

*25° Congresso Nazionale AIA - Perugia 21-23 Maggio 1997*

## **UN AMBIENTE INTEGRATO PER IL RENDERING ACUSTICO**

**Marco Giordano, Lorenzo Seno**

marco.giordano@bigfoot.com, lorenzo.seno@bigfoot.com

**Centro Ricerche Musicali - Via Lamarmora, 18 - 00185 Roma**

crm.it@usa.net

<http://www.axnet.it/crm>

<http://www.geocities.com/Vienna/4934>

# UN AMBIENTE INTEGRATO PER IL RENDERING ACUSTICO

**Marco Giordano, Lorenzo Seno**

**Centro Ricerche Musicali - Via Lamarmora, 18 - 00185 Roma**

## SOMMARIO

Uno dei campi più battuti della ricerca elettroacustica degli ultimi decenni è quello della simulazione e riproduzione di campi acustici di sintesi. Lo scopo è quello di riprodurre le caratteristiche spaziali della propagazione del suono in ambienti chiusi dal punto di vista della percezione delle direzioni di provenienza e dei volumi implicati (riverbero). L'ambiente software qui presentato fornisce, sotto certe ipotesi semplificative, gli strumenti per l'analisi e la simulazione audio della propagazione del suono in ambienti chiusi, utilizzando il modello a sorgenti virtuali esteso al caso di poliedri concavi (con angoli tra pareti, cioè, anche maggiori di  $180^\circ$ ) per ricavare la risposta impulsiva della cavità, una volta fissata la posizione della sorgente e dell'ascoltatore. Il simulatore richiede in ingresso una descrizione della geometria delle pareti e delle loro caratteristiche acustiche, e un segnale anecoico da auralizzare.

Le simulazioni effettuate con segnali dotati di transienti rapidi e ripetuti (che normalmente mettono in difficoltà i sistemi di riverbero artificiale) mostrano come siano ottenibili per questa via auralizzazioni del tutto "naturali" all'ascolto e, pur nei limiti delle semplificazioni adottate, sufficientemente "fedeli" da costituire una base per un metodo di validazione acustica preventiva del progetto architettonico di sale da concerto o da conferenza, o comunque di ambienti dove la propagazione del suono e dei rumori costituisca un elemento rilevante.

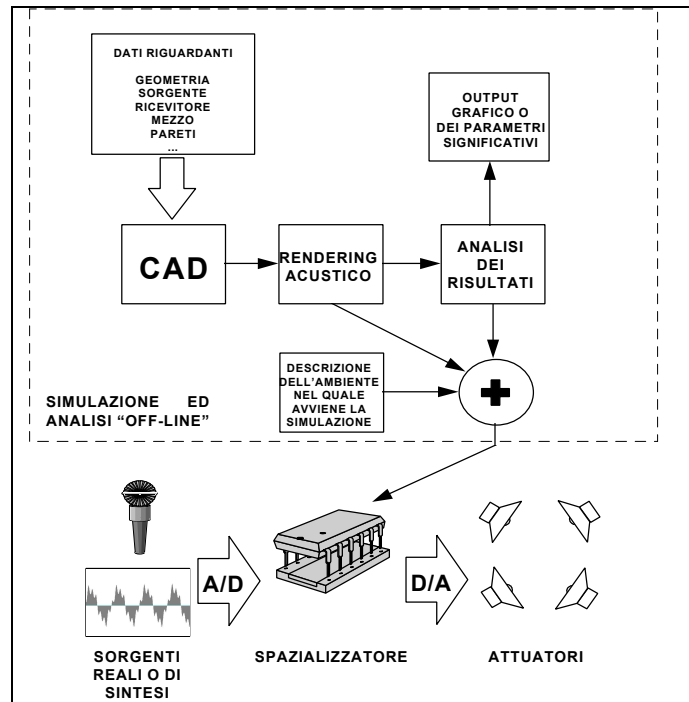
**Introduzione: gli approcci al problema della simulazione delle caratteristiche acustiche degli ambienti chiusi.**

