

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA**  
*“La Sapienza”*

Facoltà di Ingegneria  
Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

**MODELLIZZAZIONE E SIMULAZIONE DEL CAMPO  
ACUSTICO IN CAVITA' A GEOMETRIA E  
CARATTERISTICHE ACUSTICHE VARIABILI**

RELATORE

Prof. Piero MARIETTI

CANDIDATO

Marco GIORDANO  
matricola 09052667

**ANNO ACCADEMICO**  
**1995-1996**

Ad ogni *caminante*

## Ringraziamenti

Desidero ringraziare Lorenzo Seno per la disponibilità e l'apporto significativo dati a questo lavoro; la sua esperienza nel campo della ricerca e la capacità di condividere e indirizzare la mia curiosità, sono state un solido fondamento per la costruzione di un dialogo che, spero, sia sempre più fruttuoso. Un grazie particolare anche a Marco Palumbi al quale sono ricorso in molte occasioni, trovando sempre disponibilità ed estrema chiarezza nell'aiuto offerto; allo stesso modo ricordo con piacere i suggerimenti e gli scambi di posta elettronica con Alessandro Fiorito che, sebbene lontano geograficamente, ha saputo far sentire la sua presenza. Non posso dimenticare (*last but not least*) l'incontro con Michelangelo Lupone e Laura Bianchini, dal quale è nata una collaborazione foriera di tante idee che spero si realizzino come nel caso di questo lavoro.

E dopo aver ricordato ognuno desidero ringraziare tutti: tutto il Centro Ricerche Musicali per il clima amichevole e stimolante che si è instaurato e tutti coloro che, usualmente vicini, lo sono stati ancora di più in questa occasione.

# INDICE

<b>Prefazione</b>	<b>1</b>
Organizzazione dell'esposizione	4
<b>1.Introduzione</b>	<b>7</b>
1.1 Criteri e parametri di valutazione dell'acustica di ambienti	7
1.2 Algoritmi di riverberazione	9
1.3 Simulazione di ambienti e acustica architettonica	13
<b>2. Il modello</b>	<b>19</b>
2.1 Scopi del progetto e ipotesi di base	19
2.2 Teoria del modello a sorgenti virtuali	21
2.3 Limiti e vantaggi del modello a sorgenti virtuali	26
<b>3. L'algoritmo e l'implementazione</b>	<b>31</b>
3.1 I dati di ingresso	31
3.2 L'algoritmo	32
3.2.1 Generazione del reticolo di SV: validità di una SV	
nel caso di cavità convessa	32
3.2.2 Generazione del reticolo di SV: criteri per la	
terminazione dell'albero delle SV	33

3.2.3	Visibilità di una SV nel caso di cavità convessa	36
3.2.4	Generazione del reticolo di SV: validità di una SV nel caso di cavità concava	40
3.2.5	Visibilità di una SV nel caso di cavità concava	42
3.3	Sintesi della risposta impulsiva	44
3.3.1	Le pareti	44
3.3.2	L'attenuazione dovuta alla propagazione	45
3.3.3	L'assorbimento dell'aria	46
3.3.4	Sintesi della risposta impulsiva nel dominio tempo-discreto	48
3.3.5	Cenni sull'auralizzazione binaurale	51
<b>4.</b>	<b>Risultati e conclusioni</b>	<b>56</b>
4.1	La complessità	56
4.2	Un esempio di simulazione	59
4.3	Conclusioni ed approfondimenti	67
	<b>Bibliografia</b>	<b>69</b>

## **Prefazione**

Uno degli argomenti più battuti ed affascinanti della ricerca elettroacustica degli ultimi decenni è certamente quello che riguarda la simulazione e la riproduzione di campi acustici di sintesi. Gli sforzi prodotti per ottenere delle soluzioni soddisfacenti al problema sono giustificati dal gran numero di campi di applicabilità di un tale tipo di conoscenze: dall'acustica di ambienti fino alla soppressione attiva del rumore, la necessità di controllare nel dettaglio (talvolta anche in tempo reale) ogni caratteristica saliente della percezione acustica è sempre crescente, ed abbraccia ambiti di ricerca sempre più vasti. Ad esempio l'ATA (Associazione Tecnica dell'Automobile, gruppo FIAT) ha ritenuto opportuno incoraggiare questo lavoro di tesi con un premio di laurea, per la ricaduta che questo tipo di ricerche può avere nell'ambito dello studio del rumore complessivo prodotto dagli autoveicoli. L'aumento costante delle capacità di calcolo delle macchine diffuse anche su grande scala, consente, inoltre, di pensare all'implementazione di algoritmi e modelli in grado di descrivere la realtà con un crescente grado di accuratezza.

L'idea di questo lavoro di tesi è nata nell'ambito di una collaborazione con il Centro Ricerche Musicali, che da tempo è impegnato sia sul fronte della promozione del sodalizio tra ricerca scientifica applicata e ricerca musicale, sia su quello della didattica e della produzione e diffusione di opere.

Il problema della simulazione dell'acustica di ambienti è stato affrontato sin dai primi anni 60 con gli studi di M. Schroeder sugli algoritmi di riverberazione. 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, l'efficienza di calcolo e la possibilità di modificare in tempo reale i parametri della simulazione; l'altra si occupa di trovare una soluzione più accurata e più generale al problema della propagazione. Le tecniche più usate

dagli ambienti di rendering acustico che appartengono alla seconda famiglia sono il ray tracing e la generazione delle sorgenti immagine.

In questo lavoro di tesi viene presentata l'implementazione di un algoritmo di simulazione e riproduzione del campo acustico generato in una cavità tridimensionale di forma qualsiasi e basato, appunto, sul modello a sorgenti immagine. La cavità viene considerata come un sistema lineare ad un ingresso ed una uscita del quale si intende sintetizzare la risposta impulsiva. L'ingresso è rappresentato dal segnale audio anecoico, ovvero privo di qualsiasi caratteristica che all'ascolto induca la percezione di una sua collocazione all'interno di uno spazio; l'uscita è il segnale che descrive il campo acustico, al variare del tempo, nel punto in cui è stato 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.

Si è detto che modello sul quale si basa il simulatore è quello delle sorgenti immagine: esso consiste nel tradurre le condizioni al contorno, imposte dalla presenza delle pareti, in un reticolo opportuno di sorgenti virtuali distribuite 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. Uno dei grossi vantaggi di questo tipo di modello è che opera nel dominio del tempo; i segnali con cui abbiamo a che fare sono, nella quasi totalità dei casi, fortemente non-stazionari e quindi, per essere trattati propriamente, necessitano di un modello che descriva facilmente, ma accuratamente, le

situazioni transitorie. La ricerca di una soluzione espressa in funzione dei modi normali, richiederebbe il calcolo di tutti i modi all'interno della banda di interesse più le correzioni per quelli subito al di fuori. Nel dominio del tempo ogni sorgente immagine contribuisce alla risposta nello stretto ambito della sua durata; contrariamente ai modi normali che intervengono con involucri esponenziali per tutta la durata della risposta impulsiva. In questa fase dell'elaborazione è stata trovata un'ottimizzazione (non documentata in nessuno dei simulatori descritti nella letteratura raccolta) dell'algoritmo nel caso di poliedri concavi (che avendo pareti che formano angoli maggiori di  $180^\circ$  sono i più diffusi nella realtà), che permette di diminuire drasticamente il numero di sorgenti virtuali generate e quindi di risparmiare notevoli risorse di calcolo. E' stato aggiunto (rispetto ai normali criteri riportati in letteratura) un criterio diverso per la terminazione dell'albero  $n$ -ario che contiene le sorgenti virtuali generate, basato sul calcolo dell'attenuazione totale (ovvero quella dovuta alla propagazione più quella dovuta all'assorbimento delle pareti) subita dalla sorgente virtuale in questione; questo criterio si è rivelato molto utile in quanto ha permesso di selezionare, tra le sorgenti da generare, solo quelle che contribuiscono effettivamente alla risposta impulsiva.

Una volta generate le strutture dati che contengono le informazioni sul reticolo delle sorgenti virtuali, si passa alla fase di generazione della risposta impulsiva vera e propria e quindi del filtro FIR che verrà usato per la convoluzione col segnale di ingresso. Particolare attenzione è stata dedicata alla sintesi di questo filtro: ogni impulso proveniente da una sorgente virtuale è stato campionato solo dopo un opportuno filtraggio a 22.050KHz con una finestra scelta tra le più comunemente utilizzate (Hanning, Hamming Blackmann...), piuttosto che collocato "brutalmente" in corrispondenza della tappa più vicina del filtro FIR, come appare, invece, dalle realizzazioni di altri simulatori. In questo modo diminuisce considerevolmente l'errore sulle fasi e vengono ricostruiti con maggiore precisione i fenomeni di interferenza tipici delle



situazioni reali; inoltre, segnali anche con forti caratteristiche impulsive vengono riprodotti senza le sbavature e le discontinuità tipiche dei 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, a mio avviso, importante ai fini di una corretta simulazione delle prime riflessioni che, essendo le più ravvicinate, risentono poco o affatto dell'influenza dell'aria.

Le stime di grandezze usualmente rappresentative dell'acustica di ambienti, fatte basandosi sulle simulazioni, hanno fornito risultati in buon accordo con le previsioni delle leggi ricavate empiricamente. I risultati dell'elaborazione del simulatore possono essere analizzati con varie metodologie, alcune delle quali sono proposte nell'ultimo capitolo, oppure venire elaborati ulteriormente per essere ascoltati tramite cuffia. E' stata, infatti, realizzata un'auralizzazione binaurale dei risultati basata sul controllo di due grandezze importanti nella percezione delle caratteristiche spaziali del segnale acustico: la differenza di intensità interaurale (in inglese IID: rappresenta la differenza di potenza che arriva alle due orecchie per effetto dell'"ombra" della testa) e la differenza di tempo interaurale (in inglese ITD: rappresenta il ritardo con cui il segnale viene percepito dalle due orecchie).

La scelta del linguaggio di programmazione per l'implementazione dell'algoritmo è caduta sul C++; le possibilità di astrazione di un linguaggio *object-oriented* sono state essenziali, in questo caso, nella fase di progetto, di realizzazione e soprattutto di debugging del software e hanno permesso di realizzare un modello flessibile e aperto all'implementazione di ulteriori approfondimenti.

## **Organizzazione dell'esposizione**

Nel capitolo introduttivo viene esposta una panoramica degli algoritmi di simulazione più usati nella storia di questo problema. Si definiscono, inoltre, le grandezze tradizionalmente utilizzate per la caratterizzazione acustica degli ambienti e che sono utili ai fini della comprensione degli argomenti trattati successivamente.

Il secondo capitolo è dedicato ad una descrizione degli scopi del progetto e alla spiegazione delle basi teoriche del modello a sorgenti virtuali. Se ne trattano anche i limiti, i vantaggi e gli ambiti di applicabilità.

Nel terzo capitolo è spiegato l'algoritmo utilizzato per l'implementazione del modello e vengono dati dei cenni riguardo ai metodi di auralizzazione impiegati.

Nel capitolo conclusivo viene presentato un esempio di simulazione ed alcuni esempi di analisi dei risultati ottenuti.

## 1. Introduzione

*“Mentre una volta l’architettura, la statica, e la funzione determinavano l’ampiezza di uno spazio, oggi grazie a particolari strumenti elettronici possiamo trasformare in un grande spazio acustico una piccola sala. In questo modo si allungano i tempi di risonanza, in quanto non si lavora solamente con i millesimi di secondo e i secondi, ma anche con il campo del minuto, che deve essere nuovamente riscoperto alla musica.*

*Attraverso il numero e la disposizione spaziale e direzionata degli altoparlanti vengono scelte precise origini e direzioni acustiche, dirette o indirette. [...] Per i motivi citati, un’esecuzione effettuata in spazi differenti non sarà mai uguale a se stessa, cioè ripetitiva; **lo spazio a disposizione dovrà essere, sempre e comunque, studiato in modo nuovo, dovrà essere <<esaudito>>**”*

Così scrive H.P.Haller, ingegnere del suono, nel programma dell’allestimento del *Prometeo* di Luigi Nono a Milano, nel 1985. Il pensiero di Haller è rappresentativo della ricerca di molti compositori del nostro (e non solo del nostro) secolo. L’opera citata è stata un coraggioso passo avanti proprio nella ricerca del controllo dello spazio come parametro compositivo e ha visto il concorso di forze eterogenee dal punto di vista della preparazione culturale, ma unite nell’intento di imparare ad “ascoltare” le potenzialità espressive dello spazio per sposarle all’intenzione dell’idea creativa. Questa idea è stata (ed è) per molti oggetto di ricerca viva, e costituisce un elemento cardine nel passaggio dal concetto di un suono “probabile”, come è quello che viene concepito senza porsi il problema delle infinite interazioni con lo spazio, a quello di un suono “possibile”, che queste interazioni vuole comprendere e controllare.

L’idea di questo lavoro di tesi è nata nell’ambito di una collaborazione con il Centro Ricerche Musicali, che da tempo è impegnato sia sul fronte della promozione del sodalizio tra ricerca scientifica applicata e ricerca musicale, sia su quello della didattica e della produzione e diffusione di opere, ed è stata realizzata, oltre che per soddisfare le esigenze tecnologiche

sempre crescenti nel campo della simulazione, anche per dare un piccolo contributo al sodalizio ormai consolidato tra creatività e tecnologia.

## **1.1 Criteri e parametri di valutazione dell'acustica di ambienti**

Una delle più grandi difficoltà che si incontrano nel tentativo di caratterizzare l'acustica di ambienti reali è la classificazione della qualità del riverbero. Poiché alla fine della catena di valutazione c'è sempre l'orecchio umano si comprende quanto sia difficile stabilire dei criteri che siano oggettivi, come lo devono essere le procedure di misura, ma che tengano nella dovuta considerazione i parametri più direttamente legati al fenomeno fisiologico della percezione sonora. A questo proposito, tra i numerosi criteri che sono stati proposti dagli studiosi in questi anni, ricorderò brevemente quelli che hanno conquistato una posizione privilegiata nelle procedure di misura in ambito acustico. Il **tempo di riverbero  $T_{60}$**  è definito come l'intervallo di tempo (considerato a partire dall'istante in cui la sorgente viene disattivata) nel quale l'ampiezza del segnale sonoro si riduce ad un millesimo di quella iniziale, ovvero di 60 dB. E' facile comprendere come la grandezza appena definita dipenda da un insieme di fattori legati soprattutto a caratteristiche fisiche dell'ambiente (quali il volume, la geometria, la natura delle pareti e degli elementi interni allo spazio considerato) e del mezzo, che nella quasi totalità dei casi è l'aria; perciò è altrettanto facile comprendere come il tempo di riverbero dipenda dall'intervallo di frequenze che stiamo considerando: una parete di marmo sufficientemente estesa avrà un comportamento in frequenza sicuramente più uniforme di quello esibito da una platea di sedili imbottiti. Quindi sarà in generale molto utile considerare anche la **dipendenza del tempo di riverbero dalla frequenza**, che porta a riscrivere  $T_{60}$  come  $T_{60}(\omega)$ . Un'altra quantità fisica legata alla qualità della percezione acustica di un ambiente è il **ritardo della prima riflessione**, ovvero il tempo che intercorre

tra l'onda diretta<sup>1</sup> e la prima onda riflessa; se questo tempo è maggiore di 50 ms può dar luogo alla percezione di echi distinti; se invece è al di sotto di 5 ms da' la percezione di un ambiente molto piccolo o di una parete molto vicina sia alla sorgente che all'ascoltatore. Il **tasso di crescita della densità di eco** da', invece, una valutazione della rapidità con cui cresce il numero degli echi relativi alle riflessioni successive; nella figura seguente è rappresentata la risposta impulsiva campionata di una stanza [Gardner 1992]:

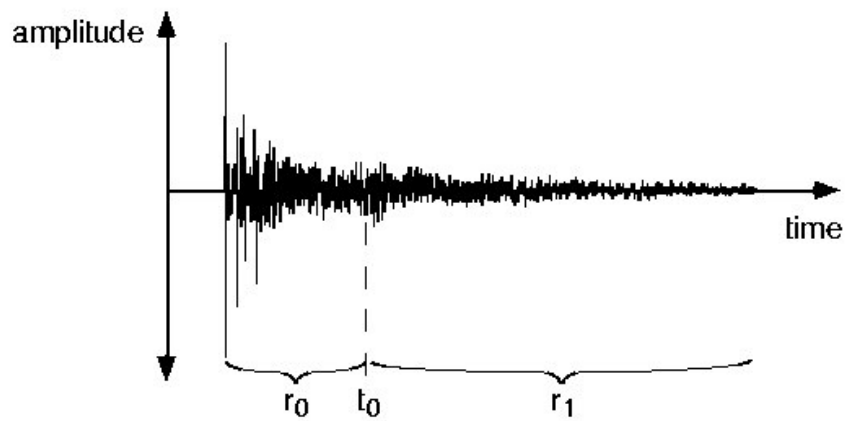


Figura 1.1 Diagramma della risposta impulsiva campionata di una stanza.

si distinguono due zone: la prima, indicata con  $r_0$ , è quella in cui sono bene individuabili le prime riflessioni; la seconda è costituita, più che dall'accavallarsi di echi, dalla sovrapposizione della risposta "ordinata" della cavità e del prodotto dei fenomeni diffusivi e diffrattivi che rendono il segnale decisamente più "ergodico". L'orecchio umano non è in grado di discriminare due riflessioni che giungano a meno di un millisecondo circa; il tasso di crescita della densità d'eco è proprio una misura del tempo necessario per raggiungere questa soglia. Altre quantità utili nella caratterizzazione acustica di uno spazio sono il **bilanciamento spettrale** e la **coerenza interaurale**. La prima è sostanzialmente la risposta in frequenza della cavità in funzione della posizione dell'ascoltatore e della sorgente; è un fatto

<sup>1</sup> Per onda diretta si intende quella che percorre il cammino tra sorgente e ascoltatore senza subire riflessioni. Per cavità con rientranze non è detto che tale cammino esista; in tal caso è possibile ridefinire la grandezza in

noto a chi frequenta sale da concerto che in alcune di esse possano esistere dei posti a sedere “privilegiati” da un punto di vista spettrale: questa è una conseguenza del fatto che, come vedremo più avanti, una cavità è un filtro nel quale la risposta impulsiva è funzione, oltre che del tempo, anche delle posizioni di sorgente ed ascoltatore. La seconda quantità è una misura della correlazione tra i segnali che giungono all’orecchio sinistro e destro: numerosi esperimenti di psicoacustica hanno evidenziato che l’acustica di spazi caratterizzati da alti valori di coerenza interaurale è giudicata dalla quasi totalità dei soggetti interrogati come poco “piacevole”. Infatti se l’ambiente ha una risposta diffusa che concentra la maggior parte dell’energia attorno alla direzione frontale e i segnali che arrivano alle orecchie sinistra e destra dell’ascoltatore sono fortemente correlati, il suono perde gran parte delle caratteristiche di spazialità.

## **1.2 Algoritmi di riverberazione**

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 salienti della risposta acustica; si trattava quindi, più che di simulazione, dell’implementazione dei primi algoritmi di riverberazione. Per comprendere meglio la strada percorsa da quegli studi e da quelli che seguirono, mi sembra utile fare due esempi che hanno rilevanza “storica” oltre che propedeutica: il primo è proprio il frutto dei primi studi di Schroeder, mentre il secondo, realizzato da J.A.Moorer, prende da questo gli spunti principali per estenderli ed introdurre nuovi concetti.

Nella figura sottostante è riportato uno schema a blocchi del riverberatore di Schroeder:

---

questione a partire dal tempo che il suono impiegherebbe a percorrere la distanza euclidea tra sorgente ed ascoltatore.

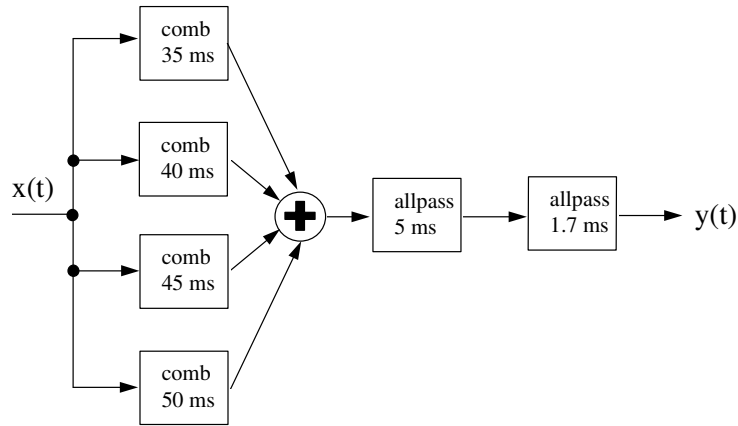


Figura 1.2 Diagramma a blocchi del riverberatore di Schroeder. Per ogni blocco è riportata la lunghezza della linea di ritardo in millisecondi.

Il filtro comb è un filtro IIR che ha il seguente diagramma di flusso:

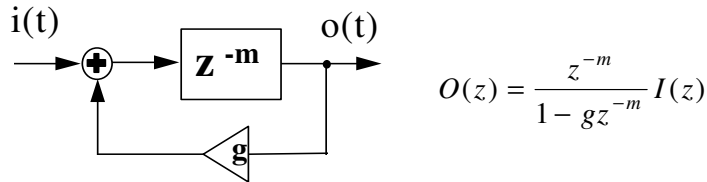


Figura 1.3 Diagramma di flusso e funzione di trasferimento di un filtro comb elementare.

La sua risposta nel dominio del tempo è un treno di impulsi con periodo pari a  $m\tau$  (essendo  $\tau$  il periodo di campionamento) le cui ampiezze decrescono esponenzialmente se  $0 < g < 1$ . Il diagramma polare mostra che i poli sono situati sul cerchio unitario con un angolo pari alla radice m-esima di 1 e con ampiezza pari alla radice m-esima di  $g$ . L'effetto che si ottiene è simile a quello di un'onda piana che rimbalza tra due pareti parallele con un'assorbimento che può essere controllato attraverso il guadagno  $g$ . Anche il filtro allpass è un filtro IIR e la sua caratteristica è quella di avere il modulo della risposta in frequenza costante. Una sua implementazione può essere la seguente:

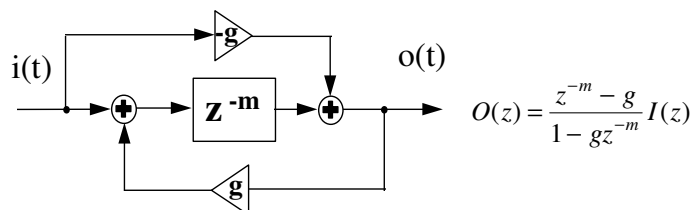


Figura 1.4 Diagramma di flusso e funzione di trasferimento di un filtro allpass elementare.

