

METODI INTEGRATI PER LA CORREZIONE DELL'ACUSTICA DELLE SALE DI ASCOLTO

Simone Bianchi - www.tangerinotech.net / www.simonebianchi.net

Tratto da: *Esperienze e valutazione di sistemi digitali per la correzione dell'acustica nelle sale d'ascolto*, 41° Convegno Nazionale AIA – Pisa, 17-19 giugno 2014 [1]

1. Metodologie di misura per l'analisi della risposta in frequenza di un ambiente d'ascolto.

L'evolversi delle tecnologie DSP (Digital Signal Processing) ha permesso lo sviluppo di metodi di controllo attivo applicati al processo di linearizzazione della risposta in ambiente noti come Digital Room Correction (DRC). Questa definizione non identifica un sistema o un algoritmo specifico ma un insieme di processi riguardanti analisi e correzione che possono coinvolgere software e dispositivi diversi. Tali metodi possono essere usati soprattutto nella regione a bassa frequenza dello spettro, vale a dire sotto la frequenza di Schroeder [2]. Ci sono importanti eccezioni, ad esempio quando la risposta di un diffusore sia caratterizzata in alta frequenza da alcune sue particolarità costruttive.

1.1 Analisi della risposta impulsiva.

Allo scopo di ottenere le maggiori informazioni possibili sulla risposta in ampiezza e fase di un ambiente di ascolto si può eseguire il rilevamento della risposta all'impulso del sistema impianto di diffusione + ambiente. La Fig. 1 sintetizza la procedura:

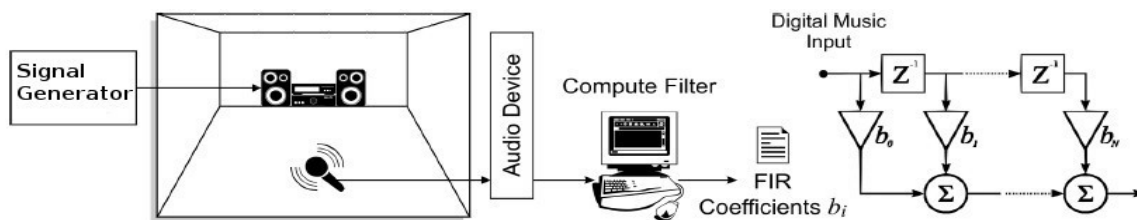


Figura 1 – Analisi della risposta impulsiva

Il criterio si basa sulla misura della funzione di trasferimento dell'ambiente a partire dalla sua risposta impulsiva $h(t)$. È necessaria dunque una fase di acquisizione che consiste nel sollecitare il locale d'ascolto con un impulso sonoro di test emesso dall'impianto di riproduzione; è possibile sintetizzare un segnale audio impulsivo di test con specifici software.

La pressione sonora nel punto d'ascolto può essere catturata con un microfono di misura che traduce la pressione sonora in un segnale elettrico. Dopo una conversione A/D in formato PCM si può ottenere la funzione di trasferimento dell'ambiente mediante FFT (Fast Fourier Transform) di questo segnale numerico. La risposta in ampiezza e fase del sistema sono così determinate univocamente.

Un inconveniente di queste tecniche è l'errore intrinseco nella misura che risiede nel segnale di test impiegato. Secondo la teoria, la funzione di trasferimento di un sistema è univocamente determinata dalla risposta all'eccitazione impulsiva. Tuttavia la funzione Delta di Dirac è un concetto ideale e nella fisica del suono è possibile trovarne solo delle approssimazioni: un suono, seppur breve, non può avere né durata infinitesima né ampiezza infinita.