I primi studi sulla simulazione di ambienti (risalenti ai primi anni 60 ad opera di M. Schroeder) si orientarono verso la progettazione di filtri digitali che riproducevano le caratteristiche percettive primarie della risposta acustica; si trattava quindi, più che di simulazioni, dell'implementazione dei primi algoritmi di riverbero. Da allora i tipi di approccio al problema si sono distinti in due famiglie: una, che prende le mosse proprio dai primi lavori di Schroeder, privilegia, rispetto alla precisione, la rapidità di calcolo e la possibilità di modificare in tempo reale i parametri della simulazione; l'altra si pone come scopo principale la ricerca di una soluzione più accurata e generale al problema

della propagazione, anche a costo di un notevole incremento delle risorse di calcolo impiegate.

La storia della costruzione delle sale da concerto è seminata di “disastri”, come ad esempio quello della Philharmonic Hall di New York. Si comprende allora quanto sia importante avere a disposizione uno strumento di simulazione e di analisi quanto più accurati possibile, (oltre che aderenti alla realtà fisica), della propagazione del campo acustico.

Uno strumento di questo genere permette di rilevare eventuali errori di progetto fin dalle prime fasi, scongiurando la necessità di costosi e mai soddisfacenti rifacimenti post operam. La figura 1 rappresenta lo schema di principio di un generico simulatore di acustica di ambienti; nella prima parte, racchiusa nel rettangolo tratteggiato, sono riportati i blocchi relativi all'analisi ed alla simulazione in tempo differito; tutti gli algoritmi che implementano soluzioni accurate di tale problema, infatti,



**Figura 1 - Schema di simulazione dell'acustica di ambienti**

richiedono ingenti risorse di calcolo e non sono in genere eseguibili in tempo reale. Attraverso un ambiente CAD (o un qualsiasi standard di descrizione geometrica) l'utente fornisce al blocco di simulazione vera e propria le specifiche relative allo scenario da simulare; i risultati della simulazione possono essere usati per analisi acustiche (es. calcolo del tempo di riverbero, energia della risposta....) o per la fase successiva che è quella di auralizzazione; qui, nel blocco collocato nell'ultima riga dello schema, convergono i risultati della simulazione, sotto forma di risposta impulsiva o di funzione di trasferimento, oppure ancora come un insieme di parametri che esprimono “in grande” le caratteristiche acustiche dell'ambiente; è inoltre in linea di principio possibile fornire in questa fase una descrizione dell'ambiente in cui avviene l'auralizzazione stessa, in modo da compensarne le caratteristiche (utilizzando per esempio algoritmi per la cancellazione dell'eco in tempo reale). Nell'ultima fase di elaborazione (che può avvenire anche in tempo reale se si dispone di sufficiente potenza di calcolo) tutte le informazioni raccolte nella fase precedente vengono usate per la convoluzione del segnale audio in ingresso con la risposta impulsiva sintetizzata e quindi per la sua diffusione attraverso altoparlanti o cuffie.

Per generare la funzione di trasferimento dell'ambiente esistono vari approcci. Il primo utilizza l'analisi modale, risolvendo l'equazione d'onda per le condizioni al contorno date dalle pareti. Questi metodi sono stati utilizzati solo per geometrie semplici (parallelepipedi) a causa delle difficoltà formali che si presentano nei casi più generali.

Un secondo approccio è quello del “ray tracing” acustico. Il metodo consiste in linea di principio nel tracciare raggi uscenti dalla sorgente, e nel seguirne il percorso attraverso le riflessioni sulle pareti, fino all’ascoltatore. Ogni cammino comporta un tempo di ritardo che è misurabile dalla lunghezza del cammino stesso, e dà luogo ad una componente della risposta impulsiva..

Un terzo approccio consiste nel considerare che una sorgente riflessa da una superficie può essere schematizzata con la sovrapposizione, a quella originale, di una sorgente “virtuale” collocata al di là della superficie in posizione di simmetria speculare. Questo metodo, noto anche in elettrodinamica, è quello adottato nel sistema qui presentato. A nostro giudizio esso è quello che permette il maggiore grado di flessibilità nel livello di approssimazione.

