



Via Ormea, 75  
10125 Torino

Ufficio Università  
Paola Castelli  
tel. 011/2099551, fax 011/2099570  
e-mail: uff.univers@utetlibreria.it  
HTTP://www.utetlibreria.it

NOVITÀ

# ACUSTICA MUSICALE E ARCHITETTONICA

A cura di

**Sergio Cingolani, Renato Spagnolo**

ISBN 88-7750 -941-4, pp. 992, € 45,00 Formato 17 x 24, broccura cucita



## Breve Sommario :

**Premessa** (S. Cingolani, R. Spagnolo) – **Cap. 1** Introduzione storica all'acustica musicale (S. Cingolani) – **Cap. 2** Consonanze, scale e temperamenti (P. Barbieri) – **Cap. 3** Fisica delle vibrazioni e dei suoni (R. Spagnolo) – **Cap. 4** La percezione uditiva (O. Schindler, A. Schindler) – **Cap. 5** Gli strumenti a corda (S. Cingolani) – **Cap. 6** Gli strumenti a fiato (P. Barbieri) – **Cap. 7** L'organo (P. Barbieri) – **Cap. 8** Gli strumenti a percussione (L. Tronchin) – **Cap. 9** Metodologie sperimentali applicate agli strumenti musicali (L. Tronchin) – **Cap. 10** Modelli fisici e strumenti musicali (L. Seno) – **Cap. 11** Acustica della voce (M. Uberti) – **Cap. 12** Musica elettronica (M. Lupone) – **Cap. 13** Acustica architettonica nella storia (P. Barbieri) – **Cap. 14** Il suono negli spazi chiusi (R. Spagnolo) – **Cap. 15** Sale da concerto e teatri d'opera (C. Ianniello) – **Cap. 16** Le sale di piccole dimensioni (M. Fringuellino) – **Cap. 17** Criteri di progettazione acustica di grandi sale (R. Spagnolo) – **Cap. 18** Gli strumenti musicali, lo spazio architettonico e l'ascolto (S. Cingolani) – **Cap. 19** Misure acustiche nei teatri e nelle sale (A. Farina, L. Tronchin) – **Cap. 20** Modelli di simulazione e auralizzazione (M. Garai, C. Tavernelli) – **Appendici** – **Bibliografia** – **Indice analitico.**

Si moltiplicano le pubblicazioni, le associazioni scientifiche e culturali e anche i corsi universitari che riguardano l'acustica musicale e architettonica. L'opera curata da Sergio Cingolani e Renato Spagnolo si muove da questo contesto, ed è legata al riconoscimento della variegata formulazione di discipline antiche e delle esigenze di chi affronta quotidianamente i problemi legati al suono musicale, alle sue caratteristiche e al suo ascolto, siano esse di carattere più spiccatamente professionale o dominate dal desiderio di conoscenza.

*Acustica musicale e architettonica* offre al lettore uno strumento che accosta alla musica la molteplicità delle discipline acustiche, recuperando il repertorio scientifico attraverso una trattazione esauriente, e restituendo la complessità della materia mediante un'opera divulgativa di ampio respiro.

L'obiettivo principale del libro è quello sia di soddisfare il ricercatore curioso, sia di dare risposte al musicista desideroso di affrontare le numerose connessioni riscontrabili dall'evento del pensiero musicale fino alla sua rappresentazione fisica: cogliere il fatto musicale come un poliedro che possa essere esaminato a partire da conoscenze e sensibilità diverse. Ciò ha portato, grazie anche alla ricchezza dei diversi contributi che compongono il libro, alla giustapposizione di un gran numero di punti di vista distinti, pur se incasellati in un quadro d'insieme organico e completo.

**Sergio Cingolani** svolge attività di docenza in acustica applicata e musicale nelle Università di Brescia, Milano e Pavia. Ha pubblicato, tra l'altro, *Acustica degli strumenti musicali: ricerca bibliografica 1840-1990* (1991).

**Renato Spagnolo** è dirigente di ricerca e responsabile del Dipartimento di acustica dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale "Galileo Ferraris" di Torino. Con UTET Libreria ha già pubblicato *Manuale di acustica applicata* (2001).

# La misurazione acustica negli ambienti chiusi: aspetti teorici e sperimentali

Angelo Farina, Lamberto Tronchin

## 1 L'acustica degli ambienti chiusi: introduzione

Negli ultimi decenni si è assistito, a livello nazionale ed internazionale, ad una crescita esponenziale dell'interesse per le problematiche relative alla qualità del suono all'interno dei teatri.

*W.C. Sabine*, definì chiaramente i requisiti fondamentali per ottenere una buona acustica in un auditorium qualsiasi (Sabine, 1922):

"... è necessario:

- ❑ che il suono sia sufficientemente forte;
- ❑ che le componenti contemporanee di un suono complesso mantengano un rapporto appropriato tra le loro intensità;
- ❑ che suoni successivi nella loro rapida articolazione, sia che si tratti di parlato, sia che si tratti di musica, siano chiari e distinti, liberi da sovrapposizione mutua e da rumori estranei.

Queste sono le condizioni necessarie, nonchè del tutto sufficienti, per una buona acustica..."

Ai giorni d'oggi i requisiti che Sabine esprimeva più di tre quarti di secolo fa, si concretizzano fisicamente in una serie di parametri che prendono spunto fondamentalmente dalle caratteristiche intrinseche che sono possedute da un teatro che può essere inteso come un «sistema lineare tempo invariante», caratterizzato pertanto dalla sua «risposta all'impulso».

## 2 Evoluzione delle tecniche di misura

Quando Sabine studiava l'acustica dei teatri si avvaleva di segnali musicali interrotti eseguiti all'organo. Essi costituiscono storicamente il primo metodo di indagine nell'acustica dei teatri. La generazione di suoni stazionari interrotti consente, infatti, il calcolo del tempo di riverberazione  $T_{60}$  direttamente dall'estrapolazione dell'intervallo di decadimento del segnale (rumore rosa) emesso. Anche oggi, qualora l'interesse sia volto esclusivamente alla determinazione del  $T_{60}$ , può essere sufficiente avvalersi di una sorgente sonora in grado di generare segnale stazionario che viene spenta istantaneamente. In corrispondenza del punto di misura sarà sufficiente collocare un fonometro collegato ad un registratore grafico, il quale restituirà il decadimento del livello di pressione sonora misurato in quel punto.

Negli anni successivi l'attenzione venne posta ad altri descrittori acustici, in grado di analizzare il comportamento in frequenza della sala ovvero la distribuzione dell'energia sonora tra i vari punti della platea o dei palchi. In questo caso l'effettuazione dei rilievi, che tuttora possono essere effettuati, richiede l'impiego di una sorgente sonora di rumore stazionario (solitamente rumore rosa) da collocarsi in corrispondenza della sorgente musicale, mentre un normale fonometro, possibilmente collegato ad un registratore digitale, consentirà di rilevare l'andamento sia del livello sonoro sia della risposta in frequenza nei vari punti di misura. In tale maniera tuttora può essere misurata la distribuzione del livello sonoro (*strength*) in una sala da concerto, parametro assai importante per la determinazione della corretta distribuzione dell'energia sonora nei teatri.