Una soluzione ormai universalmente accettata è quella di sostituire il segnale impulsivo con uno sweep di sinusoidi. Un esempio delle relazioni spettrali fra impulso e sweep è descritto nella figura che segue [3]:

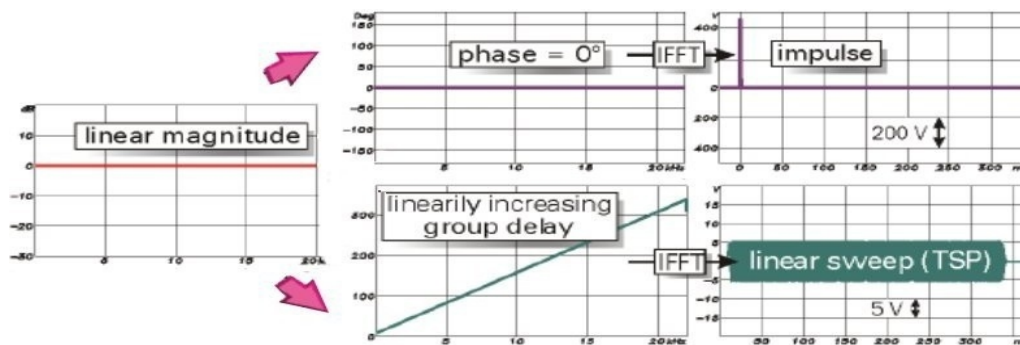


Figura 2 – Relazione fra impulso e sweep

L'uso dello sweep (che ha una risposta in fase nota, seppure diversa da quella della funzione Delta) permette un recupero perfetto della funzione di trasferimento e quindi di tutte le informazioni correlate alla risposta in fase. Inoltre con questo sistema di misura si riesce a isolare l'influenza della distorsione del sistema audio (altoparlanti ecc.) nella misura della parte lineare della funzione di trasferimento.

1.1.1 Correzione tramite filtro FIR (Finite Impulse Response).

Invertendo la funzione di trasferimento così ottenuta ed antitrasformando il risultato si ottiene la risposta impulsiva del filtro FIR di correzione. I valori della sua ampiezza, valutata ad intervallo di campionamento, rappresentano i coefficienti per l'implementazione digitale del filtro inverso di correzione. Il segnale musicale in ingresso viene pre-corretto inserendo il filtro FIR risultante nella catena di riproduzione. Con questo sistema si intende correggere l'intera funzione di trasferimento dell'ambiente, sia in ampiezza che in fase, a patto che la funzione di trasferimento stessa sia invertibile. Se la funzione di trasferimento ha regioni a fase non minima, caso tutt'altro che raro nella pratica, la correzione non sarà ottimale.

Un semplice esempio di una risposta a fase non minima è dato da una riflessione di ampiezza pari a quella del segnale diretto (per esempio focalizzata da una parete non rettilinea). [8] In questo caso ci troveremmo in presenza di frequenze regolarmente spaziate in cui la riflessione ha fase opposta rispetto al segnale diretto. Quando questi segnali si sommano l'ampiezza a tali frequenze è zero, e non si può fare niente, qualunque sia il sistema di correzione adottato (comprenda esso o meno la correzione di fase) per ripristinare un comportamento perfetto. Il problema è attaccabile anche utilizzando diffusori e canali audio supplementari dedicati alla correzione, ma la sua soluzione non è banale. Nella pratica sistemi di tale complessità ne limitano fortemente l'applicazione. In definitiva, se una risposta ha delle regioni in cui è nulla essa non potrà essere invertita e sarà a fase non minima.

1.1.2 Correzione tramite filtri IIR (Infinite Impulse Response).

Se si trascura l'informazione relativa alla risposta in fase e si considera solamente la risposta in ampiezza ottenuta dalla misura, essa può essere corretta facendo uso di un banco di filtri parametrici IIR regolati in modo opportuno, tramite un algoritmo di approssimazione. Questa soluzione ha lo svantaggio di non consentire correzioni della risposta in fase e soffre comunque dell'impossibilità di correggere completamente la risposta in ampiezza nei casi di funzione di trasferimento non invertibile.