Il digramma poli-zeri di questa famiglia di filtri mostra la stessa collocazione dei poli, rispetto al comb; ma in questo caso per ogni polo c'è uno zero nella posizione coniugata che ne cancella l'influenza sul modulo della risposta in frequenza; tuttavia la non linearità della fase può avere un effetto non irrilevante sul segnale elaborato. A questo punto è più chiaro l'intento di Schroeder nel progettare il filtro della figura (1.2): i comb in parallelo imitano i modi normali che si instaurano tra le pareti parallele della stanza, mentre la serie degli allpass serve a costruire la densità di echi caratteristica della risposta diffusa, e che i comb da soli non avrebbero. La costanza del modulo degli allpass garantisce la loro "trasparenza" spettrale, anche se, come abbiamo già ricordato, il comportamento della loro risposta in fase richiede particolare attenzione.

Il riverberatore di Schroeder fu un ottimo punto di partenza per quei tempi, anche se non "suonava" in modo molto realistico: il tasso di crescita della densità d'eco risultava comunque basso e la risposta a suoni impulsivi era povera, dando luogo a brusche curve di estinzione del segnale. J.A. Moorer nel 1979 pubblicò un articolo in cui esponeva i miglioramenti che aveva introdotto nel suo riverberatore: questi riguardavano soprattutto l'aumento del numero dei filtri comb per incrementare la densità di echi generati, l'introduzione di filtri passa-basso nel ciclo di reazione dei comb per comprendere l'attenuazione dell'aria che è dipendente dalla frequenza, e l'aggiunta di una linea di ritardo digitale per simulare la prima risposta. La figura seguente mostra lo schema del riverberatore di Moorer:



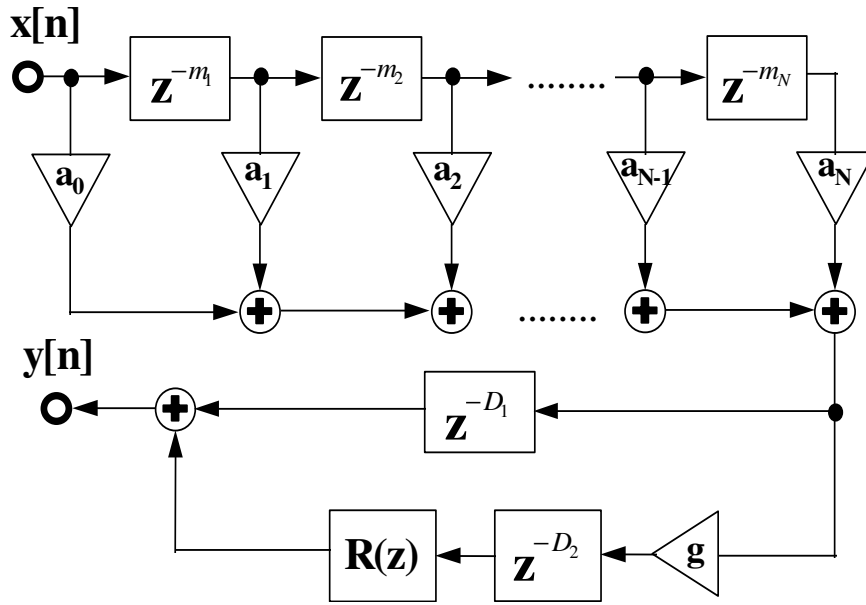


Diagramma di flusso di un riverberatore che utilizza un filtro FIR per simulare le prime riflessioni ed un filtro IIR, indicato con  $R(z)$ , per simulare la parte diffusa della risposta. I ritardi  $D_1$  e  $D_2$  sono scelti in modo che l'ultimo impulso proveniente dalla sezione FIR corrisponda temporalmente al primo impulso in uscita dalla sezione IIR.

Figura 1.5 Schema del riverberatore di Moorer.

Il miglioramento più importante è certamente l'introduzione della linea di ritardo<sup>2</sup> il cui scopo è la simulazione degli echi dovuti alle prime riflessioni. La novità di questo metodo risiede nel fatto che non si è più vincolati dalla rigida struttura dei comb nel tentativo di riprodurre l'effetto della riflessione delle pareti; è quindi possibile seguire nuove strade per ricostruire la prima parte della risposta impulsiva che è fondamentale nella percezione delle caratteristiche spaziali del segnale sonoro.

Sulla strada segnata da Schroeder, Moorer e pochi altri si incontrano innumerevoli variazioni della stessa idea che in sostanza consiste nel progettare un "patch" di filtraggio numerico che induca nell'ascoltatore la percezione corretta dell'ambiente che si vuole simulare. Sono

<sup>2</sup> D'ora in avanti per linea di ritardo si intenderà indifferentemente una multi-tapped delay line (MTDL) digitale, ovvero un filtro FIR. Mi sembra che la differenza tra i due si percepisca solo a livello di implementazione: una MTDL si può realizzare mettendo in serie tanti blocchi di ritardo quanti sono i punti in cui si vuole prelevare il segnale, mentre un filtro FIR rende disponibile il segnale di ogni tappa ad ogni istante di campionamento. Quindi, ove non espressamente specificato, questa differenza sarà ritenuta concettualmente irrilevante.

algoritmi efficienti da un punto di vista del calcolo (quindi ideali, ad esempio, nel caso di utilizzo in tempo reale), ma molto approssimativi riguardo alla possibilità di descrivere caratteristiche “in dettaglio” dello spazio simulato.

### **1.3 Simulazione di ambienti e acustica architettonica.**

Anche se non è questa la migliore occasione per fare una storia dell’acustica architettonica, è importante comunque, per le considerazioni che verranno fatte più avanti, dare alcuni cenni sugli inizi di questa disciplina e sugli avvenimenti più rilevanti.

L’acustica architettonica nasce nel 1895, quando Wallace Clement Sabine, Hollis Professor di Matematica e Filosofia all’Università di Harvard fu chiamato a trovare un rimedio ad una situazione davvero incresciosa: la sala conferenze del Fogg Art Museum era stata aperta da poco ed era impossibile comprendere le parole pronunciate dai relatori. Prima di Sabine, la progettazione architettonica si affidava, per la predizione dell’acustica, a conoscenze euristiche tramandate per anni, ma che spesso si basavano su pratiche al limite della superstizione. Sabine identificò il motivo per il quale i discorsi nella sala del Fogg Art Museum erano inintelligibili: il suono persisteva troppo a lungo (cioè la riverberazione era eccessiva); ridusse, quindi, la riverberazione ricoprendo di feltro alcuni muri, dopo di che, egli scrisse, la sala divenne “*non eccellente, ma del tutto atta allo scopo*”.

Uno dei problemi centrali dell’acustica architettonica era la possibilità di predire accuratamente l’entità della riverberazione di un ambiente. Sabine fu il primo a definire il tempo di riverbero (anche se non rigorosamente) e a dare una legge che permetteva di ricavarlo in funzione del volume dell’ambiente e dei coefficienti di assorbimento delle pareti:

$$T_{60} = \frac{13.8L}{ca} \quad (1.1)$$

Nella precedente<sup>3</sup>  $L$  è il libero cammino medio fra due successive riflessioni delle onde sonore,  $c$  è la velocità del suono ed  $a$  è legato ai coefficienti di assorbimento (cioè la frazione di energia della radiazione che non viene riflessa) nel modo seguente:

$$a = \frac{\sum_i a_i s_i}{\sum_i s_i}$$

è, cioè, una media dei coefficienti di assorbimento  $a_i$  dei vari materiali pesata con le rispettive superfici  $s_i$ .

Sabine assumeva che il libero cammino medio  $L$  fosse proporzionale alla radice cubica del volume, ma era già noto dalla teoria cinetica dei gas che il libero cammino medio è dato da

$$L = \frac{4V}{S}$$

dove  $V$  è il volume e  $S = \sum_i s_i$  la superficie interna del volume considerato. Le relazioni

appena scritte hanno ormai un valore poco più che storico: emergono chiaramente i limiti di un approccio che, nonostante mostrasse la volontà di trovare una soluzione rigorosa al problema, era comunque limitato dagli strumenti sia pratici che teorici allora disponibili. Ciò che mi preme sottolineare del lavoro di Sabine, è il taglio decisamente energetico-statistico che diede all'impostazione del problema; questa interpretazione può essere giustificata dal fatto che egli si concentrò su alcuni degli aspetti che caratterizzano la risposta acustica di un ambiente, non potendone apprezzare altri che oggi abbiamo la possibilità di valutare con maggiore dettaglio. La sua era quindi una visione parziale anche se non del tutto errata.

---

<sup>3</sup>Uno dei problemi della (1.1) è che prevede un tempo di riverberazione non nullo nel caso di assorbimento totale ( $a = 1$ ). Nel 1929 K. Schuster ed E. Waetzmann, e successivamente Carl F. Eyring nel 1930, rimediarono a questo inconveniente proponendo una formula leggermente diversa:

$$T = -\frac{13.8L}{c \ln(1-a)} \quad (1.1')$$

Malgrado i limiti della sua trattazione, Sabine riuscì a migliorare l'acustica di molte sale progettate da architetti che erano totalmente all'oscuro delle necessità degli ascoltatori o che semplicemente non se ne curavano; e anzi progettò egli stesso una sala, la Symphony Hall di Boston, costruita nel 1900, che è ancora una delle migliori sale da concerto del mondo.

A questo proposito vorrei riportare, attraverso il racconto di J.R. Pierce [Pierce 1988] il caso della Philharmonic Hall di New York progettata da Leo Beranek, uno dei pionieri dell'acustica architettonica, molti anni dopo la realizzazione della Symphony Hall di Boston:

“La Philharmonic Hall del Lincoln Center a Manhattan aprì il 12 settembre del 1962 e fu un disastro. Ma, nel luglio del 1962, Leo L. Beranek, dello studio di architettura Bolt, Beranek & Newman, poteva scrivere nella prefazione del suo libro *Music, Acoustics & Architectural Design*: <<Il punto di maggior interesse di questo volume è la descrizione degli sforzi fatti nel progettare la Philharmonic Hall del Lincoln Center. La dea Fortuna è stata finalmente spodestata dall'analisi più accurata e dalla stupefacente applicazione di nuovi ma sicuri principi acustici>>. Che cosa andò male nel progetto della Philharmonic Hall, e perché? Il perché sta nel fatto che fu dedicata molta attenzione ad aspetti che Beranek riteneva importanti e poca ad altre questioni che poi si rivelarono ancora più importanti(\*). Per quanto riguarda invece la prima parte della domanda, la risposta è: praticamente tutto. Vi erano degli echi in alcuni posti, gli orchestrali non riuscivano a sentirsi l'un l'altro (dato che il muro alle loro spalle assorbiva troppo), non c'era una riverberazione sufficiente e la diffusione del suono nella sala era inadeguata. Ma la cosa peggiore è che vi era un'apparente assenza delle frequenze basse: era difficile sentire i violoncelli e i contrabbassi.[...] lo spettatore veniva raggiunto dalle frequenze basse solo dopo molte riflessioni ripetute, dopo che avevano attraversato la sala più volte. Questi suoni arrivavano così in ritardo che l'ascoltatore non riusciva ad associarli con le note che i violoncelli e i contrabbassi suonavano. In definitiva, divenivano rumori di sottofondo, separati dalla loro fonte musicale.”

(\*)Beranek era così convinto della correttezza delle sue teorie che non si preoccupò neppure di costruire un modello della sala. I modelli sono stati costruiti sin dai tempi di W.C. Sabine, i cui lavori mostrano vari disegni concernenti la propagazione del suono all'interno di modelli di sale per conferenze. Ciò che Sabine faceva approssimativamente tra il 1895 e il 1915, oggi può essere fatto con estrema precisione. La lunghezza d'onda del suono in un modello deve essere proporzionale al modello utilizzato. Per esempio in un modello in scala 1:10, una frequenza di 500 Hz deve essere rappresentata da una frequenza di 5000 Hz.)

Vennero fatte varie misure per individuare gli errori nella realizzazione della sala e, una volta trovati questi, si susseguirono le modifiche e le ristrutturazioni per tentare di migliorarne l'acustica. Infine la sala venne completamente ridisegnata da Cyril Harris della Columbia

University, e divenne così la Avery Fisher Hall, un ottimo auditorium, ma pagato a caro prezzo.

Si comprende, quindi, quanto talvolta sia più importante avere a disposizione una soluzione accurata piuttosto che rapida del problema della propagazione del campo acustico. Se si pensa appunto alla progettazione di auditorium e sale da concerto, ma anche di teatri, cinema, capannoni per grandi officine e a tutti gli altri ambienti nei quali il ruolo giocato dal suono è fondamentale o comunque rilevante, ci si accorge immediatamente che cercare di porre riparo ad un risultato catastrofico può costare molto

sia in termini economici che di tempo, e può condurre comunque ad una soluzione mediocre. Nella figura 1.6 è rappresentato lo schema di principio di un simulatore di acustica di ambienti; nella prima parte dello schema, quella 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,

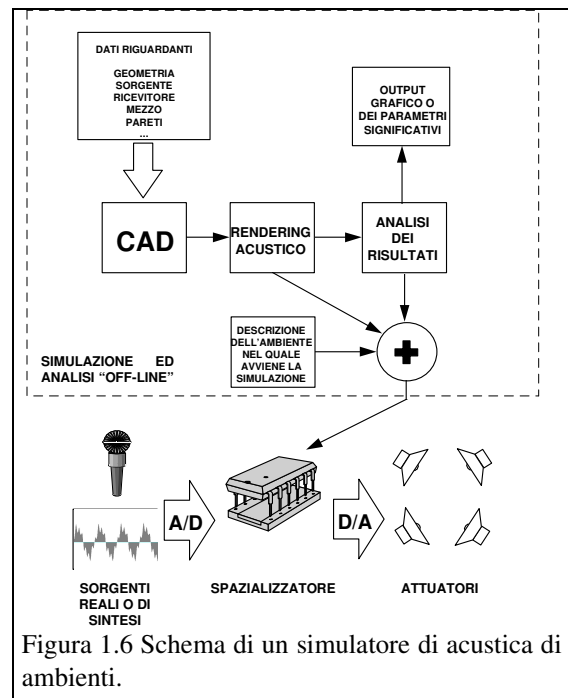


Figura 1.6 Schema di un simulatore di acustica di ambienti.

richiedono ingenti risorse di calcolo e non

sono quindi indicati per una simulazione 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; l'uscita di questo blocco può essere usata per un'analisi dei risultati (es. calcolo del tempo di riverbero, energia della risposta...) o per la fase successiva che è quella di auralizzazione; al blocco di auralizzazione, collocato nell'ultima riga dello schema, convergono quindi i risultati veri e propri della simulazione

(per esempio in forma di risposta impulsiva), un insieme di parametri che ne danno le caratteristiche “in grande”, ed eventualmente una descrizione dell’ambiente in cui avviene l’auralizzazione stessa (per esempio nel caso in cui si auralizzi tramite altoparlanti e si utilizzino degli algoritmi di cancellazione dell’eco in tempo reale). Nell’ultima fase di elaborazione (che può avvenire anche in tempo reale se la potenza di calcolo dell’hardware a disposizione lo permette) tutte le informazioni raccolte nella fase precedente vengono usate per la convoluzione del segnale audio digitalizzato con la risposta impulsiva sintetizzata e quindi per l’attuazione attraverso il sistema prescelto, previa riconversione D/A del segnale di uscita. In genere gli algoritmi “accurati” di simulazione lavorano convertendo le informazioni sull’ambiente in una risposta impulsiva binaurale<sup>4</sup> che viene quindi convoluta col segnale di ingresso. Una soluzione accurata attraverso le tecniche di risoluzione delle equazioni differenziali che descrivono la propagazione del campo acustico è, nella quasi totalità dei casi reali, impraticabile.

Bisogna allora introdurre semplificazioni che “alleggeriscano” il modello, ma non a discapito della sua capacità di fornire soluzioni teoricamente fondate e “acusticamente” soddisfacenti. A questo proposito i metodi più usati sono il ray tracing acustico e la generazione delle sorgenti virtuali. Del secondo, essendo oggetto del presente lavoro, parleremo in dettaglio nelle prossime sezioni. A proposito del primo diremo che è una tecnica presa in prestito dalla *computer graphics* e riadattata al caso di un segnale audio. Essa consiste nel pensare la sorgente reale come l’origine di un insieme di “raggi” emessi in tutte le direzioni, e nel calcolare quelli che raggiungono l’ascoltatore che, per avere una probabilità di essere colpito diversa da zero, dovrà essere caratterizzato da una sezione d’urto finita. Il ray tracing è una tecnica molto utilizzata per la sua semplicità di programmazione che, in realtà è solo apparente: se si vogliono ottenere risultati soddisfacenti bisogna correggere l’algoritmo con

---

<sup>4</sup> I canali di uscita possono ovviamente essere più di due, se si è scelto di auralizzare con un sistema diverso dalla

una serie di modifiche che lo rendono di una complessità confrontabile a quella di altre tecniche che però danno risultati generalmente più soddisfacenti. D'altro canto il ray tracing si presta maggiormente all'implementazione di certe caratteristiche, per esempio, delle pareti: è certamente più semplice che in altri casi includere la dipendenza della direzione di riflessione da quella di incidenza o dalla frequenza. Tuttavia, per quanto riguarda la modellizzazione della prima parte della risposta (essenziale nei meccanismi di percezione), ritengo che modificare il metodo del ray tracing per ottenere i risultati forniti da altre tecniche, sia assai oneroso sia dal punto di vista computazionale che da quello della programmazione.

---

cuffia. Negli ultimi anni sono rilevanti le ricerche nel campo dell'olografia acustica che si propone la diffusione del campo acustico sintetizzato, attraverso la ricostruzione di uno dei suoi fronti con array di diffusori.

## **2. Il modello**

### **2.1 Scopi del progetto e ipotesi di base**

Il problema allo studio è quello della propagazione del campo acustico generato da una sorgente in una cavità tridimensionale. Posto in questi termini, il problema soffre di una generalità che costringe subito a fare ipotesi molto restrittive sull'ambito di validità del modello adottato. Per avere un'idea della complessità dei fenomeni con i quali ci si trova a trattare, basta valutare gli ordini di grandezza delle lunghezze d'onda che limitano lo spettro udibile; sebbene sia difficile valutare la risposta dell'orecchio umano, sia per il fatto che esso è un sistema non lineare, sia per la soggettività intrinseca al fenomeno percettivo, lo spettro udibile viene solitamente individuato tra i 20 e i 20000Hz, ovvero una gamma di frequenze che comprende ben tre ordini di grandezza; le lunghezze d'onda che corrispondono a queste frequenze per una velocità del suono pari a 343.9m/s (in aria, a 20°C e pressione atmosferica standard) sono rispettivamente 17.16m e 17.16mm: se si pensa che quasi tutti gli oggetti, con i quali abbiamo a che fare ogni giorno, hanno un ordine di grandezza compreso tra il centimetro e alcuni metri, ci si accorge che l'entità dei fenomeni diffrattivi e diffusivi può essere rilevante in molte situazioni. Tuttavia mostreremo che l'impiego di modelli ed algoritmi che si basano su ipotesi semplificative, si dimostra pienamente soddisfacente una volta chiarito l'ambito di validità dei risultati raggiunti. Nel nostro caso possiamo cominciare col dire che i risultati sono in buon accordo con l'esperienza per cavità con un volume al di sopra dei 100m<sup>3</sup>, che corrisponde ad una stanza cubica con un lato di 4.6m circa; ciò è in perfetto accordo con l'intento di fornire uno strumento di analisi e simulazione del campo acustico lontano, in ambienti che vanno dal grande ufficio all'auditorium.

La cavità viene considerata come un sistema lineare ad un ingresso ed una uscita del quale si intende sintetizzare la risposta impulsiva. L'ingresso è rappresentato dal segnale audio



anecoico, ovvero privo di qualsiasi caratteristica che all'ascolto induca la percezione di una sua collocazione all'interno di uno spazio; l'uscita è il segnale che descrive il campo acustico, al variare del tempo, nel punto in cui è stato collocato l'ascoltatore. In realtà, se si pensa anche all'auralizzazione<sup>1</sup> del segnale, appare evidente che le uscite del sistema saranno più di una; nella figura sottostante viene illustrato lo schema a blocchi nel caso di auralizzazione tramite una cuffia dotata di un sensore in grado di rilevare i movimenti della testa (head-tracking):

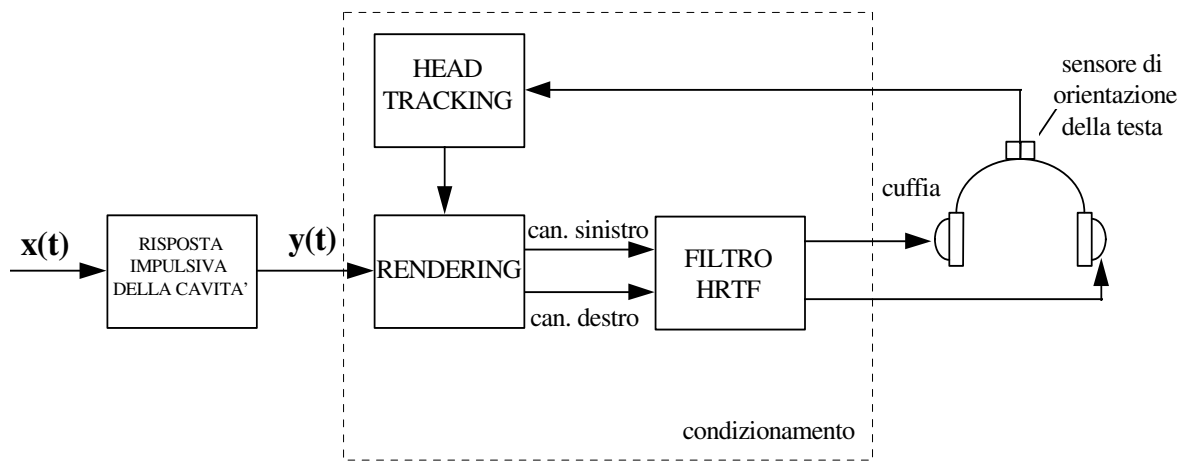


Figura 2.1 Schema a blocchi di un sistema di simulazione e auralizzazione di un segnale audio. Il blocco RENDERING comprende l'elaborazione delle informazioni sulla spazializzazione contenute nel segnale  $y(t)$ . Il filtro HRTF (Head Related Transfer Function) implementa il filtraggio dei padiglioni auricolari e di tutto ciò che è a monte dell'orecchio interno (se ne parlerà con maggiore dettaglio a proposito dell'auralizzazione). Per semplicità si sono omessi i blocchi di conversione A/D e D/A.

