffia AKG-K240.
 - 3.3.4 Differenze binaurali nel dominio del tempo Cuffia AKG-K240.
 - 3.3.5 Differenze binaurali in frequenza normalizzata.
 - 3.3.6 Spettri di potenza.
 - 3.3.7 Confronto delle risposte impulsive destra e sinistra e delle relative inverse con la funzione *freq.*
 - 3.3.8 Spettri di potenza della risposta impulsiva e dell'inversa.
 - 3.3.9 Convoluzione in frequenza normalizzata.
 - 3.3.10 Confronto tra le trasformate della convoluzione e il prodotto delle trasformate.
- 3.4.1 Simulazione del segnale di output fornendo in input un'eccitazione MLS - Cuffia Sennheiser HD480.
- 3.4.2 Simulazione del segnale di output ad un input ESS Cuffia Sennheiser HD480.
- 3.4.3 Confronto delle risposte impulsive ottenute Cuffia Sennheiser HD480.
- 3.4.4 Sovrapposizione delle risposte impulsive nel dominio del tempo Cuffia Sennheiser HD480.
- 3.4.5 Sovrapposizione delle risposte impulsive in frequenza normalizzata Cuffia Sennheiser HD480.
- 3.4.6 Spettri di potenza.
- 3.4.7 Confronto delle risposte impulsive destra e sinistra e delle relative inverse in frequenza normalizzata.
- 3.4.8 Spettri di potenza della risposta impulsiva e dell'inversa.
- 3.4.9 Convoluzione in frequenza normalizzata.
- 3.4.10 Confronto tra le trasformate della convoluzione e il prodotto delle trasformate.

- 3.5.1 Simulazione del segnale di output fornendo in input un'eccitazione MLS-Cuffia Radio Shack Nova.
- 3.5.2 Simulazione del segnale di output fornendo in input un'eccitazione ESS-Cuffia Radio Shack Nova.
- 3.5.3 Confronto delle risposte impulsive ottenute Cuffia Radio Shack Nova38.
- 3.5.4 Sovrapposizione delle risposte impulsive nel dominio del tempo.
- 3.5.5 Modulo e fase delle risposte impulsive in frequenza normalizzata.
- 3.5.6 Spettri di potenza Cuffia Radio Shack Nova38.
- 3.5.7 Modulo e fase delle risposte impulsive e delle relative inverse.
- 3.5.8 Confronto dei moduli in frequenza.
- 3.5.9 Convoluzione in frequenza normalizzata.
- 3.5.10 Confronto tra le trasformate della convoluzione e il prodotto delle trasformate.
- 3.6.1 Simulazione del segnale di output fornendo in input un'eccitazione MLS-Cuffia Sony-Twin Turbo.
- 3.6.2 Simulazione del segnale di output ad un input ESS Cuffia Sony-Twin Turbo.
- 3.6.3 Confronto delle risposte impulsive ottenute Cuffia Sony-Twin Turbo.
- 3.6.4 Sovrapposizione delle risposte impulsive nel dominio del tempo Cuffia Sony-Twin Turbo.
- 3.6.5 Sovrapposizione delle risposte impulsive in frequenza normalizzata Cuffia Sony-Twin Turbo.
- 3.6.6 Spettri di potenza Cuffia Sony-Twin Turbo.
- 3.6.7 Confronto delle risposte impulsive destra e sinistra e delle relative inverse con la funzione *freqz* - Auricolari Sony-Twin
- 3.6.8 Spettri di potenza della risposta impulsiva e dell'inversa auricolari Sony-Twin Turbo.
- 3.6.9 Convoluzione in frequenza normalizzata Cuffia Sony-Twin Turbo.
- 3.6.10 Confronto tra le trasformate della convoluzione e il prodotto delle trasformate per gli auricolari Sony Twin Turbo.
- 3.7.1 Confronto delle risposte impulsive ottenute nel dominio del tempo per tutte le cuffie.
- 3.7.2 Spettri di potenza di tutte le cuffie.