D'altra parte questa soluzione ha il vantaggio di consentire l'inserimento di una persona nel processo di linearizzazione che, integrando i dati della misura della risposta impulsiva con quelli dell'analisi della risposta con rumore (come vedremo nel seguito) e quelli derivanti dalle valutazioni d'ascolto, permette di ottenere spesso migliori risultati rispetto a quelli derivanti dall'approccio precedente. Per quanto riguarda l'udibilità delle distorsioni di fase, si ritiene significativa l'opinione di Lipshitz et.al.

[...] Nei normali segnali musicali o vocali la distorsione di fase sembra non essere *generalmente* udibile [...] [4]

1.2 Analisi della risposta con rumore integrata con correzione tramite filtri IIR .

Il sistema classico per misurare la risposta in ampiezza (non l'intera funzione di trasferimento, o in altri termini ignorando interamente la risposta in fase) del complesso sistema audio + ambiente di ascolto impiega come stimolo un rumore con spettro di ampiezza definito e spettro di fase casuale. Un esempio delle relazioni spettrali fra impulso e rumore è descritto [3] nella Figura 3:

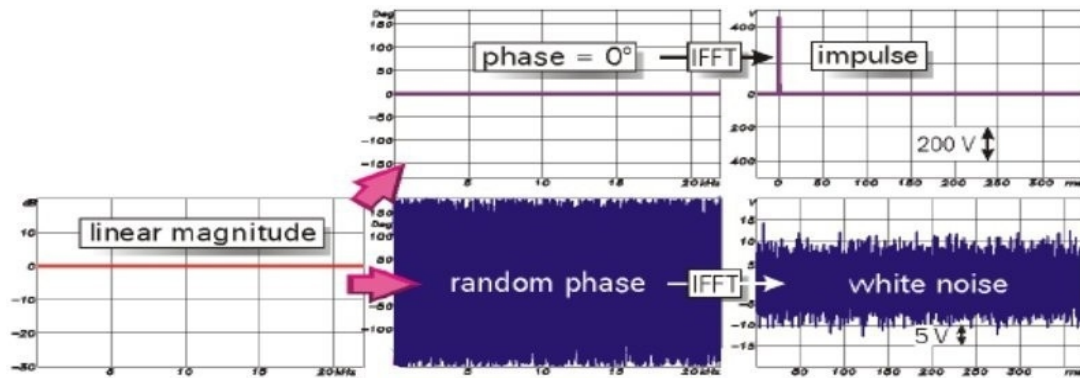


Figura 3 – Relazione fra impulso e rumore

La pressione sonora nel punto d'ascolto può essere catturata con un microfono di misura che la traduce in un segnale elettrico. Dopo una conversione A/D in formato PCM si può ottenere la funzione di trasferimento mediante FFT (Fast Fourier Transform) di questo segnale numerico. La risposta in ampiezza del sistema è così determinata. A causa della caoticità dello spettro di fase del segnale di ingresso non è possibile con questo metodo trarre alcuna informazione sulla risposta in fase. Inoltre, per migliorare la precisione di misura, la risposta in ampiezza è misurata continuamente effettuando medie sulle misure successive in modo da ottenere un effetto di *smoothing* che riduce le irregolarità connaturate all'uso del rumore.

Dal momento che l'informazione sulla risposta in fase viene trascurata, un sistema di analisi di questo tipo si presta all'integrazione con filtri parametrici IIR in un pacchetto di analisi e correzione destinato all'uso manuale da parte di un operatore umano, come descritto in figura:

