

Simulazione acustica virtuale ed auralizzazione di un teatro scomparso: La Fenice di Venezia

Angelo Farina*, Lamberto Tronchin**

* Ind. Eng. Dept., University of Parma, Viale delle Scienze - 43100 Parma, Italy

[HTTP://pcfarina.eng.unipr.it](http://pcfarina.eng.unipr.it)

** DIENCA - CIARM, University of Bologna, Viale Risorgimento 2 - 40136
Bologna Italy

Scopi

- Creazione di risposte all'impulso sintetiche, mediante simulazione acustica (tracciamento dei raggi sonori)
- Confronto con le risposte all'impulso sperimentali, misurate tre mesi prima dell'incendio del Teatro la Fenice (29 gennaio 1996)
- Conversione delle risposte all'impulso energetiche, ottenute dal programma di simulazione, in segnali sonori in format WAV
- Auralizzazione effettuata mediante convoluzione di musica anecoica con le risposte all'impulso sperimentali e simulate

Metodi

- Anzitutto viene descritto il programma di simulazione impiegato (Ramsete), sviluppato da uno degli autori
- Vengono quindi descritte le ipotesi impiegate per la simulazione acustica (progetto di ricostruzione presentato da una delle imprese partecipanti alla gara)
- I risultati della simulazione vengono confrontati con i rilievi sperimentali, effettuati da uno degli autori nei giorni 14, 28 ottobre e 4 novembre 1995

Il Gran Teatro La Fenice



- Il primo teatro La Fenice fu ultimato nel 1792, su progetto di Gian Antonio Selva, dopo che Venezia aveva perduto causa incendio il preesistente Teatro San Benedetto
- Nel dicembre 1836 il teatro andò completamente distrutto in un furioso incendio, ma fu ricostruito, in meno di un anno (!), su progetto di Giambattista e Tommaso Meduna, e con decori di Tranquillo Orsi
- Il teatro fu chiuso per ristrutturazione al termine della stagione 1995, ed avrebbe dovuto riaprire il 1 Febbraio 1996. Un incendio doloso, causato da due elettricisti, lo distrusse quasi completamente il 29 gennaio 1996

Il Gran Teatro La Fenice - oggi

- Dopo una serie di inenarrabili vicissitudini legali, i lavori di ricostruzione sono ripresi. Comunque, a luglio 2002, la cavea era in queste condizioni:

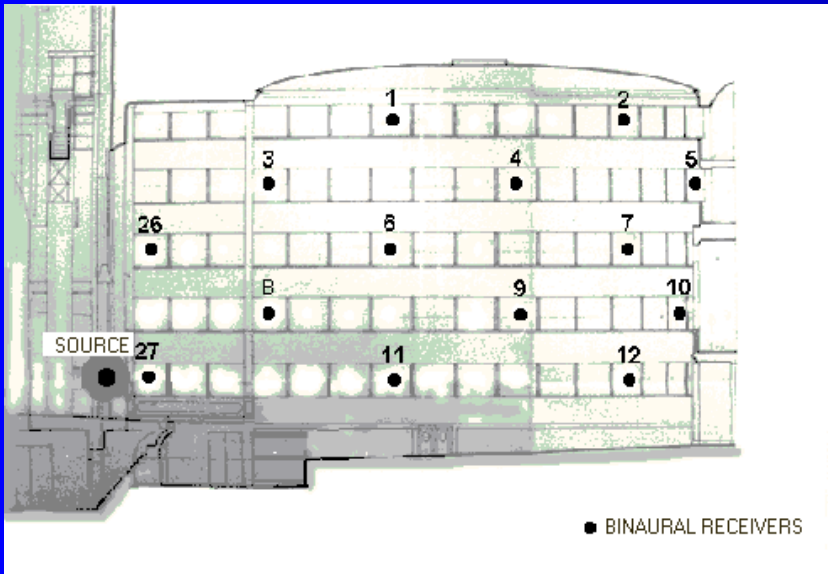
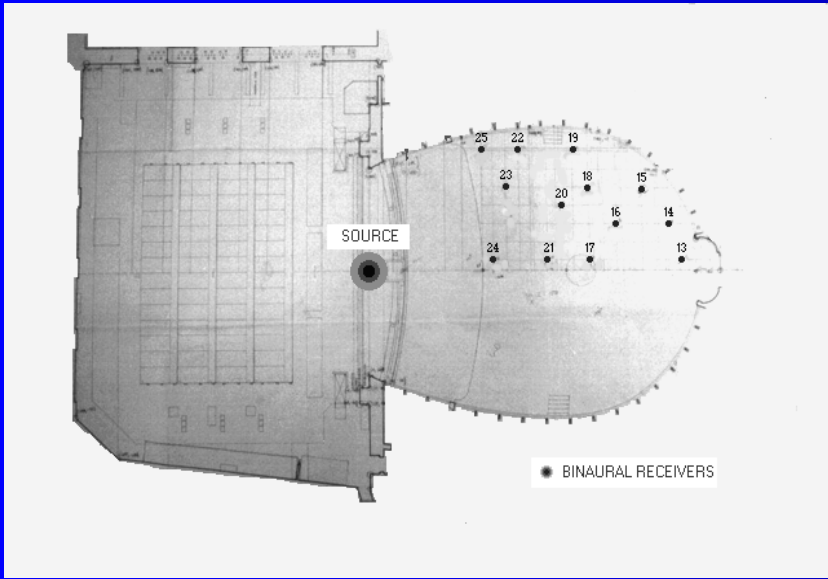


Misure acustiche (1)



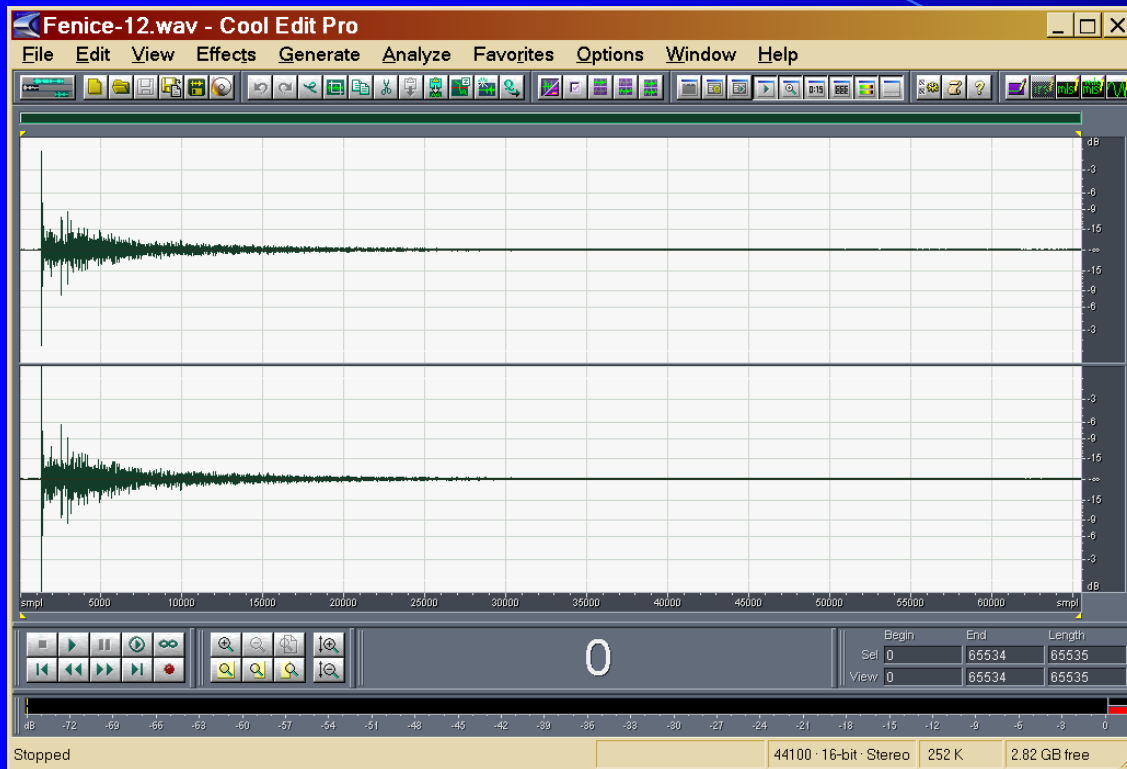
- Le misure vennero effettuate in ottobre-novembre 1995 dall'ing. Tronchin, con tecnica impulsiva (colpo di pistola) e registrazione binaurale digitale delle risposte all'impulso
- Scopo delle misure era fornire indicazioni per alcuni piccoli interventi di correzione dell'acustica della sala (non era tutto così perfetto come invece oggi si racconta!), e per la progettazione della camera d'orchestra (di cui il teatro era privo)
- Per l'elaborazione dei dati acquisiti venne per la prima volta impiegato il software Aurora, che consente sia la determinazione dei parametri acustici oggettivi, sia l'auralizzazione.

Misure acustiche (2)



- Venne impiegata una posizione della sorgente posta sul palcoscenico, al centro, sotto il sipario tagliafuoco
- La risposta all'impulso venne misurata in 27 posizioni, poste in platea e sui palchi, nella metà destra della sala (sfruttando la simmetria della stessa onde ridurre il numero di rilievi)
- Nel corso delle misure la sala era assolutamente intatta, mentre il palcoscenico era in condizioni poco realistiche (assenza di quinte e di arredo scenico).

Misure acustiche (3)



- In ogni punto, si è registrata una risposta all'impulso binaurale (stereofonica)
- Essa è contenuta in un file WAV stereo (o due mono)
- Nel corso delle misure la sala era assolutamente intatta, mentre il palcoscenico era in condizioni poco realistiche (assenza di quinte e di arredo scenico).



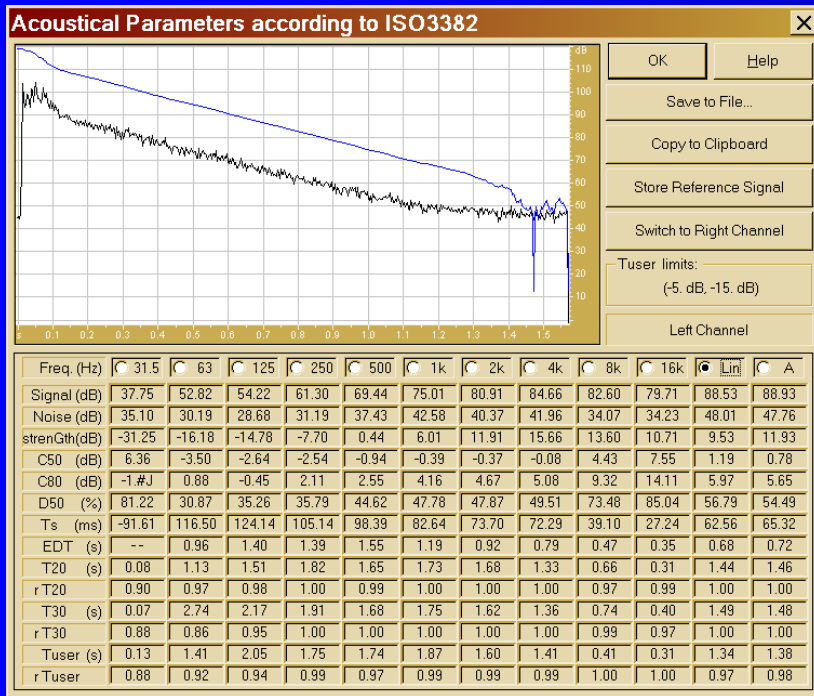
Punto n. 12

Parametri acustici

- Un apposito plugin, sviluppato per il programma CoolEdit, consente il calcolo dei parametri acustici secondo ISO 3382 dalla risposta all'impulso

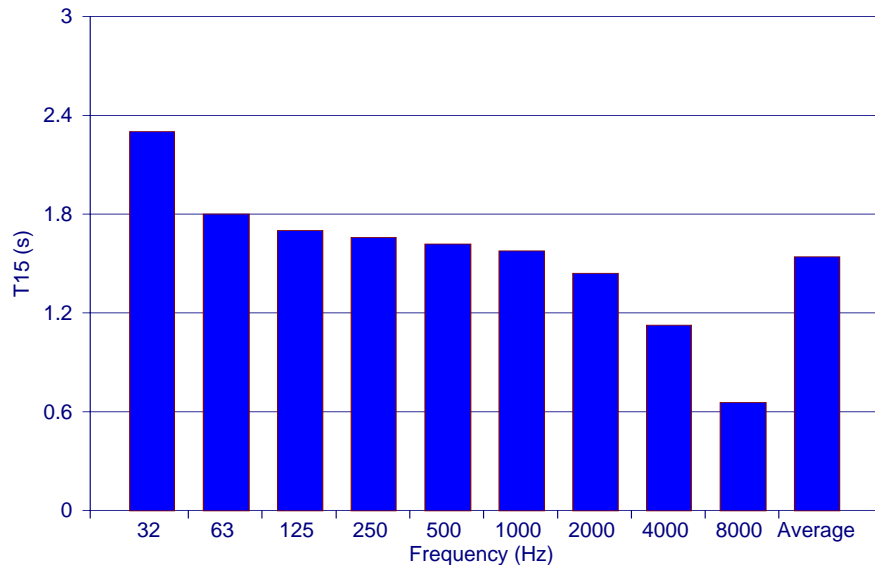
- I parametri comprendono il tempo di riverbero T15 e T30, la chiarezza C80, e la IACC (cross-correlazione inter-aurale) in 10 bande d'ottava