Questo esempio mostra che, se si intende il sistema come comprensivo degli stadi di condizionamento che si occupano del rendering e dell'auralizzazione, esso avrà una uscita distinta (ed in generale potrà avere altri ingressi come il segnale proveniente dalla periferica di head-tracking) per ognuno dei canali indipendenti attraverso i quali avviene l'attuazione del segnale. La risposta impulsiva non è, in generale, funzione della sola variabile temporale: trattandosi di un problema propagativo entreranno in gioco anche le variabili spaziali e tutte le funzioni che ad esse fanno riferimento. La risposta impulsiva si potrebbe esprimere come:

<sup>1</sup> Con il termine auralizzazione si intende, più estesamente, il processo di condizionamento ed attuazione attraverso trasduttori audio, di un segnale reale o di sintesi.

$$h = h(t ; \vec{P}_S, \Sigma_S(\theta, \varphi, \nu, t), \vec{P}_R, \Sigma_R(\theta, \varphi, \nu, t))$$

ove  $t$  è la variabile temporale;  $\vec{P}_S$  e  $\vec{P}_R$  sono i vettori che indicano la posizione della sorgente e dell'ascoltatore all'interno della cavità;  $\Sigma_S(\theta, \varphi, \nu, t)$  e  $\Sigma_R(\theta, \varphi, \nu, t)$  sono gli spettri spaziali di emissione per la sorgente, e di ricezione per il ricevitore; ovvero sono le funzioni che esprimono l'intensità di emissione (o la sensibilità in ricezione) in funzione delle coordinate sferiche angolari  $\theta, \varphi$ , della frequenza  $\nu$ , e, se si ammette che possano essere non-stazionarie, del tempo. Per fare un esempio di un ricevitore che abbia queste caratteristiche di variabilità, basta pensare ad un punto di ricezione che sia identificabile con un ascoltatore umano: l'insieme delle strutture coinvolte nella prima parte del processo di percezione uditiva<sup>2</sup> formano un filtro la cui risposta in frequenza dipende dalla direzione di incidenza del segnale e (dal punto di vista del simulatore) anche dal tempo se si consente all'ascoltatore di muovere la testa. 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.

## 2.2 Teoria del modello a sorgenti virtuali

Quando la superficie di una sfera pulsante si espande e si contrae radialmente attorno ad una posizione media, sul mezzo fluido in contatto con la superficie si esercita una forza. Il fluido è quindi

perturbato rispetto alla sua configurazione di quiete. Come risultato di ciò, si produce una perturbazione che si propaga, a partire dalla sfera, uniformemente in tutte le direzioni come onda sferica. In questa fase dello studio del moto di un'onda sonora si fanno le seguenti ipotesi: *a)* viscosità del mezzo nulla; *b)* mezzo fluido omogeneo e continuo; *c)* processo adiabatico e *d)* mezzo isotropo e perfettamente elastico. La perturbazione del mezzo si traduce nello spostamento del fluido in una direzione dello spazio (che è quella radiale rispetto alla sorgente, nel caso di onde sferiche), producendo piccole variazioni di pressione e di densità che oscillano attorno ai valori di equilibrio. Queste oscillazioni sono descritte dall'equazione d'onda:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

per un sistema di riferimento cartesiano ortogonale, o dalla

$$\frac{\partial^2(rp)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2(rp)}{\partial r^2} \quad (2.1')$$

per un sistema di riferimento sferico. Nelle precedenti:  $c$  è la velocità del suono nel mezzo<sup>3</sup> e  $p$  è la **pressione acustica**, ovvero lo scostamento della pressione in un determinato punto dalla pressione di riferimento. Talvolta le trattazioni fanno riferimento, invece che alla pressione acustica  $p$ , agli elementi d'onda  $u(x,y,z,t)$  e  $v(x,y,z,t)$ , definiti rispettivamente come lo **spostamento** dalla posizione di equilibrio e la **velocità** di piccole porzioni del mezzo fluido di volume costante e proprietà medie uguali. I due elementi d'onda  $u$  e  $v$  sono comunque legati a  $p$ , nel caso di onde sferiche, dalle

---

<sup>2</sup> Alcuni esempi di queste strutture sono il padiglione auricolare, le spalle, la scatola cranica e tutto ciò che è a monte dell'orecchio interno che è il vero e proprio organo sensoriale.

<sup>3</sup> Nel caso dell'aria la velocità del suono si può ricavare dalla  $c = \sqrt{\gamma p/\rho}$ , dove  $\gamma$  è il rapporto tra il calore specifico dell'aria a pressione costante e quello a volume costante,  $p$  è la pressione di riferimento in  $N/m^2$ , e  $\rho$  è la densità in  $Kg/m^3$ . A temperatura ambiente e pressione atmosferica standard, la velocità del suono nell'aria è di circa 343.9m/s ed aumenta di circa 0.6m/s per ogni grado centigrado di aumento della temperatura.

$$u = -\left(\frac{1}{r} + jk\right) \frac{p}{\omega^2 \rho} \quad (2.2)$$

$$v = \left(\frac{1}{r} + jk\right) \frac{p}{j\omega\rho} \quad (2.3)$$

dove  $\rho$  è la densità del mezzo e  $k = \omega/c$ . A questo punto conviene soffermarsi brevemente sulla (2.3): nel caso di onda piana si trova che  $p = -\rho c^2 v$ , ovvero che la pressione acustica è in fase con la velocità delle particelle del mezzo; se si osservano le componenti della (2.3) che esprimono la velocità in funzione della pressione nel caso di onda sferica, ci si accorge che per distanze sorgente-ascoltatore tali che  $r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$ , la (2.3) si può riscrivere come segue

$$v \approx \frac{k}{\omega\rho} p \quad (2.3')$$

A 20 Hz  $\frac{\lambda}{2\pi} \approx 2.73\text{m}$ ; questo vuol dire che a partire da alcuni metri è possibile trascurare nella (2.3) la componente reattiva ed approssimare l'onda sferica con un'onda piana per qualsiasi componente dello spettro udibile.

Dall'equazione (2.1') si perviene, come ben noto, all'equazione di Helmholtz per una sorgente puntiforme

$$\nabla^2 P(\omega, \mathbf{R}, \mathbf{R}') + \frac{\omega^2}{c^2} P(\omega, \mathbf{R}, \mathbf{R}') = -\delta(\mathbf{R} - \mathbf{R}') \quad (2.4)$$

la cui soluzione descrive, nel dominio della frequenza e una volta stabilite le condizioni al contorno, l'andamento della pressione  $P(\omega, \mathbf{R}, \mathbf{R}')$  in funzione delle posizioni  $\mathbf{R}=(x,y,z)$  e  $\mathbf{R}'=(x',y',z')$  di sorgente e ascoltatore. Nel caso di propagazione libera la soluzione è data dalla

$$P(\omega, \mathbf{R}, \mathbf{R}') = \frac{1}{4\pi r} e^{j\omega\left(\frac{r}{c} - t\right)} \quad (2.5)$$

dove si intende  $r = |\mathbf{R} - \mathbf{R}'|$ . Supponiamo ora che in  $x=0$  sia presente un parete ideale, ovvero



una parete che abbia impedenza acustica normale<sup>4</sup> ed estensione entrambe infinite; la condizione al contorno costituita dalla parete si può imporre ponendo in posizione speculare alla sorgente reale una sorgente “immagine” e considerando la propagazione nello spazio libero. In tal caso la (2.5) diventa

$$P(\omega, \mathbf{R}, \mathbf{R}') = \left( \frac{e^{j\omega \frac{r_+}{c}}}{4\pi r_+} + \frac{e^{j\omega \frac{r_-}{c}}}{4\pi r_-} \right) e^{-j\omega t} \quad (2.5')$$

dove  $r_+^2 = (x+x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2$  e  $r_-^2 = (x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2$  sono le distanze dell'ascoltatore dalla sorgente immagine e da quella reale. Generalizzando al caso di una cavità parallelepipedica di dimensioni  $L_x, L_y, L_z$ , la soluzione si complica notevolmente perché ogni sorgente deve essere riflessa attraverso ogni parete. Tuttavia, anche in questo caso, è possibile arrivare ad una espressione in forma chiusa della soluzione considerando la funzione di Green nel dominio della frequenza che esprime la soluzione della (2.4) con le opportune condizioni al contorno:

$$P(k, \mathbf{R}, \mathbf{R}') = \frac{1}{L_x L_y L_z} \sum_{i^3=-\infty}^{+\infty} \frac{\Psi_i(\mathbf{R})\Psi_i(\mathbf{R}')}{k_i^2 - k^2} \quad (2.6)$$

dove  $k = \omega/c$ ,  $i^3 = (n, l, m)$  indica una somma tridimensionale,  $k_i = \left( \frac{n\pi}{L_x}, \frac{l\pi}{L_y}, \frac{m\pi}{L_z} \right)$ ,  $k_i^2 = |k_i|^2$  e

$\Psi_i(\mathbf{R}) = \cos\left(\frac{n\pi}{L_x}x\right)\cos\left(\frac{l\pi}{L_y}y\right)\cos\left(\frac{m\pi}{L_z}z\right)$ . La (2.6) rappresenta, in sostanza, lo sviluppo del campo

acustico nella serie dei modi normali, cioè di un set di autofunzioni ortogonali che

---

<sup>4</sup> L'impedenza acustica specifica normale di un solido è il rapporto, generalmente complesso, tra la pressione acustica che agisce sulla superficie del solido e la velocità delle particelle del fluido normalmente alla superficie del solido, cioè  $z_n = r_n + jx_n = p/v$ . Ha le dimensioni di  $\text{kg/m}^2\text{s}$  che in acustica si indicano con il **rayl**.

costituiscono una base per lo spazio delle soluzioni della (2.4) nel dominio della frequenza; si dimostra [J.B.Allen e D.A.Berkley 1978] che la (2.6) può essere scritta nella forma seguente:

$$P(\omega, \mathbf{R}, \mathbf{R}') = \sum_{q=1}^8 \sum_{i^3=-\infty}^{+\infty} \frac{e^{j\frac{\omega}{c}|\mathbf{r}_q+\mathbf{r}_i|}}{4\pi|\mathbf{r}_q+\mathbf{r}_i|} e^{-j\omega t} \quad (2.7)$$

nella quale  $\mathbf{r}_q$  rappresenta gli otto vettori dati dalle otto permutazioni su  $\pm$  di  $\mathbf{r}_q = (x \pm x', y \pm y', z \pm z')$ , e  $\mathbf{r}_i = 2(nL_x, lL_y, mL_z)$ . Ebbene, la (2.7) è appunto la generalizzazione della (2.5') al caso di una cavità parallelepipedica delimitata da pareti infinitamente rigide. Se si antitrasforma secondo Fourier la (2.7), si ottiene la funzione di Green nel dominio del tempo e cioè la risposta all'impulso della stanza rettangolare

$$p(t, \mathbf{R}, \mathbf{R}') = \sum_{q=1}^8 \sum_{i^3=-\infty}^{+\infty} \frac{\delta\left(t - \frac{|\mathbf{r}_q + \mathbf{r}_i|}{c}\right)}{4\pi|\mathbf{r}_q + \mathbf{r}_i|} \quad (2.8)$$

che è proprio la funzione cercata. Come per la (2.6) nel dominio della frequenza, possiamo dire che la (2.8) rappresenta “esattamente” la soluzione all'equazione delle onde come combinazione lineare di un set di funzioni (se si considera la  $\delta$  di Dirac un'estensione del concetto di funzione) che costituiscono una base nel dominio del tempo. Un'interpretazione più intuitiva della (2.8) può essere data osservando la figura seguente

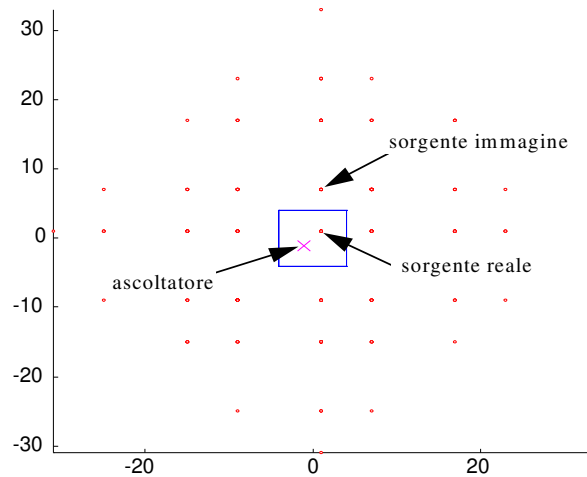


Figura 2.2 Reticolo di sorgenti virtuali nel caso di cavità rettangolare. Sono rappresentate le sorgenti fino al quarto ordine di riflessione.

nella quale è rappresentato il reticolo bidimensionale (per maggiore chiarezza) delle sorgenti immagine nel caso di cavità rettangolare: quando la sorgente reale viene eccitata, contemporaneamente ad essa ogni sorgente virtuale comincia ad emettere onde sferiche la cui sovrapposizione fornisce in ogni istante il valore della pressione acustica nel punto di ascolto.

### 2.3 Limiti e vantaggi del modello a sorgenti virtuali

Abbiamo visto, nel paragrafo precedente, che la soluzione fornita dal modello a sorgenti virtuali nel dominio del tempo è di fatto equivalente a quella espressa come combinazione dei modi normali della cavità nel dominio della frequenza. In realtà alla base di questa dimostrazione c'è l'ipotesi non trascurabile della infinita rigidità delle pareti; se questa ipotesi non è verificata, la (2.8) non è più una soluzione esatta, bensì approssimata della (2.4). Per comprendere meglio il peso di questa approssimazione, conviene allora dare alcuni cenni sulle caratteristiche delle pareti reali e sui modelli utilizzati per descriverle.

Abbiamo definito nella nota <sup>(4)</sup> l'impedenza acustica specifica normale  $z_n = r_n + jx_n$  di un solido; in funzione di questa grandezza è possibile definirne un'altra che ha un ruolo



essenziale nella descrizione dell'**incidenza obliqua** (con un angolo  $\theta_i$ ) sulla superficie di un solido di un'onda acustica che si propaga in aria: il **coefficiente di riflessione della potenza acustica**  $\alpha_r$ , è definito come il rapporto tra la quantità di energia acustica riflessa e la quantità di energia acustica incidente

$$\alpha_r = \frac{A_r^2}{A_i^2} = \frac{(r_n \cos \theta_i - \rho c)^2 + x_n^2 \cos^2 \theta_i}{(r_n \cos \theta_i + \rho c)^2 + x_n^2 \cos^2 \theta_i} \quad (2.9)$$

dove  $A_i$  e  $A_r$ , sono le ampiezze di onda incidente e riflessa e  $\rho c$  è l'impedenza caratteristica dell'aria. Nella realtà, l'impedenza acustica di una parete è non solo una quantità finita e complessa, ma anche dipendente dalla frequenza della radiazione incidente, cosicché la (2.9) può essere riscritta, facendo riferimento alle ampiezze piuttosto che alle energie, come

$$A_r = \frac{[r_n(\omega) \cos \theta_i - \rho c] + jx_n(\omega) \cos \theta_i}{[r_n(\omega) \cos \theta_i + \rho c] + jx_n(\omega) \cos \theta_i} A_i = M_p(\omega, \theta) e^{j\Phi_p(\omega, \theta)} A_i \quad (2.9')$$

La parete ha quindi una funzione di trasferimento<sup>5</sup> in cui modulo e fase dipendono sia dalla frequenza dell'onda, sia dal suo angolo di incidenza.

Un altro aspetto da considerare nella trattazione della riflessione è quello della **diffusione**; fino a questo punto, infatti, abbiamo supposto implicitamente che la parete si comportasse come un riflettore perfetto, ovvero che obbedisse alla legge di Snell-Cartesio per la quale le direzioni di incidenza e riflessione dell'onda sono complanari con la normale alla parete e formano con questa lo stesso angolo. In antitesi alla legge di

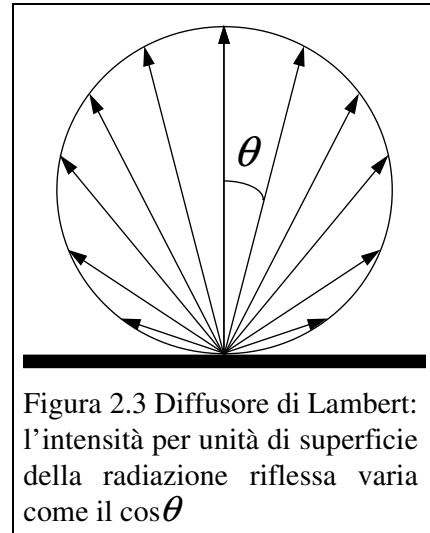


Figura 2.3 Diffusore di Lambert: l'intensità per unità di superficie della radiazione riflessa varia come il  $\cos \theta$

Snell-Cartesio c'è quella di Lambert che definisce il diffusore perfetto come quello per il

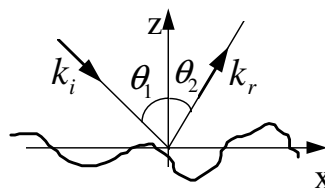
<sup>5</sup> Si suppone, ovviamente, di essere in condizioni di linearità e stazionarietà, anche se queste sono verificate nella quasi totalità dei casi.

quale l'intensità luminosa<sup>6</sup> per unità di superficie varia in ogni direzione come il coseno dell'angolo tra la direzione stessa e la normale alla superficie. Se pensiamo di descrivere le caratteristiche di diffusione di una parete con una funzione di distribuzione dello scattering di un'onda in una certa direzione, allora nel caso della parete infinitamente rigida e liscia questa funzione sarà una delta di Dirac di ampiezza unitaria posizionata in corrispondenza della direzione indicata dalla legge di Snell; nel caso di un diffusore lambertiano, invece, sarà una funzione con una rappresentazione vettoriale come quella della figura 2.3, indipendentemente dalla direzione di incidenza. Il problema è, allora: come si comporta una parete nella realtà? Dato che la legge di Lambert è molto semplice e quindi efficiente dal punto di vista del calcolo, essa è stata usata in molte occasioni per stimare il valore dell'energia diffusa. D'altronde alcuni risultati sperimentali [E. Meyer, H. Kuttruff 1959][H. Kuttruff 1991] evidenziano che non c'è alcuna certezza sulla possibilità di applicare questa legge al caso di diffusori acustici. Inoltre se si pensa ad una stanza che abbia pareti lambertiane, è possibile dimostrare [T. Hidaka 1995] che la funzione di distribuzione della lunghezza del libero cammino medio della radiazione ha una varianza infinita; questo impedisce di applicare il teorema del limite centrale e quindi invalida, di fatto, qualsiasi trattazione statistica dell'acustica di ambienti. Nello stesso articolo Hidaka espone i risultati teorici dell'analisi di un modello di parete<sup>7</sup> con distribuzione gaussiana delle altezze delle irregolarità, e afferma

---

<sup>6</sup> Nella legge si parla di intensità luminosa perché fu formulata nell'ambito degli studi sulla radiazione del corpo nero, ma la stessa definizione si può applicare alla "radiazione" acustica.

<sup>7</sup> Se si suppone che l'altezza della superficie (v. figura) sia un processo gaussiano  $N(0, \sigma)$  e la funzione di



correlazione tra due punti della superficie (supposta unidimensionale per semplicità, ma senza perdita di generalità)  $x_1$  e  $x_2$  sia data da  $C(\tau) = e^{-\frac{\tau^2}{T^2}}$  con  $\tau = |x_1 - x_2|$  e  $T$  lunghezza di correlazione, i risultati dell'analisi di Hidaka sono: (continua nella pag.seg.)

che la quasi totalità delle superfici irregolari non obbedisce alla legge di Lambert, ma riflette la maggior parte dell'energia nella direzione della riflessione perfettamente speculare. Da queste considerazioni appare lecito supporre che la riflessione di un'onda acustica da parte di una parete reale è ben descritta (almeno in un primo grado di approssimazione) dal modello geometrico, anche se in determinate situazioni dovrà essere valutato l'errore commesso nel non considerare il peso dell'energia diffusa per scattering.

Un altro fenomeno da valutare è quello della **diffrazione** dovuta alla **finitezza** della superficie che individua la parete reale. Spiegando il modello a sorgenti virtuali, abbiamo visto che un ipotetico ascoltatore “vede” l'immagine della sorgente reale riflessa nello “specchio” della parete ed è quindi interessato dalla sovrapposizione dei campi generati dalle due sorgenti; questa considerazione è esatta soltanto se la parete in questione ha estensione infinita, anche nel caso in cui questa sia infinitamente rigida. L'ampiezza e la fase del suono riflesso dipendono dalla dimensione della parete e dalla posizione della proiezione<sup>8</sup> dell'immagine all'interno del perimetro della parete stessa. E' come se l'ascoltatore “osservasse” la sorgente virtuale attraverso una finestra di dimensioni finite: man mano che le dimensioni della finestra diminuiscono, le figure di diffrazione diventano sempre più evidenti e cambiano forma al variare della posizione dell'ascoltatore. La valutazione di un tale effetto può essere espressa in termini di soluzione esatta (integrale di Kirchhoff-Fresnel che descrive la propagazione in ipotesi di campo vicino) o approssimata (formula di Fresnel-Fraunhofer in campo lontano); dato che l'uso della soluzione esatta prevederebbe la risoluzione numerica di un integrale di

---

a) anche se la superficie ha grosse irregolarità, la legge di Lambert non è soddisfatta e la frazione di energia riflessa nella direzione speculare è dominante.

b) solo nel caso limite in cui  $T/\sigma$  è infinitamente piccolo (punti vicini poco correlati e asperità anche molto profonde) il pattern di scattering approssima quello di un diffusore lambertiano.

c) nel caso (teorico) in cui  $T \rightarrow 0$  indipendentemente dal valore di  $\sigma$  (ovvero le altezze della superficie costituiscono un “rumore bianco”) nel pattern di scattering sopravvive il solo termine speculare.