### **Il modello fisico della cavità e l’algoritmo di generazione delle sorgenti virtuali.**

La cavità viene considerata come un sistema lineare, il cui ingresso è rappresentato dal segnale audio anecoico, pensato come applicato nella posizione della sorgente, mentre l’uscita è il segnale che descrive il campo acustico, al variare del tempo, nel punto in cui è collocato l’ascoltatore. La risposta impulsiva è, in generale, una funzione di diverse variabili oltre a quella temporale. Tuttavia, una volta che si siano fissate la posizione della sorgente e dell’ascoltatore e si sia fatta l’ipotesi che questi sono puntiformi ed isotropi dal punto di vista dell’intensità di emissione e della sensibilità di ricezione, la risposta impulsiva si semplifica notevolmente dipendendo dalla sola variabile temporale. Il problema si riduce, allora, alla determinazione della perturbazione acustica in un punto fissato della cavità (che costituisce un insieme coerente di condizioni al contorno), causata dall’emissione di una sorgente puntiforme in un altro punto dello spazio.

Nel modello a sorgenti immagine le condizioni al contorno, imposte dalla presenza delle pareti (delle quali deve essere fornita l’impedenza), sono tradotte nel reticolo di sorgenti virtuali, ottenute dalle riflessioni multiple sulle pareti, che si distribuiscono intorno alla cavità. La sovrapposizione dei campi emessi nello spazio libero dalle sorgenti virtuali fornisce (in ipotesi di linearità) la perturbazione acustica nel punto in cui è stato collocato l’ascoltatore. [Allen, Berkley 1978] hanno fornito una dimostrazione dell’equivalenza tra il modello a sorgenti virtuali e quello basato sui modi normali per geometrie a parallelepipedo rettangolo. A differenza dell’analisi modale, il modello a sorgenti virtuali opera nel dominio del tempo rendendo più immediato il trattamento di segnali con evidenti caratteristiche impulsive.

La generazione del reticolo delle sorgenti virtuali procede per due passi: nel primo, a partire dalla posizione della sorgente reale, vengono generate le sorgenti “valide” (ovvero quelle visibili da almeno un punto della cavità); nel secondo, fissata la posizione dell’ascoltatore, vengono selezionate solo quelle visibili dal punto di ascolto prescelto. In questa fase dell’elaborazione sono stati trovati due metodi di ottimizzazione dell’algoritmo: il primo permette, nel caso di poliedri concavi, di diminuire drasticamente il numero di sorgenti virtuali generate e quindi di risparmiare notevoli risorse di calcolo. Il secondo, introducendo un criterio per la limitazione del numero delle sorgenti virtuali generate, basato sul calcolo preventivo dell’attenuazione totale (ovvero quella dovuta alla propagazione più quella dovuta all’assorbimento delle pareti) subita dalla sorgente virtuale, permette di ridurre la complessità del problema rendendolo trattabile.