- In tutto sono stati sviluppati 15 plugins, denominati AURORA, liberamente scaricabili da Internet ([HTTP://www.ramsete.com/aurora](http://www.ramsete.com/aurora))

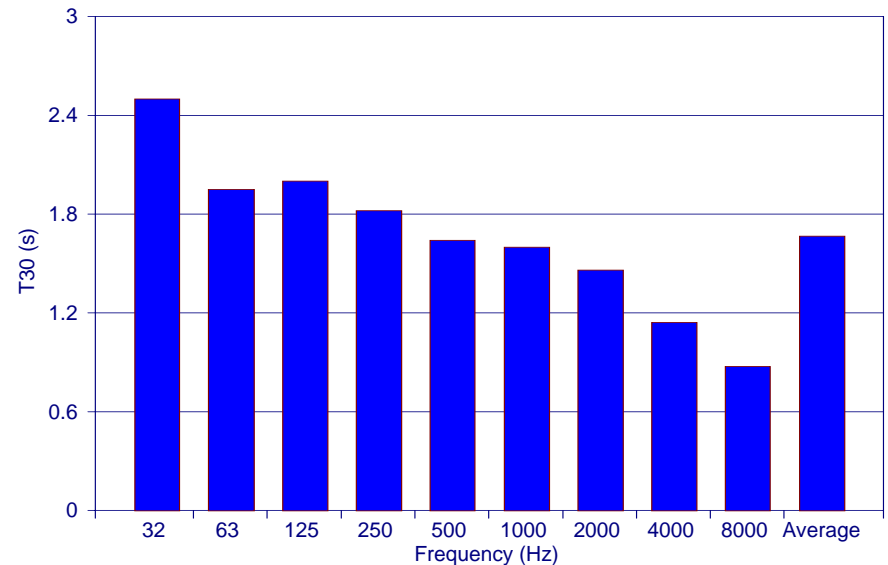


Tempi di riverbero

Teatro La Fenice - Venezia
Reverberation Time T15



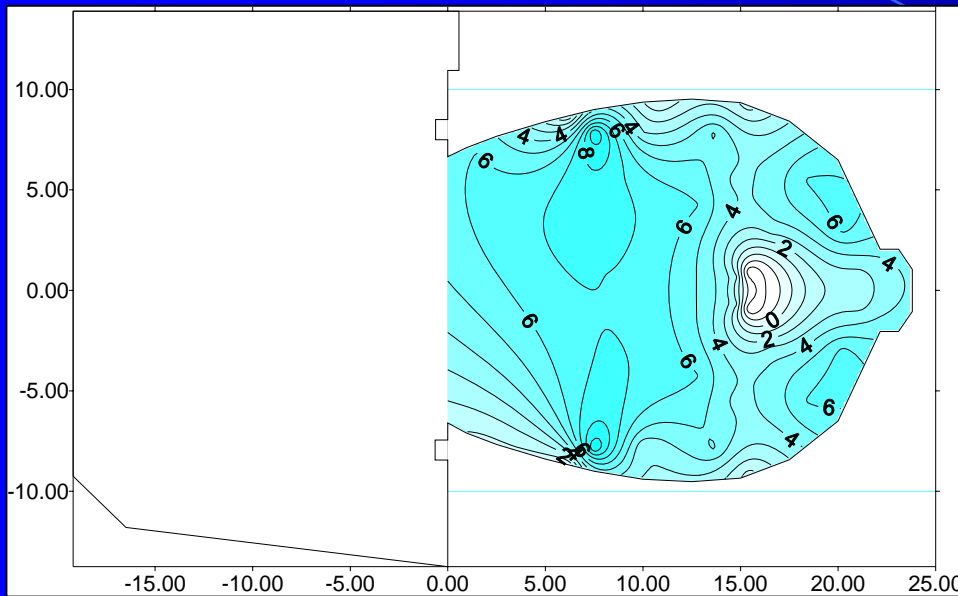
Teatro La Fenice - Venezia
Reverberation Time T30



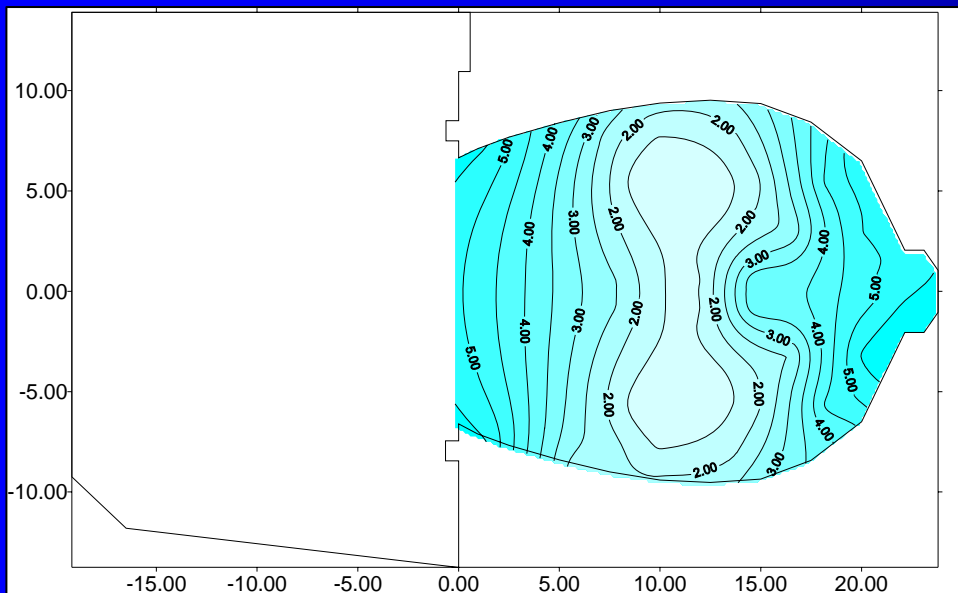
I valori sono sistematicamente più alti che nella maggior parte dei teatri d'opera italiani, e portavano La Fenice a rivaleggiare con i migliori teatri in Austria e Germania, rispetto ai quali le sale italiane hanno in genere sempre sofferto di scarsa “vivezza”

L'incremento a bassa frequenza causa il tipico effetto di “calore”

Mappe dei parametri acustici

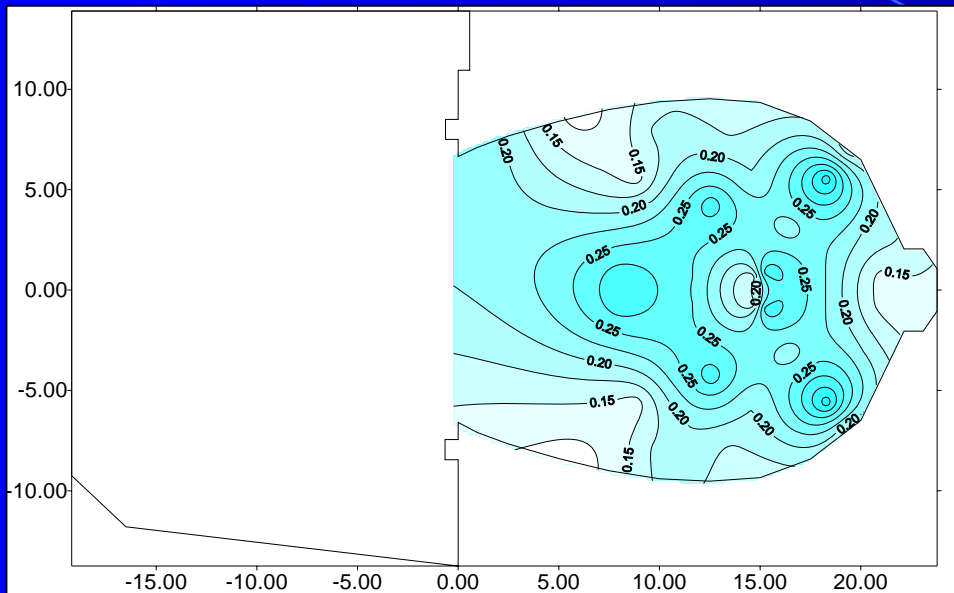


Mappa della Strenght G (livello sonoro), che mostra il tipico effetto di focalizzazione della pianta a ferro di cavallo

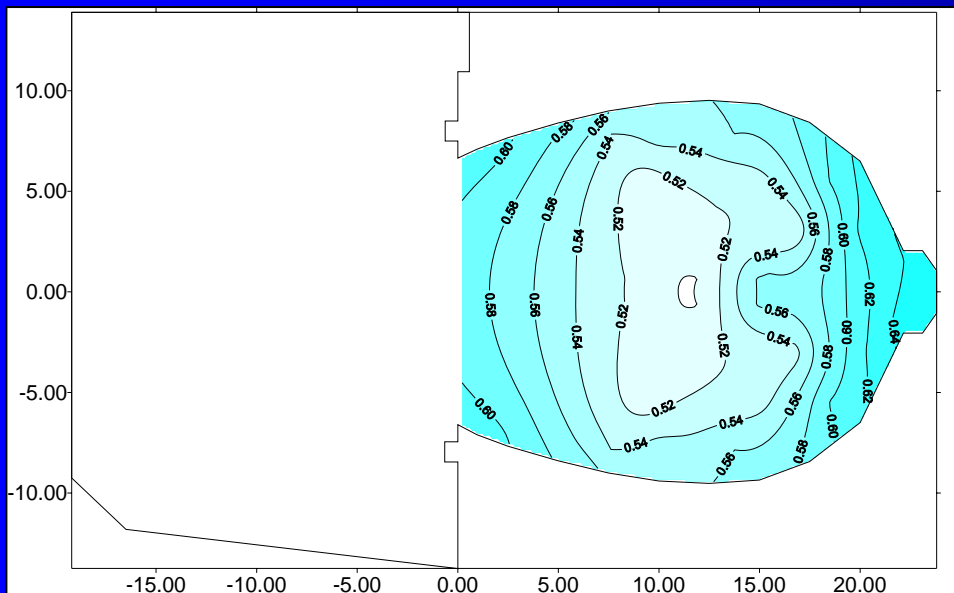


Mappa della Chiarezza C80 (livello sonoro), che mostra valori molto elevati rispetto a quanto atteso in base al tempo di riverbero.