Queste metodologie di misurazione, molto semplici e di facile impiego, possono essere tutt'oggi utilizzate comunemente qualora l'obiettivo della campagna di rilievi sia limitata alla determinazione del tempo di riverberazione o della *strength*, sebbene oramai si richiedano da campagna di misurazioni altri parametri acustici, come indicato nell'unico riferimento esistente a livello internazionale sulle metodologie di rilevazione del tempo di riverberazione: la norma ISO 3382.

### 3 Sistema lineare tempo invariante?

Le misurazioni e le simulazioni acustiche degli ambienti chiusi mirano a determinare quali saranno i parametri acustici percepiti dagli ascoltatori durante una normale *performance*. Durante lo svolgimento delle misurazioni, nonché durante l'operazione di simulazione del campo acustico di una sala, appare pertanto essenziale ritrovare esattamente le condizioni di funzionamento dell'ambiente esaminato. L'ipotesi fondamentale di tutte le teorie acustiche formulate sugli ambienti chiusi consiste nell'ipotizzare ciascun ambiente musicale come sistema lineare tempo invariante.

Un qualunque sistema fisico può essere considerato lineare quando si possa formulare la seguente ipotesi: presi due segnali di ingresso separati (A e B), e determinati i loro corrispondenti segnali di uscita (C e D), qualunque combinazione lineare dei segnali di ingresso verrà mantenuta immutata nei segnali di uscita. Ad esempio, come indicato nella tab. 3.1, la somma dei segnali di ingresso (A + B) produrrà la somma dei segnali di uscita (C + D).

| ingresso | uscita |
|----------|--------|
| A        | C      |
| B        | D      |
| A+B      | C+D    |

**Tab. 3.1:** schema di funzionamento del sistema lineare tempo invariante

Allo stesso modo, il sistema fisico potrà essere considerato tempo-invariante qualora esso non si modifichi in alcun modo al passare del tempo. Ciò significa che il sistema dovrà essere immutato per tutto il periodo di analisi. Nell'acustica degli spazi chiusi si definiscono i seguenti sistemi:

**SISTEMA ACUSTICO.** Si definisce sistema acustico o spazio acustico-musicale l'insieme delle componenti fisiche che delimitano l'ambiente nel quale si svolge l'attività musicale che è oggetto di studio. Esso è quindi costituito dall'architettura dello spazio, comprendendo la sala, il palcoscenico e tutto ciò che normalmente ne costituisce parte integrante, come le poltrone, le quinte, la macchina scenica, etc. In esso vanno anche comprese le caratteristiche termoigrometriche dell'ambiente, ossia temperatura dell'aria ed il suo gradiente termico, la velocità dell'aria, l'umidità relativa. Possono essere compresi anche gli strumenti musicali.

**SISTEMA ELETTRONICO.** Il sistema elettronico include tutto ciò che non costituisce il normale spazio acustico ma viene utilizzato esclusivamente per lo svolgimento delle misurazioni. Vanno quindi compresi gli apparati di misurazione quali microfoni, sorgenti sonore, trasduttori di potenza, schede audio, cavi di collegamento ed interfacciamento.

Nel caso dell'acustica dei teatri si assume l'ipotesi di perfetta linearità del sistema elettroacustico, costituito cioè dal sistema acustico (spazio acustico-musicale) e dal sistema elettronico (la strumentazione utilizzata), e d'altro canto l'ipotesi di invariabilità assoluta di tutto il sistema nel corso dello svolgimento delle misure (ma anche del normale utilizzo durante un concerto).

La realtà fisica appare comunque ben diversa, e ciò è risultato evidente fin da quando sono state sviluppate tecniche di misura delle caratteristiche dell'ambiente. L'ipotesi di linearità del sistema acustico-musicale non appare eccessivamente forzata, dacché effettivamente la propagazione acustica e le caratteristiche fluidodinamiche dell'aria interessata dalla propagazione della perturbazione sonora possono essere ritenute lineari. D'altro canto non è invece ipotizzabile ritenere lineare il comportamento dei trasduttori impiegati durante l'effettuazione delle misure. Sia la sorgente sonora che i microfoni possiedono un comportamento altamente non lineare, specie alle alte frequenze. Anche gli strumenti musicali durante una normale *performance* normalmente hanno un comportamento non lineare, dovuto ad innumerevoli ragioni, come ad esempio la variazione delle tensioni delle corde per gli archi, o l'effetto della viscosità dell'aria per i fiati.

L'ipotesi di tempo invarianza richiederebbe perfetta invarianza fisica dei due sistemi (sistema acustico-musicale e sistema elettronico) sia durante lo svolgimento delle performance musicali sia durante la campagna di misurazioni. Anche in questo caso la realtà fisica differisce dall'ipotesi teorica, dacché il minimo spostamento all'interno dell'ambiente provoca una sua variazione nel tempo. Ad esempio, già lo spostamento della strumentazione durante la campagna di misura comporta una variazione fisica nel sistema acustico-musicale, così come la semplice variazione delle condizioni termoigrometriche (temperatura e umidità

dell'aria). Oltre alle variabili termoigrometriche, anche la variazione termica per effetto *joule*, provoca una diversa curva di risposta in frequenza dei trasduttori (soprattutto altoparlanti e microfoni), che non consente più il mantenimento delle ipotesi di invarianza del sistema.

Va comunque sottolineato che l'obiettivo di una campagna di misurazioni sperimentali di qualità acustica all'interno di un ambiente per la musica consiste nel determinare proprio le caratteristiche del sistema acustico-musicale, a prescindere dalle caratteristiche della strumentazione utilizzata. La misurazione quindi dovrà essere in grado di separare i contributi non lineari (in modo particolare le distorsioni) causati dalla strumentazione dalla risposta acustica dello spazio acustico-musicale.

Questi limiti presenti tra i requisiti teorici necessari allo svolgimento dei rilievi e la realtà fisica del sistema sotto analisi comporta una diversa risposta delle tecniche sperimentali applicate alla determinazione dei parametri acustici dei teatri, ed in particolare dei segnali di prova impiegati per la determinazione delle risposte all'impulso, come verrà analizzato in seguito.

#### **4 La risposta all'impulso**

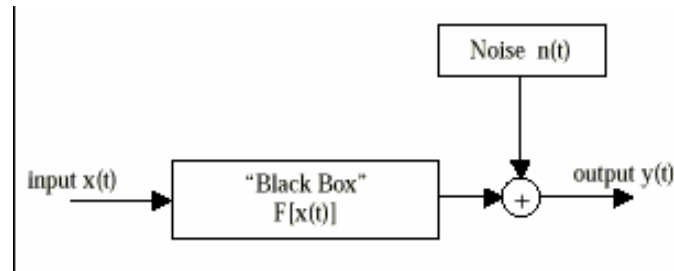
L'acustica di una sala da concerto o di un teatro d'opera può pertanto essere fisicamente considerato «sistema lineare tempo invariante», e come tale sarà possibile determinarne le proprietà fisiche, contenute nella sua risposta all'impulso. In essa sono presenti tutte le informazioni di cui è dotato il sistema. Pertanto, il contenuto informativo necessario e sufficiente per una completa caratterizzazione dell'acustica di una sala è racchiuso nella sua risposta all'impulso.