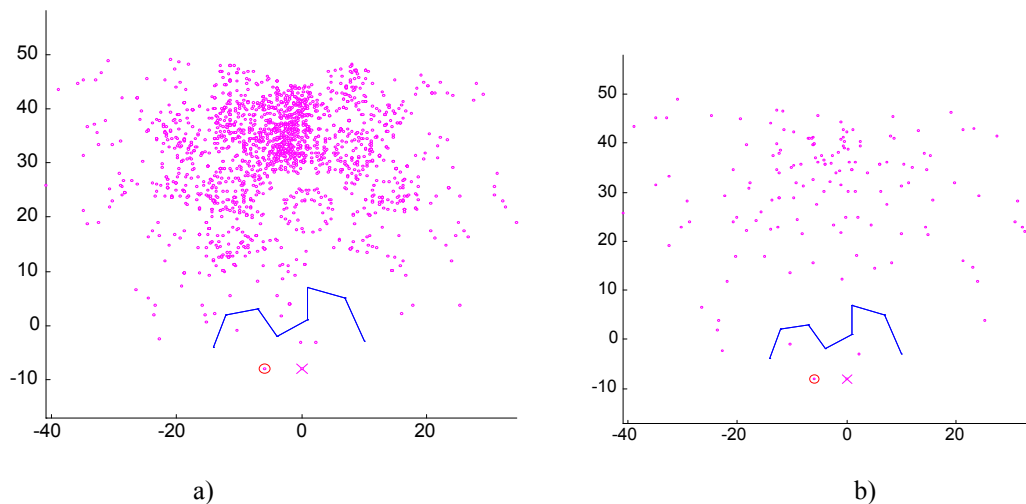


Figura 2 - L'ottimizzazione nel caso di cavità concave permette di diminuire drasticamente il numero di SV generate. In a) sono 2141, mentre in b) sono 147. La sorgente reale è indicata da un cerchio.

Una volta generate le strutture dati che contengono le informazioni sul reticolo delle sorgenti virtuali, il sistema genera la risposta all'impulso e quindi il filtro FIR che verrà usato per la convoluzione col segnale di ingresso.

A differenza di altre implementazioni simili, questo filtro è stato sintetizzato in modo rigoroso, limitando la banda dell'impulso di eccitazione a 22.050KHz con una finestra di Hanning, anziché collocando "brutalmente" una singola tappa sull'istante di campionamento più vicino al corrispondente ritardo. In questo modo l'errore sulle fasi è minimo e vengono quindi ricostruiti in modo rigoroso i fenomeni di interferenza. E' per questo che segnali anche con forti componenti impulsive vengono riprodotti senza quelle asperità dovute agli echi distinti che si manifestano in simulatori meno accurati.

E' stata implementata una modellizzazione del filtraggio dell'aria che si è rivelata molto efficace, soprattutto nella seconda parte della risposta, nel fornire all'ascoltatore la sensazione di spazialità tipica dei segnali reali. Il modello è stato ricavato dall'analisi di misure di attenuazione reperite in letteratura, ed è basato su un filtro passa-basso ad un polo la cui collocazione varia in funzione della distanza dalla sorgente con una legge esponenziale della quale sono stati stimati i parametri. L'implementazione della dipendenza di tale filtro con la distanza è importante ai fini di una corretta simulazione delle prime riflessioni che, essendo le più ravvicinate, risentono poco o affatto dell'influenza dell'aria.

E' stata inoltre realizzata un'auralizzazione binaurale basata sulla sintesi di due grandezze importanti nella percezione delle caratteristiche direzionali del segnale acustico: la differenza di intensità interaurale (IID: differenza di potenza che arriva alle due orecchie per effetto della distanza interaurale e dell'"ombra" della testa) e la differenza di tempo interaurale (ITD: ritardo con cui il segnale viene percepito dalle due orecchie).

### **Limiti e ulteriori sviluppi possibili.**

Il problema più rilevante degli algoritmi di generazione delle sorgenti virtuali è certamente la complessità computazionale. Il numero di sorgenti valide generate è propor-

zionale a  $Nk$  dove  $N$  è il numero di pareti della cavità e  $k$  è l'ordine di riflessione (strettamente correlato con la distanza); il numero di sorgenti viene poi "potato" dal criterio di visibilità da uno specifico punto, riducendo la crescita ad un andamento del tipo  $k^3$ . Sic stantibus rebus il problema sembrerebbe intrattabile. L'introduzione invece di un criterio di limitazione basato sull'attenuazione (basta supporre una riflettività delle pareti minore di 1) sovrappone a questi andamenti esplosivi un esponenziale decrescente, riportando il problema ad essere trattabile e rendendo l'algoritmo terminale in tempo polinomiale. Il numero delle sorgenti visibili in questo modo decresce esponenzialmente, superando l'apparente paradosso (alla Olberts) introdotto dagli andamenti cubici.