Mappe dei parametri acustici



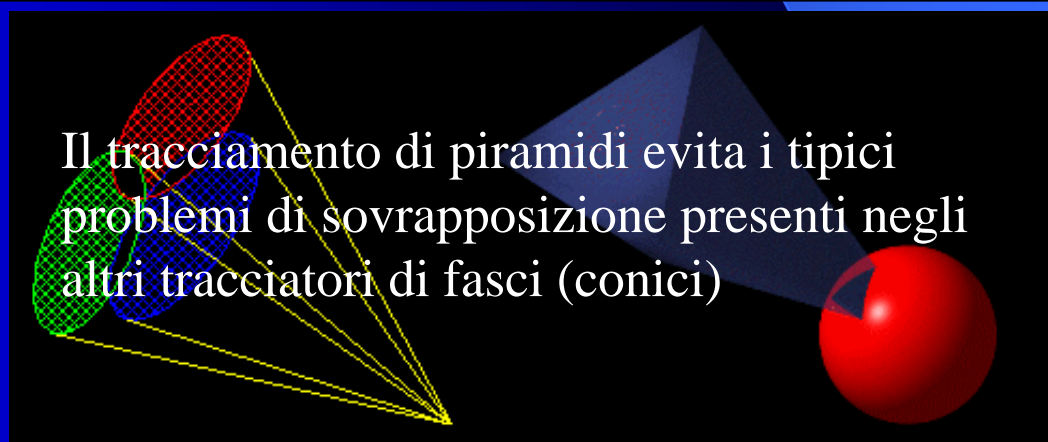
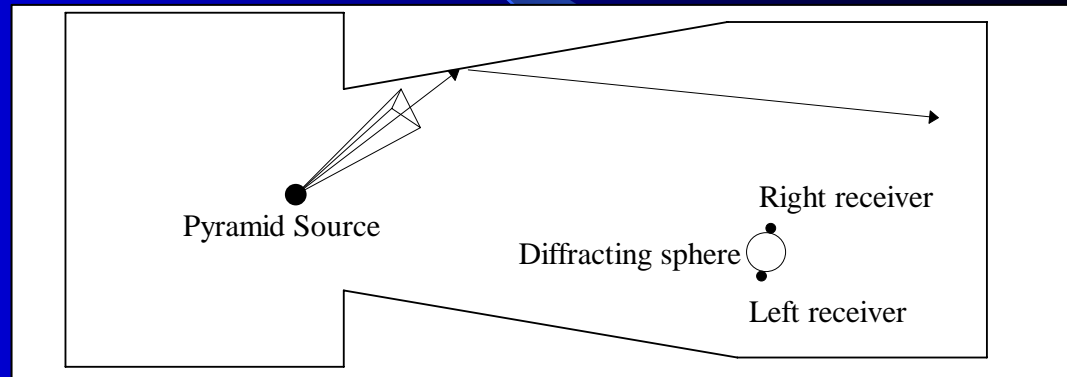
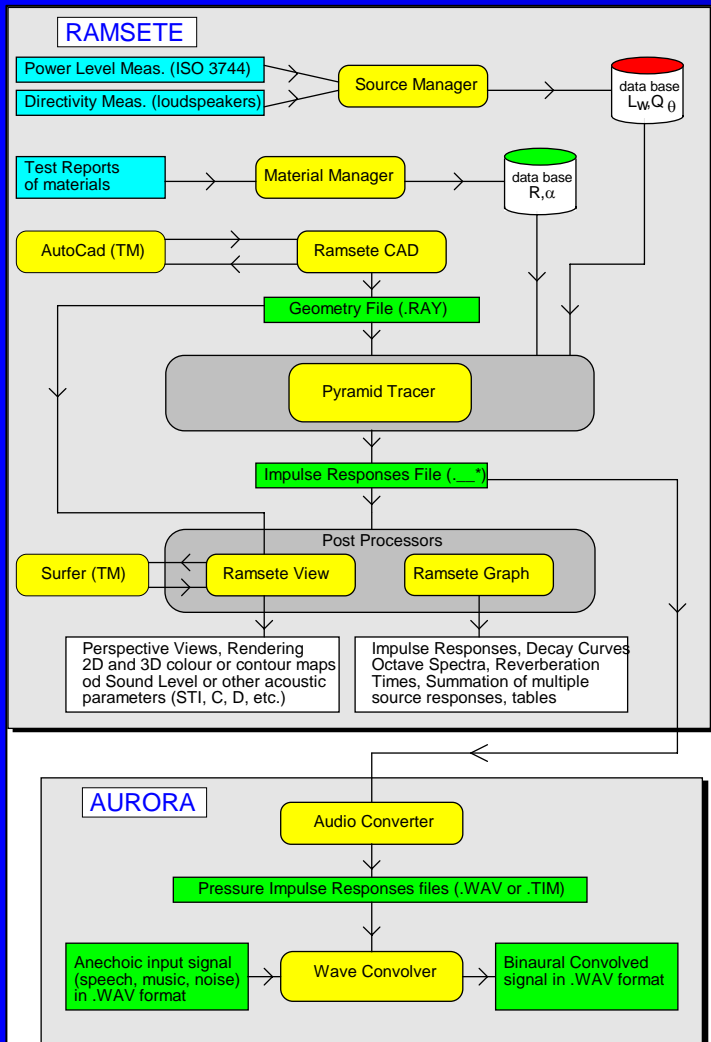
Mappa della IACC (spazialità): i bassi valori indicano una spazialità elevata.



Mappa dello Speech transmission index (STI): buono quasi ovunque (maggiore di 0.6), tranne che in un piccolo nucleo al centro della platea

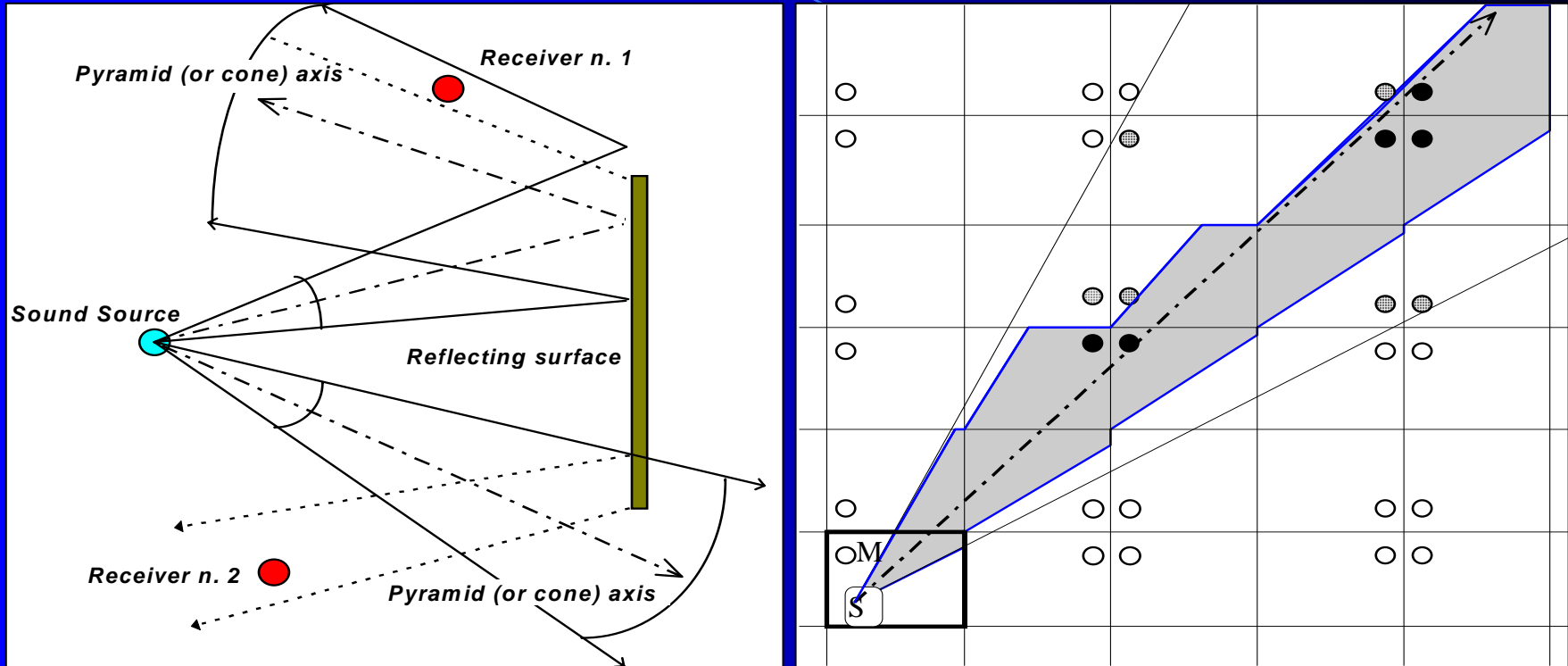
L'algoritmo di simulazione acustica: Ramsete

L'algoritmo si basa sul tracciamento di fasci piramidali (Pyramid Tracing), ubbidendo alle leggi semplificate dell'acustica geometrica.



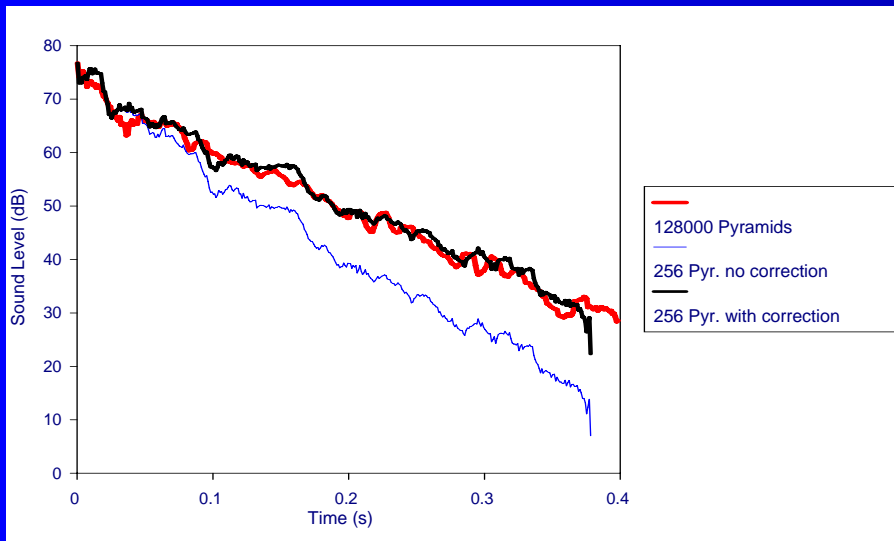
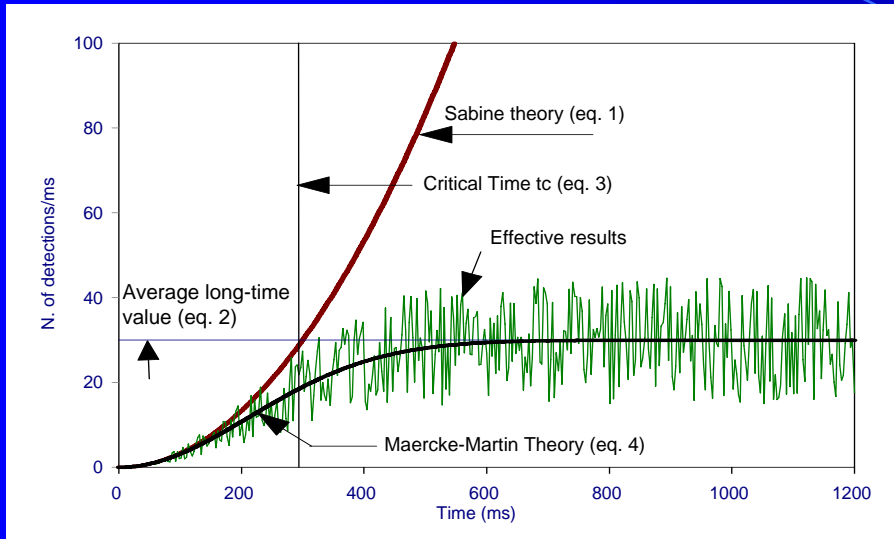
Il tracciamento di piramidi evita i tipici problemi di sovrapposizione presenti negli altri tracciatori di fasci (conici)