<sup>8</sup> Per proiezione dell'immagine si intende il punto di intersezione tra il piano della parete e il segmento che congiunge sorgente virtuale e ascoltatore.

superficie, sarebbe auspicabile l'utilizzo della soluzione approssimata: purtroppo, però, la valutazione dell'ambito di applicabilità di quest'ultima è in generale difficoltosa e, nel caso dell'acustica di ambienti, ancora oggetto di studio.

Da questa breve panoramica si intuisce quanto possa essere complesso un modello che descriva con un elevato grado di fedeltà il fenomeno dell'interazione del campo acustico con un ambiente reale. Sebbene una gran parte dei modelli appena discussi possano essere implementati in un algoritmo basato sulle sorgenti immagine, ciò non può avvenire se non al prezzo di un rilevante aumento del costo computazionale. Tuttavia il modello a sorgenti virtuali è in grado di dare indicazioni utili già ai primi livelli di approssimazione e soprattutto per quanto riguarda la prima risposta, ovvero quella parte di segnale che contiene le informazioni più importanti sulla direzione e la distanza della sorgente e che dà i primi "suggerimenti" sulle caratteristiche salienti dell'ambiente simulato.

Uno dei grossi vantaggi di questo tipo di modello è che opera nel dominio del tempo; i segnali con cui abbiamo a che fare sono, nella quasi totalità dei casi, fortemente non-stazionari e quindi, per essere trattati propriamente, necessitano di un modello che descriva facilmente, ma accuratamente, le

situazioni transitorie. La ricerca di una soluzione espressa in funzione dei modi normali, richiederebbe il calcolo di tutti i modi all'interno della banda di interesse più le correzioni per quelli subito al di fuori. Nel dominio del tempo ogni sorgente immagine contribuisce alla risposta nello stretto ambito della sua durata; contrariamente ai modi normali che intervengono con involucri esponenziali per tutta la durata della risposta impulsiva. La definizione di una sorgente richiede il calcolo del ritardo e dell'attenuazione, mentre quella di un modo normale necessita della localizzazione del polo e del calcolo dei residui, operazioni che sono certamente più gravose da un punto di vista computazionale specialmente nel caso in

cui viene lasciata completa libertà nella specificazione della geometria delle condizioni al contorno.

### 3. L'algoritmo e l'implementazione

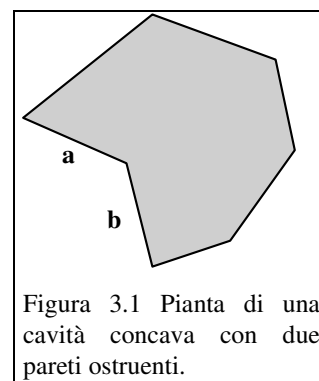
In questo capitolo verrà descritto un algoritmo basato sul modello delle sorgenti virtuali (SV nel seguito), esposto nel capitolo precedente, ed un'implementazione di questo realizzata in linguaggio C++.

#### 3.1 I dati di ingresso

I dati necessari all'esecuzione dell'algoritmo sono quelli riguardanti la cavità, la sorgente ed il ricevitore.

La **cavità** è definita come un insieme finito di pareti con giacitura planare; le pareti non piane possono essere descritte approssimandole con un numero di pareti piane che dipenderà dalle risorse di calcolo disponibili<sup>1</sup>. La cavità può essere un **poliedro**

**convesso** (nel caso in cui tutti gli angoli tra le pareti sono minori di  $180^\circ$ ) o **concavo** (se almeno uno di questi angoli è maggiore di  $180^\circ$ ). Nel caso di cavità concave, le pareti che formano i lati degli angoli maggiori di  $180^\circ$  saranno indicate con l'aggettivo “**ostruenti**”<sup>2</sup>; nella figura 3.1, ad esempio, è rappresentata una



cavità concava vista in pianta, nella quale le pareti *a* e *b* sono

ostruenti. Una **parete** è caratterizzata dall'equazione del piano orientato<sup>3</sup> di giacitura, da una successione ordinata<sup>4</sup> di punti dello spazio  $\mathfrak{R}^3$  che individuano il suo perimetro e dal coefficiente di riflessione  $\alpha_r$ , definito dalla (2.9).

<sup>1</sup> Come si vedrà più avanti, la complessità dell'algoritmo nella fase di generazione del reticolo di sorgenti virtuali è una funzione esponenziale del numero di pareti che compongono la cavità, quindi il grado di approssimazione di una parete curva dovrà tenere conto necessariamente delle risorse di calcolo.

<sup>2</sup> Il motivo di questa aggettivazione sarà chiaro nel seguito quando verrà introdotto il concetto di *visibilità* di una sorgente virtuale.

<sup>3</sup> L'orientazione del piano di giacitura è scelta concordemente con la faccia “riflettente” della parete, cioè quella che è rivolta verso l'interno della cavità.

La **sorgente** ed il **ricevitore** sono due punti dello spazio delimitato dalla cavità e sono quindi individuati da due terne di coordinate cartesiane ortogonali.

## 3.2 L'algoritmo

### 3.2.1 Generazione del reticolo di SV: validità di una SV nel caso di cavità convessa

Una volta assegnata la cavità e la posizione della sorgente, il primo passo è la generazione del reticolo di SV. Cominciamo col riferirci al caso molto semplice di una parete:

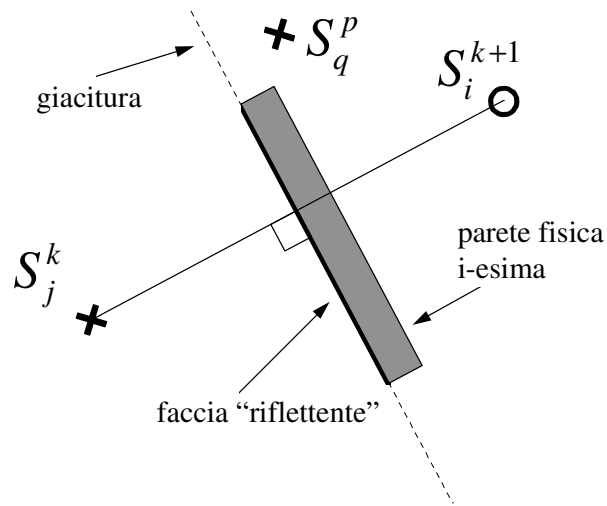


Figura 3.2 Generazione di una SV di ordine  $k+1$  per riflessione di una SV di ordine  $k$  su una parete di ordine  $i$ .

La giacitura della parete è individuata dai parametri  $(a,b,c,d)$  della rappresentazione implicita di un piano in un riferimento cartesiano ortogonale  $ax+by+cz+d=0$ ; la sorgente  $S_j^k$ , di coordinate  $(x_k, y_k, z_k)$ , è la sorgente che è stata generata per riflessione sulla parete  $j$ -esima ed ha **ordine**  $k$ ; per ordine di una SV si intende il numero di riflessioni che hanno portato alla sua generazione (la sorgente reale avrà quindi ordine nullo e non essendo stata generata per riflessione su alcuna delle pareti della cavità, sarà indicata con  $S_0^0$ ). Delle due sorgenti  $S_j^k$  e

<sup>4</sup> La successione di punti deve definire una circuitazione della parete; due punti consecutivi nella successione (tranne il primo e l'ultimo) devono essere estremi dello stesso lato.

$S_q^p$  della figura 3.2, solo la prima può generare la sorgente di ordine superiore per riflessione sulla parete  $i$ , essendo la seconda situata nel semispazio “opaco” della parete stessa. Diremo allora che la  $S_i^{k+1}$  è **valida**, se la  $S_j^k$  è situata nel semispazio riflettente della parete  $i$ , ovvero se è verificata la

$$k = -\frac{ax_k + by_k + cz_k + d}{a^2 + b^2 + c^2} < 0. \quad (3.1)$$

In questo caso (e solo in questo caso) la  $S_i^{k+1}$  deve essere generata e la sua posizione è data da

$$(x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1}) \equiv (x_k + 2ka, y_k + 2kb, z_k + 2kc). \quad (3.2)$$

La verifica di validità di una SV ed il calcolo della sua posizione richiedono sei moltiplicazioni e sei addizioni<sup>5</sup>.

Se si ammette che gli angoli tra le pareti siano minori di 180° (ovvero nel caso di cavità convesse), si può estendere senza limitazioni la definizione ora data. Vedremo più avanti che nel caso di cavità concave, per evitare di generare SV che non hanno significato fisico, bisognerà ridefinire il concetto di validità in modo più stringente.

### 3.2.2 Generazione del reticolo di SV: criteri per la terminazione dell'albero delle SV

Supponiamo di avere una cavità convessa con  $N$  pareti; le SV di ordine 1 sono quindi  $N$ ; ognuna di esse genererà al più<sup>6</sup>  $N-1$  sorgenti di ordine 2, che saranno quindi  $N(N-1)$ ; iterando il procedimento fino all'ordine  $i$  si avranno al più  $N(N-1)^{i-1}$  sorgenti che potranno pensarsi come gli elementi di un albero  $n$ -ario nel quale ogni nodo (tranne la radice che è la sorgente reale) ha un genitore e  $N-1$  figli al massimo. Si pone il problema del criterio da adottare per

<sup>5</sup> Potrebbe sembrare dalle (3.1), (3.2) che il numero di operazioni richieste sia maggiore; in realtà i parametri del piano di giacitura sono memorizzati in questo modo

$\left( \frac{a}{a^2 + b^2 + c^2}, \frac{b}{a^2 + b^2 + c^2}, \frac{c}{a^2 + b^2 + c^2}, \frac{d}{a^2 + b^2 + c^2} \right)$ , cioè sono rappresentati normalizzati rispetto al

quadrato della norma del versore del piano.

<sup>6</sup> Supponendo cioè che tutte le sorgenti siano valide ed escludendo dal conto la parete che ha generato la sorgente in questione.



fermare la proliferazione esponenziale delle SV. Una prima possibilità è quella di generare le SV fino ad un certo **ordine** fissato; ma dato che l'ordine non ha nessuna relazione con i parametri fisici della simulazione, sarà difficile stabilire quale sia quello più adatto. Si può, allora, decidere di fermare la generazione in funzione della **distanza** della SV; se si osserva infatti la figura seguente

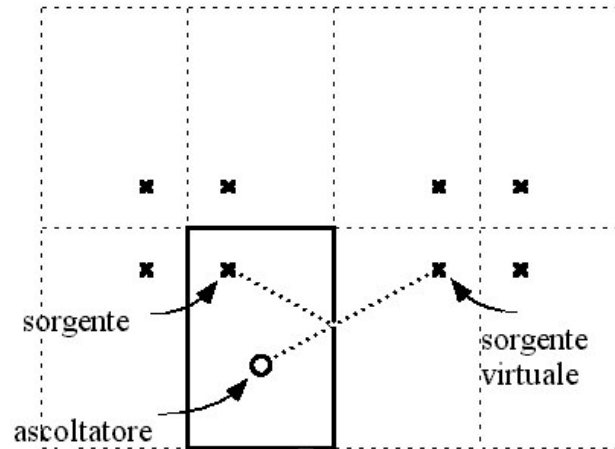


Figura 3.3 Reticolo delle SV per una cavità rettangolare

ci si accorge che il cammino dalla sorgente reale all'ascoltatore ha la stessa misura di quello che parte invece dalla sorgente virtuale. Durante questo cammino l'ampiezza dell'onda subirà un'attenuazione per propagazione proporzionale all'inverso della distanza percorsa; quindi, generando le SV fino ad un certo raggio dall'ascoltatore, si escluderanno dall'analisi quelle che hanno subito un'attenuazione per propagazione maggiore di quella che corrisponde alla distanza fissata. Anche questo criterio, nonostante sia più fondato di quello esposto precedentemente, ha un limite: non tiene in conto le eventuali differenze nell'attenuazione delle pareti. Supponiamo, infatti, che nella cavità della figura precedente i quattro lati siano divisi in due coppie di pareti attigue con  $\alpha_r$ , molto diversi; adottando il criterio della distanza, la generazione del reticolo continuerà in tutte le direzioni anche se le sorgenti che corrispondono a riflessioni sulle due pareti più assorbenti contribuiranno molto di meno alla

risposta impulsiva. Si è deciso, allora, di fornire l'algoritmo di un ulteriore criterio di terminazione legato all'**attenuazione totale**: la SV viene generata se è valida e se l'attenuazione che ha subito per effetto della propagazione e dell'assorbimento delle pareti è inferiore ad un certo valore fissato in precedenza. Nella figura 3.4 sono illustrati tre esempi di generazione di un reticolo di SV interrotto in base ai tre criteri sopra esposti

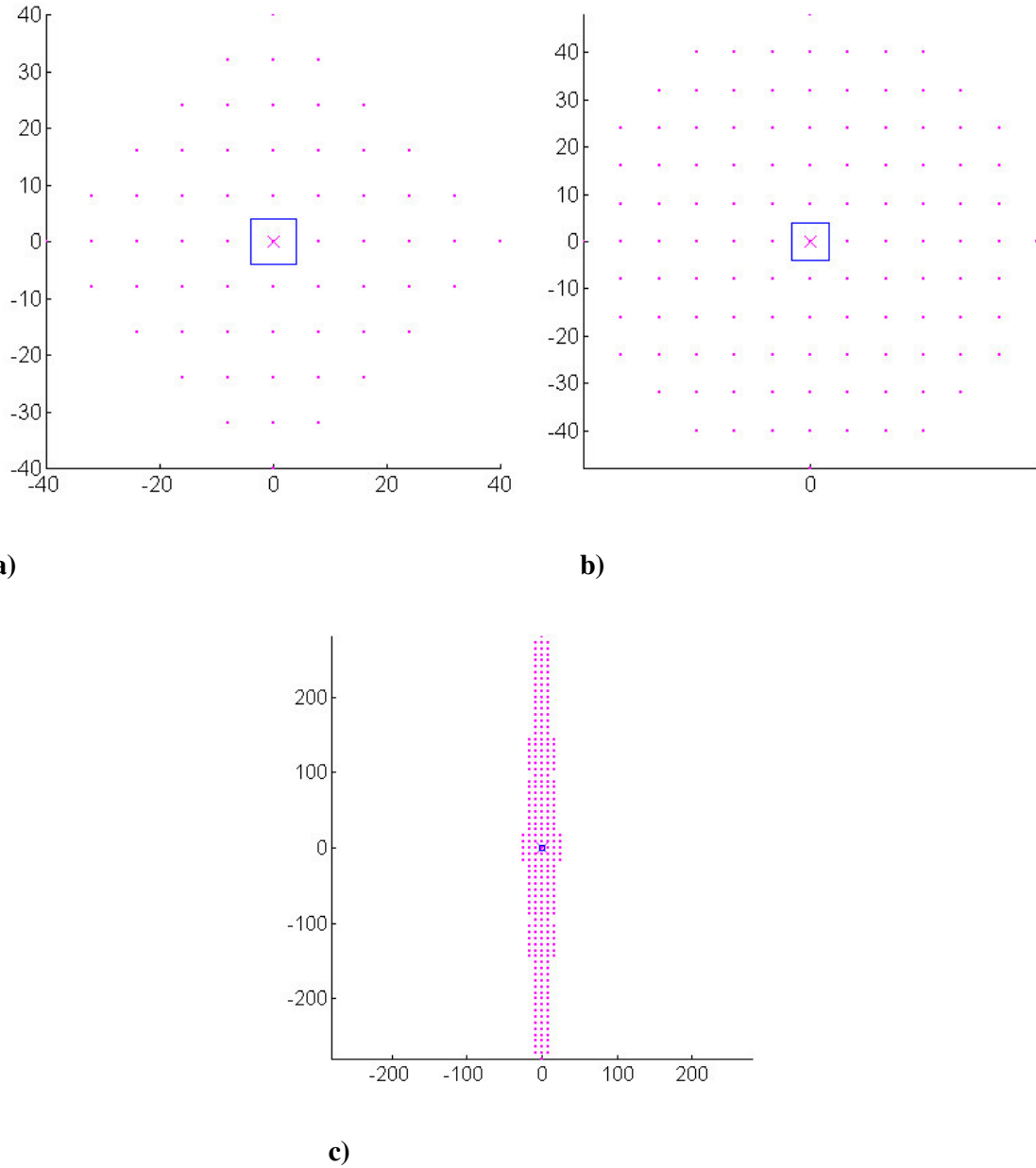


Figura 3.4 Criteri di interruzione della generazione delle SV nel caso di una cavità rettangolare nella quale le pareti adiacenti hanno coefficienti di riflessione molto diversi. **a)** SV fino al quarto ordine; **b)** SV fino ad una distanza pari a circa dieci volte le dimensioni medie della cavità; **c)** SV con un'ampiezza ridotta fino a 60dB rispetto alla sorgente reale. Si noti come, nel terzo caso, la cavità abbia dimensioni trascurabili rispetto alla distanza fino alla quale si è spinta la generazione nella direzione delle pareti meno assorbenti.

### 3.2.3 Visibilità di una SV nel caso di cavità convessa

La generazione dell'albero delle SV è un'operazione che prescinde dalla posizione dell'ascoltatore<sup>7</sup> essendo legata unicamente alla geometria della cavità; una volta generato l'albero delle SV, però, bisognerà stabilire quali di esse siano “visibili” dal punto di ascolto.

Per introdurre il concetto di visibilità si faccia riferimento alla seguente figura

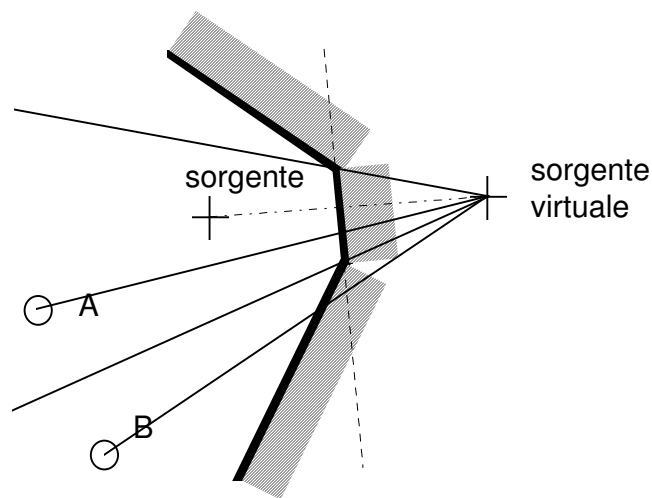


Figura 3.5 La SV è visibile all'osservatore in A, ma non a quello in B.

Appare chiaro che la SV sarà visibile solo per l'ascoltatore in A, poiché questo si trova all'interno del cono intercettato dalla parete reale. Per le sorgenti del primo ordine è quindi molto semplice enunciare il criterio di visibilità: data una  $S_j^1$ , un punto dello spazio e il segmento che li unisce, diremo che la sorgente è **visibile** se il punto in cui il segmento interseca la giacitura della parete  $j$  è interno al perimetro della parete fisica. Per le sorgenti degli ordini successivi la verifica di visibilità è più complessa, ma prima di enunciarla

<sup>7</sup> In verità i criteri di terminazione della fase di generazione dell'albero delle SV che si basano sulla distanza o sull'attenuazione totale necessitano della conoscenza della posizione dell'ascoltatore. Si può però, in questa fase, collocare un ascoltatore fittizio in una posizione centrale della cavità in modo da non compromettere eccessivamente la fase successiva.

conviene esporre il criterio utilizzato per riconoscere se l'immagine della sorgente virtuale sulla giacitura della

parete è interna o meno al perimetro della parete stessa. Nel caso di cavità convessa, i lati delle poligonali che descrivono i perimetri delle pareti formano angoli minori di  $180^\circ$ ; in questo caso per capire se un punto del piano è interno o esterno alla poligonale si può rilevare il segno del prodotto vettoriale dei vettori che lo uniscono di volta in volta ad ognuno dei vertici consecutivi della poligonale stessa. Facendo riferimento alla figura 3.6 si

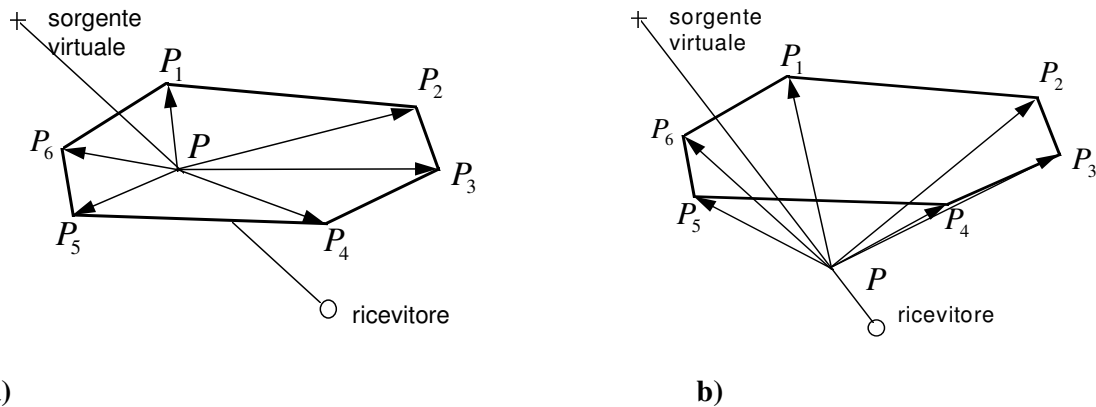


Figura 3.6 In a) il punto  $P$ , immagine della sorgente virtuale sulla giacitura della parete, è interno al perimetro della parete stessa. In b), invece, è esterno.

nota che nel primo caso il prodotto vettoriale non cambia mai segno, mentre nel secondo  $\underline{PP_2} \times \underline{PP_3}$  e  $\underline{PP_3} \times \underline{PP_4}$  hanno segni diversi.