Nel caso dell'acustica degli ambienti chiusi si considera sistema il comportamento acustico esistente tra una particolare sorgente, teoricamente puntiforme, e un particolare punto d'ascolto, anch'esso ipotizzato puntiforme, collocati all'interno dell'ambiente. Esso può essere misurato mediante apparecchiature elettroniche o anche simulata con sufficiente approssimazione durante la simulazione del comportamento acustico degli ambienti.

Va rimarcato che tale precisazione evidenzia la presenza di infiniti sistemi lineari esistenti all'interno di un ambiente per la musica, dacché esistono  $\infty^3$  diverse possibilità di collocare la sorgente sonora (supposta omnidirezionale) ed altrettante possibilità per il microfono. Cionondimeno, come si vedrà in seguito, anche l'orientazione sia della sorgente (se supposta non omnidirezionale) sia del microfono (se anch'esso supposto non omnidirezionale) contribuiscono ad aumentare esponenzialmente i gradi di libertà presenti all'atto della scelta delle misurazioni.

Se  $x(\tau)$  rappresenta il segnale emesso dalla sorgente (Fig. 4.1), e  $y(\tau)$  è il risultato delle modifiche prodotte dal sistema (considerato in gergo come *black box*) sul

segnale in ingresso (il segnale raccolto dall'ascoltatore), essi sono tra di loro correlati dalla risposta all'impulso dell'ambiente, chiamata  $h(\tau)$ .



**Fig. 4.1:** schema di funzionamento del sistema lineare tempo invariante

La risposta all'impulso  $h(\tau)$  è la risposta del sistema nell'ipotesi che la sorgente sonora generi un segnale  $x(\tau)$  particolare, ossia un solo impulso unitario, preceduto e seguito da una infinità di zeri. Esso è chiamato funzione delta di *Dirac*:

$$\delta(\tau) = 0 \text{ per } \tau \neq 0 \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\tau) d\tau = 1 \quad (4.1)$$

Più in generale, dato un segnale qualsiasi  $x(\tau)$  generato dalla sorgente, il segnale percepito dal ricevitore in una particolare posizione si ottiene tramite il cosiddetto integrale di convoluzione, dato dall'espressione:

$$y(\tau) = x(\tau) * h(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) h(\tau - t) dt \quad (4.2)$$

La risposta in frequenza  $H(f)$ , più propriamente chiamata funzione di trasferimento, è la trasformata di *Fourier* di  $h(\tau)$ . Si dimostra che nel dominio della frequenza il prodotto di convoluzione (4.2) si traduce in un semplice prodotto fra gli spettri delle funzioni di partenza:

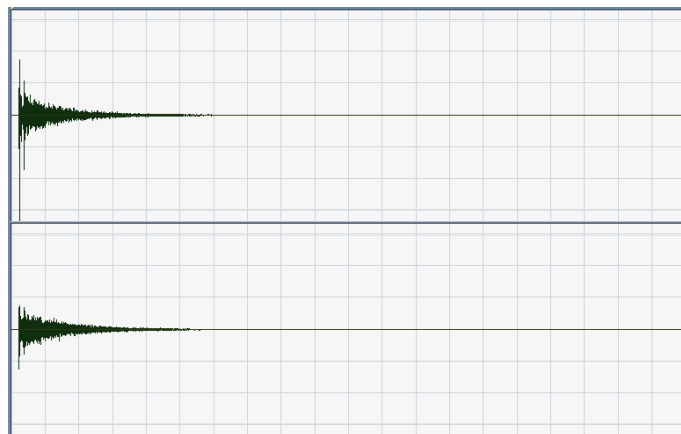
$$Y(f) = X(f) \cdot H(f) \quad (4.3)$$

In base a queste considerazioni, tutta la problematica della misurazione e della simulazione acustica può essere ricondotta in estrema sintesi alla determinazione della risposta all'impulso: quando  $x(\tau)$  è la pressione sonora alla sorgente, l'uscita  $y(\tau)$  è la pressione sonora al ricevitore, nota la quale si possono calcolare i parametri acustici di interesse, come di seguito descritto.

Quanto ora affermato rimane valido anche qualora si voglia tenere in debita considerazione estensione e direttività delle sorgenti sonore, oltre alla loro potenza sonora e risposta in frequenza, e si vogliano anche considerare l'orientazione dei ricevitori e l'effetto della conformazione dei padiglioni auricolari, che consentono all'ascoltatore di sentire assai diversamente da quanto sente un normale microfono. Sarà pertanto necessario sviluppare una ulteriore metodologia in grado di descrivere appieno la opportuna modellizzazione delle sorgenti sonore nonché del meccanismo di ascolto del ricevitore, sia nel corso dell'effettuazione delle misure che soprattutto nella fase di simulazione ed auralizzazione degli scenari progettuali.

## 5 La risposta all'impulso binaurale

Se la risposta all'impulso rappresenta in ogni caso il parametro fisico in grado di esprimere esaustivamente le caratteristiche fisico-acustiche di un teatro, cionondimeno è necessario tenere in debita considerazione che il brano musicale viene percepito tramite le orecchie dell'ascoltatore. La risposta all'impulso pertanto deve essere modificata e riferita anche alla conformazione dell'apparato uditivo medio, pertanto devono essere considerate anche le funzioni di trasferimento relative alla testa (*Head-Related Transfer Function, HRTF*). Esse sostanzialmente trasformano la risposta in frequenza del microfono normale (omnidirezionale) in una coppia di microfoni binaurali. Questa operazione è necessaria quando si vuole simulare una risposta all'impulso binaurale, mentre nel corso delle misurazioni essa viene operata molto semplicemente ricorrendo ad un apparato sperimentale appropriato, ossia una testa artificiale (*dummy head*), che consente di effettuare misurazioni binaurali di risposte all'impulso. In Fig. 5.1 si riporta un esempio di risposta all'impulso binaurale sperimentale misurata nel Teatro 1763 di Villa Aldrovandi-Mazzacorati a Bologna.