Errori causati dall'algoritmo



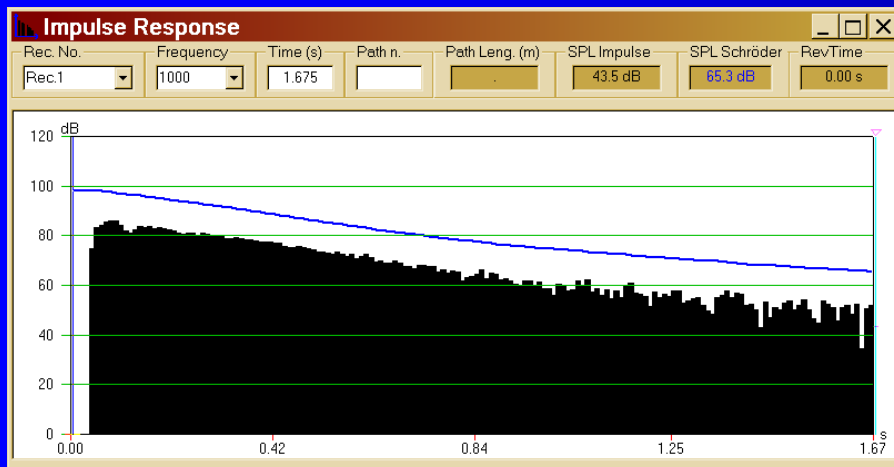
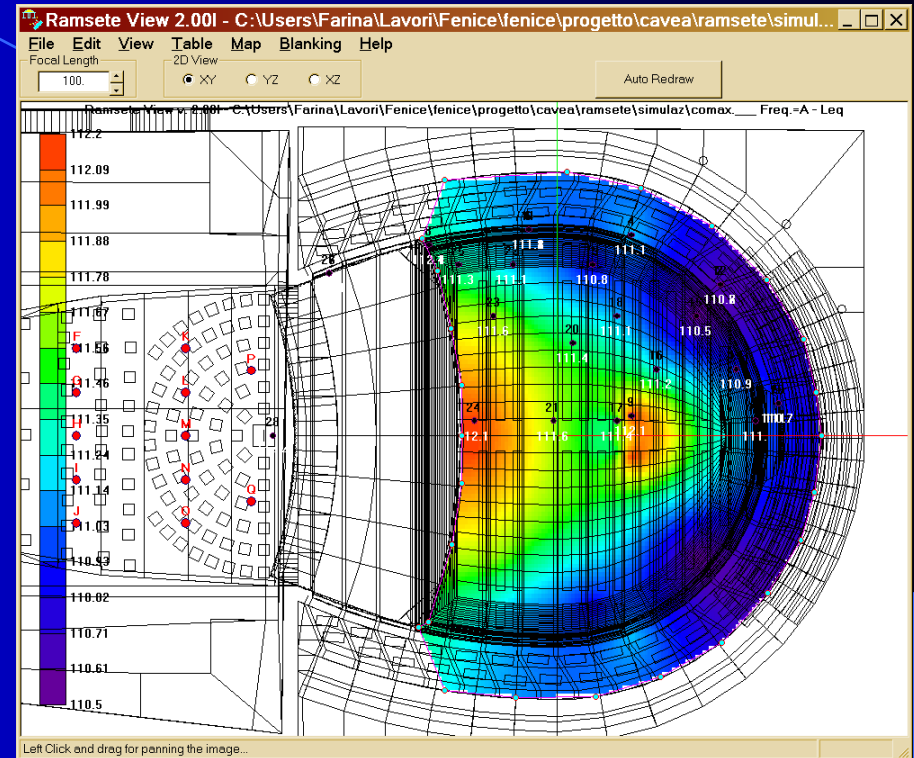
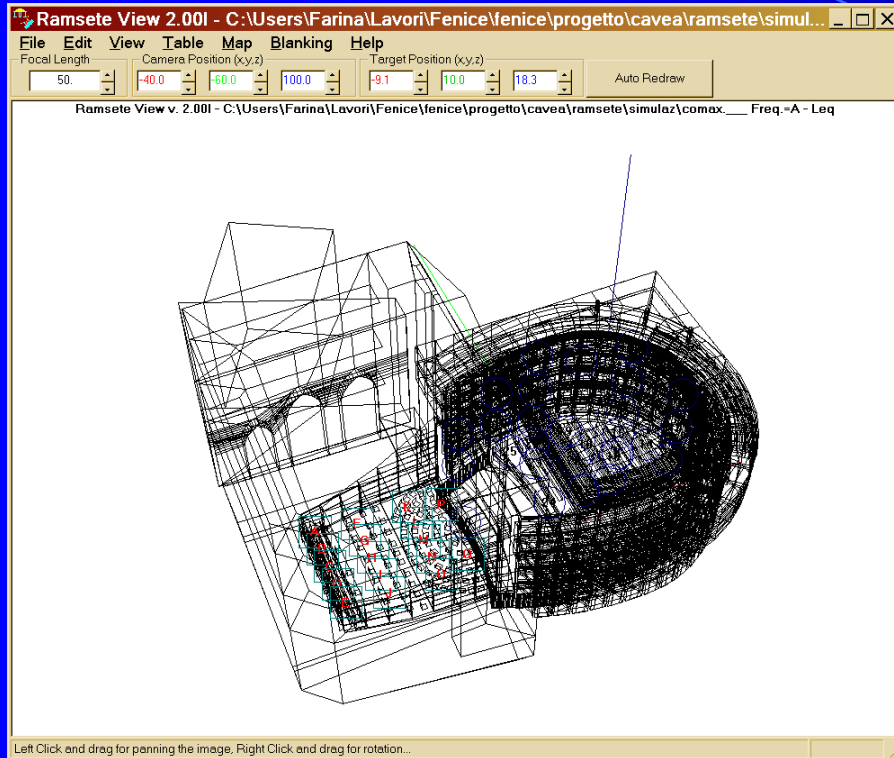
Errore nel rilevamento di recettori (a sinistra) e perdita sistematica di sorgenti immagine di ordine elevato (a destra): di conseguenza, occorre “correggere” la coda sonora per compensare tale errore.

Correzione della coda sonora



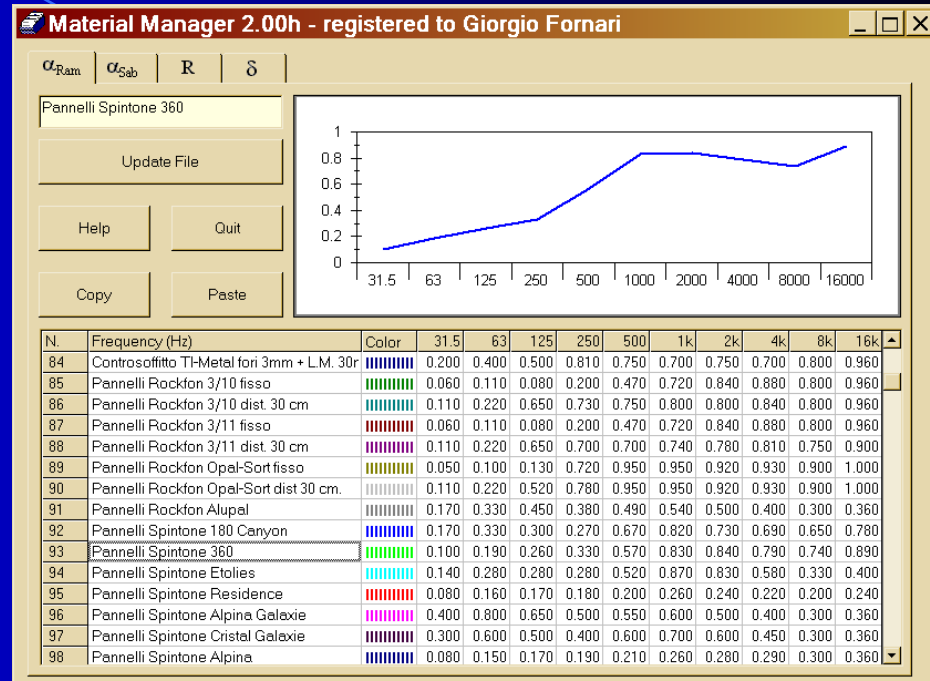
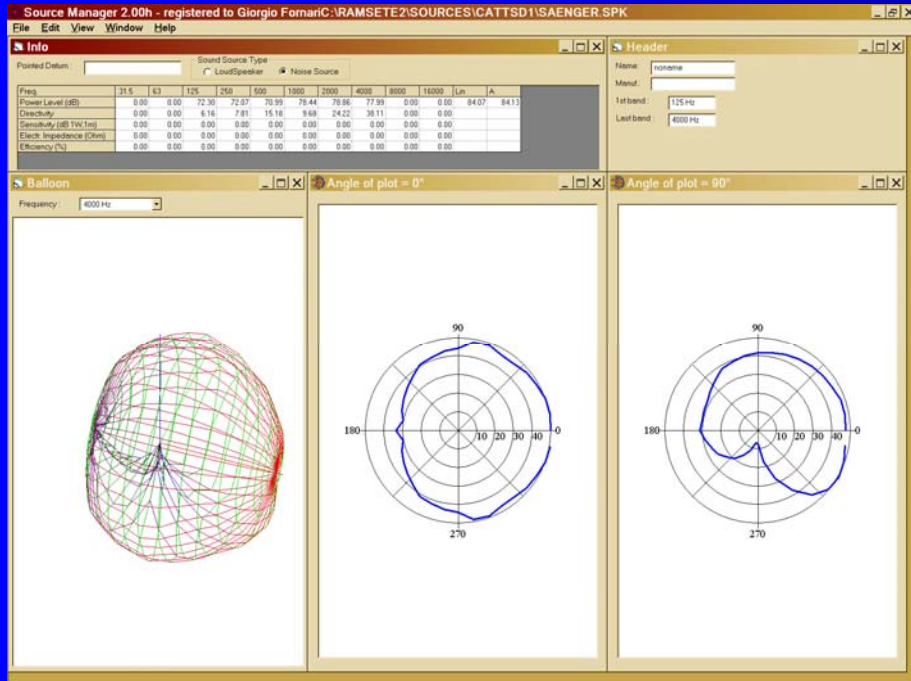
La correzione viene fatta moltiplicando l'energia della coda sonora per il rapporto fra la densità temporale teorica delle riflessioni e quella ottenuta dal tracciatore (che tende ad essere sistematicamente inferiore all'allungarsi della coda, stabilizzandosi attorno ad un valore massimo asintotico)

Il programma Ramsete (1)



Partendo da un modello CAD, vengono calcolate le risposte all'impulso, e mappati i parametri acustici

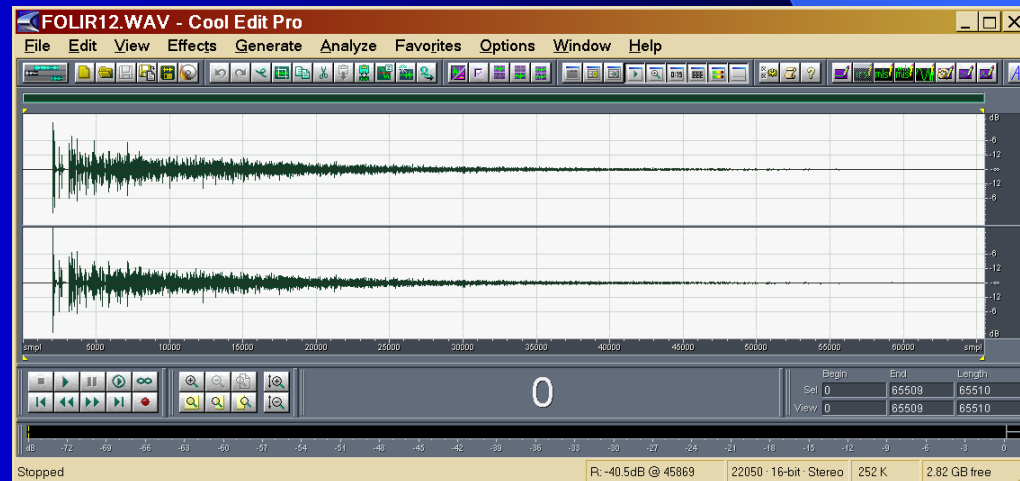
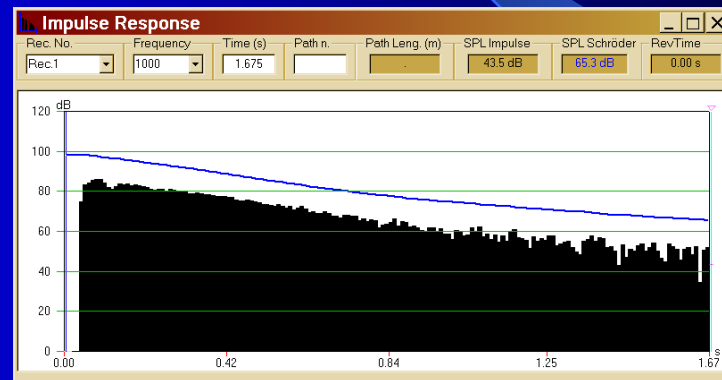
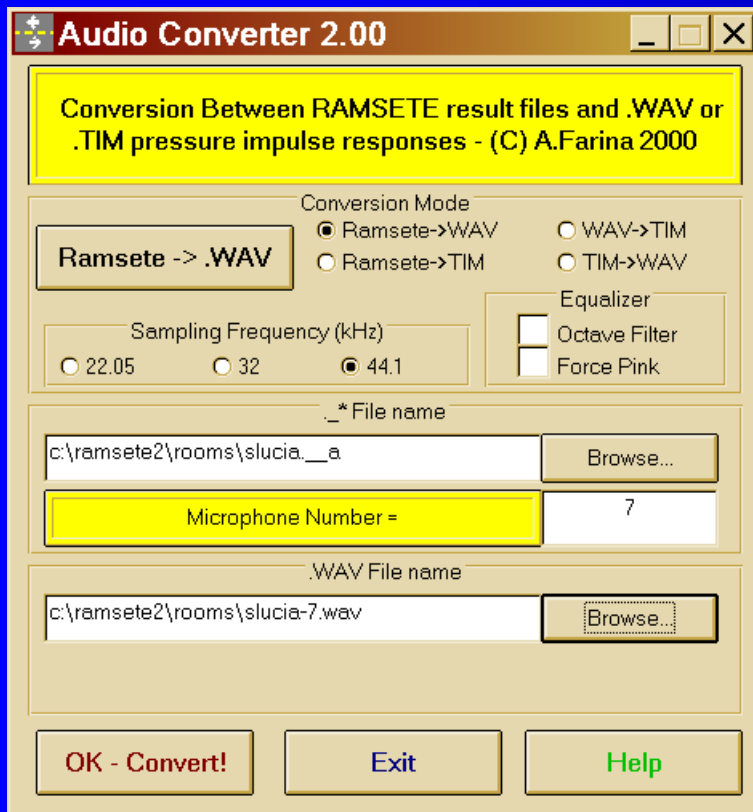
Il programma Ramsete (2)



Il programma contiene un vasto data-base di direttività di sorgenti sonore (inclusi vari strumenti musicali) e di materiali acustici

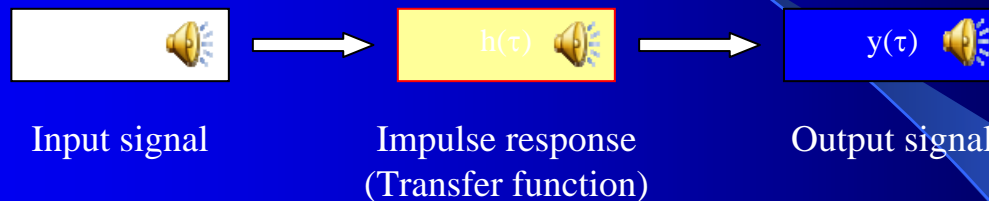
Conversione della risposta all'impulso

Il risultato del calcolo è una risposta all'impulso energetica, per ciascuna banda d'ottava. Per convertirla in pressione sonora, si usa una tecnica di modulazione in ampiezza di uno spezzone di rumore bianco, preventivamente filtrato in bande d'ottava.