Se l'ordine della SV è maggiore di uno, è possibile applicare il criterio sopra esposto per verificarne la visibilità? La risposta è no, e per mostrarne la ragione utilizziamo la figura 3.7:

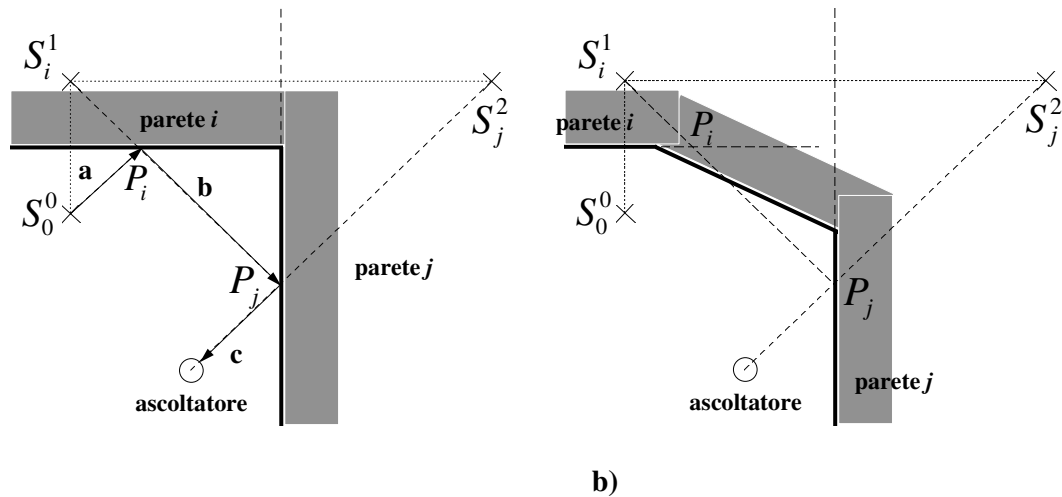


Figura 3.7 Visibilità di una SV di ordine superiore ad uno. Nel caso a) la  $S_j^2$  è visibile all’ascoltatore, ma non nel caso b).

In **a)** è mostrato il caso di una sorgente di ordine 2 ( $S_j^2$  generata per riflessione della sorgente reale sulla parete *i* e quindi sulla *j*) che è visibile all’ascoltatore; infatti il punto  $P_j$ , immagine di  $S_j^2$  sulla giacitura *j*, appartiene alla parete fisica, ma anche il punto  $P_i$ , intersezione con la giacitura *i* del segmento che unisce  $S_i^1$  a  $P_j$ , appartiene alla parete fisica *i*; potremo affermare, quindi, che la  $S_j^k$  è visibile, soltanto dopo aver verificato a ritroso, col procedimento appena esposto, la visibilità di ognuna delle SV che la precedono nell’albero “genealogico”; nella fig. 3.7 **a)** il percorso *a-b-c* ricostruisce il cammino reale all’interno della cavità. Infatti nel caso **b)** la stessa SV non è visibile all’ascoltatore perché, anche se il punto  $P_j$  è ancora all’interno della parete fisica *j*, il punto  $P_i$  è esterno alla  $P_j$ .

Prima di passare all’estensione dei concetti introdotti finora al caso di cavità concave, riassumiamo brevemente i passi da percorrere per la generazione e la validazione di un reticolo di SV per una cavità convessa:

⇒ partendo dalla sorgente reale  $S_0^0$ , per ognuna delle pareti della cavità, si verifica la **validità** della sorgente che si sta per generare, e che sia falsa la **condizione di terminazione**

prescelta; se entrambi i test danno risultato positivo, si genera la SV e si procede fino all'esaurimento delle pareti. In questo modo si è costruito il primo livello dell'albero delle SV.

⇒ si applica iterativamente la stessa procedura ad ognuna delle SV generate al passo precedente fino a quando l'albero non è completo.

⇒ si visita l'albero generato, verificando la visibilità di ogni nodo dal punto prescelto come punto di ascolto. Alla fine della visita solo le SV che avranno superato il test di visibilità contribuiranno alla costruzione della risposta impulsiva. E' importante sottolineare la differenza tra il concetto di validità e quello di visibilità: l'insieme delle sorgenti valide contiene in sé tutti i possibili insiemi di sorgenti visibili da ogni punto della cavità; quindi, una volta generato l'albero delle SV valide, si potrà procedere con l'analisi di visibilità da punti differenti della cavità senza doverlo ricostruire ogni volta. Inoltre, mentre una sorgente non valida non può avere discendenti valide, una sorgente non visibile **può** avere, tra le sue discendenti, SV visibili; l'aver incontrato una sorgente non visibile, quindi, non costituisce ragione sufficiente per interrompere la verifica di quel ramo.

Per comprendere quanto appena asserito, ci si riferisca alla figura 3.8 nella quale si è ripresa la situazione di figura 3.7 b) aggiungendo una sorgente di ordine tre, figlia diretta della  $S_j^2$ , ma, al contrario di questa, visibile all'ascoltatore.

### 3.2.4 Generazione del reticolo di SV: validità di una SV nel caso di cavità concava

Nel caso di una cavità concava, ovvero quando siano ammessi angoli tra le pareti maggiori di  $180^\circ$ , si è trovato che la definizione di validità è più stringente che

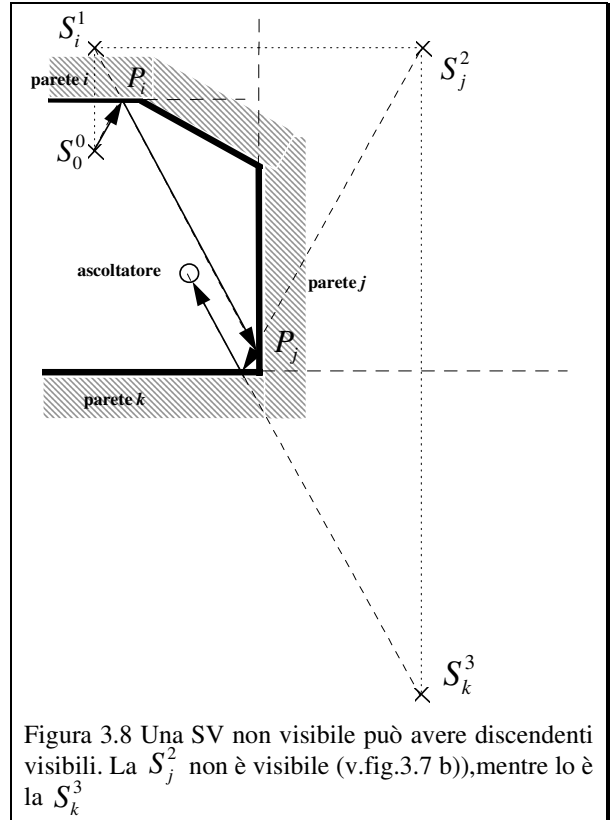
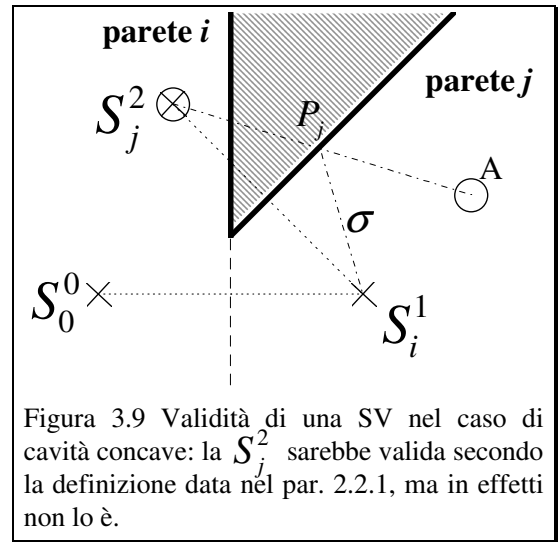


Figura 3.8 Una SV non visibile può avere discendenti visibili. La  $S_j^2$  non è visibile (v.fig.3.7 b)),mentre lo è la  $S_k^3$

nel caso di cavità convesse. L'estensione

della definizione già data al caso di cavità concave porta alla generazione di una moltitudine di sorgenti che non hanno significato fisico alcuno, ma che incrementano notevolmente l'aggravio computazionale dell'algoritmo. Durante le fasi di test e debugging del programma di simulazione, si sono verificati casi in cui, in presenza di cavità concave, si assisteva ad una proliferazione incontrollata di SV in pochi punti dello spazio anche nelle immediate vicinanze della cavità; quando, però, ci si è accorti che questa moltitudine non contribuiva in nessun caso alla risposta impulsiva, si è compreso che doveva esserci qualche meccanismo geometrico che generava questi "collapsi" e che non aveva nessun riscontro fisico; anche in letteratura (es. [Borish 1984]) si trovano riferimenti a questo comportamento "anomalo" delle cavità concave, ma senza che venga mai indicata una soluzione.

Per spiegare l'origine del problema conviene fare riferimento alla figura 3.9: secondo la definizione data nel paragrafo 3.2.1, la  $S_j^2$  sarebbe valida e andrebbe quindi generata; supponiamo allora di generarla e di verificarne la visibilità rispetto all'ascoltatore in  $A$ . La verifica del primo tratto da' risultato positivo, essendo il punto  $P_j$  appartenente alla parete  $j$ ; la



verifica del secondo tratto non potrà **mai** dare risultato positivo in quanto il segmento  $\sigma$  si trova interamente nel semispazio opaco della parete  $i$  e quindi non la potrà **mai** intersecare; come è facile intuire dalle costruzioni mostrate in figura, questa situazione nasce dal fatto che l'angolo tra le pareti  $i$  e  $j$  è maggiore di  $180^\circ$ . Senza addentrarci nei particolari algoritmici che rischierebbero di far perdere di vista il filo del discorso, diremo che l'aver individuato l'origine del problema ha permesso di riformulare il concetto di validità nel caso di cavità concave e quindi di evitare la generazione di una pletora di SV inutili. Nella figura 3.10 è mostrato un esempio di quanto affermato nel caso di un segmento di cavità concava bidimensionale<sup>8</sup>; nel primo caso si è usata la definizione di validità esposta nel paragrafo 3.2.1 e le sorgenti generate sono state 2141; nel secondo caso si è utilizzata la definizione di validità più generale che ha portato a generare soltanto 147 SV, ovvero circa il 7% del numero precedente.

<sup>8</sup> E' opportuno sottolineare ancora una volta che gli esempi e le illustrazioni riportati si riferiscono a reticoli e cavità bidimensionali o con simmetrie planari, al solo scopo di renderli intelligibili. Tutto ciò che è stato detto fa riferimento al caso che è stato implementato e cioè quello tridimensionale.



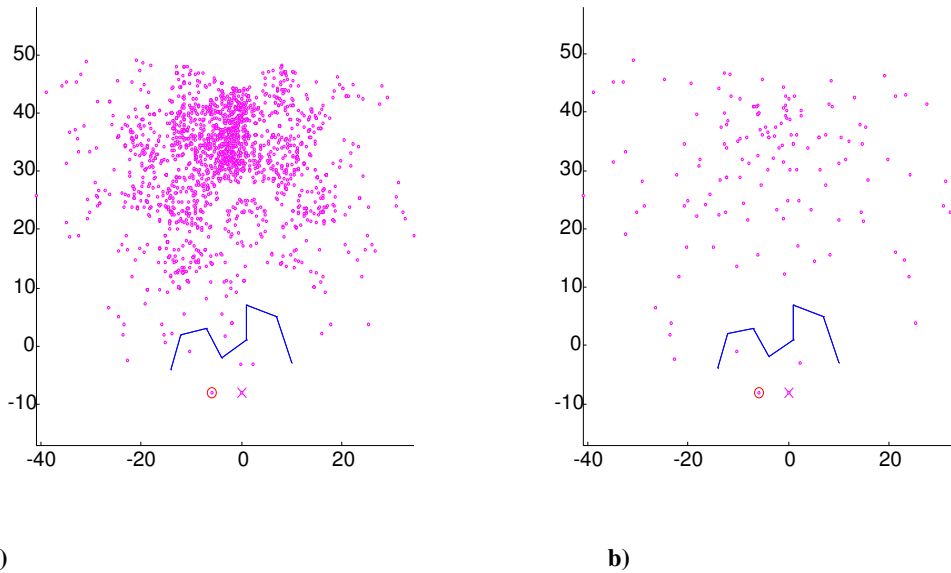


Figura 3.10 L'applicazione della definizione di validità nel caso più generale, permette di diminuire drasticamente il numero di SV generate. In **a)** sono 2141, mentre in **b)** sono 147. La sorgente reale è indicata da un cerchio circoscritto.

Per quanto riguarda i criteri di terminazione della generazione dell'albero delle SV, non vi sono differenze rispetto al caso delle cavità convesse.

### 3.2.5 Visibilità di una SV nel caso di cavità concava

Si è visto nel par. 2.2.3 che la verifica di visibilità di una SV consiste nel ripercorrere a ritroso l'albero fino alla sorgente reale, verificando la visibilità di ognuno dei tratti del cammino che conduce fino all'ascoltatore; nel caso di cavità convesse si è spiegato che il controllo nodale della verifica di visibilità verte sull'accertamento della posizione del punto immagine rispetto alla poligonale che descrive la parete fisica. Nel momento in cui si ammette la possibilità che gli angoli tra i lati della poligonale di una parete possano essere maggiori di  $180^\circ$ , il metodo spiegato in quel paragrafo non funziona più. Consideriamo la fig. 3.11 nella quale sono raffigurati la parete  $i$ -esima in pianta ed il punto immagine; il segno del prodotto vettoriale stavolta non può esserci di aiuto: anche se il punto è interno alla poligonale, possono verificarsi inversioni del verso di rotazione del vettore che congiunge il punto stesso con ognuno dei vertici. Basterà allora misurare la rotazione totale del vettore suddetto: una

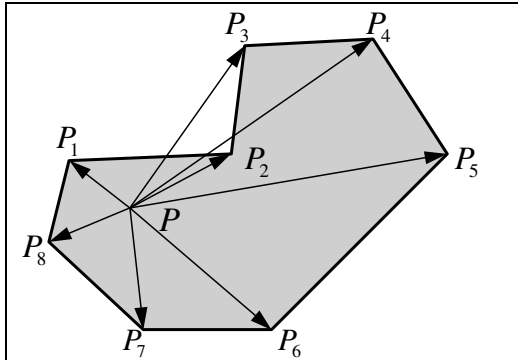


Figura 3.11 Se sono ammesse rientranze nelle poligonali che descrivono le pareti, la direzione di rotazione del vettore  $\underline{PP}_k$  può cambiare anche se il punto è interno (v. per es. la successione  $P_1 P_2 P_3 P_4$ ). Bisogna misurare, allora, la rotazione completa del vettore.

rotazione di  $2\pi$  rad vuol dire che il punto è interno; una rotazione di 0 rad vuol dire che il punto è esterno al perimetro.

Un'altra sostanziale modifica dell'algoritmo interviene ad appesantire la verifica di visibilità delle SV nel caso di cavità concave: oltre a verificare la visibilità di ogni singolo tratto del percorso, bisognerà anche verificare che questo non intersechi una parete rientrante, che in questa fase costituisce un ostacolo; dato che questa

verifica può essere molto costosa in termini di calcolo,

sarà bene contrassegnare le pareti ostruenti in modo tale che il numero di controlli sia minimo.

Per completare il paragrafo si riportano, in figura 3.12, le vedute semi-laterale e in pianta dell'ecogramma (ovvero il pattern di SV) di una cavità cilindrica aperta a sezione ottagonale; le SV inscritte in un piccolo cerchio sono quelle visibili dal punto di ascolto che, in questo caso, coincide con la sorgente reale ed è contrassegnato dalla croce all'interno dell'ottagono.

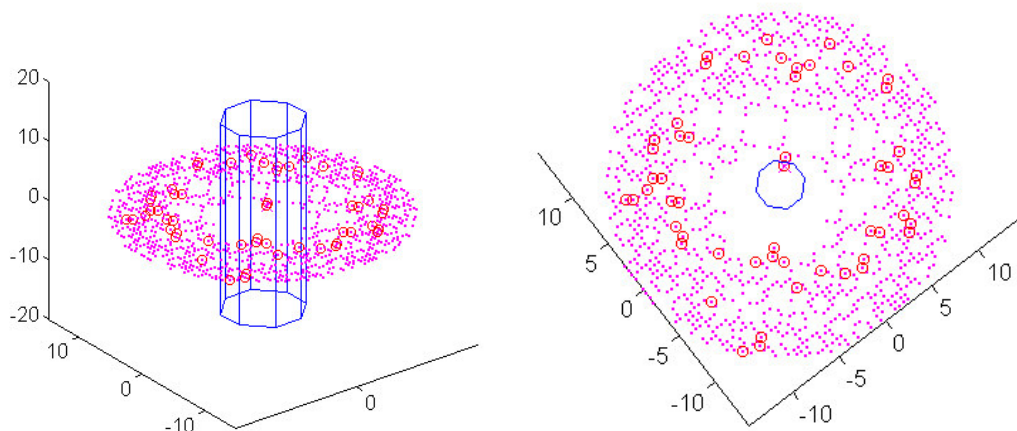


Figura 3.12 Vista semi-laterale e in pianta dell'ecogramma di una cavità cilindrica a sezione ottagonale. Le sorgenti inscritte in un cerchio sono quelle visibili dal punto scelto che, in questo caso, coincide con la sorgente reale.

### 3.3 Sintesi della risposta impulsiva

Una volta terminata l'analisi dell'albero delle SV valide, si avrà isolato un insieme di oggetti (le SV visibili dal punto di ascolto prescelto) che contengono tutte le informazioni necessarie alla costruzione della risposta impulsiva. Per il momento conviene pensare alla sintesi di una risposta impulsiva nel dominio tempo-continuo, rimandando l'analisi del passaggio al dominio tempo-discreto ad un secondo momento. La risposta impulsiva apparirà, allora, come una successione di impulsi il cui ritardo dall'istante iniziale (quello nel quale è stato idealmente collocato il primo impulso) dipenderà dalla distanza della SV dal punto di ascolto, e la cui ampiezza dipenderà dall'attenuazione totale che la sorgente ha subito nel corso delle varie riflessioni. Inoltre, la posizione della SV nello spazio darà le informazioni necessarie alla ricostruzione della direzione di provenienza dell'eco che essa rappresenta. Nelle sezioni successive analizzeremo l'implementazione dei fenomeni di attenuazione e la strada seguita nella sintesi della risposta impulsiva tempo-discreto.

#### 3.3.1 Le pareti

Nel paragrafo 3.1 si è parlato della rappresentazione geometrica di una parete. Per quanto riguarda le caratteristiche acustiche dei materiali che compongono le pareti, bisogna fornire, nell'ambito della descrizione della cavità, o il coefficiente di riflessione come definito dalla (2.9) o l'impedenza complessa  $z_n = r_n + jx_n$  della parete. Dato che la  $S_j^k$  si ottiene attraverso  $k$  riflessioni su altrettante pareti, l'ampiezza dell'impulso ad essa relativo sarà data da

$$A_{S_j^k} = \prod_{p_i \in P_k} \alpha_r^{(p_i)} \quad (3.3)$$

se si suppone che l'impulso iniziale abbia ampiezza unitaria e che  $P_k$  sia l'insieme delle  $k$  pareti lungo il cammino fino a  $S_j^k$ . Nella (3.3) si fa riferimento alla sola attenuazione per

effetto della riflessione sulle pareti della cavità: bisognerà tenere in conto anche l'attenuazione dell'aria e quella dovuta alla propagazione dell'onda.

### 3.3.2 L'attenuazione dovuta alla propagazione

Si è visto, nella esposizione dell'algoritmo, che la distanza euclidea di una SV dal punto di ascolto è pari alla distanza percorsa dall'onda nel propagarsi dalla sorgente all'ascoltatore. L'ampiezza dell'onda sferica, come è noto, è proporzionale all'inverso della distanza dalla sorgente. Questa è, però, un'approssimazione che è tanto più vera quanto più la distanza è grande; se la stessa legge valesse per distanze inferiori all'unità o addirittura molto prossime allo zero, l'ampiezza divergerebbe. Per avere una legge che abbia un riscontro fisico si può allora ragionare come segue. Supponiamo che la potenza irradiata dalla sorgente sia  $P$ ; questa potenza si distribuisce, man mano che l'onda si propaga, sul fronte d'onda sferico di raggio  $R$ ; ciò che ci interessa è trovare un'espressione per la densità superficiale di potenza in funzione della distanza  $R$  dall'origine.

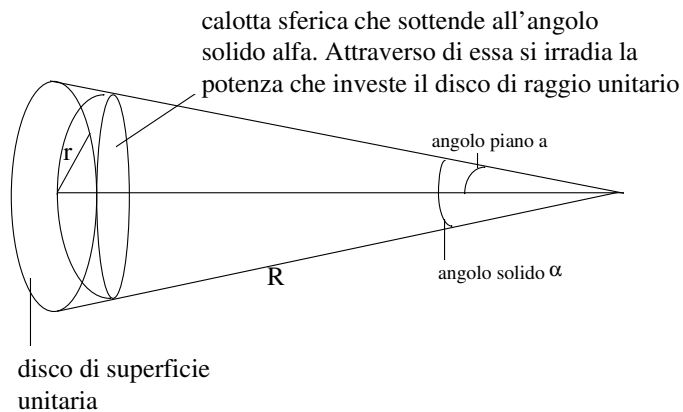


Figura 3.13 Calcolo della potenza irradiata a distanza  $R$  da una sorgente puntiforme.

Dopo semplici considerazioni geometriche si arriva alla

$$P_R = P \operatorname{sen}^2 \left( \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\pi R^2}} \right) \quad (3.4)$$

che soddisfa pienamente le aspettative in quanto, come è facile verificare,

$$\lim_{R \rightarrow \infty} P \operatorname{sen}^2 \left( \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\pi R^2}} \right) = 0 \quad \text{e} \quad \lim_{R \rightarrow 0^+} P \operatorname{sen}^2 \left( \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\pi R^2}} \right) = \frac{P}{2} .^9$$

Il grafico bilogarithmico nella figura successiva illustra la coincidenza della legge data dalla (3.4) con quella dell'inverso del raggio, per distanze "grandi".<sup>10</sup>

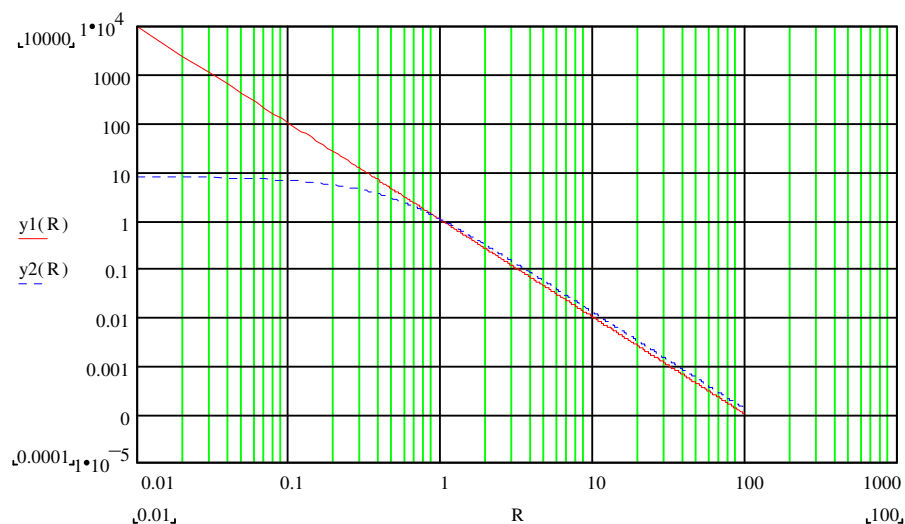


Figura 3.14 Confronto tra la legge (3.4) (linea tratteggiata) e la  $1/R^2$  (linea continua) sulla potenza irradiata da una sorgente puntiforme a distanza  $R$ .