Un altro problema nasce dal meccanismo di costruzione della risposta all'impulso, che nel sistema qui presentato a tutt'oggi presuppone una propagazione geometrica sorgente virtuale-ascoltatore. Così facendo si trascurano le caratteristiche ondulatorie della propagazione, ignorando cioè la diffrazione attorno ai diaframmi rappresentati dalle pareti. L'approssimazione geometrica è tanto più legittima quanto maggiore è il rapporto tra dimensioni delle pareti e lunghezza d'onda. In altre parole, essa può essere accettabile per locali grandi e frequenze non troppo basse. Al di fuori di questi limiti, occorrerebbe calcolare gli effetti della diffrazione, con notevoli appesantimenti dei tempi di calcolo [Hidaka-95].

Infine, nell'algoritmo non viene considerata la diffusione. Questa approssimazione sarebbe inaccettabile se le pareti fossero diffusori lambertiani. In realtà il problema è meno importante perché le superfici reali sono ben lontane dalla condizione di diffusore ideale [Hidaka-95] ma sono piuttosto più simili a riflettori ideali.

### **Risultati ottenuti.**

L'ascolto delle simulazioni effettuate, anche per suoni di tipo "impulsivo" come il clavicembalo, è molto soddisfacente. L'auralizzazione binaurale in cuffia, rispetto al corrispondente segnale anecoico, provoca una percepibile sensazione di esternalizzazione.

Tutto ciò è un indizio della sensatezza delle approssimazioni fatte e della correttezza dell'implementazione, ma sarebbero necessari dei riscontri sperimentali, sia confrontando le risposte all'impulso simulate con quelle misurate, sia verificando le reazioni di ascoltatori con test psicoacustici.

[Pompetzki, Blauert-94], che adottano una metodologia di simulazione simile, ma non identica, a quella qui presentata, hanno ottenuto verifiche sperimentali effettuando sia misure che test psicoacustici.

Data la somiglianza degli approcci, i risultati da loro ottenuti possono essere considerati incoraggianti anche per il sistema qui presentato, ma ciò non elimina né l'esigenza di una validazione specifica del metodo, né la necessità dell'introduzione di ulteriori miglioramenti del modello, secondo le linee già indicate.

### **Bibliografia**

[Allen, Berkley-79]

Allen J.B., Berkley D.A. "Image Method for Efficiently Simulating Small-Room Acoustics" *Journal of Acoustical Society of America*. 65(4) pp.943-950; 1979.

[Borish-84]

Borish J. "Extension of the image model to arbitrary polyhedra" *Journal of Acoustical Society of America*. 75(6) pp.1827-1836; 1984.