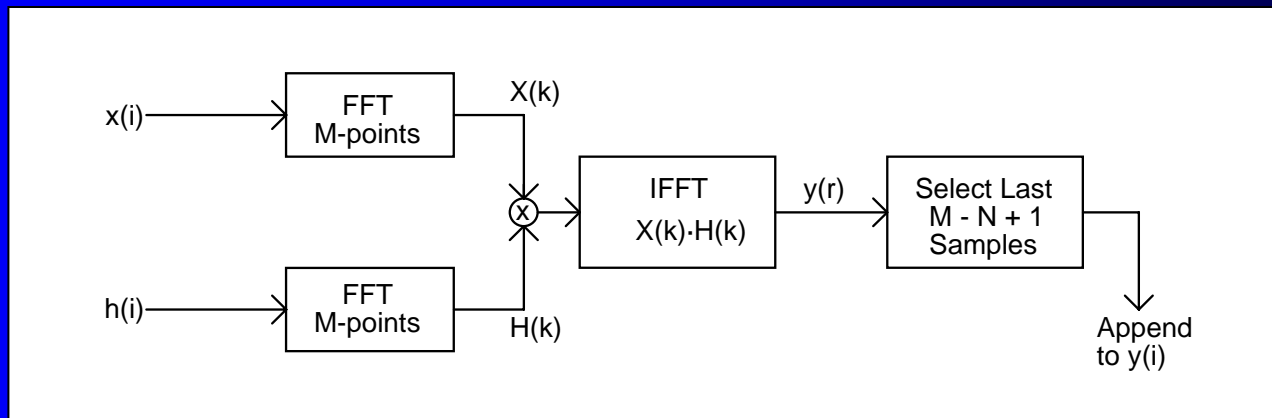


Auralizzazione

L'auralizzazione è il processo con cui un suono anecoico viene “proiettato virtualmente” in un ambiente acustico, caratterizzato dalla sua risposta all'impulso



L'operazione di convoluzione, matematicamente molto “pesante”, viene normalmente implementata mediante l'algoritmo “overlap_and_save”, che opera tramite blocchi FFT



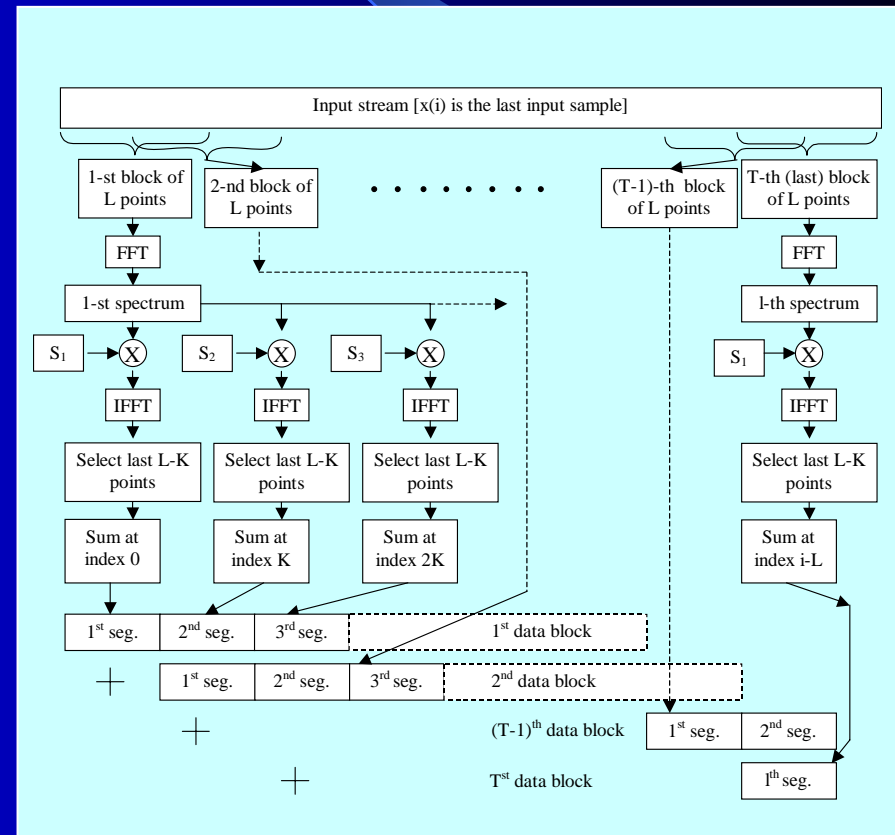
Convoluzione in tempo reale

Il grosso limite della convoluzione è il tempo di latenza (ritardo di I/O). Sinora, per evitarlo, era necessario l'impiego di un costoso sistema basato su DSP (LakeDSP), che funziona tramite un algoritmo (brevettato) di convoluzione a bassa latenza.

Ma ora, grazie al pioneristico lavoro di Anders Torger (Svezia), è disponibile su PC Linux una implementazione open-source, che fornisce prestazioni di calcolo 10 volte superiori a quelle del sistema Lake DSP, senza uso di schede DSP, e gratis!

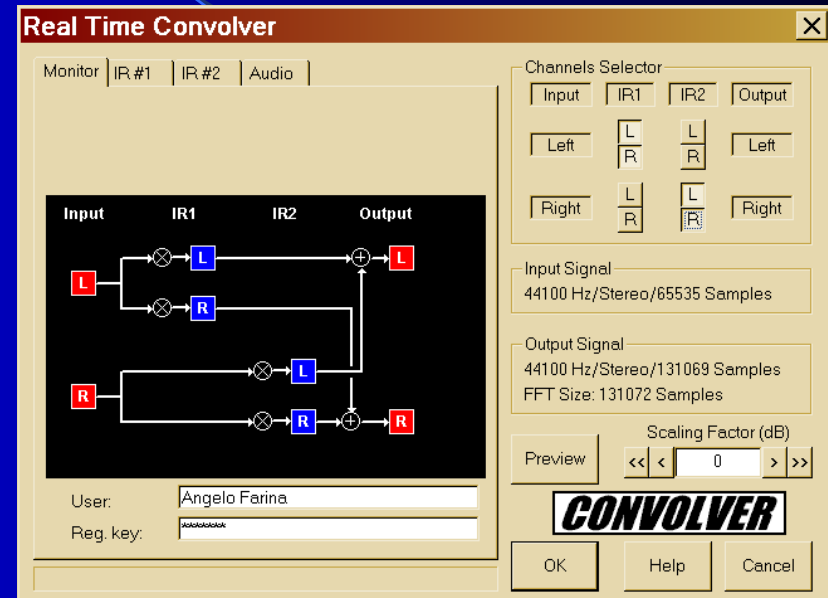
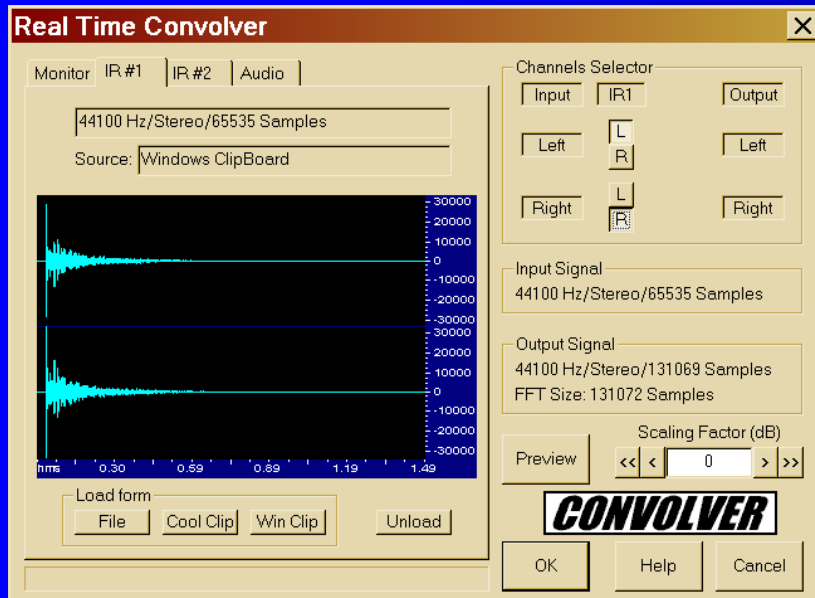
Il programma BruteFIR è scaricabile dal sito Internet:

<http://www.ludd.luth.se/~torger/brutefir.html>

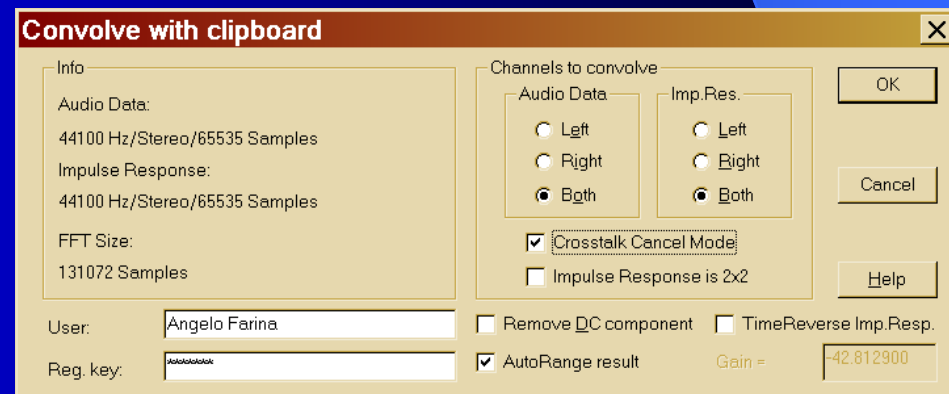


Convoluzione su PC (plugin Aurora)

Per applicazioni non in tempo reale, la soluzione più pratica è costituita dagli appositi Plug-ins di Aurora



Tale software consente la convoluzione di un segnale in ingresso stereo, con una risposta all'impulso stereo, e fornisce anche la funzione di "cross-talk-cancellation"



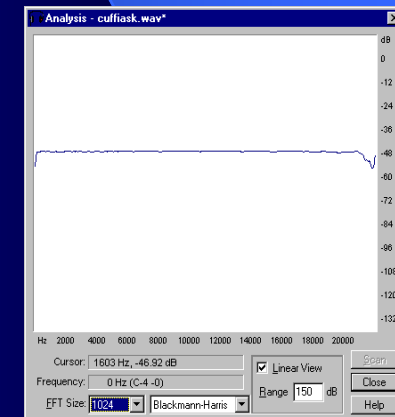
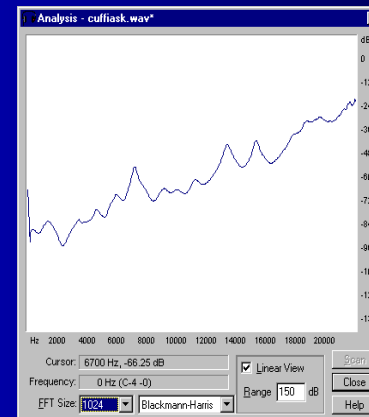
Riproduzione del segnale auralizzato

Sono disponibili, in ordine di complessità crescente, i seguenti dispositivi di riproduzione:

- Cuffie stereofoniche
- Cuffie stereofoniche con head-tracking
- Riproduzione su altoparlanti con cross-talk cancellation (Stereo Dipole)
- Doppio Stereo Dipole (frontale e posteriore)
- Ambisonics: sistema con 4 canali di trasmissione (B-format), proiettati su un array di 8-24 altoparlanti (3D)
- Ambiophonics: sistema che combina uno o due Stereo-dipoles con un sistema “surround” tipo Ambisonics