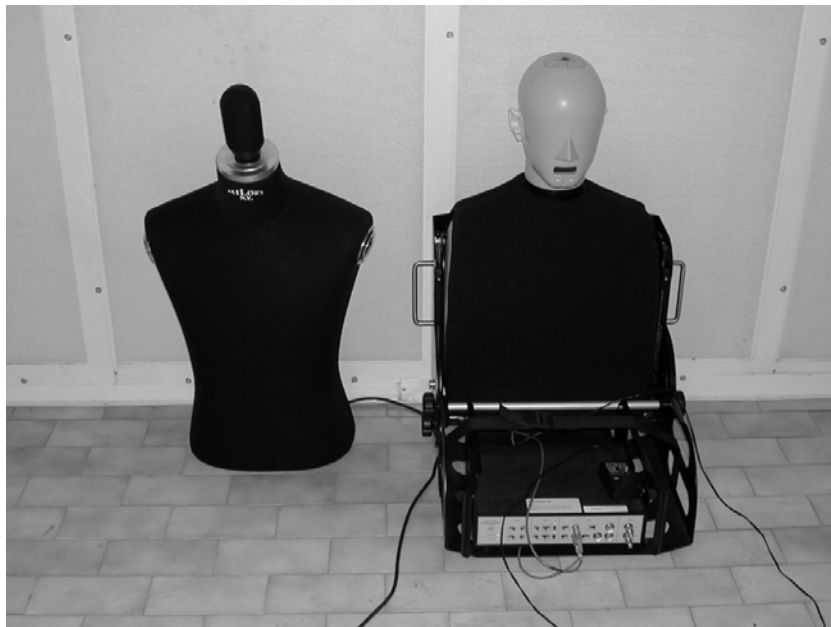
**Fig. 5.1** Risposta all'impulso binaurale sperimentale.

Le risposte all'impulso binaurali sono state a lungo utilizzate allo scopo di effettuare misurazioni all'interno degli ambienti dedicati alla musica, in grado anche di quantificare anche parametri binaurali (in particolare *IACC*). A tutt'oggi esse costituiscono il riferimento internazionale per lo svolgimento delle misurazioni acustiche all'interno dei teatri, seppure presentino limitazioni molto forti in particolare in relazione alla possibilità di quantificare esattamente la spazializzazione del campo acustico nei teatri.

Va altresì sottolineato come a rigore esse debbano essere misurate esclusivamente per il calcolo di parametri binaurali e non monoaurali, sebbene assai frequentemente vengano impiegate anche per questo scopo.

## 6 La risposta all'impulso *B-format*

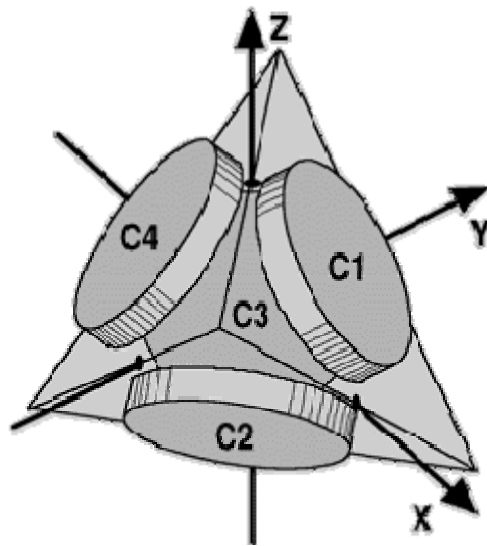
La risposta all'impulso di tipo *B-format* rappresenta una sorta di sviluppo della risposta binaurale, dacché riunisce in sé le caratteristiche monoaurali e tridimensionali del campo acustico. Un esempio tipico di microfono tridimensionale è illustrato in Fig. 6.1, assieme ad una testa artificiale. Entrambi sono montati sopra un "torso" che sintetizza la presenza del corpo umano.



---

**Fig. 6.1** Testa artificiale (dx) e microfono tridimensionale (sx) montati su dei *torsi*.

Alla base del funzionamento del sistema vi è l'intuizione di Gerzon di utilizzare un sistema di registrazione a quattro canali caratterizzato da quattro microfoni cardioidi montati su un supporto tetraedrico regolare, chiamato *a-format* (Gerzon, 1975). Tale sistema, utilizzato per le riprese sonore di eventi musicali dalla BBC, doveva poi essere decodificato tramite opportune relazioni per essere successivamente riprodotto in un ambiente d'ascolto secondo una serie di formule che costituivano la teoria *Ambisonics*. Nella Fig. 6.2 si riporta lo schema del sistema *a-format*.



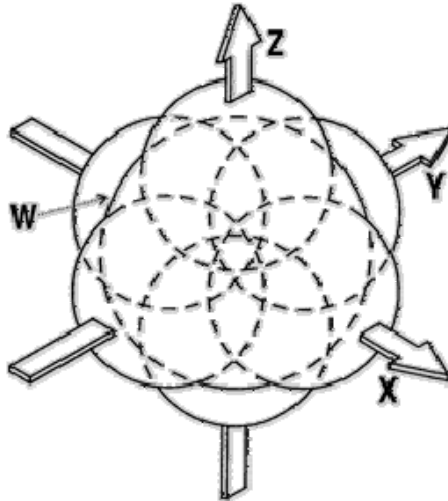
**Fig. 6.2** Le quattro capsule dell'*a-format* del sistema *Ambisonic*

I segnali in ingresso nelle capsule del sistema *a-format* possono essere elaborati, secondo le semplici relazioni della formole 6.1, ottenendo una serie di segnali virtualmente provenienti da altre direzioni, chiamate *B-format*, come indicato nella Fig. 6.3.

$$\begin{aligned}
 C1 + C2 + C3 + C4 &= W \\
 C1 + C2 - C3 - C4 &= X \\
 C1 - C2 + C3 - C4 &= Y \\
 C1 - C2 - C3 + C4 &= Z
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

Il significato di questa trasformazione è immediato: il segnale *W* rappresenta un segnale omnidirezionale, come se virtualmente nel baricentro delle capsule *a-*

format vi fosse un microfono omnidirezionale. Gli altri segnali ( $X$ ,  $Y$  e  $Z$ ) rappresentano ciascuno tre microfoni cardioidi virtuali collocati lungo gli assi di una terna cartesiana, e forniscono quindi i valori del campo sonoro proveniente da ciascun asse cartesiano.

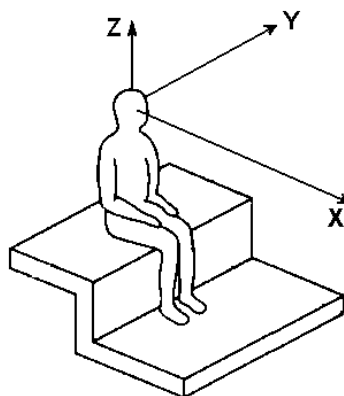


**Fig. 6.3** Gli armonici sferici e gli assi del sistema *B-format*

La loro combinazione consente la creazione di un nuovo microfono virtuale corrispondente a un'armonica sferica semplice o complessa del primo ordine che punta in una direzione qualsiasi, ottenuta semplicemente sommando vettorialmente le tre componenti, secondo i coseni direttori della direzione considerata. Questi tre segnali corrispondono a tre armoniche sferiche semplici del primo ordine, orientate a  $90^\circ$  le une in rapporto alle altre, mentre il segnale  $W$  rappresenta un'armonica sferica di ordine zero.