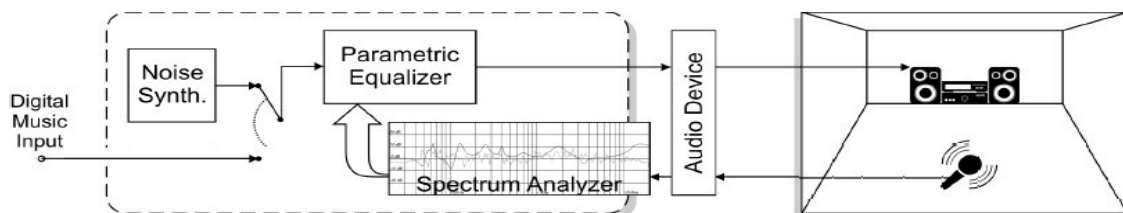


Figura 4 – Analisi della risposta al rumore

All'interno di questa architettura viene dunque a crearsi un anello di retroazione in grado di dare un feedback sull'effetto della modifica di ciascun parametro dei filtri sul segnale rilevato dal microfono nel punto d'ascolto. Ogni modifica impostata sul banco dei filtri IIR è visibile sul display dell'analizzatore di spettro in tempo reale. Ultimata la taratura manuale, il segnale audio da sorgenti esterne può essere direttamente commutato sul banco dei filtri parametrici per le opportune verifiche di ascolto.

Il rumore di misura può essere facilmente sintetizzato real-time con un generatore di numeri

casuali computazionalmente molto efficiente. Invece del rumore bianco, si usa generalmente il rumore rosa, che ha una densità spettrale che diminuisce di 3 dB per ottava, ciò conferisce al rumore un'energia costante in ogni ottava della banda audio. Ciò era utile quando si utilizzavano per mostrare la risposta in ampiezza dei sistemi sotto misura i cosiddetti analizzatori RTA (Real Time Analyzer) che computavano l'energia del segnale integrandola in frazioni di ottava.

Utilizzando rumore rosa l'ampiezza del segnale di ogni frazione di ottava è costante. Questa proprietà può essere sfruttata anche con i moderni analizzatori FFT qualora li si impieghi per valutare i segnali in frazioni di ottava.

1.2.1 Analisi a frazioni di ottava utilizzando la Constant-Q Transform.

Quando si intende realizzare un analizzatore real-time per l'analisi della risposta da rumore, appare evidente che la FFT, seppur veloce computazionalmente, fornisce componenti spettrali che non mappano efficientemente le frequenze della banda audio. Questo perché le componenti calcolate dalla FFT presentano una risoluzione costante e sono equispaziate. Mappare questi punti da una scala lineare in un dominio logaritmico fornisce poca informazione in bassa frequenza (poche componenti lineari mappate su un gran numero di punti logaritmici) e troppa informazione ad alta frequenza. Una soluzione a questo inconveniente è stata proposta da J.C. Brown nel 1991 ed è nota come Constant-Q Transform [5]. Una sua implementazione è stata fornita e il codice sorgente reso pubblico da alcuni degli autori di questo lavoro nel 2008 [6] [7]. Questa l'espressione della Constant-Q Transform impiegata per l'emulazione di un analizzatore RTA a ventiquattresimi di ottava. Ciascun ventiquattresimo di ottava viene analizzato dalla trasformata discreta di Fourier della sequenza d'ingresso troncata ad una lunghezza diversa:

$$(1) \quad X_k = \frac{1}{N_k} \sum_{n=0}^{N_k-1} w_k(n) \cdot x(n) e^{-j \frac{2\pi Q n}{N_k}}$$

dove:

$w_k(n)$ è una sequenza di finestrazione della durata opportuna di N_k campioni, per esempio la finestra di Hamming;

Q è il fattore di merito, definito come il rapporto tra il valore nominale della frequenza e il passo di campionamento in frequenza:

$$(2) \quad Q = \frac{f}{\delta f}$$

Il fattore di merito della progressione delle frequenze f_k assume un valore costante indipendente dalla frequenza:

$$(3) \quad Q = \frac{f_k}{f_{k+1} - f_k} = \frac{1}{2^{1/24} - 1} \approx 34$$

Con le opportune semplificazioni dovute all'uso come analizzatore real-time (trascurando l'analisi di fase) per il cui approfondimento si rimanda al lavoro completo, la Constant-Q Transform permette, a parità di impegno computazionale, di realizzare degli analizzatori di risposta in ampiezza con maggiore risoluzione in bassa frequenza rispetto alla FFT classica. Essa può essere inoltre ricalcolata modificandone la risoluzione in maniera più semplice e veloce rispetto al banco di filtri (analogici o digitali) di misura impiegati dai tipici analizzatori RTA.