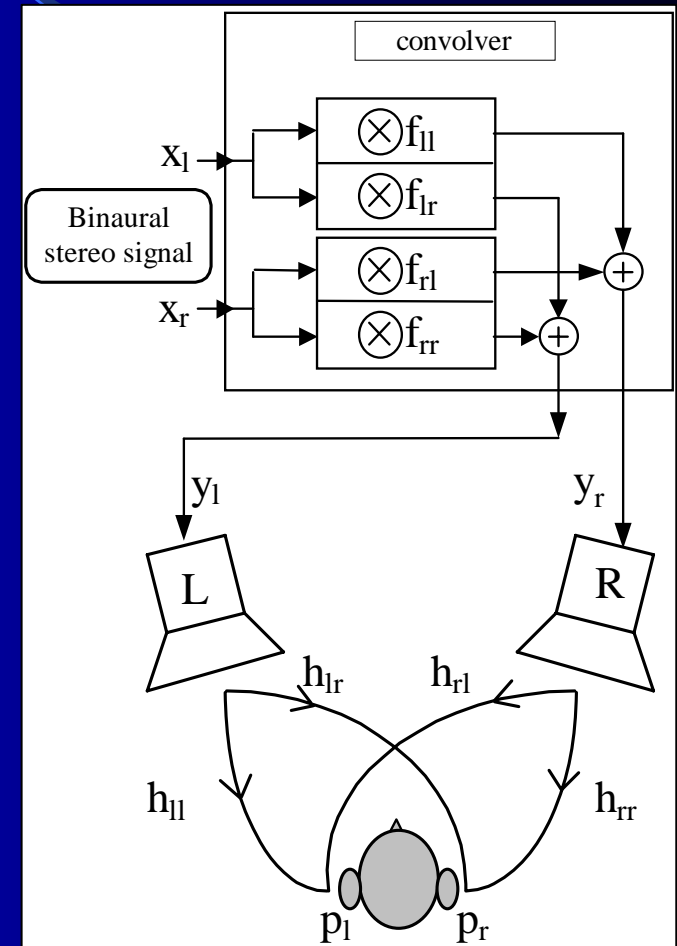
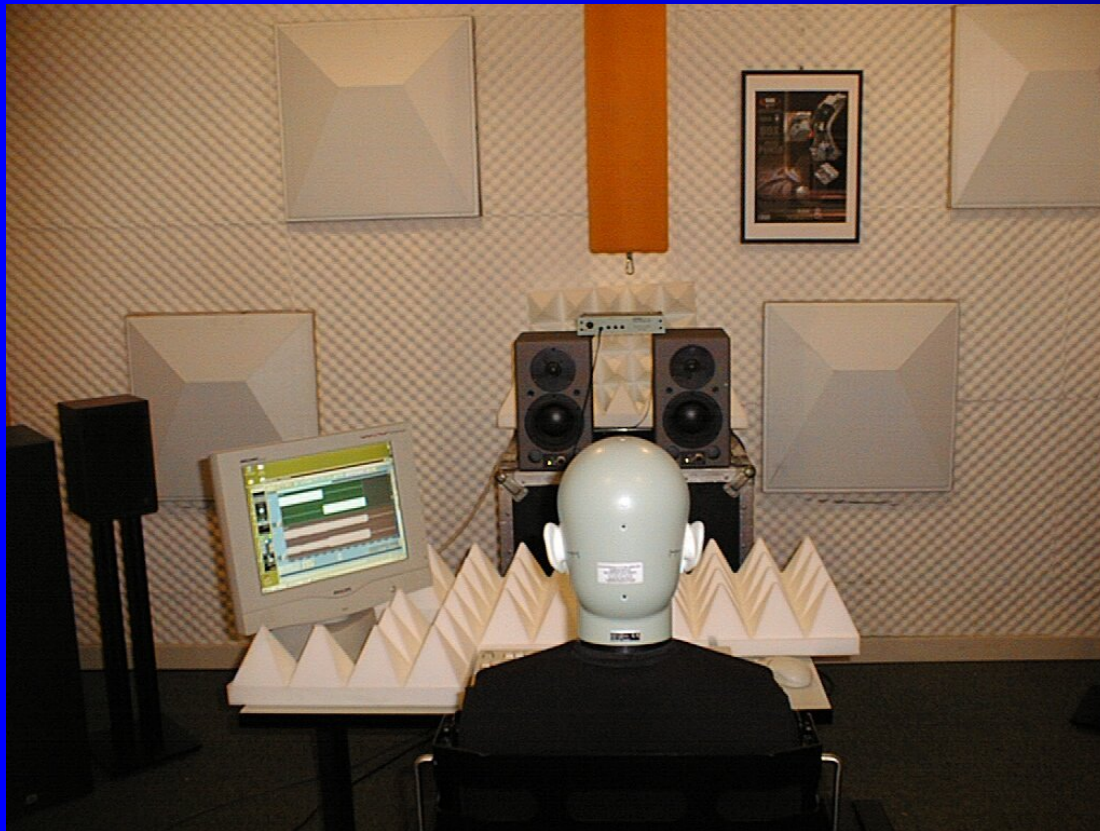
Cuffia stereofonica

- E' necessario che la risposta della cuffia venga equalizzata digitalmente, onde garantire la corretta risposta in modulo/fase



Stereo Dipole

- In questo caso, il filtraggio digitale inverso ha sia la funzione di rendere piatta la risposta in frequenza, sia soprattutto di azzerare il cross-talk



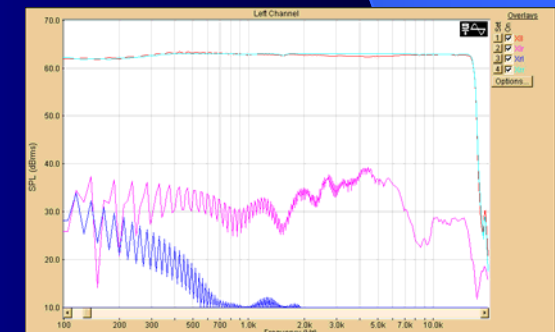
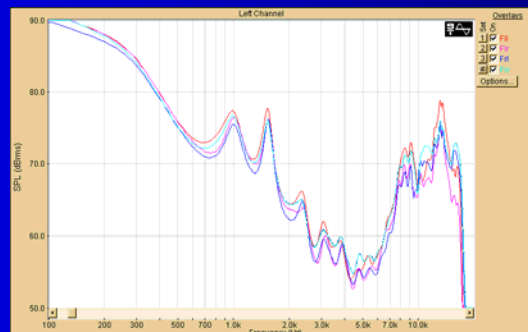
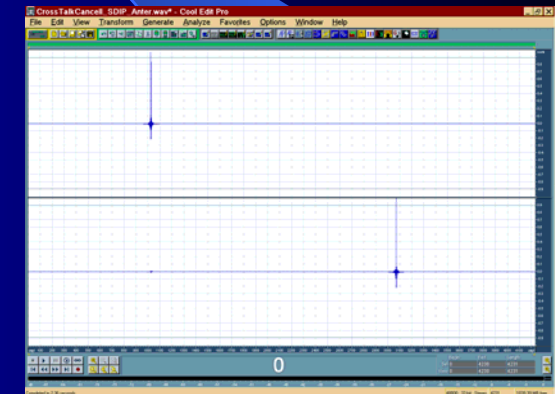
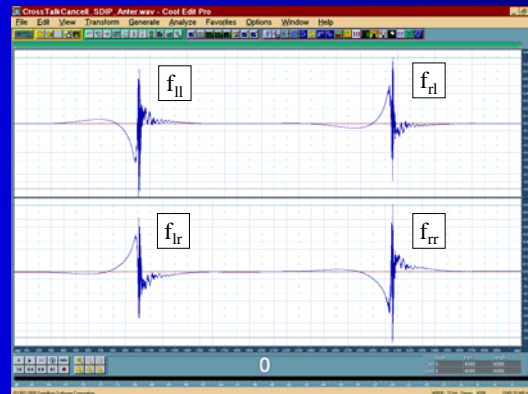
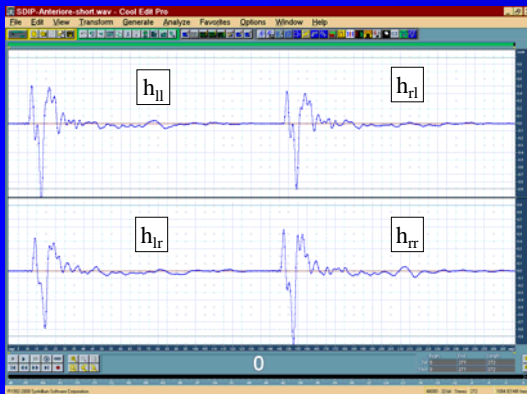
Cancellazione del cross-talk

$$\begin{cases} f_{ll} = (h_{rr}) \otimes \text{InvDen} \\ f_{lr} = (-h_{lr}) \otimes \text{InvDen} \\ f_{rl} = (-h_{rl}) \otimes \text{InvDen} \\ f_{rr} = (h_{ll}) \otimes \text{InvDen} \\ \text{InvDen} = \text{InvFilter}(h_{ll} \otimes h_{rr} - h_{lr} \otimes h_{rl}) \end{cases}$$

$$C(\omega) = \text{FFT}(h_{ll}) \cdot \text{FFT}(h_{rr}) - \text{FFT}(h_{lr}) \cdot \text{FFT}(h_{rl})$$

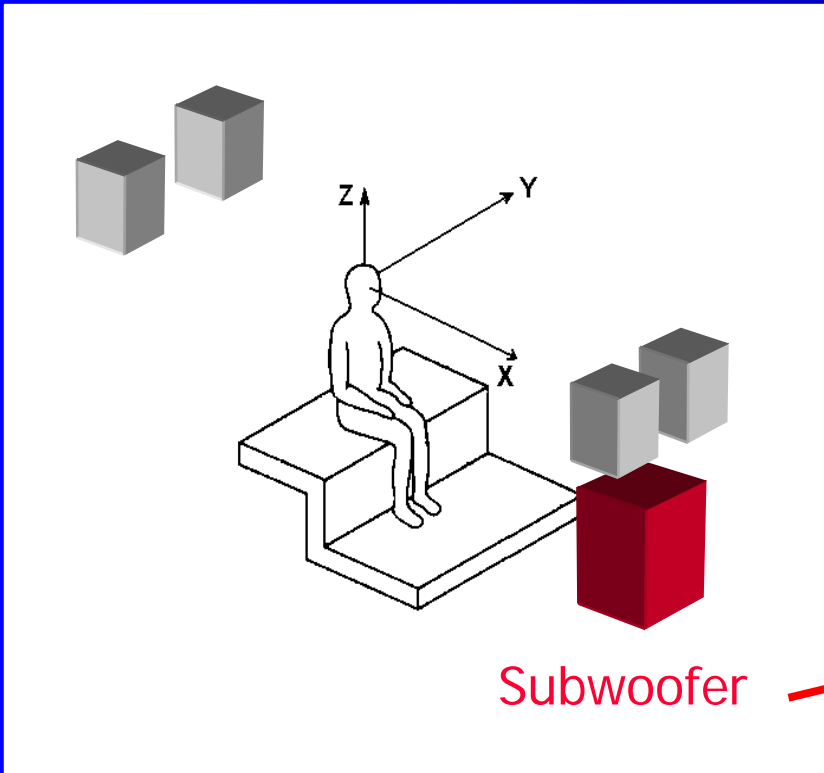
$$\text{InvDen}(\omega) = \frac{\text{Conj}[C(\omega)]}{\text{Conj}[C(\omega)] \cdot C(\omega) + \varepsilon(\omega)}$$

Formule per inversione di Kirkeby



Dual Stereo Dipole

Schema concettuale



vantaggi:

- Completa periferia 3D
- Ammette la rotazione della testa
- I filtri di cancellazione del cross-talk compensano anche la risposta in frequenza dei trasduttori

disadvantages:

- ~~■ Non gestisce bene le basse frequenze~~
- Colorazione fuori dallo "sweet spot"