I tre assi considerati sono orientati nella maniera seguente (Fig. 6.4):

- “X” punta avanti,
- “Y” punta verso sinistra,
- “Z” punta verso l’alto.



**Fig. 6.4** Sistema di riferimento cartesiano per misure *B-format*

#### 6.1 Il microfono di tipo *Soundfield*

Le misurazioni di risposta all'impulso di tipo *B-format*, così importanti per determinare le caratteristiche tridimensionali del campo acustico, possono essere effettuate esclusivamente con un microfono *A-format*, ossia con il microfono *Soundfield*. Esso è stato sviluppato nel corso degli anni settanta partendo dalle ricerche di Gerzon e Craven.



**Fig. 6.1.1** Montaggio tetraedrico a quattro capsule del microfono *Soundfield* Mk V

Come si può vedere nella Fig. 6.1.1, i microfoni di tipo *Soundfield* sono costituiti da quattro capsule sub-cardioidi o cardioidi disposte come se fossero i lati di un tetraedro regolare. L'uscita a 4 canali di questo microfono è in *A-format*.

**SOUNDFIELD MK V** Il microfono *Soundfield* MK V costituisce il primo prototipo di microfono tridimensionale utilizzato in acustica architettonica. In esso il segnale *a-format* è inviato a un'unità di controllo per essere preamplificato. In seguito, esso viene convertito in *B-format* e corretto nelle sue irregolarità di frequenza. Il segnale *B-format* può essere successivamente modificato, sia al momento dell'acquisizione, sia nella post produzione. Le modifiche possibili, ottenute agendo su *azimuth*, *elevation* e *dominance*, permettono complete rotazioni virtuali del microfono in orizzontale (assi X e Y), nel piano meridiano (assi X e Z), e nel fronte sonoro (distorsione frontale o posteriore). In sostanza risulta possibile orientare virtualmente il microfono nello spazio, analizzare le componenti del campo acustico provenienti da direzioni particolari, od effettuare operazioni tra varie componenti laterali (ad esempio calcolare la frazione laterale, LF).

In realtà se il *Soundfield* fu commercializzato come strumento di registrazione tridimensionale di *performance* musicali prodotte dalla BBC, esistono altri sistemi analoghi, seppure con diverse sfumature nella realizzazione delle componenti elettroniche. Pertanto oggi è più corretto parlare del *Soundfield* come tipo o tecnica di registrazione, piuttosto che come modello di una compagnia in particolare.

**ARRAY DI MICROFONI** Per ottenere una analisi ancor più dettagliata della distribuzione spaziale del suono, è possibile effettuare la misurazione di risposte all'impulso con un elevato numero di canali (da 16 a 64), impiegando *array* di microfoni disposti in opportune configurazioni geometriche:

- lungo i due rami di una croce,
- ad anello,
- sulla superficie di una sfera,
- distribuiti randomicamente all'interno di un volume sferico.

Ciascuna configurazione geometrica ha i suoi pregi e difetti, comunque in generale mediante tecniche di "*beamforming*" è possibile sintetizzare la risposta di un elevato numero di microfoni virtuali ad alta direttività, che consentono di separare i fronti d'onda provenienti dalle diverse direzioni.

Non disponendo di un sistema di acquisizione con così alto numero di trasduttori e di canali, si può comunque ricostruire la stessa informazione mediante un *virtual array*, realizzato muovendo un ridotto numero di microfoni (al limite anche solo uno) in una serie di posizioni, mediante un dispositivo di posizionamento sequenziale automatico (ad esempio una tavola rotante). Tale tecnica si è rivelata

molto proficua per la misurazione completa delle caratteristiche acustiche spaziali di un teatro (Farina, Ayalon 2003).

## 7 Tecniche di misura del tempo di riverberazione

### 7.1 Decadimento del rumore stazionario interrotto

Le misure del tempo di riverberazione possono essere effettuate con diversi tipi di strumentazione e con differenti metodologie. Il primo metodo utilizzato storicamente prevede l'interruzione di una sorgente sonora in condizioni di regime stazionario, come W. Sabine descrisse ad inizio secolo.

#### IL TEMPO DI RIVERBERAZIONE.

Così come fu definito da Sabine, richiede di misurare il tempo che intercorre dallo spegnimento di una sorgente sonora stazionaria, in condizione di regime, fino ad ottenere un decadimento dell'energia sonora presente nell'ambiente pari a 60 dB. Spesso non è possibile ricavare il tempo di riverberazione dalla definizione di Sabine, poiché non si riesce a registrare un decadimento di 60 dB in quanto è presente un rumore di fondo troppo elevato: si ricorre, pertanto, ad una estrapolazione della prima parte della curva di decadimento. Esistono numerose possibilità di estrapolazione del tempo di riverberazione, a seconda della lunghezza del tratto di decadimento considerato. L'intervallo più comunemente impiegato è compreso tra -5 dB e -35 dB sotto il livello di regime, tralasciando quindi i primi 5 dB nei quali sono frequentemente presenti anomalie nel decadimento, e viene indicato  $T_{30}$ . Il tempo di riverberazione, tuttavia, viene estrapolato anche da altre porzioni ridotte. Vanno citati i tempi  $T_{10}$  e  $T_{20}$ , per i quali le estrapolazioni vengono effettuate su intervalli pari a 10 e 20 dB rispettivamente, nonché l'*Early Decay Time*, indicato con l'acronimo EDT, per il quale il decadimento considerato è compreso tra 0 e -10 dB. Tutti i valori ottenuti sono sempre comunque riferiti ad un decadimento complessivo pari a 60 dB.

Si può notare che nel caso di un decadimento della densità di energia perfettamente esponenziale i valori ottenuti del tempo di riverberazione estrapolato da ciascun intervallo considerato coincidono tra di loro. Infatti, sotto tale ipotesi, si avrebbe similitudine dei triangoli rettangoli aventi tutti in comune l'angolo retto, l'angolo di decadimento e l'ipotenusa, che necessariamente sarebbe costituita da un segmento di retta.

La realtà acustica è però assai più complicata.

Normalmente le curve di decadimento sono tutt'altro che rettilinee. Esse sono spesso caratterizzate da doppie pendenze o curvature non trascurabili. In tale caso il risultato è influenzato dall'estensione in dB od in millisecondi del tratto iniziale di curva usato per l'estrapolazione. Ciò giustifica quindi l'impiego di diverse

formulazioni del tempo di riverberazione, correlate alle varie fasi del decadimento sonoro.

Per la misura del decadimento si rende necessario l'utilizzo di un misuratore di livello sonoro (fonometri) in grado di fornire il valore del livello istante per istante. Per effettuare la misura del tempo di riverberazione si deve collegare il misuratore di livello ad un registratore scrivente in modo da ottenere il tracciato ben evidente su carta. Per ottenere dei tracciati chiari si diminuisce la velocità di trascinamento della carta. Il valore del tempo di riverberazione si ottiene dalla pendenza della linea di decadimento. Ciò può essere fatto direttamente usando uno speciale goniometro. Qualora si desideri ottenere i valori del tempo di riverberazione nella scala ponderata «A» o per bande di ottava o terzi d'ottava, si vede semplicemente applicare al fonometro il corrispondente filtro.