2. Utilizzo delle metodologie di misura per la correzione della risposta in frequenza di un ambiente d'ascolto.

Si approfondirà ora l'uso dei differenti sistemi di analisi prima accennati, unitamente ad un equalizzatore parametrico DSP, per cercare di ridurre le alterazioni della risposta in frequenza indotte dal sistema diffusori + ambiente d'ascolto.

2.1 Uso dell' analisi della risposta impulsiva.

Per questa analisi si userà il software *Room EQ Wizard* [8] che è in grado di effettuare analisi tramite lo sweep di sinusoidi e ricavare i grafici di risposta impulsiva, frequenza e fase. Esso è sviluppato per tutti i principali Sistemi Operativi. Nella figura seguente un esempio della misura effettuata con questo software:



Figura 5 – Analisi in ampiezza e fase

Il software stesso è poi in grado di computare i filtri parametrici da inserire nell'equalizzatore DSP per la correzione della risposta. Questo sistema è in buona parte automatizzato e consente di ultimare il lavoro in tempi ragionevoli; all'operatore non si richiede un lungo intervento manuale per la taratura dei singoli filtri. Ma la peculiarità di questo tipo di analisi è quella di poter evidenziare le regioni della risposta a fase non minima tramite un semplice calcolo del ritardo di gruppo differenziale:

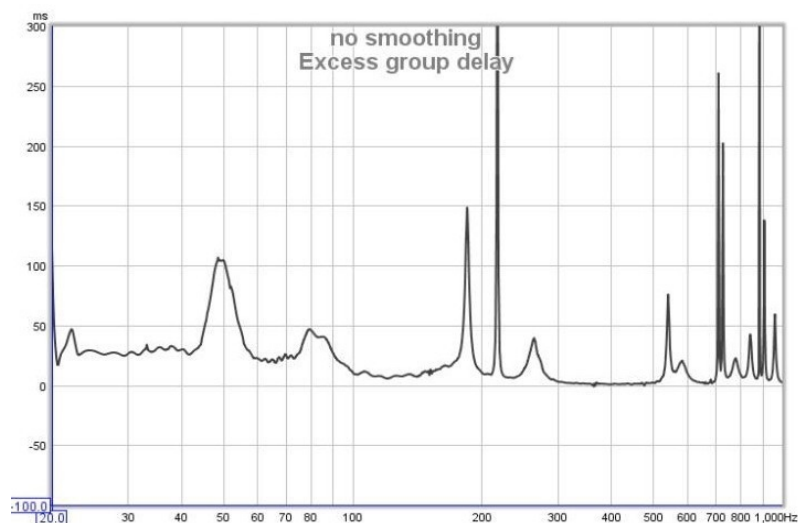


Figura 6 – Ritardo di gruppo differenziale

Le regioni a fase non minima (dunque quelle che non saranno pienamente linearizzabili) sono quelle in cui il grafico non è piatto. L'analizzatore andrà dunque a calcolare i filtri parametrici evitandole e cercando di correggere le altre regioni della risposta. Le regioni a fase non minima saranno attaccabili soltanto tramite un trattamento acustico del locale di ascolto. Il vantaggio di questa tecnica è quello di permetterci di identificare velocemente le regioni a fase non minima e calcolare in automazione una correzione parametrica di base, lo svantaggio principale è quello di non permettere all'operatore di vedere le modifiche alla correzione sull'analizzatore e ascoltarle dagli altoparlanti in tempo reale.