Dual Stereo Dipole

Frontale



Quested 2108 monitors

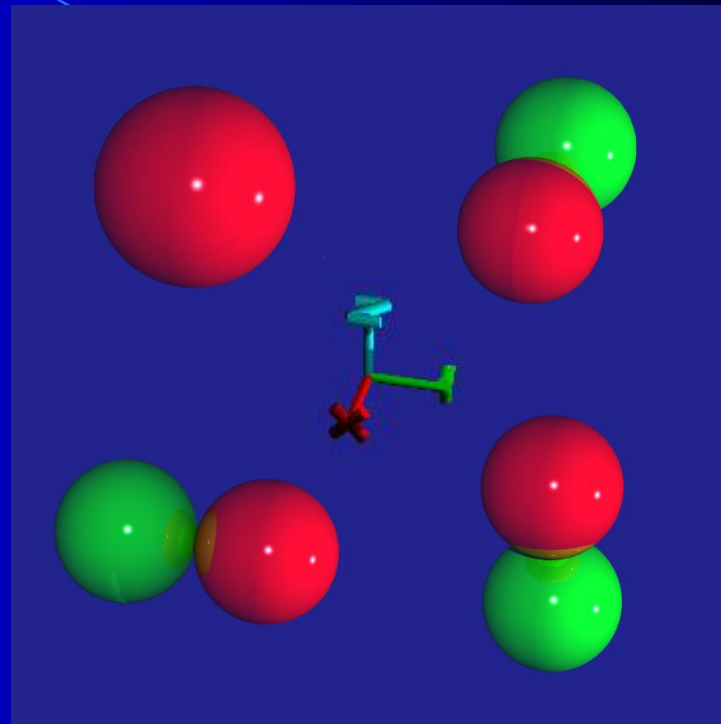
Posteriore



Quested F11P monitors

Ambisonics encoding

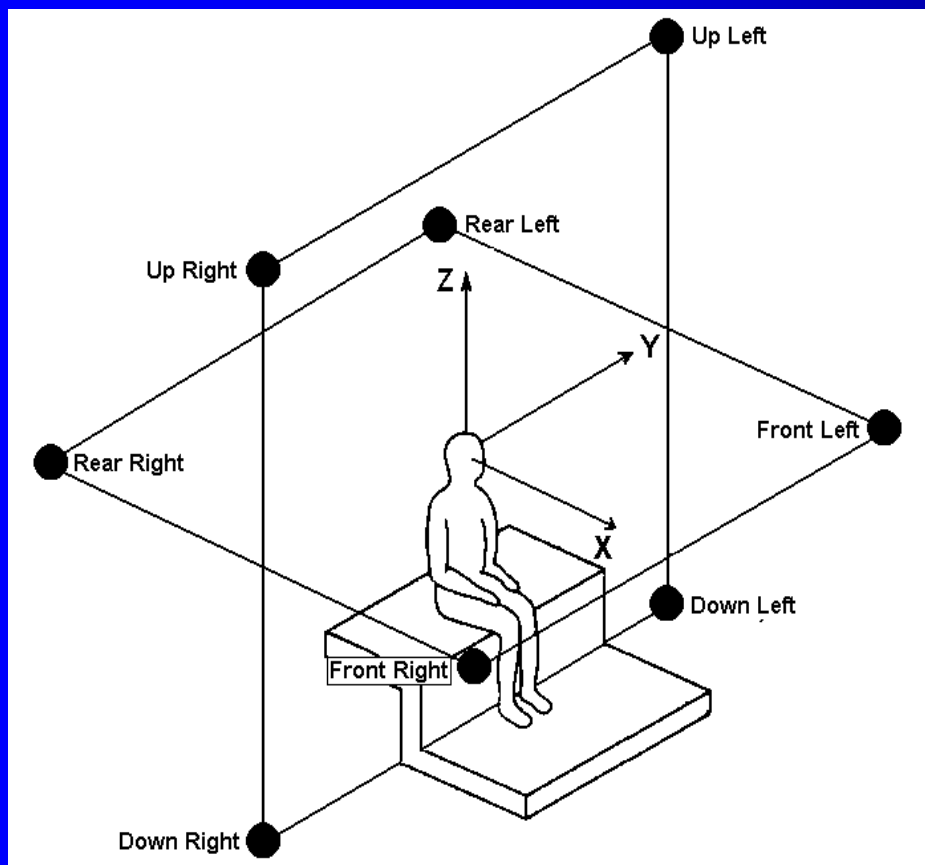
Il segnale B-format deriva da un microfono Soundfield...



Oppure dalla sintesi dei 4 canali (WXYZ) a partire dalla loro definizione matematica (armoniche sferiche di ordine 0 ed 1)

Ambisonics decoding

Bi-square Ambisonics array



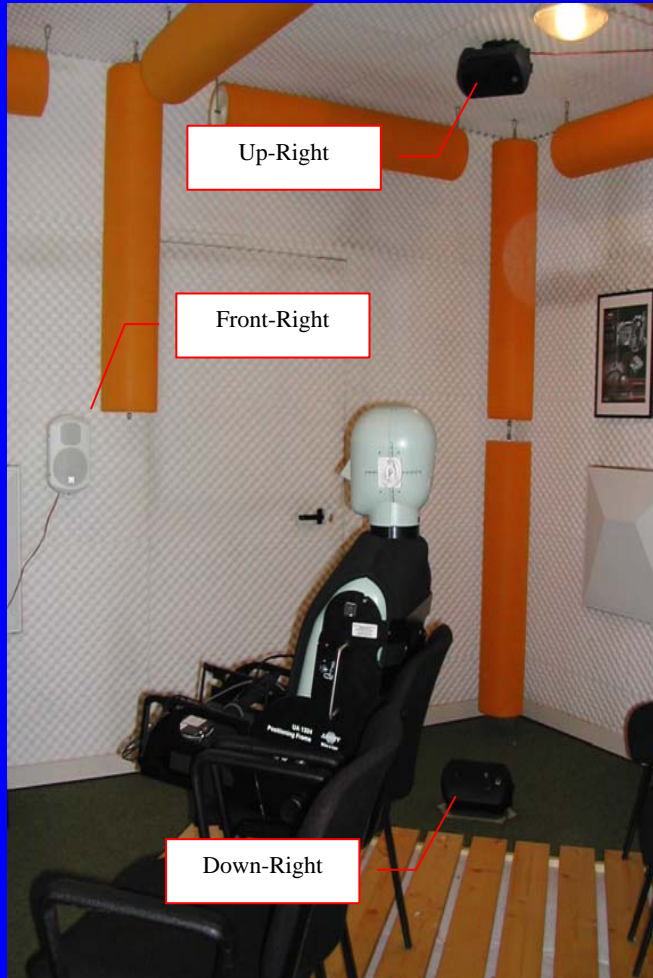
vantaggi:

- Tridimensionale
- Buona percezione dei suoni laterali
- Buona risposta ai bassi
- "sweet spot" largo, nessuna colorazione uscendo da esso

svantaggi:

- Non isotropico
- Richiede un decoding avanzato (Y trattato diversamente da X,Z)

Bi-square Ambisonics array



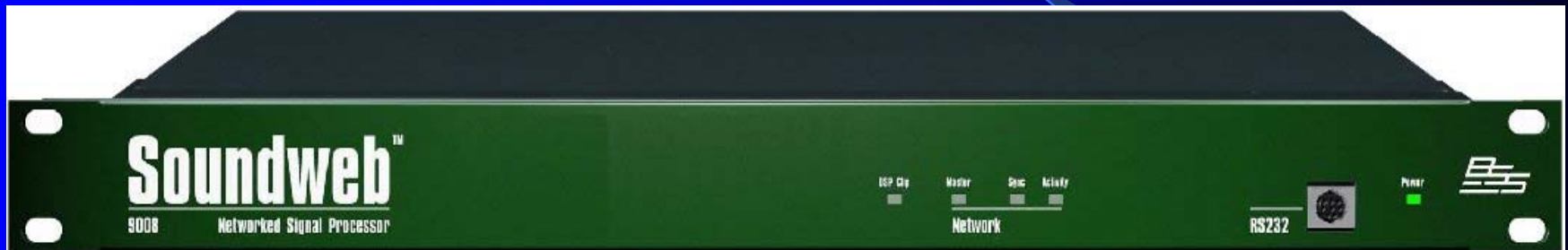
8 Turbosound Impact 50 loudspeakers:

- Light, easily fixed and oriented
- Good frequency response
- Very little distortion



Sistema DSP per decoding Ambisonics

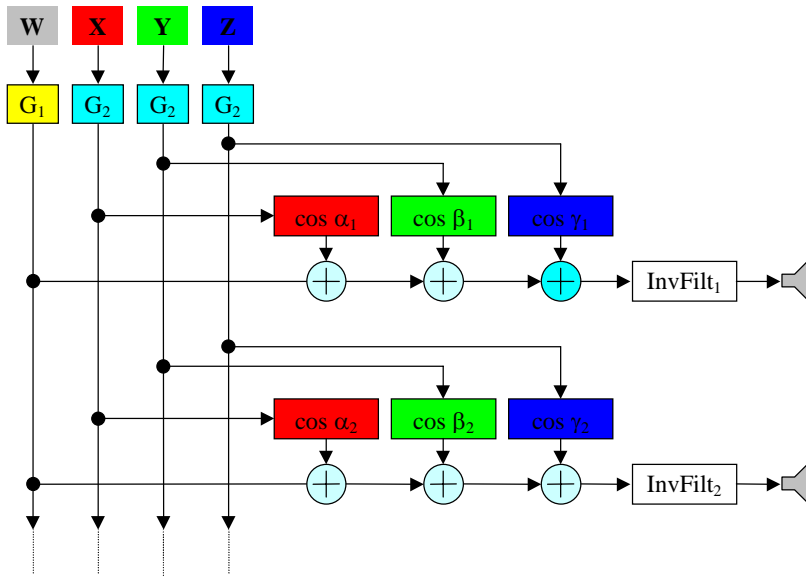
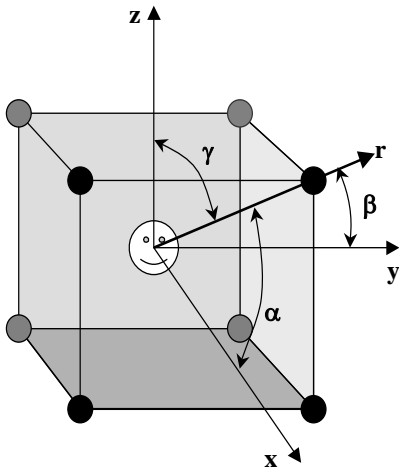
BSS Soundweb 9088-II (8 ins, 8 outs)



SID Futureclient fanless PC (Pentium-III 1 GHz)