ANALIZZATORI IN TEMPO REALE. In alternativa ai fonometri possono essere utilizzati analizzatori in tempo reale, riducendo notevolmente i tempi di misura

Il loro uso si basa sull'acquisizione di un multispettro, ossia una serie di spettri acquisiti ad intervalli di tempo regolari molto brevi, fissati in base alla lunghezza della misura che si vuole effettuare. Nel caso della misura del tempo di riverberazione devono essere evitate le costanti di tempo esponenziali (*Fast*, *Slow*, *Impulse*) che alterano la pendenza del decadimento, e deve essere utilizzata la costante «lineare».

## 7.2 Tecniche impulsive

È stata sinora considerata l'idea iniziale di Sabine, cioè una sorgente che produce un campo sonoro stazionario e diffuso, interrotta improvvisamente.

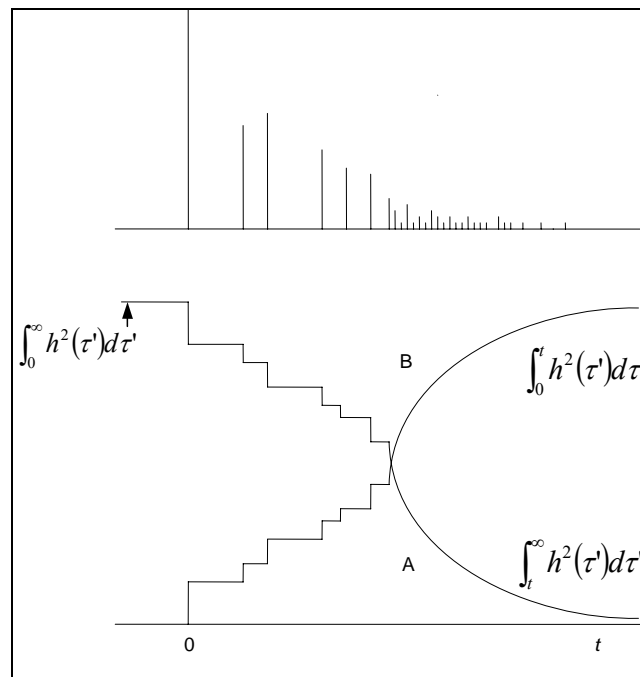
In alternativa può essere utilizzata una sorgente sonora di tipo impulsivo, quale un colpo di pistola a salve, lo scoppio di un palloncino od un impulso inviato da un altoparlante. In sostanza si tratta di misurare una versione semplificata della risposta all'impulso, descritta nei Par. 3 e 4, che viene pertanto chiamata «ecogramma» sperimentale.

Il tempo di riverberazione può essere ottenuto a partire dalla risposta all'impulso (o dalla sua versione semplificata, l'ecogramma). In particolare viene ricostruita la curva di decadimento che sarebbe stata prodotta da una sorgente in funzionamento continuo. Il legame tra la risposta all'impulso e il tempo di riverberazione è stato studiato da Schröder (Schröder, 1965).

Il decadimento del rumore contiene fluttuazioni casuali dovute alla storia casuale del segnale immediatamente precedente allo spegnimento della sorgente. La media temporale  $\langle n^2(\tau) \rangle$  di un numero molto grande di misure del decadimento quadrato  $n^2(\tau)$ , è collegata alla risposta all'impulso al quadrato  $h^2(\tau)$ , dalla relazione (7.2.1):

$$\langle n^2(\tau) \rangle = \int_{\tau}^{\infty} g^2(\tau') d\tau' = \int_0^{\infty} g^2(\tau') d\tau' - \int_0^{\tau} g^2(\tau') d\tau' \quad (7.2.1)$$

In Fig. 7.2.1 è visibile la rappresentazione grafica dell'integrazione di Schröder. La ricostruzione della curva di decadimento può avvenire mediante l'integrazione all'indietro della risposta all'impulso quadrata (curva A) fino a raggiungere il livello di energia stazionario, oppure, procedendo per tempi crescenti, per sottrazione dal livello di energia stazionario calcolato a parte, dei valori assunti progressivamente dall'integrale della risposta all'impulso quadrata (curva B).



**Fig. 7.2.1** Ricostruzione della curva di decadimento mediante integrazione all'indietro

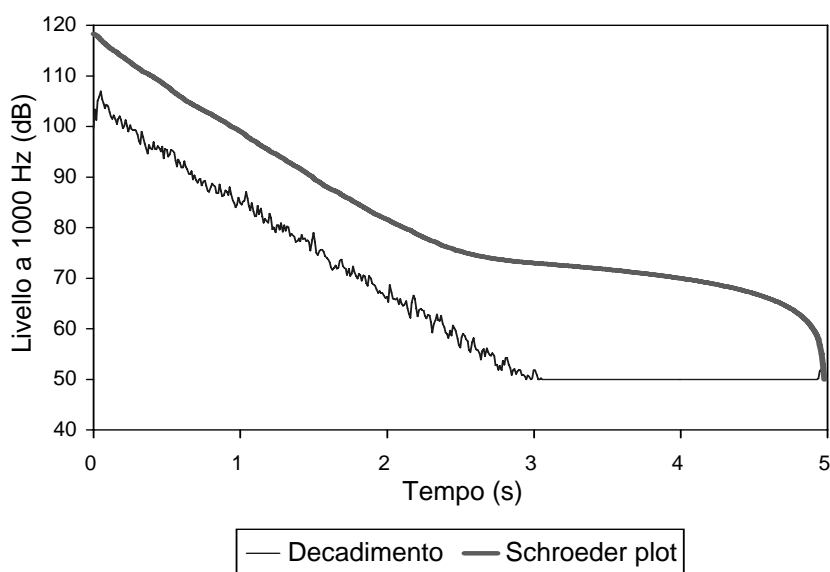
Trasformando questi grafici in scala logaritmica, è possibile calcolare il tempo di riverberazione con gli stessi procedimenti illustrati precedentemente.

**NORMA ISO3382.** La norma ISO3382 (1997) costituisce a livello internazionale l'unico riferimento per lo svolgimento delle misurazioni del tempo di riverberazione e degli altri parametri acustici correlati nei teatri. In essa si descrivono le tecniche di misura utilizzabili per le misurazioni, nonché alcuni parametri acustici. La norma ISO3382 è attualmente in fase di revisione, poiché sono state evidenziate numerose limitazioni sia sulle procedure di rilevamento sia sulle definizioni dei parametri misurabili. In particolare le carenze principali riguardano le caratteristiche della strumentazione, le tipologie dei segnali di prova

da impiegare, e soprattutto le posizioni della sorgente sonora e dei microfoni. Ciononostante la norma risulta applicabile per quanto riguarda la misurazione del tempo di riverberazione. A tale proposito essa prevede esplicitamente che la misura venga effettuata mediante integrazione all'indietro di Schröder allorché il segnale di eccitazione è di tipo impulsivo o pseudo-impulsivo.