2.2 Uso dell' analisi della risposta al rumore.

Per questa analisi si userà il software *AD Charon* [9] per Mac Os, dotato di analizzatore Constant-Q Transform, generatore di rumore rosa e filtri parametrici DSP incorporati. La sua interfaccia utente principale è descritta nella figura seguente:

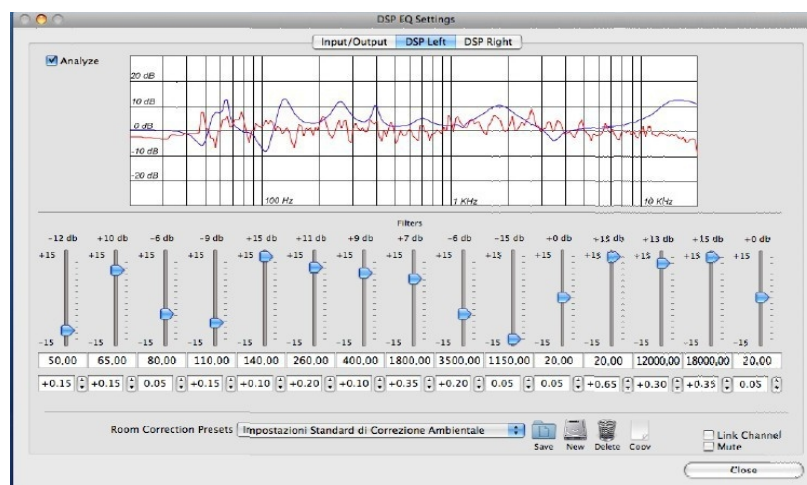


Figura 7 – Analizzatore Constant-Q e filtri parametrici

La risposta in ampiezza misurata è mostrata sovrapposta all'impostazione dei filtri parametrici e consente di verificare in tempo reale gli interventi effettuati tramite l'equalizzatore DSP. Questo sistema è totalmente manuale e richiede all'operatore una lunga sessione di taratura necessaria per riconoscere le regioni a fase non minima da quelle in cui la correzione può essere efficace.

Per isolare le regioni a fase minima bisogna identificare le aree in cui la risposta in ampiezza è attenuata (per esempio la regione dei 57 Hz nella Fig. 7) e provare a correggerle utilizzando un singolo filtro parametrico con fattore di merito elevato. Se la regione è a fase minima la correzione avrà effetto, altrimenti il grafico della risposta misurata e il rumore emesso dagli altoparlanti non cambieranno apprezzabilmente. In Fig. 8, dove la curva rossa rappresenta la risposta misurata in ambiente, c'è una sospetta cancellazione (zona a fase non minima) alla frequenza f . Un filtro di correzione molto stretto viene posto sulla stessa frequenza, e non dà luogo a modifiche della risposta. Nello stesso momento, il segnale emesso dagli altoparlanti nella sala non manifesta differenze macroscopiche, dunque si ha la ragionevole certezza che l'anomalia non può essere corretta per via puramente attiva.