### 3.3.3 L'assorbimento dell'aria

L'effetto di filtraggio dell'aria è stato modellizzato, in prima approssimazione, con un filtro passa-basso ad un polo. Ogni impulso prodotto dall'algoritmo viene, quindi, trasformato in

<sup>9</sup> Il fatto che il secondo limite dia  $P/2$  come risultato è coerente con le aspettative in quanto, se il raggio  $R$  tende a zero il disco di superficie unitaria tende a sottendere un angolo solido di  $2\pi$  steradiani e quindi a raccogliere metà della potenza irradiata dalla sorgente.

<sup>10</sup> Può avere un certo rilievo la differenza di aggravio computazionale tra le due leggi, specialmente se, come condizione di terminazione, si sceglie l'attenuazione totale. In questo caso, infatti, la differenza tra il numero di operazioni nell'un caso e nell'altro, va moltiplicata per il numero di SV che può raggiungere un ordine di grandezza di  $10^5$ . La soluzione adottata nell'implementazione è la tabulazione della funzione (3.4) fino ad una distanza fissata e l'adozione, per distanze maggiori, della legge  $1/R$ .

un'esponenziale decrescente con una costante di tempo che dipende dalla distanza percorsa dall'onda. Il filtro che implementa l'interazione con l'aria è del tipo:

$$a(t) = e^{-2\pi f_c(d)t} \quad (3.5)$$

Per esprimere la dipendenza della frequenza di taglio del polo dalla distanza percorsa, si è fatta l'analisi di alcune misure messe a disposizione in rete dalla Enviromeasure<sup>11</sup> e si è trovata una legge del tipo

$$f_c(t) = 10^{4.88} d^{-0.698} \quad (3.6)$$

che vale per una pressione atmosferica di 101325 Pa, a 20°C e con umidità relativa del 50%. Come suggerito da un'attenta analisi della (3.6), l'effetto dell'aria, soprattutto nell'ultima parte della risposta impulsiva, non è indifferente. Ad esempio, già a circa sei metri di distanza (che corrispondono ad un ritardo di 17ms) la frequenza di taglio del polo è in banda audio; ad una distanza di 1Km (che potrebbe sembrare grande, ma in realtà corrisponde ad un ritardo di poco meno di tre secondi, ovvero un tempo di riverberazione per nulla inusuale in una sala di medie dimensioni) la frequenza a 3dB è intorno ai 600Hz e a 5KHz l'attenuazione si attesta intorno ai 44dB. L'aria ha quindi un ruolo fondamentale nella costruzione della densità tipica della seconda parte della risposta impulsiva: essa tende a "mescolare" i contributi delle SV più lontane e contribuisce alla formazione di una "coda" esponenziale che è tipica delle risposte campionate di ambienti reali.

---

<sup>11</sup> La decisione di utilizzare i dati forniti dalla Enviromeasure sulla rete WWW è scaturita dal fatto che i dati riguardanti misure sull'attenuazione della radiazione acustica nell'aria sono difficilmente reperibili in letteratura e quelli che si avevano a disposizione erano risalenti al 1963 [C.M.Harris 1963] (molta della letteratura successiva fa, più o meno consapevolmente, riferimento a quei dati). Oltretutto nell'articolo citato si presentavano i risultati da un punto di vista qualitativo, senza fornire i dati sperimentali. Le misure della Enviromeasure sono comunque in sostanziale accordo con i risultati già conosciuti in letteratura e sono date, nelle condizioni sopradette, con un'accuratezza del 10%.

### 3.3.4 Sintesi della risposta impulsiva nel dominio tempo-discreto

Fino a questo punto si è pensato al filtro FIR della risposta impulsiva come ad un filtro tempo-continuo. Ma dato che l'elaborazione del segnale è svolta interamente in ambito digitale, bisognerà dedicare attenzione al passaggio dal dominio tempo-continuo a quello tempo-discreto. La linea di frontiera nel passaggio da un dominio all'altro è costituita dal teorema del campionamento le cui condizioni di applicabilità pongono subito un problema, nel nostro caso: la risposta impulsiva che è stata ricavata fino a questo punto è costituita da una successione di impulsi di ampiezza via via decrescente che, quindi, non è limitata in banda. Si può, allora, pensare di rappresentarla come una sovrapposizione di segnali che provengono dall'aver filtrato, per esempio in banda audio, lo spettro dell'impulso, supponendo, in questo modo, di poter trascurare il contributo delle armoniche con frequenze superiori ai 22050Hz; se pensiamo di filtrare l'impulso con un filtro passa-basso rettangolare con frequenza di taglio a 22050Hz, la linea di convoluzione (che appartiene ancora al dominio tempo-continuo) apparirà come una sovrapposizione di *sinc*, piuttosto che impulsi, centrate sullo stesso istante di tempo dell'impulso di provenienza e con ampiezza del lobo principale pari a  $\frac{1}{22050Hz} \approx 45.4\mu s$ . Riprendendo la soluzione espressa dalla (2.8), la potremo riscrivere nel modo seguente

$$p(t, \mathbf{R}, \mathbf{R}') = \sum_{q=1}^8 \sum_{i^3=-\infty}^{+\infty} \frac{\text{sinc}_{f_N} \left( t - \frac{|\mathbf{r}_q + \mathbf{r}_i|}{c} \right)}{4\pi |\mathbf{r}_q + \mathbf{r}_i|} \quad (3.7)$$

dove per  $\text{sinc}_{f_N}(t)$  si intende la  $\frac{\sin(2\pi f_N t)}{2\pi f_N t}$  e  $f_N = 22050\text{Hz}$ . Nelle due figure che seguono è mostrato un tratto di una risposta impulsiva dopo il filtraggio a 22050Hz. A questo punto è possibile campionare il segnale così ottenuto ed usarlo per la convoluzione con la sequenza di ingresso.

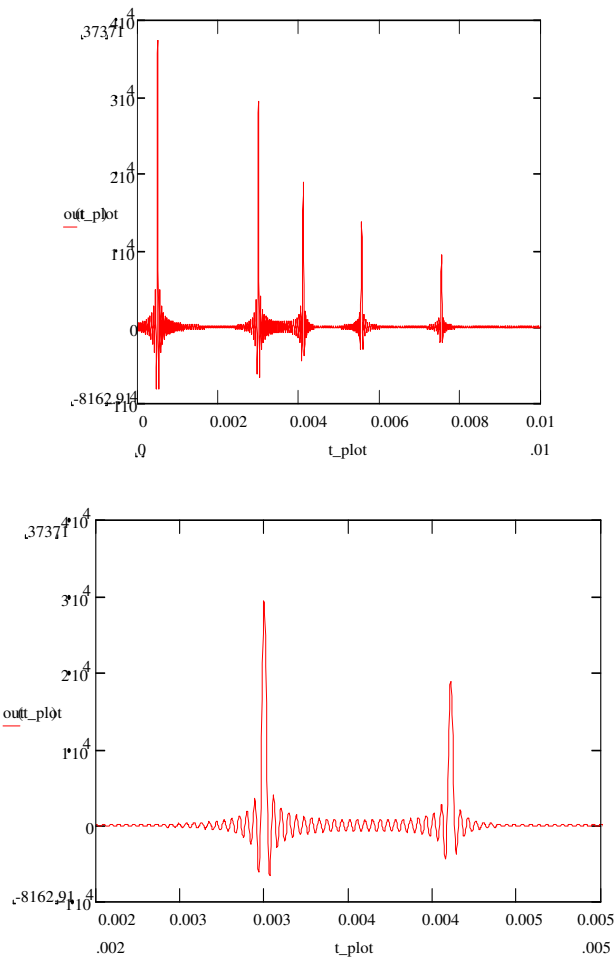


Figura 3.15 Risposta impulsiva costituita da cinque impulsi con ritardi diversi, filtrati a 22.050KHz. Nella seconda immagine è riportato un dettaglio dell'intervallo di tempo tra il secondo ed il terzo impulso per evidenziare la zona di sovrapposizione dei due segnali.

Due problemi scaturiscono dall'adozione di questo tipo di approccio: la non causalità della  $\text{sinc}$  e il filtraggio dell'impulso con un filtro ideale a pendenza infinita. La non causalità della  $\text{sinc}$  comporta il fatto che, in sede di ricostruzione del segnale, io debba poter "guardare nel



futuro” per un intervallo di tempo pari alla metà della finestra temporale che ho usato per rappresentare la *sinc* stessa. Supponiamo, ad esempio, di avere un convolutore che sia in grado di calcolare, in tempo reale<sup>12</sup> e ad una frequenza di campionamento di 44100Hz, la convoluzione tra un segnale anecoico ed una risposta impulsiva sintetizzata precedentemente della durata di alcuni secondi. Se la risposta impulsiva è stata sintetizzata, come appena spiegato, filtrando l’impulso con un filtro FIR a 128 tappe, l’effetto di ricostruire il segnale con una risposta impulsiva siffatta sarà quello di avere traslato nel tempo **tutto** il segnale di uscita di un intervallo pari a  $128/2=64$  campioni, ovvero di avere introdotto un ritardo fittizio, rispetto al segnale originale, di appena 1.5ms<sup>13</sup>.

Per ciò che riguarda, invece, il problema del filtraggio dell’impulso con un filtro rettangolare ideale, l’inconveniente maggiore dell’aver a disposizione una finestra temporale finita è quello del “ringing” alle frequenze vicine alla frequenza di Nyquist.

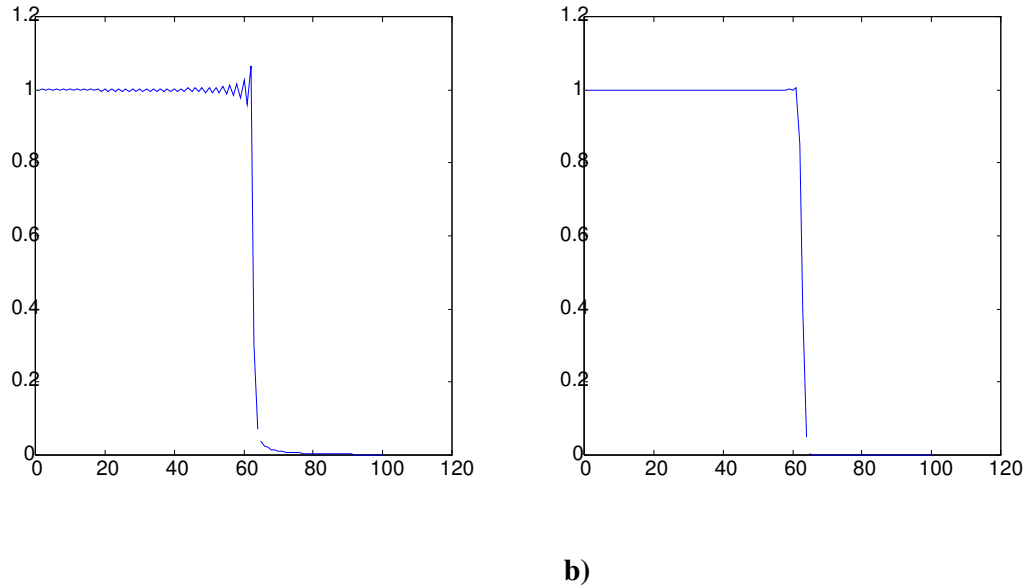


Figura 3.15 Effetto di una finestra di tipo Hanning su un filtro FIR a 1024 tappe.

<sup>12</sup> Il problema di cui si tratta è “sensibile” solo nel caso di applicazioni in tempo reale. Se, infatti, l’elaborazione del segnale avviene in tempo differito, l’introduzione di un ritardo fittizio diventa irrilevante poiché si è persa completamente traccia del riferimento temporale al segnale reale.

<sup>13</sup> Tale ritardo può essere considerato, con buona pace dell’orecchio, assolutamente non lesivo del concetto di tempo reale in questo tipo di applicazioni.

Una delle soluzioni è quella di utilizzare una funzione che, moltiplicata per la *sinc*, abbia l'effetto di smussare i lobi secondari ed ottenere, in frequenza, una risposta più "liscia". Nella figura 3.15 **a)** è mostrata l'ampiezza della risposta in frequenza di un filtro passa-basso FIR a 1024 tappe ottenuto con una finestra perfettamente rettangolare, mentre nella **b)** è riportata la risposta in frequenza dello stesso filtro, ma ottenuto con una finestra di Hanning.

Una sintesi corretta della risposta impulsiva ed una ricostruzione accurata del segnale di uscita sono importanti per rappresentare correttamente le interazioni e le sovrapposizioni delle perturbazioni prodotte dalle SV, soprattutto nella prima parte della risposta<sup>14</sup>. La seconda parte, come abbiamo visto, è caratterizzata da un deciso aumento della densità delle SV e dagli effetti di filtraggio dell'aria che attenua considerevolmente le alte frequenze; non avrebbe, quindi, molto senso cercare di ricostruire con estrema precisione una situazione che per sua natura tende ad essere caotica. Ma la prima parte della risposta merita particolare attenzione perché in essa sono localizzate la maggior parte delle informazioni che danno al cervello le indicazioni più importanti sulla posizione e la distanza della sorgente ed i primi suggerimenti sulle caratteristiche dell'ambiente circostante. In altre implementazioni dello stesso algoritmo documentate in letteratura, una volta generate le SV e fatta la verifica di visibilità, la collocazione dell'impulso nel filtro FIR veniva decisa in base a criteri di approssimazione alla tappa più vicina; anche campionando a 44.1KHz un metodo del genere può far compiere errori di fase pari a metà del periodo di campionamento, che per la componente a 22KHz significa un errore pari ad un quarto di lunghezza d'onda, mentre per la componente a 11KHz significa  $\lambda/8$ . Errori che possono essere non trascurabili, dato che le componenti a frequenze più alte sono quelle più facilmente localizzabili.

---

<sup>14</sup> La suddivisione della risposta di un ambiente in due "parti" è ovviamente opinabile e del tutto arbitraria. Nel capitolo introduttivo abbiamo definito il "tasso di crescita della densità d'eco" che può essere di aiuto nel tentativo di rendere più oggettiva questa classificazione, che rimane comunque fondamentalmente qualitativa.

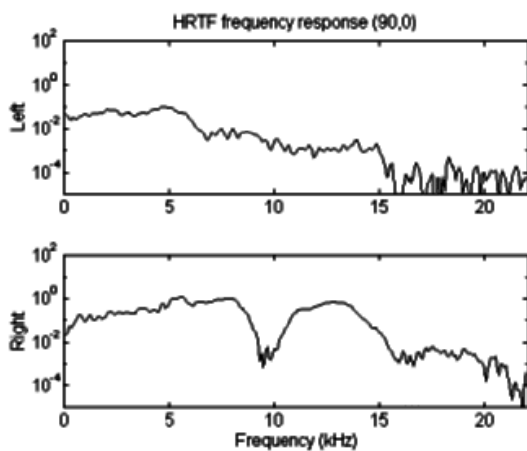
### 3.3.5 Cenni sull'auralizzazione binaurale

In parole molto semplici si può definire l'auralizzazione di un segnale come un'ulteriore elaborazione che ha l'obiettivo di indurre nell'ascoltatore la percezione corretta (cioè voluta) del materiale sonoro. Anche se non è propriamente lo scopo di questo lavoro di tesi (uno studio sulle tecniche di auralizzazione avrebbe bisogno di altrettanto spazio), è stato attuato un modello molto semplice di auralizzazione attraverso l'implementazione di due grandezze che la psicoacustica classica individua come basilari nell'identificazione della direzione o dell'angolo di incidenza di una sorgente sonora: la **differenza di intensità interaurale (IID)** e la **differenza di tempo interaurale (ITD)**. L'ITD si basa sul fatto che il segnale proveniente dalla sorgente arriva alle due orecchie dell'ascoltatore con ritardi differenti a meno che la sorgente non si trovi nel piano mediano. L'IID, invece, è dovuto alla differenza di intensità nel segnale percepito dalle due orecchie a causa dell'"ombra" che la testa getta nel cono percettivo dell'orecchio opposto alla sorgente. Se una sorgente si allontana dal piano mediano verso le direzioni più laterali rimanendo sul piano orizzontale, l'IID cresce da 0dB fino a 20dB, a seconda della frequenza del segnale, e l'ITD cresce da 0 fino a circa  $650\mu s$ . Poiché la testa attenua solo quelle frequenze le cui lunghezze d'onda sono minori del suo diametro (da 1KHz in poi), l'"ombra acustica" della testa responsabile dell'IID è dipendente dalla frequenza. Per suoni puri l'IID è una grandezza significativa solo per frequenze maggiori di 1KHz; dato che i periodi delle frequenze più alte sono inferiori del massimo ITD, l'ITD è una grandezza significativa solo per le frequenze al di sotto di 1.5KHz. È stato dimostrato, però, che la confusione potenziale tra il periodo della radiazione incidente e l'ITD, viene annullata se questa ha un'ampiezza o una frequenza variabili nel tempo.<sup>15</sup> In realtà l'IID e l'ITD forniscono le informazioni sufficienti alla "lateralizzazione" del segnale, cioè alla capacità di

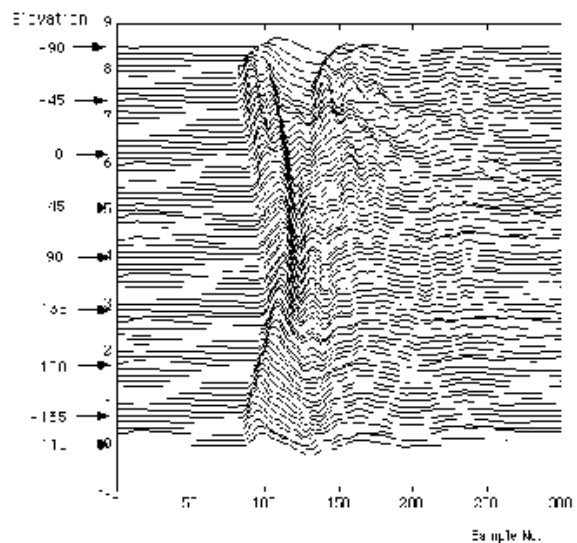
---

<sup>15</sup> Probabilmente ciò è dovuto al fatto che l'orecchio, come tutti gli organi sensoriali, non è sensibile alla fase assoluta di un segnale.

collocarlo genericamente alla destra o alla sinistra dell'ascoltatore. Soltanto negli ultimi venti anni si è compresa l'importanza che hanno le riflessioni del suono sul padiglione auricolare, sulle spalle e sul busto dell'ascoltatore. Queste parti del corpo hanno un vero e proprio effetto di "coloritura spaziale" dello spettro; il padiglione auricolare, per esempio, ha una forma fortemente asimmetrica per poter filtrare in modo diverso suoni provenienti da direzioni diverse. Il sistema uditivo usa, quindi, queste ulteriori informazioni per eliminare l'ambiguità spaziale che deriva dai soli ITD e IID. Senza addentrarci troppo nei dettagli di una materia che è ancor oggi oggetto di numerosi studi, diremo soltanto che è possibile, per ogni individuo, tracciare una HRTF (Head-Related Transfer Function) (v. fig. 3.15), ovvero una famiglia di funzioni di trasferimento, parametrizzate rispetto alla direzione di provenienza dei segnali, del sistema costituito da tutto ciò che è al di fuori del condotto uditivo. Si comprende, però, che l'estrema soggettività delle HRTF e la difficoltà di progettare dei filtri che varino dinamicamente la posizione di poli e zeri in funzione dello spostamento della sorgente senza aggiungere troppo rumore, rendono questo un campo ancora aperto.



a)



b)

Figura 3.15 a) Esempio di ampiezza di HRTF per un segnale collocato a  $90^\circ$  di azimut e  $0^\circ$  di altezza; si notino i notches, evidenti soprattutto nel grafico in basso, che sembrano essere alla base del meccanismo di percezione della direzione. b) famiglia di HRIR (Head Related Impulse Response) nel piano mediano (v. fig. seguente); la figura mostra come cambia la risposta impulsiva con l'angolo di altezza; la risposta delle orecchie non è differenziata in quanto nel piano mediano le differenze nei tempi di arrivo del segnale sono trascurabili per ogni angolo.

Dal punto di vista del simulatore di cui abbiamo parlato, diremo che è stata realizzata un'elaborazione delle informazioni spaziali delle SV con l'obiettivo di generare due linee di convoluzione distinte per i canali sinistro e destro; il segnale anecoico convoluto con esse ed ascoltato tramite cuffia è in grado di dare all'ascoltatore i suggerimenti relativi all'ITD e all'IID.

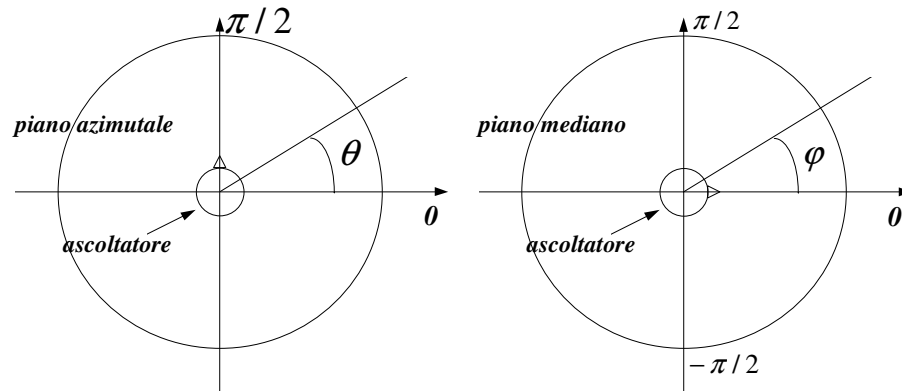


Figura 3.16 Convenzioni adottate per il sistema di riferimento in coordinate sferiche:  $-\pi \leq \theta \leq \pi$ ,  $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$ .