- [Cammarata, Fichera, Graziani, Marchese-95]  
Cammarata G., Fichera A., Graziani S., Marchese M. "A Virtual Instrument for the Analysis of Objective Acoustic Parameters" CIARM Proc. pp.295-300; 1995.
- [Carletti, Pedrielli, Prodi, Stanzial-95]  
Carletti E., Pedrielli F., Prodi N., Stanzial D. "The Elettra sound project: preliminary experimental results" CIARM Proc. pp.159-164; 1995.
- [Farina, Rocco, Sauro-95]  
Farina A., Rocco L., Sauro S. "Attendibilità dei metodi computerizzati di auralizzazione nello studio acustico di un palazzetto dello sport" CIARM Proc. pp.287-294; 1995.
- [Gardner-92]  
Gardner W.G. "The Virtual Acoustic Room" Tesi di dottorato - MIT Media Lab - 1992.
- [Giordano-97]  
Giordano M. "Modellizzazione e simulazione del campo acustico in cavità a geometria e caratteristiche acustiche variabili" Tesi di laurea - Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma "La Sapienza" - 1997.
- [Harris-63]  
Harris C.M. "Absorption of Sound in Air in the Audio Frequency Range" Journal of Acoustical Society of America. 35(1) pp.11-18; 1963.
- [Hidaka-95]  
Hidaka T. "Sound Field Simulation, -Some Consideration of Related Problems for Wave Theoretical Auralization." CIARM Proc. pp.11-22; 1995.
- [Jot, Warusfel-95]  
Jot J.M., Warusfel O. "Spat~: A Spatial Processor for Musicians and Sound Engineers" CIARM Proc. pp.177-182; 1995.
- [Kendall-95]  
Kendall G.S. "The Decorrelation of Audio Signals and Its Impact on Spatial Imagery" Computer Music Journal. 19(4) pp.71-87; 1995.
- [Kendall-95]  
Kendall G.S. "A 3-D Sound Primer: Directional Hearing and Stereo Reproduction" Computer Music Journal. 19(4) pp.23-46; 1995.
- [Kendall, Martens, Decker-85]  
Kendall G.S., Martens W.M., Decker S.L. "Spatial Reverberation: Discussion and Demonstration" Current Directions in Computer Music Research. Cap. 7. pp.65-87; 1985.
- [Lee-74]  
Lee J.B. "Information Theory, Wavefront Reconstruction and the Concert Hall Problem" Acustica. 30 pp.196-200; 1974.
- [Lee-89]  
Lee J.B. "Note: Why Concert Halls are not ergodic" Journal of Acoustical Society of America. 85(6) pp.2680-2681; 1989.
- [Lee-95]  
Lee J.B. "Feynman's Problem - Waves in 3 Dimensional Space" CIARM Proc. pp.165-170; 1995.
- [Loomis, Hebert, Cicinelli-90]  
Loomis J.M., Hebert C., Cicinelli J.G. "Active localization of virtual sound" Journal of Acoustical Society of America. 88(4) pp.1757-1764; 1990.
- [Malham, Myatt-95]  
Malham D.G., Myatt A. "3-D Sound Spatialization using Ambisonic Techniques" Computer Music Journal. 19(4) pp.58-70; 1995.

[Moore-90]

Moore F.R. "Elements of computer music" Prentice-Hall, Englewoods Cliffs, NJ 1990.

[Moorer-79]

Moorer J.A. "About this reverberation business" Computer Music Journal. 3(2) pp.13-28; 1979.

[Pierce -88]

Pierce J.R. "La scienza del suono" Zanichelli, Bologna 1988.

[Pompetzki, Blauert-94]

Pompetzki W., Blauert J. "A study on the Perceptual Authenticity of Binaural Room Simulation" Wallace Clement Sabine Centennial Symposium Proc. pp.81-84; 1994.

[Rindel, Christensen-95]

Rindel J.H., Christensen C.L. "An Auralization Tool for Studying the Interaction Between Room and Music" CIARM Proc. pp.201-206; 1995.

[Rocchesso-95]

Rocchesso D. "The Ball within the Box: A Sound-processing Metaphor" Computer Music Journal. 19(4) pp.47-57; 1995.

[Sakamoto, Gotoh, Kogure, Shimbo, Clegg-81]

Sakamoto N., Gotoh T., Kogure T., Shimbo M., Clegg A.H. "Controlling Sound Image Localization in Stereophonic Reproduction" Journal of the Audio Engineering Society. 29(11) pp.794-798; 1981.

[Schroeder-61]

Schroeder M.R. "Improved Quasi-Stereophony and "Colorless" Artificial Reverberation" Journal of Acoustical Society of America. 33(8) pp.1061-1064; 1961.

[Schroeder-70]

Schroeder M.R. "Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces" Journal of Acoustical Society of America. 47(2:1) pp.424-431; 1970.

[Schroeder-87]

Schroeder M.R. "Statistical Parameters of the Frequency Response Curves of Large Rooms" Journal of the Audio Engineering Society. 35(5) pp.299-306; 1987.

[Searle, Braida, Davis, Colburn-76]

Searle C.L., Braida L.D., Davis M.F., Colburn H.S. "Model for Auditory Localization" Journal of Acoustical Society of America. 60(5) pp.1164-1175; 1976.

[Toole-70]

Toole F.E. "In-Head Localization of Acoustic Images" Journal of Acoustical Society of America. 48(4:2) pp.943-949; 1970.