Attualmente sono disponibili strumenti o programmi per PC capaci di effettuare automaticamente l'integrazione di Schröder di segnali impulsivi. In questo modo è possibile ottenere accurate misure dei tempi di riverberazione alle varie frequenze anche con un semplice colpo di pistola (Farina, Righini, 1997). Tali risultati sono in genere confrontabili con i risultati ottenuti con le misure classiche ottenute dallo spegnimento del rumore stazionario.

In caso di decadimento non esponenziale si riscontrano viceversa delle differenze fra i due metodi. Secondo Schröder è proprio il valore misurato dalla risposta all'impulso integrata ad essere meglio correlato con la sensazione soggettiva delle persone. In Fig. 7.2.2 viene mostrato un esempio di curva di decadimento da rumore impulsivo e relativo integrale di Schröder.



**Fig. 7.2.2** Curva di decadimento da rumore impulsivo e integrale di Schröder

Osservando la Fig. 7.2.2, si nota come la pendenza della curva integrata cambi avvicinandosi al termine della risposta all'impulso, poiché viene integrato anche il rumore di fondo non causato dall'impulso stesso. Esso si traduce in un secondo tratto lineare, di pendenza molto inferiore a quella del primo tratto, che può essere

facilmente confuso con un caso di decadimento a doppia pendenza. In realtà la misura riportata in Fig. 7.2.2 si riferisce ad un ambiente perfettamente Sabiniano, e la doppia pendenza è un tipico artefatto prodotto dall'integrazione di Schröder. Il valore corretto del tempo di riverberazione si ottiene estrapolando la pendenza del primo tratto di curva, e tralasciando il secondo.

Purtroppo la norma ISO3382 non è sufficientemente esplicita sull'argomento legato al rumore di fondo, ed afferma (erroneamente) che l'integrazione dello stesso causa una curva ad andamento orizzontale, mentre come mostrato essa è sì lineare, ma dotata di pendenza non trascurabile.

Inoltre nella norma suddetta non vengono esplicitamente illustrati gli accorgimenti in uso per evitare il problema dell'erronea integrazione del rumore di fondo, e si suggerisce semplicemente un criterio empirico onde definire l'intervallo ottimale di risposta all'impulso da integrare, limitando in tal modo l'influenza del rumore di fondo.

In realtà i moderni apparati per la misura del tempo di riverberazione mediante risposta all'impulso integrata incorporano avanzate tecniche numeriche di rimozione degli effetti indesiderati del rumore di fondo, che consentono la sua eliminazione in fase di integrazione, e producono in tal modo un decadimento molto più esteso ed immune da doppie pendenze artificiali (Farina, 2000). In Fig. 7.2.3 si riporta l'effetto della correzione dell'integrazione della risposta all'impulso dovuta all'eliminazione del rumore di fondo

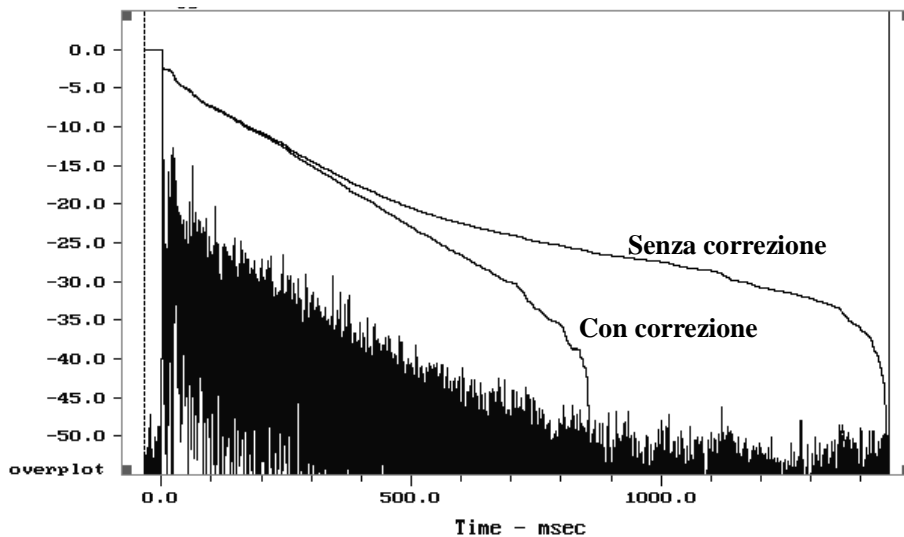


Fig. 7.2.3 Integrazione di Schröder di una risposta all'impulso sperimentale

Si può notare come, in presenza della correzione per rumore di fondo, il decadimento ricostruito risulta perfettamente lineare fino a oltre 30 dB al di sotto

del livello stazionario di partenza, mentre in assenza della correzione il tratto di decadimento corretto arriva solo a -15 dB.

**MEDIE SINCRONE.** Un'altra possibilità per incrementare il rapporto segnale/rumore, e dunque l'estensione del decadimento rilevato, consiste nell'operare una media sincrona su più ripetizioni del segnale di prova. In tale modo è possibile arrivare a misurare correttamente il tempo di riverberazione anche in presenza di rumore di fondo di livello più elevato del segnale proveniente dall'altoparlante, a patto di effettuare una media di parecchie decine di minuti, o addirittura di ore.

E' ovvio come la tecnica della media sincrona richieda la perfetta e stabile tempo-invarianza del sistema elettroacustico oggetto della misura (costituito dal sistema acustico nonché dai trasduttori elettroacustici impiegati). Ciò risulta quindi difficile da ottenere, come dimostrato nei paragrafi precedenti, in quanto soprattutto la strumentazione elettroacustica varia le proprie caratteristiche fisiche con il tempo, specie per effetti *joule*. Quando tale tempo-invarianza viene meno, le fasi del segnale misurato possono ruotare, e la procedura di media sincrona tende dunque a cancellare il segnale stesso, almeno parzialmente.

Poiché la rotazione di fase cresce con il tempo di volo del suono, la cancellazione del segnale per imperfetta tempo-invarianza si verifica in maggior misura nella parte tardiva della coda sonora, mentre ben difficilmente porta ad una riduzione del segnale del suono diretto e della parte iniziale della risposta all'impulso. Quindi si ottiene sovente una risposta all'impulso di aspetto convincente, apparentemente ben misurata, ma che fa registrare valori del tempo di riverberazione significativamente più bassi del valore reale.

In sostanza quindi è sempre preferibile evitare di fare la media sincrona fra i risultati di più misure di risposta all'impulso.

## 8 Tecniche di misura della risposta all'impulso

### 8.1 Misura con segnale impulsivo

La tecnica di misura dei coefficienti  $h$  della risposta all'impulso è teoricamente molto semplice: basta infatti immettere nel sistema la funzione impulsiva ideale, detta « $\delta$  di Dirac», ovvero un segnale costituito da un campione avente il valore massimo consentito dalla rappresentazione digitale impiegata (ad esempio +1, nei moderni sistemi «a virgola mobile») seguito solo da numeri nulli.