L'ampiezza di ogni eco è stata suddivisa tra i due canali in modo che la potenza totale si conservi: se  $G_S$  e  $G_D$  sono i guadagni relativi ai canali sinistro e destro dovrà valere la  $G_S^2 + G_D^2 = 1$ ; i guadagni trovati per un riferimento in coordinate sferiche con le convenzioni illustrate in fig. 3.16 sono:

$$\begin{aligned}
 G_S &= \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \varphi \cos \theta} \\
 G_D &= \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \varphi \cos \theta}
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Per quanto riguarda l'ITD, i ritardi dei due impulsi sono stati calcolati in base alle:

$$\begin{aligned} r_S &= \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + r^2 + hr \cos \varphi \cos \theta} \\ r_D &= \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + r^2 - hr \cos \varphi \cos \theta} \end{aligned} \quad (3.8)$$

dove  $r_S$  e  $r_D$  sono le distanze della sorgente dall'orecchio sinistro e destro,  $r$  è la distanza della sorgente dal centro della testa,  $h$  è la distanza tra le orecchie (~21cm).

## 4. Risultati e conclusioni

In questo capitolo verranno presentati alcuni esempi di simulazione insieme ai relativi risultati e ai metodi di analisi utilizzati. Sono stati prodotti esempi audio binaurali che spesso si sono rivelati più eloquenti di molte considerazioni teoriche. L'intenzione che è dietro questo lavoro è quella di cercare uno strumento di indagine "oggettiva" che sia di ausilio nell'analisi e nella previsione dei fenomeni che coinvolgono suono e spazio; ma la strada verso l'individuazione delle "chiavi" che diano una lettura completa del fenomeno della percezione uditiva è ancora lunga: perciò spesso, (ed è una constatazione non rassegnata, bensì deferente verso la natura) può dirci di più uno strumento meno oggettivo, ma che sappiamo usare con disinvoltura sin dai primi anni di vita.

### 4.1 La complessità

La complessità dell'algoritmo "in toto" è difficile da valutare dato il gran numero di gradi di libertà dei dati di ingresso; oltretutto l'intero processo di elaborazione di un segnale audio con la risposta impulsiva sintetizzata, è costituito da fasi decisamente eterogenee dal punto di vista dell'impegno computazionale: per esempio, la verifica di visibilità delle SV generate, è ancora ben lungi dal poter essere implementata in tempo reale, mentre è già possibile pensare ad un HW dedicato in grado di realizzare la convoluzione col segnale di ingresso in tempo reale e con bassi tempi di latenza. La quantità certamente più indicativa nella stima dell'aggravio computazionale è comunque il numero di sorgenti virtuali generate; questa grandezza ha influenza sia sul tempo di elaborazione (la gran parte del quale è rappresentato proprio dalla fase di verifica di visibilità) sia sulla quantità di memoria impiegata. Abbiamo visto che un maggiorante del numero di SV è dato da  $N^k$ , dove  $N$  è il numero di pareti che compongono la cavità e  $k$  è l'ordine fino al quale ci si spinge, ovvero la profondità dell'albero  $n$ -ario che le contiene; abbiamo anche visto che il meccanismo di validità fa sì che in realtà il numero delle

SV generate sia decisamente inferiore. A questo proposito i grafici seguenti illustrano l'andamento del numero di SV generate, in funzione dell'ordine e della distanza<sup>1</sup> dal centro di una cavità di forma cubica e di un poliedro convesso:

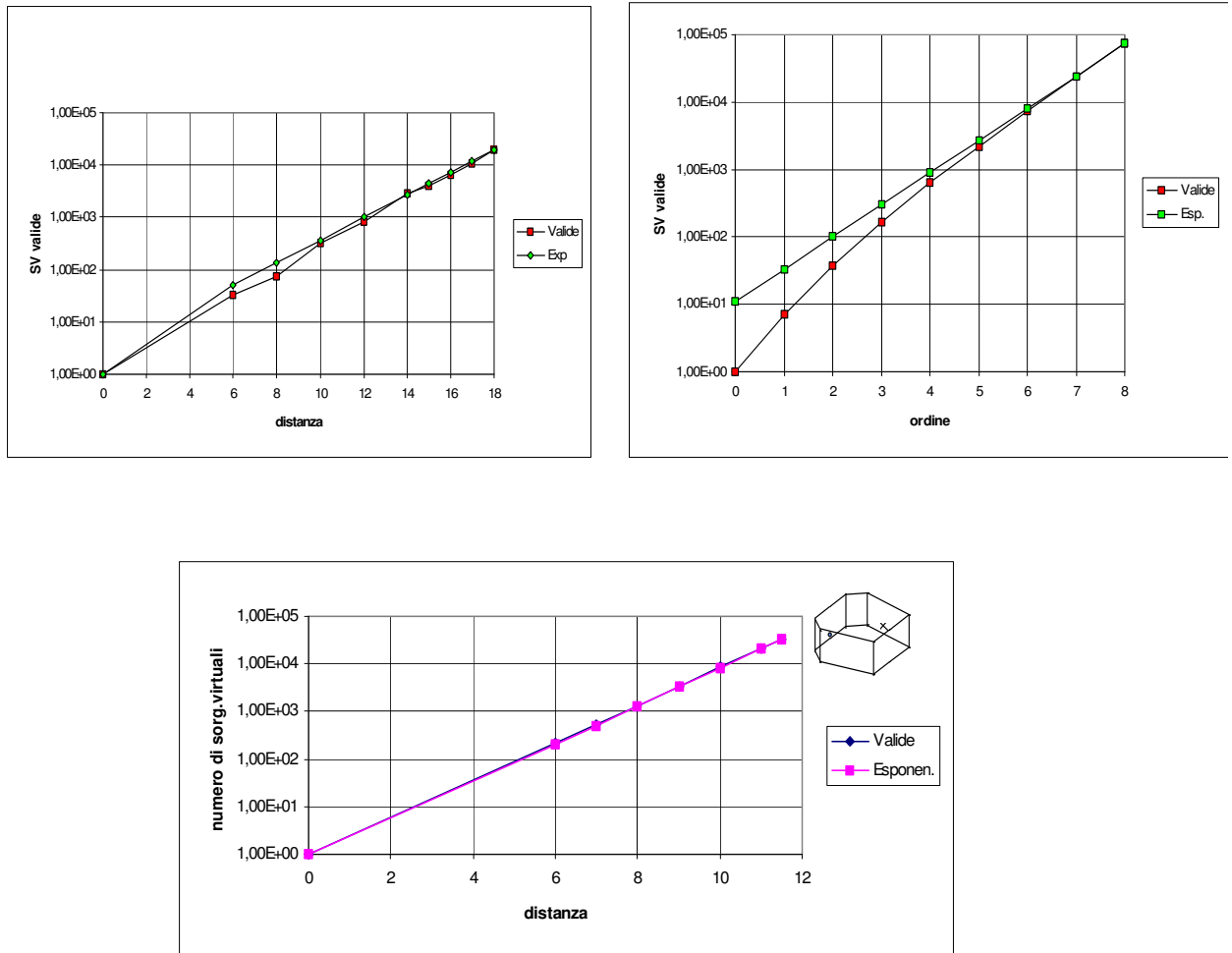


Figura 4.1 Numero di SV valide in funzione di ordine e distanza (primi due grafici) per una cavità cubica di 4 unità (in questo caso è irrilevante l'unità di misura assoluta) di lato e la sorgente al centro, e in funzione della distanza (terzo grafico) per il poliedro convesso illustrato in piccolo in alto a destra.

l'andamento è chiaramente esponenziale, come ci si aspettava, ma la base sembra essere legata, più che al numero di pareti, alla cardinalità di SV che la posizione della sorgente e la struttura geometrica della cavità sono in grado di eccitare; in entrambi gli esempi precedenti la base è tre, e nel caso del reticolo bidimensionale generato da un quadrato è risultata essere

<sup>1</sup> C'è ovviamente una stretta relazione tra ordine di una SV e distanza: maggiore è l'ordine, "più lontano" si va. La monotonia della relazione, però, è vera soltanto all'interno di un ramo genealogico: vale a dire che se una SV



due; mentre se il poligono è ottagonale la base sembra<sup>2</sup> attestarsi intorno a 5. La base potrebbe quindi essere uguale alla metà del numero delle pareti, più una quantità che potrebbe dipendere dalla “complessità geometrica” del poliedro. Nelle figure seguenti è invece riportato il risultato relativo alle SV visibili negli stessi casi già esaminati:

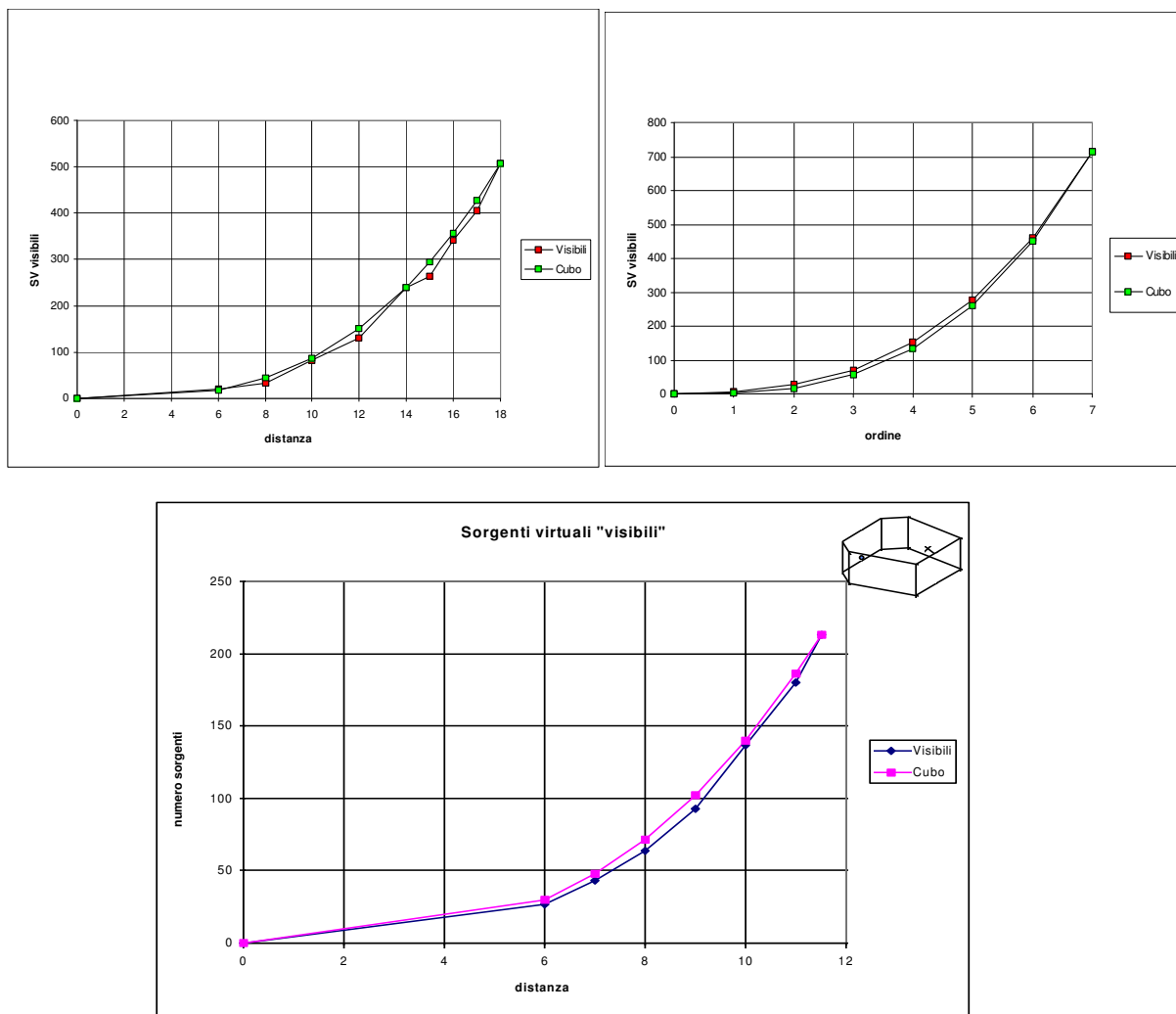


Figura 4.2 Numero di SV visibili in funzione di ordine e distanza (primi due grafici) per una cavità cubica di 4 unità di lato e la sorgente al centro, e in funzione della distanza (terzo grafico) per il poliedro convesso illustrato in piccolo in alto a destra.

in questo caso i dati sono in buon accordo con una legge del tipo  $S_v = \alpha r^3$ , dove  $S_v$  è il numero di sorgenti visibili ed  $r$  la distanza dalla sorgente. Alla luce di questi numeri appaiono

---

ha un ordine  $k$  e una distanza  $d_0$ , le sue discendenti avranno certamente distanza maggiore, ma sarà in generale possibile trovare, tra le SV con lo stesso ordine, sorgenti più vicine o più lontane di quella data.

<sup>2</sup> L'approssimazione è doverosa in quanto è difficile, per le risorse di calcolo necessarie, spingersi oltre un certo ordine.

ancora più evidenti il vantaggio di avere trovato l'ottimizzazione dell'algoritmo esposta nel paragrafo 3.2.4, che permette di risparmiare una buona dose di risorse di calcolo, e la necessità di adottare un criterio di selezione delle SV che tenga conto anche delle caratteristiche "dissipative" della cavità.

## 4.2 Un esempio di simulazione

Si riporta in questo paragrafo la simulazione relativa alla cavità in fig. 4.3.

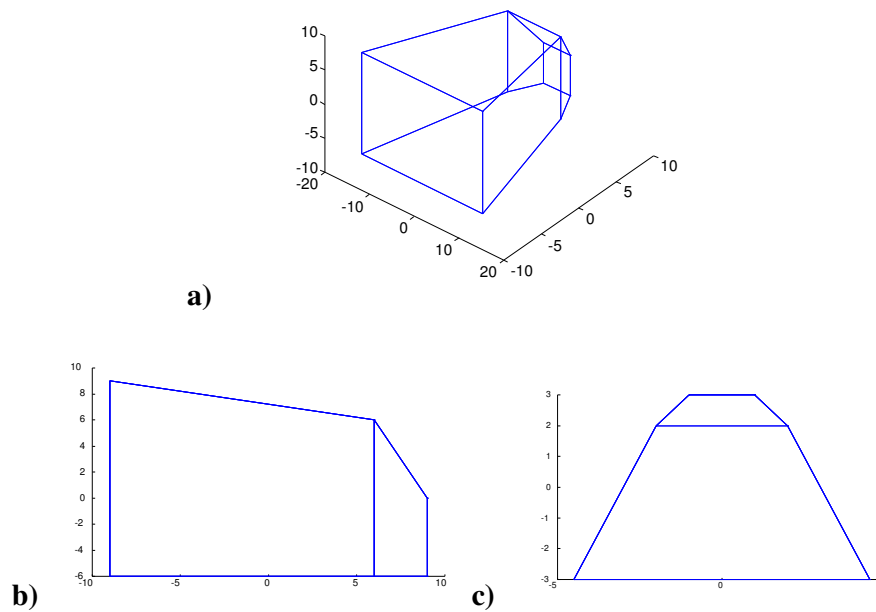


Figura 4.3 Struttura della cavità simulata; veduta a) aerea b) laterale c) in pianta.

La scala rispetto agli assi riportati in figura è di 3m; i coefficienti di riflessione delle pareti variano dallo 0.2 del pavimento allo 0.77 delle pareti laterali. Dalle figure che seguono è possibile rilevare la posizione della sorgente e dell'ascoltatore ed il pattern di sorgenti visibili.

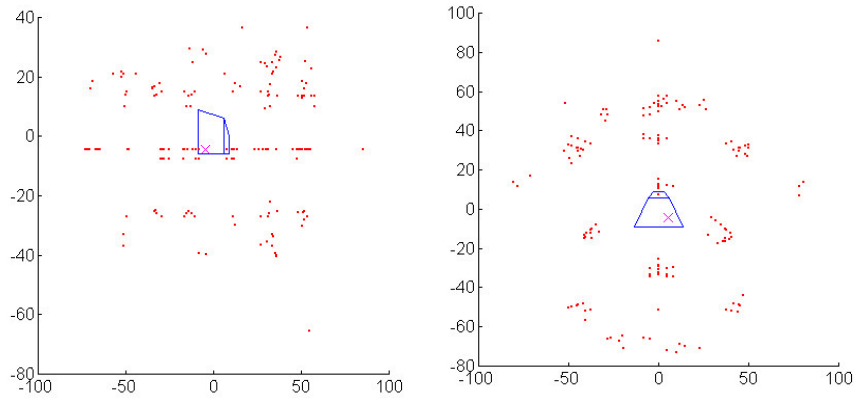


Figura 4.4 Veduta laterale ed in pianta dell'ecogramma. Il punto di ascolto è segnato con una croce.

Da queste rappresentazioni grafiche è già possibile ricavare delle informazioni utili sulle prime riflessioni: ad esempio sono ben visibili nel secondo ecogramma i “grappoli” di SV che danno luogo agli echi più prossimi al segnale diretto. Un altro modo per avere una visualizzazione dei risultati è la rappresentazione in coordinate polari dell'ecogramma.

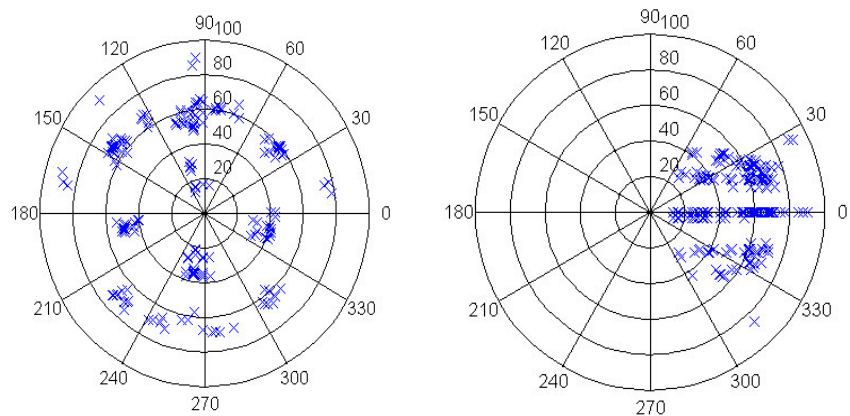


Figura 4.5 Ecogramma polare. Nel primo grafico è riportata la posizione delle SV in funzione di azimuth e distanza; nel secondo, invece, in funzione di altezza e distanza (le convenzioni per azimuth, altezza e distanza sono quelle esposte nella fig.3.16)

In questa rappresentazione il punto di ascolto coincide con l'origine ed è possibile avere a colpo d'occhio informazioni sulla successione e la direzione di provenienza degli echi; dal primo grafico si deducono le direzioni di provenienza degli addensamenti di SV, anche se questo tipo di rappresentazione non dà informazioni esplicite sul peso col quale ogni SV contribuisce alla risposta. Si nota che nell'emisfero ovest è collocata la maggior parte delle

SV, ma ciò non può essere collegato direttamente al risultato finale (come vedremo più avanti) dato che a questo concorrono altri fattori; inoltre nella prima figura si nota chiaramente che la SV più vicina (che quindi è la prima ad arrivare) è la prima dell'unico gruppo interno al cerchio delle 20 unità: quella è proprio l'onda diretta che, come è facile verificare dalla fig. 4.4, proviene dalla direzione della sorgente reale. Le informazioni che si possono ricavare da un'analisi del secondo grafico riguardano invece la distribuzione delle SV rispetto all'altezza: si faccia attenzione, nell'analizzare il grafico, al fatto che nel riferimento sferico l'altezza va da  $-\pi/2$  a  $\pi/2$  e quindi l'azimut è mappato interamente nel segmento che va dall'origine al punto indicato con "0"; le SV appaiono raggruppate in tre "nuvole" che danno un'idea della distribuzione degli echi rispetto alle pareti circostanti, al pavimento e al soffitto; la densità cresce evidentemente man mano che ci si allontana dall'origine, ma come abbiamo già ricordato, le SV più remote contribuiscono di meno alla risposta sia perché sono più lontane, sia perché provengono da un numero maggiore di riflessioni. Una volta auralizzato il risultato di questa simulazione si percepisce<sup>3</sup> chiaramente che la direzione di provenienza della sorgente è a sinistra dell'ascoltatore. Ho pensato allora di sostituire il soffitto liscio della cavità con quello illustrato nelle figure seguenti.

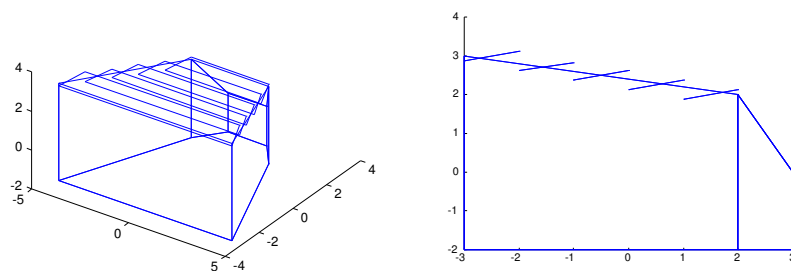


Figura 4.5 Veduta aerea e laterale della stessa cavità dopo la "sostituzione" del soffitto.

<sup>3</sup> La stessa percezione è stata condivisa anche dai soggetti ai quali ho sottoposto (senza informazioni preventive sulle caratteristiche di ciò che stavano per ascoltare) questa simulazione e la successiva.