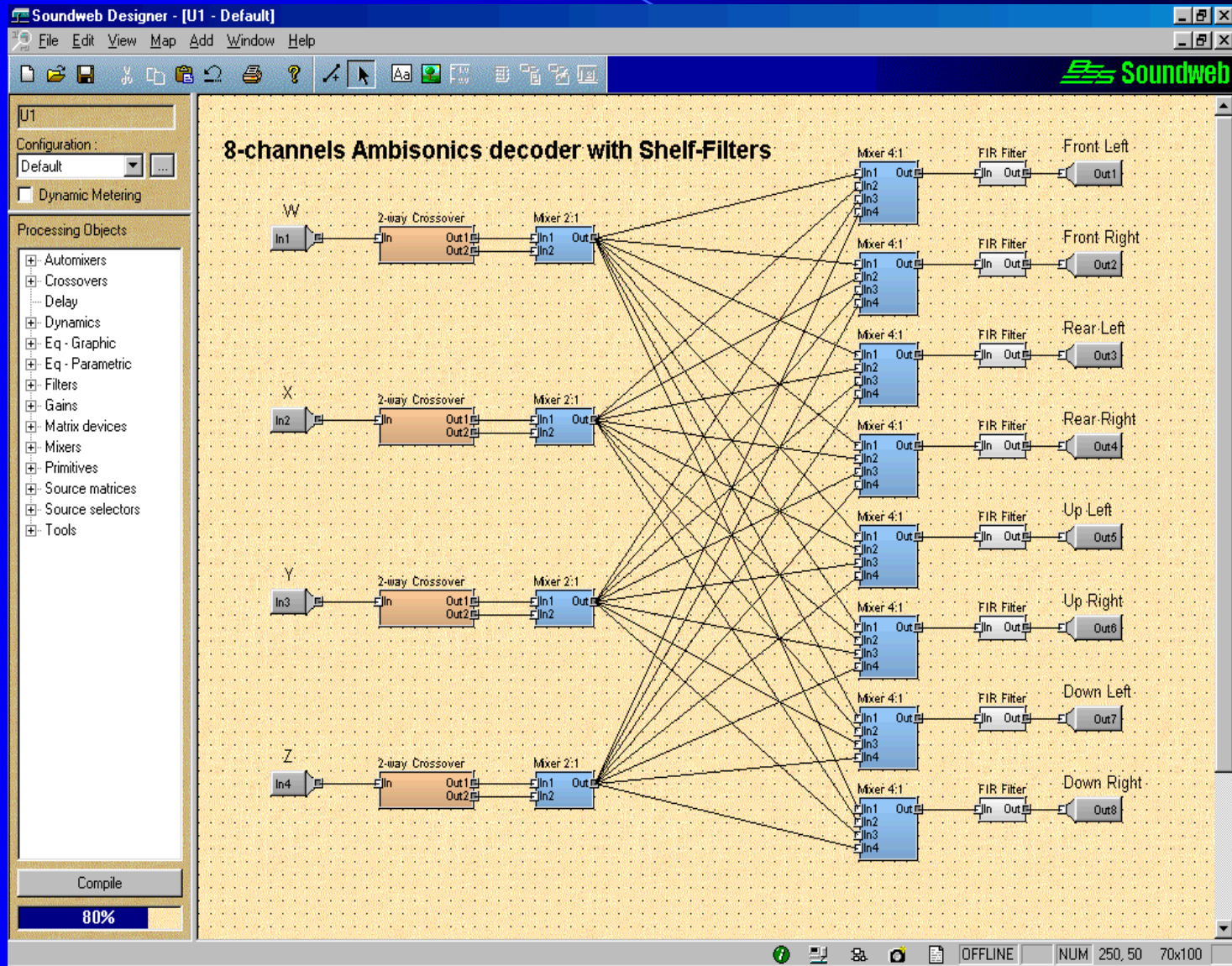


Algoritmo per decoding Ambisonics

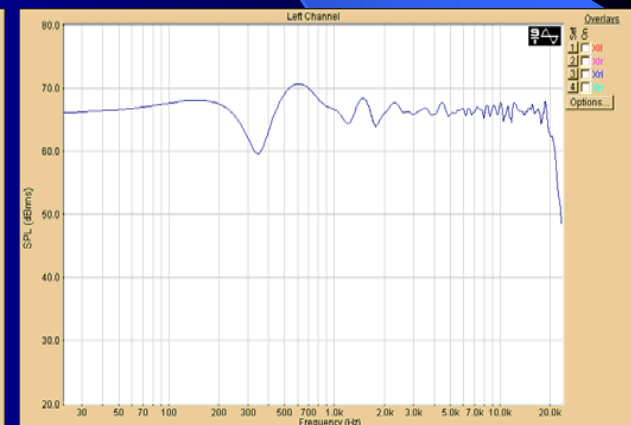
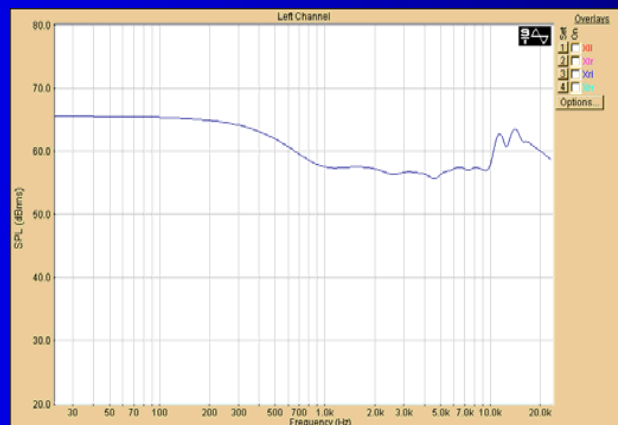
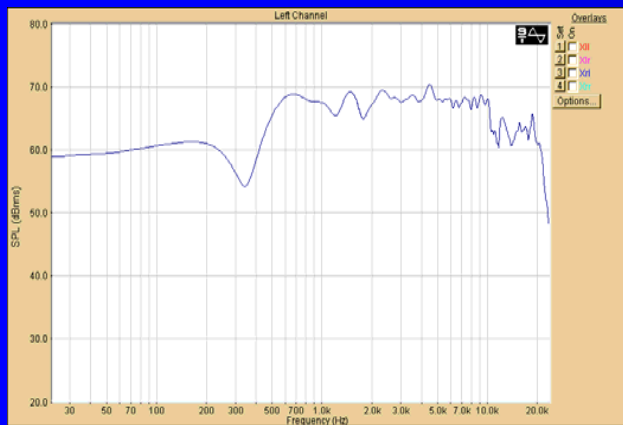
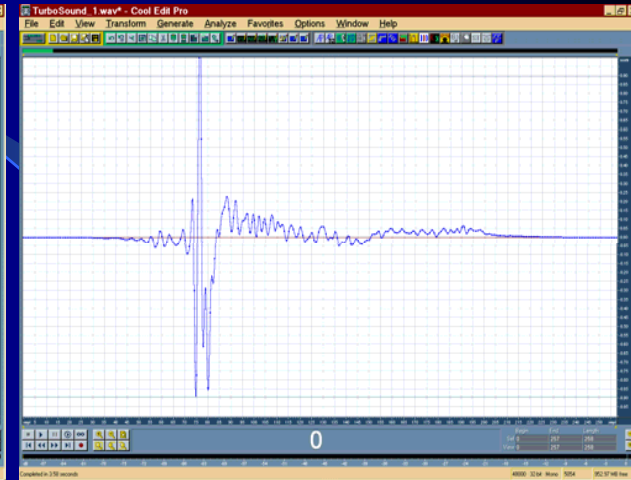
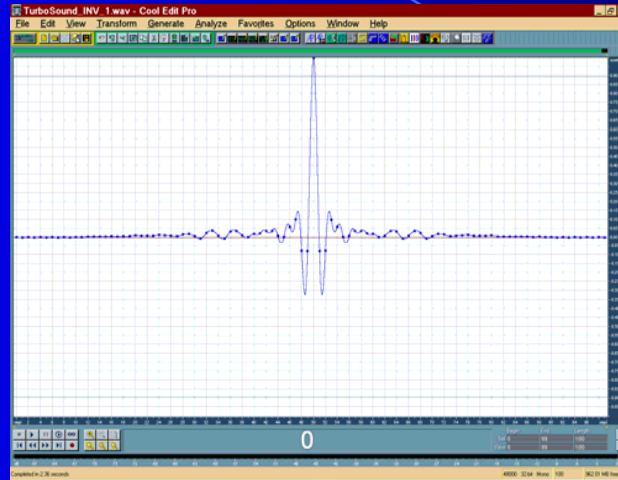
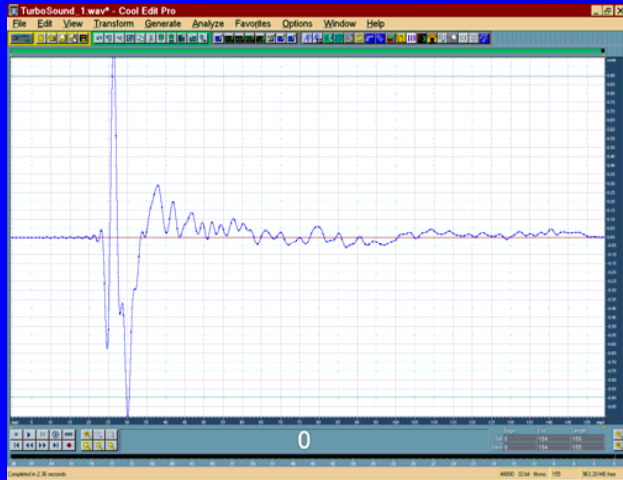


- Il segnale di ciascun altoparlante è semplicemente un “mix” dei 4 canali di trasmissione (WXYZ)
- I guadagni dipendono solo dalla posizione di ciascun altoparlante
- Viene aggiunto un piccolo filtro FIR specifico per ogni altoparlante, per equalizzarne la risposta

Programmazione del decoder sul processore digitale SoundWeb



Effetto dell'equalizzazione FIR di ciascun altoparlante

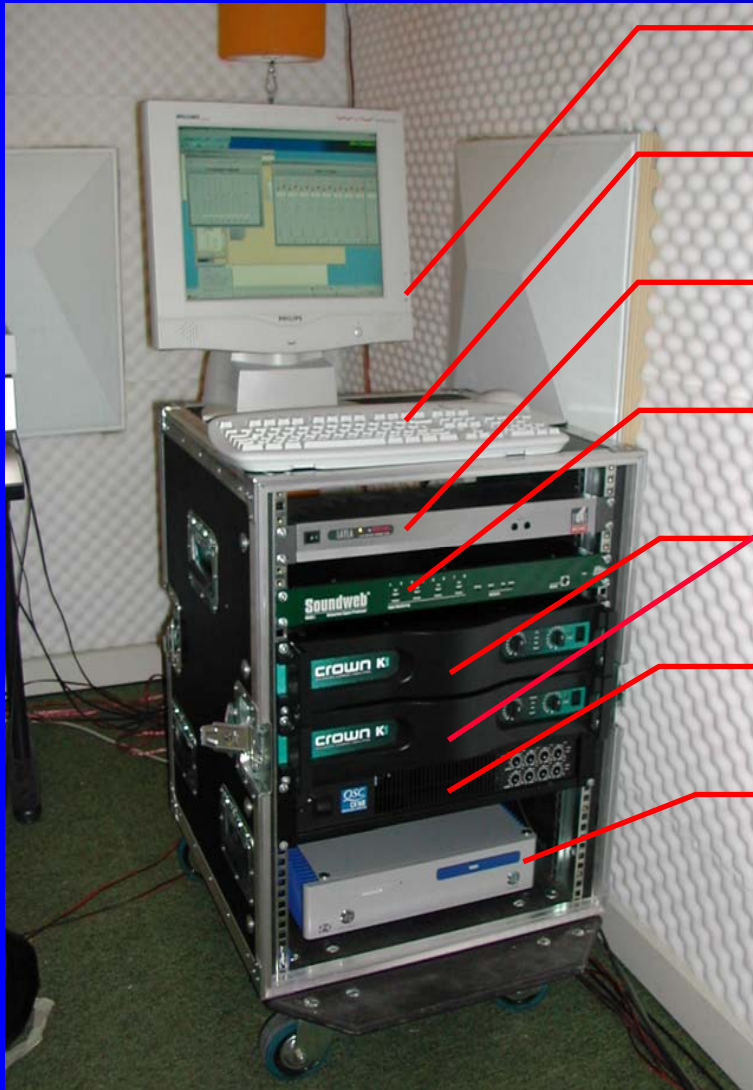


Funzione di trasferimento
misurata dell'altoparlante
Front-left

Filtro inverso a fase
minima (100 coefficienti)

Effetto equalizzante del
filtro

Sistema di gestione audio completo



Philips 15" Brilliance LCD display

Logitech wireless keyboard & mouse

Echo Layla Soundboard (8 ins, 10 outs)

BSS Soundweb digital processor

2 Crown K1 amplifiers

QSC CX168 8-channels amplifier

Signum Data Futureclient fanless PC

Ambiophonics



In sostanza, vengono impiegati simultaneamente il sistema Ambisonics e gli Stereo-Dipoles

Conclusioni

- I risultati dell'auralizzazione mostrano che il progetto di ricostruzione qui analizzato è in grado di produrre una risposta acustica perfettamente congrua con quella del teatro originale
- Al termine dei lavori di ricostruzione, una nuova campagna di rilevamento acustico, effettuata esattamente con la stessa strumentazione e la stessa tecnica di quella iniziale, consentirà di verificare sperimentalmente il grado di similitudine con l'originale
- La metodica dell'auralizzazione ha mostrato di avere raggiunto la maturità tecnica, ed è oggi disponibile a basso costo grazie a piattaforme hardware e software di largo impiego.

Ascolto n. 1 – La Fenice



Overture alle Nozze di Figaro di Mozart

- Brano anecoico
- Convoluzione con I.R. sperimentale (pt. 12)
- Convoluzione con IR simulata

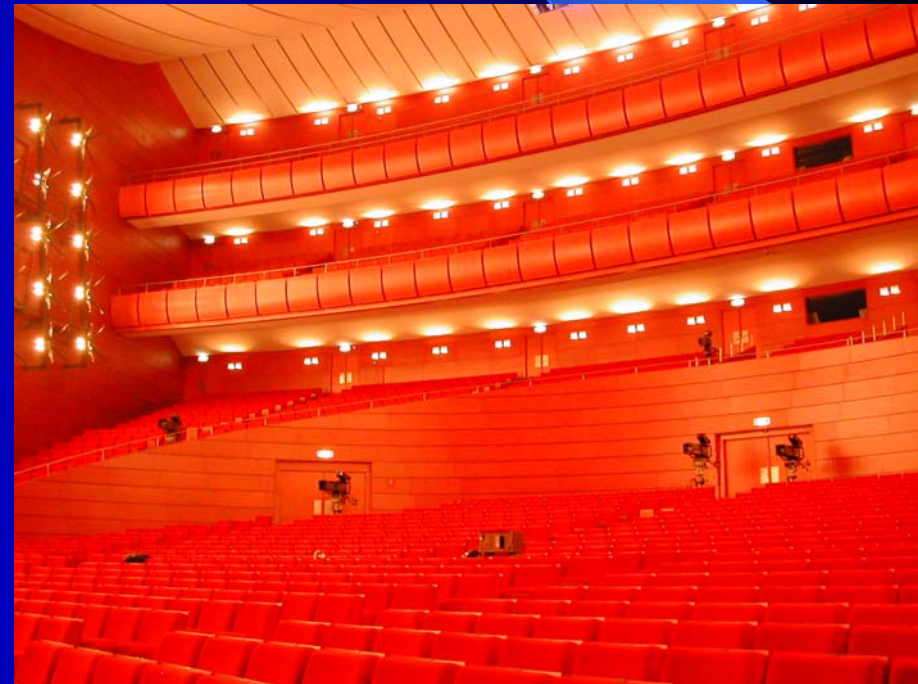
Preludio al primo atto della Traviata di G. Verdi

- Brano anecoico
- Convoluzione con I.R. sperimentale (pt. 12)
- Convoluzione con IR simulata

Ascolto n. 2 – Teatro degli Arcimboldi - Mozart



- Platea, con pannelli



- Platea, senza pannelli

Ascolto n. 3 – La Grande Parigi vs. la Piccola Parigi



- Cité de la Musique, Parigi



- Auditorium di Parma