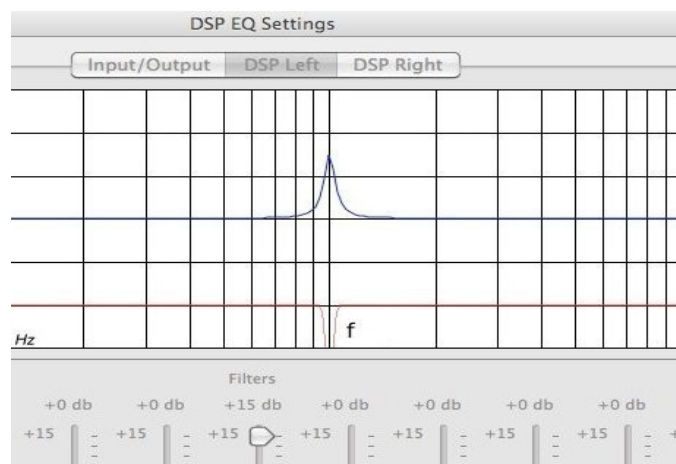


Figura 8 – Controllo con rumore rosa delle regioni a fase non minima

Gli svantaggi di questo metodo di misura sono la sua laboriosità e la mancanza di un immediato riscontro sulle regioni a fase non minima della risposta, il vantaggio principale è la possibilità di capire in tempo reale l'influenza del cambiamento dei parametri sulla risposta complessiva del sistema, e la possibilità di effettuare valutazioni auditive immediate, sia utilizzando il rumore di misura che segnali musicali.

3. Metodi integrati per la soluzione del problema.

Un approccio integrato per massimizzare i risultati può articolarsi in più fasi:

1. Misura della risposta impulsiva e identificazione delle regioni a fase non minima. Si può usare un software come Room EQ Wizard per rilevare i parametri richiesti.

2. Trattamento acustico strutturale, dove richiesto: le regioni della risposta a fase non minima possono essere nella pratica affrontate facendo uso di trattamenti acustici ambientali. Per migliorare la resa acustica dell'ambiente è possibile installare materiali e strutture assorbenti che permettono di attenuare il suono riflesso rispetto a quello diretto. Questi materiali devono rivestire le superfici in quei punti dove avvengono le prime riflessioni che hanno maggior contributo energetico. A questo scopo si è soliti impiegare tappeti sul pavimento, tendaggi pesanti in prossimità dei diffusori o pannelli artificiali come quelli illustrati [6] in Fig. 9:



Figura 9 – Trattamento acustico

3. Nuova misura della risposta impulsiva, dopo il trattamento acustico, per ottenere la correzione parametrica di base.

4. Applicazione della correzione parametrica di base.

5. Ottimizzazione facendo uso dell' analisi della risposta al rumore.

6. Applicazione della correzione parametrica ottimizzata che consente, a partire dalla correzione parametrica di base, di ottenere una maggiore personalizzazione e un miglior adattamento del sistema audio alla sala d'ascolto.

4. Bibliografia.

[1] Simone Bianchi, Massimo Magrini, Paolo Sarri, Egisto Testa: *Esperienze e valutazione di sistemi digitali per la correzione dell'acustica nelle sale d'ascolto*, 41° Convegno Nazionale AIA – Pisa, 17-19 giugno 2014 (<https://acustica-ia.it/>)

[2] M. R. Schroeder: *Die statistischen Parameter der Frequenzkurven von grossen Räumen*. Acustica 4 (1954).

[3] S. Mueller, P. Massarani, *Transfer-Function Measurement with Sweeps* J.AES, 2001 June.

[4] S.P. Lipshitz, M. Pockock, and J. Vanderkooy, *On the Audibility of Midrange Phase Distortion in Audio Systems* J. Audio Eng. Soc., Vol. 30, No 9, Sept. 1982.

[5] J.C. Brown, *Calculation of a constant Q spectral transform*, The Journal of the Acoustical Society of America - 89, 1991.

[6] https://www.simonebianchi.net/wp-content/uploads/2023/01/ex_tesi.pdf

[7] https://www.simonebianchi.net/wp-content/uploads/2023/01/constant_Q.pdf

[8] <https://www.roomeqwizard.com>

[9] <https://www.simonebianchi.net/tangerinotech/prodotti-2/ad-charon-dsp-audio/index.html>

I documenti originali sono © dei rispettivi Autori.

Il presente documento è ©2014 Simone Bianchi.

La distribuzione senza modifiche del documento è consentita.

Prodotto con LibreOffice – 6 Luglio 2014. Aggiornato il 19 Febbraio 2023.

<https://www.simonebianchi.net>

<https://www.tangerinotech.net>