L'unico parametro della simulazione ad essere stato modificato è la struttura del soffitto: esso è stato

frammentato in più pannelli con pendenza invertita rispetto a quella dell'originale, ma la sua pendenza media è rimasta invariata. Tutti gli altri parametri (posizione di sorgente e ascoltatore, coefficienti di riflessione, volume dell'ambiente) sono stati lasciati invariati. La figura 4.6 mostra gli ecogrammi della seconda simulazione: confrontando il primo degli ecogrammi polari con il suo omologo dell'esempio precedente si nota che alcuni gruppi di riflessioni si sono indeboliti mentre altri si sono rafforzati; ad esempio alle spalle del primo gruppo di riflessioni (quello interno al cerchio contrassegnato dalle 20 unità) compare adesso una densità di riflessioni che, a giudicare dal secondo ecogramma polare, provengono dall'alto. Sarebbe, ad un primo esame del grafico, che la maggior parte delle SV sia ancora situata nell'emisfero alla sinistra dell'ascoltatore; invece, una volta auralizzato il risultato, la nitidezza con la quale si percepiva la direzione di provenienza della sorgente sembra essersi attenuata: si percepisce un segnale più "diffuso", ovvero meno caratterizzabile dal punto di vista della direzionalità. Il risultato non appare strano se si pensa che "ricostruendo" il soffitto nel modo esposto si sono aumentate le sue caratteristiche diffuse soprattutto alle frequenze medio-alte; l'introduzione del nuovo soffitto ha quindi ridistribuito spazialmente l'energia rendendo l'immagine uditiva più uniforme. Questa sarebbe, ad esempio, una caratteristica auspicabile per tutti gli auditorium, nei quali si vuole che il segnale raggiunga uniformemente (e cioè conservando le sue caratteristiche spettrali) tutti i punti dello spazio delegati all'ascolto; bisognerebbe cercare di eliminare le zone di penalizzazione di certe bande di frequenza che possono crearsi come nel caso già visto della Philharmonic Hall di New York.

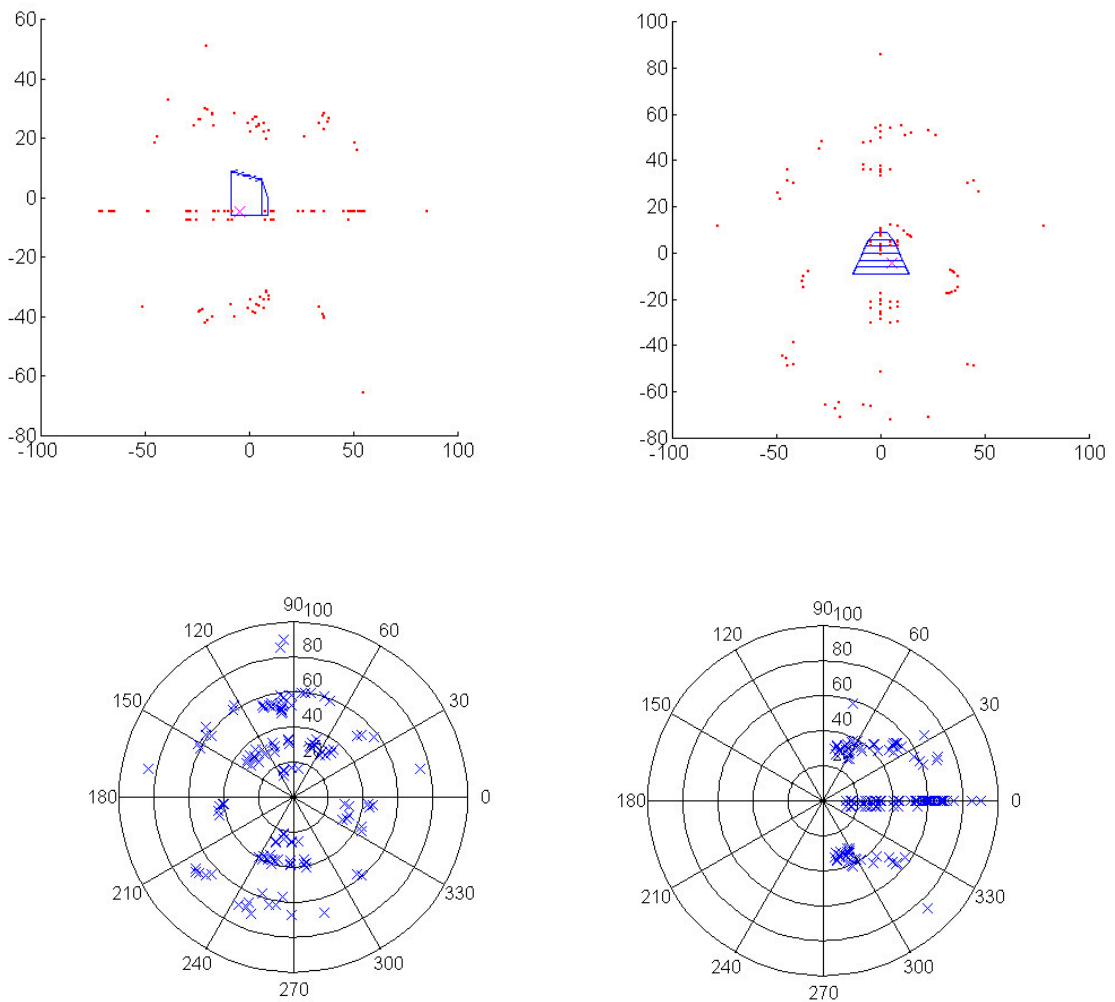


Figura 4.6 Ecogrammi della seconda simulazione.

Questo è il motivo per cui spesso negli auditorium ristrutturati compaiono dei pannelli di strana foggia che altro scopo non hanno se non quello di aumentare lo scattering del suono. E' possibile accorgersi di questo effetto anche confrontando gli ecogrammi polari dell'altezza nei due casi: nel primo caso, come abbiamo già notato, la maggiore densità di SV era nella parte finale delle nuvole del soffitto e del pavimento; dopo la modifica del soffitto la concentrazione maggiore si ha all'inizio della risposta, sia per quanto riguarda la nuvola

“alta”, sia per quanto riguarda quella “bassa”; ciò vuol dire che il suono occuperà sin dall’inizio tutto il fronte spaziale offerto all’ascoltatore.

Un’altra serie di informazioni possono essere ricavate dall’analisi della risposta impulsiva sintetizzata. Quelle mostrate nella figura seguente sono le risposte impulsive in scala lineare e logaritmica relative all’esempio precedente.

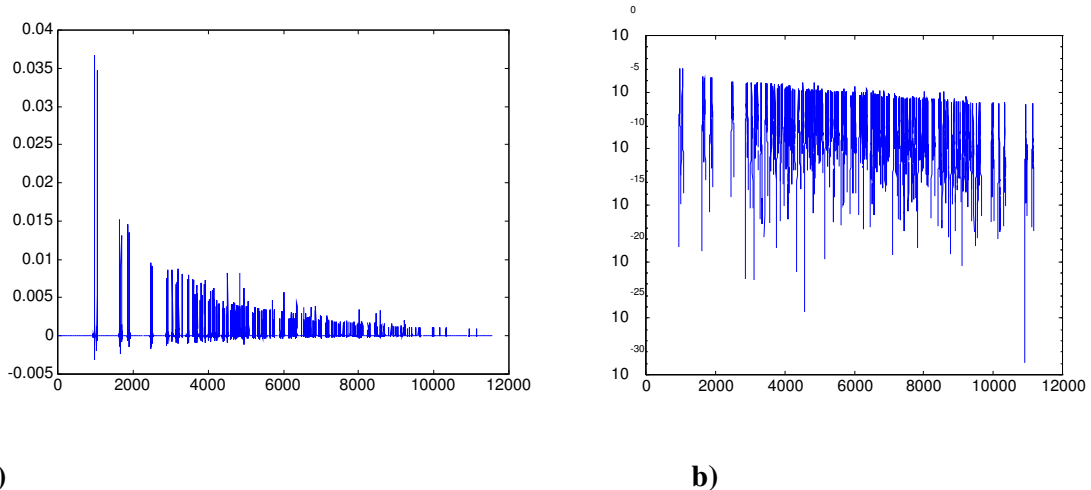


Figura 4.7 Risposta impulsiva in scala **a)** lineare e **b)** logaritmica relativa all’esempio precedente.

Nel primo grafico è facile distinguere la zona delle prime riflessioni dalla risposta “diffusa” che ha un decadimento esponenziale, come ben evidenziato dall’andamento rettilineo del secondo grafico. Può essere utile, ad esempio per stimare il tempo di riverbero, la curva di decadimento dell’energia che si può calcolare con la

$$E(t) = \int_t^{\infty} i^2(\tau) d\tau \tag{4.1}$$

dove  $i(t)$  (o meglio  $i(nT)$ ) è la risposta impulsiva, e che è riportata nella fig.4.8

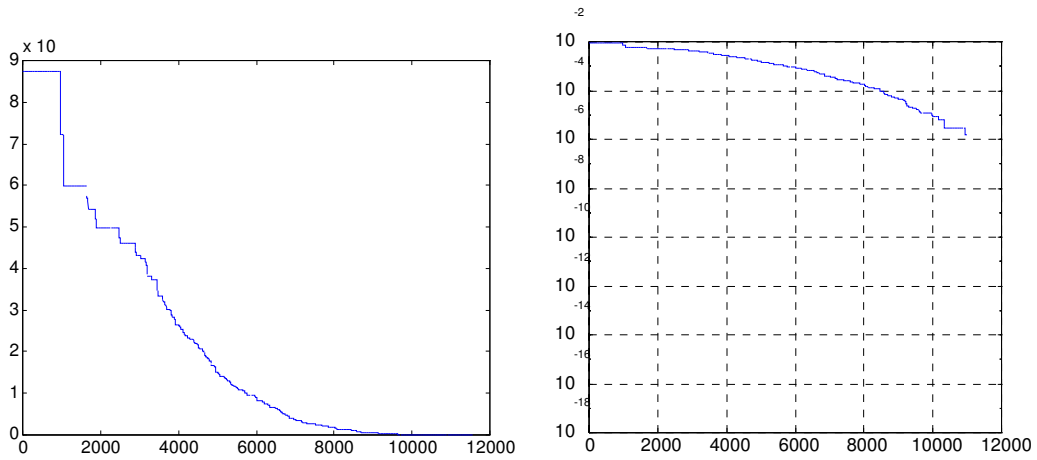


Figura 4.8 Curva lineare e logaritmica di decadimento dell'energia

I tempi di riverbero stimati con la (4.1) sono in ottimo accordo con quelli previsti dalla formula di Sabine-Eyring (v. cap.1).

Si è visto nel capitolo 1 come risultino più piacevoli all'udito gli ambienti con una bassa correlazione interaurale. Quindi un'altra analisi che può dare informazioni utili sui risultati ottenuti è quella della correlazione tra le risposte impulsive sintetizzate per i canali sinistro e destro. Nella fig.4.9 si riportano i grafici della correlazione interaurale dell'esempio esposto; essi sono qualitativamente simili, ma hanno in comune un basso valore del massimo di correlazione che, è interessante notare, corrisponde ad un valore della traslazione intorno a 10 campioni.

Un'altra analisi doverosa è quella dello spettro dei segnali elaborati. Nella figura 4.10 sono mostrati gli spettri del segnale anecoico e di quello elaborato con il filtro della cavità con il soffitto "nuovo";



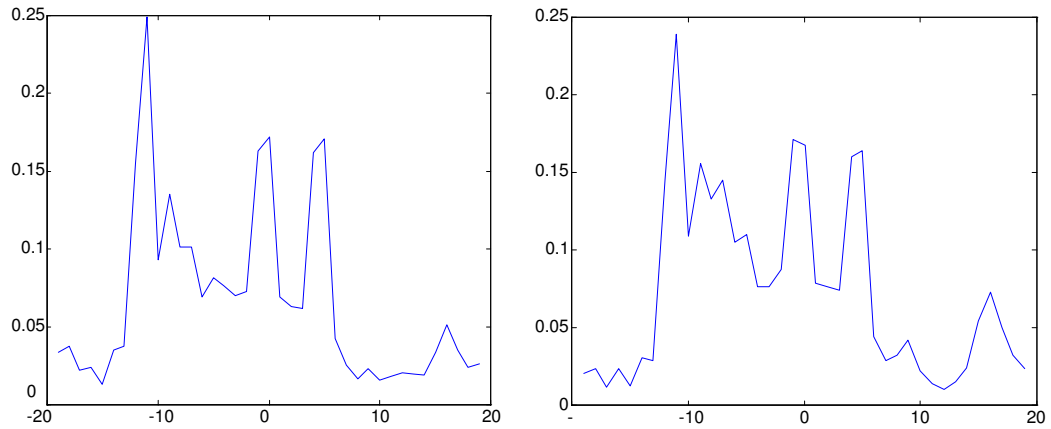


Figura 4.9 Grafici della correlazione interaurale relativi alla cavità esaminata nell'esempio precedente prima e dopo la "sostituzione" del soffitto. In ascissa è riportato il ritardo in termini di campioni a 44100Hz.

c'è da dire, però, che lo spettro calcolato secondo Fourier non da' grosse informazioni, come si verifica facilmente guardando i grafici. Il motivo sta nel fatto che i segnali audio non sono segnali stazionari e quindi più che un'analisi a lungo termine che ha l'effetto di "schiacciare" le componenti frequenziali su un piano a-temporale, è utile un'analisi nel dominio congiunto tempo-frequenza.

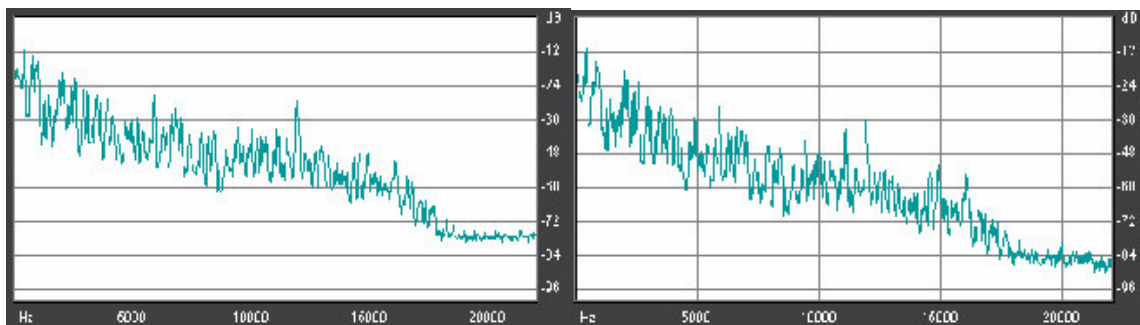


Figura 4.10 Spettri del segnale anecoico prima e dopo l'elaborazione con la risposta impulsiva della cavità 4.3.

A questo scopo rispondono, ad esempio, gli spettrogrammi, la distribuzione di Wigner-Ville (fig. 4.11) o le decomposizioni in wavelet citate in bibliografia [Cohen-1989][Lee-1995][Yen-1987].

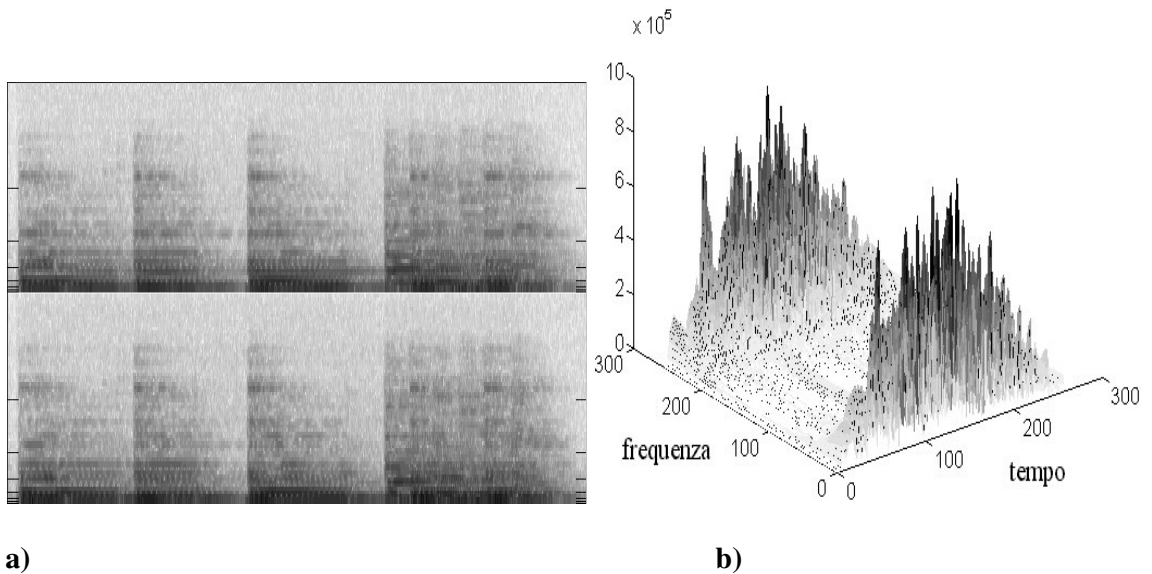


Figura 4.11 **a)** Spetrogramma del segnale stereofonico elaborato con l'esempio di figura 4.5. In ascissa è riportato il tempo, in ordinata le frequenze in scala logaritmica. L'ampiezza delle componenti spettrali è mappata sulla scala dei grigi con il bianco corrispondente allo zero. Le tre sagome triangolari che si distinguono all'inizio corrispondono alle tre percussioni consecutive dello stesso tasto del clavicembalo. **b)** Rappresentazione tridimensionale della distribuzione di Wigner-Ville per una porzione di segnale audio elaborato con il filtro della cavità 4.3.

### 4.3 Conclusioni ed approfondimenti

E' stata presentata l'implementazione di un algoritmo di simulazione di acustica di ambienti e di auralizzazione binaurale a 44100Hz basato sul metodo delle sorgenti virtuali e sulla sintesi FIR. Questo tipo di simulazione da' risultati soddisfacenti nella modellizzazione della risposta acustica di ambienti caratterizzati da bassa diffusività e/o diffrazione ed è quindi particolarmente indicato per avere informazioni sulla parte più deterministica della risposta stessa, ovvero quella che compete alle prime riflessioni e quindi ai primi suggerimenti su direzionalità e distanza della sorgente. I risultati sono molto buoni proprio per ciò che riguarda le prime riflessioni perché è stata dedicata particolare attenzione alla sintesi della linea di convoluzione: segnali anche con forti caratteristiche impulsive sono riprodotti senza sbavature e discontinuità. 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. L'accuratezza della simulazione richiede

notevoli quantità di calcolo, ma la struttura aperta con la quale è stata concepita l'implementazione dell'algoritmo, permette di tarare le esigenze dell'utente in funzione delle risorse di calcolo disponibili.

Ulteriori approfondimenti possono essere fatti in varie direzioni. Il modello può essere esteso per comprendere una descrizione più accurata della dipendenza dalla frequenza e dalla direzione di incidenza della riflettività delle pareti; si è visto che in alcune situazioni queste caratteristiche sono importanti ai fini di una corretta percezione dello scenario acustico. Possono essere descritte in maggior dettaglio e più "economicamente"<sup>4</sup> la diffusione e la diffrazione da parete finita. Si può pensare di realizzare delle sorgenti e dei ricevitori più realistici, implementando le caratteristiche di direzionalità dell'emissione e della ricezione attraverso filtri spaziali e HRTF.

Particolare interesse rivestirebbe una ricerca sulla possibilità di attuare un'analisi preventiva della cavità per estrarne le caratteristiche geometriche rilevanti per ogni gamma di frequenze. A questo proposito sembrerebbero promettenti le tecniche basate sull'analisi multi-scala con funzioni a supporto compatto.

---

<sup>4</sup> Le caratteristiche di diffusione possono essere già comprese nella simulazione aumentando il grado di fedeltà della descrizione della cavità, come è stato dimostrato nell'esempio di questo capitolo. Ma come è intuibile dalle considerazioni sulla complessità, questo avverrebbe a discapito del costo di elaborazione.

## **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.

### **[Arabadzhi-95]**

Arabadzhi V.V."Local auto-resonance absorber for chamber acoustics" CIARM Proc. pp.195-200; 1995.

### **[Belladonna, Vidolin-95]**

Belladonna A., Vidolin A."spAAce: un programma di spazializzazione per il Live Electronics" CIARM Proc. pp.113-118; 1995.

### **[Berkhout-88]**

Berkhout A.J."A Holographic Approach to Acoustic Control" *Journal of the Audio Engineering Society*. 36(12) pp.977-995; 1988.

### **[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.

### **[Chen, Van Veen, Hecox-92]**

Chen J., Van Veen B.D., Hecox K.E."External ear transfer function modeling: A beamforming approach" *Journal of Acoustical Society of America*. 92(4) pp.1933-1944; 1992.

### **[Chowning-71]**

Chowning J.M."The Simulation of Moving Sound Sources" *Journal of the Audio Engineering Society*. 19(1) pp.2-6; 1971.

### **[Cohen-89]**

Cohen L."Time-frequency Distributions-A Review" *IEEE Proceedings*. 77(7) pp.941-981; 1989.

### **[Dodge, Jerse-85]**

Dodge C. and Jerse T.A."Computer music:Synthesis, composition and performance" Schirmer Books, New York 1985.

### **[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 1992.

**[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.

**[Maynard, Williams, Lee-85]**

Maynard J.D., Williams E.G., Lee Y."Nearfield Acoustic Holography: I.Theory of Generalized Holography and the Development of NAH" *Journal of Acoustical Society of America*. 78(4) pp.1395-1413; 1985.

**[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.

**[Oldfield, Parker-84]**

Oldfield S.R., Parker S.P.A."Acuity of sound localization: a topography of auditory space. I. Normal hearing conditions" *Perception*. 13 pp.581-600; 1984.

**[Oldfield, Parker-84]**

Oldfield S.R., Parker S.P.A."Acuity of sound localization: a topography of auditory space. II. Pinna cues absent" *Perception*. 13 pp.601-607; 1984.

**[Oppenheim, Schafer-89]**

Oppenheim A.V. and Schafer R.W."Discrete-time signal processing" Prentice-Hall, Englewoods Cliffs, NJ 1989.

**[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-58]**

Schroeder M.R."An Artificial Stereophonic effect Obtained from a Single Audio Signal" *Journal of the Audio Engineering Society*. 6(2) pp.74-79; 1958.

**[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.

**[Williams, Maynard, Skudrzyk-80]**

Williams E.G., Maynard J.D., Skudrzyk E."Sound source reconstruction using a microphone array" *Journal of Acoustical Society of America*. 68(1) pp.340-344; 1980.

**[Yen-87]**

Yen N."Time and frequency representation of acoustic signals by means of the Wigner distribution function: Implementation and interpretation" *Journal of Acoustical Society of America*. 81(6) pp.1841-1850; 1987.