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

**Fig. 8.1** Codifica binaria di un  $\delta$  di Dirac

Convolvere la  $\delta$  di Dirac si ottengono quindi:

$$\begin{aligned} y_1 &= 1 \cdot h_1 + 0 \cdot h_2 + 0 \cdot h_3 = h_1 \\ y_2 &= 0 \cdot h_1 + 1 \cdot h_2 + 0 \cdot h_3 = h_2 \\ y_3 &= 0 \cdot h_1 + 0 \cdot h_2 + 1 \cdot h_3 = h_3 \end{aligned} \quad (8.1.1)$$

Ad ogni passo di campionamento si ottiene quindi un coefficiente  $h$ .

Questo tipo di misurazione, benché teoricamente semplicissima, è praticamente molto difficile da realizzare: infatti, alimentando un altoparlante con il segnale  $\delta$ , esso dovrebbe essere in grado di produrre un impulso molto breve e di elevatissima potenza (per una buona misurazione occorre superare di almeno 60 dB il rumore di fondo). Una possibile soluzione consiste nell'uso di una sorgente sonora di tipo esplosivo (una pistola caricata a salve, un palloncino di gomma) che però non fornisce un segnale che dura solo un periodo di campionamento, ma arriva a qualche decina di periodi.

**TIME REVERSAL MIRROR.** Per ovviare a questo inconveniente si può convolvere il segnale di risposta dell'ambiente con sé stesso rovesciato sull'asse dei tempi in modo da far diventare primo l'ultimo campione. questa tecnica prende il nome di *time reversal mirror*. ciò porta ad avvicinarsi alla risposta teorica derivante dall'uso di una vera  $\delta$  di Dirac, ma non al suo raggiungimento. si otterrebbe il risultato ideale solo se lo spettro del segnale impulsivo di eccitazione fosse realmente piatto. poiché, al contrario, esso è solitamente piuttosto irregolare, dopo la convoluzione con il proprio *time reversal mirror* corrispondente, si ottiene una risposta all'impulso il cui andamento spettrale è ancora più marcatamente artefatto.

Inoltre, dacché il prodotto di convoluzione gode della proprietà commutativa, se col *time reversal mirror* si potesse ottenere effettivamente la risposta ad una  $\delta$  di Dirac ideale, basterebbe convolvere il segnale in uscita con il generico segnale in ingresso rovesciato sui tempi per ottenere la risposta all'impulso del sistema, qualunque sia tale segnale di ingresso, ad esempio anche musica o parlato.

Va ricordato che la convoluzione di un segnale con sé stesso rovesciato sull'asse dei tempi fornisce la cosiddetta funzione di autocorrelazione del segnale, mentre convolvere un segnale  $y$  con la versione rovesciata sull'asse dei tempi di un diverso segnale  $x$ , porta al calcolo della cosiddetta funzione di cross-correlazione fra tali due segnali.

Da queste considerazioni nasce l'idea di deconvolvere la risposta all'impulso a partire da una misura effettuata impiegando come segnale di test un segnale casuale, ad esempio rumore bianco.

Si supponga, infatti, di trovare una coppia di segnali tali che il loro prodotto di convoluzione fornisca il  $\delta$  di Dirac. Si tratta quindi di due segnali per i quali si ha:

$$x^{-1} \otimes x = \delta \quad (8.1.2)$$

Poiché il prodotto di convoluzione, al pari del prodotto semplice, gode della proprietà commutativa, si ha:

$$y \otimes x^{-1} = x \otimes h \otimes x^{-1} = h \otimes x \otimes x^{-1} = h \otimes \delta = h \quad (8.1.3)$$

Il problema, di tipo computazionale, consiste quindi nel determinare una coppia di segnali  $x$  e  $x^{-1}$ , il primo dei quali da utilizzare come test nell'ambiente di prova, ed il secondo, chiamato «filtro inverso», da convolvere con l'*output* del segnale nell'ambiente stesso.

Non è semplice determinare tale coppia di segnali, a meno che il segnale di partenza  $x$  sia costruito in modo da avere alcune speciali proprietà matematiche, come accade con il segnale *MLS* oppure con i segnali sinusoidali tipo *sweep*.

## 8.2 Deconvoluzione nel dominio della frequenza

La deconvoluzione della risposta all'impulso può essere effettuata anche nel dominio delle frequenze. Il teorema della convoluzione, anticipato inella formula 4.3, dice infatti che:

$$y = x \otimes h \xrightarrow{FFT} Y = X \cdot H \quad (8.2.1)$$

Si può notare che:

- nel «dominio del tempo» sono necessarie  $m$  convoluzioni ( a loro volta costituite da  $m$  somme ed  $m$  prodotti ) quindi un numero di operazioni dell'ordine di  $m^2$ ,
- nel «dominio delle frequenze» ogni armonica viene semplicemente moltiplicata per un coefficiente, per un totale di  $m$  operazioni di tipo *FFT*, con un costo di calcolo molto limitato. inoltre nel dominio delle frequenze l'operazione di ricerca dei coefficienti  $h$  é estremamente semplice, dacché essi sono semplicemente il quoziente fra  $y$  e  $x$ , ossia è:

$$H = \frac{Y}{X} \xrightarrow{IFFT} h \quad (8.2.2)$$

STABILITÀ E TIME ALIASING. Operando nel dominio delle frequenze esiste un problema fondamentale: il risultato può diventare instabile. Infatti possono verificarsi casi per i quali ad una particolare frequenza il valore  $X$  corrispondente sia nullo. Conseguentemente il coefficiente  $H$  relativo diverge all'infinito. Si può

ovviare a questo problema facendo una media con varie misurazioni e scegliendo un segnale in ingresso che fornisca energia su tutte le frequenze, tipicamente il rumore bianco.

Un altro problema riguarda la lunghezza della *FFT* impiegata. Essa deve essere adeguata al tempo di risposta del sistema. Infatti, adottando una *FFT* troppo corta, si verifica il fenomeno del *Time Aliasing*: esso consiste nel fatto che, stante la natura «circolare» del processo di calcolo dell'*FFT*, se la risposta all'impulso del sistema è più lunga della finestra temporale processata dall'*FFT* stessa, la parte eccedente si ricolloca all'inizio della finestra temporale, andando ad intaccare la parte iniziale della risposta all'impulso che si cerca di determinare.

Per ridurre gli effetti del rumore di fondo, si può infine effettuare una media nel tempo, facendo impiego delle normali tecniche di stima dei descrittori spettrali note dalla teoria dell'analisi dei segnali, in particolare la determinazione delle funzioni di autospettro ( $G_{XX}$ ,  $G_{YY}$ ) e cross-spettro  $G_{XY}$  medi dei due segnali campionati ( $x$  ed  $y$ ). Per la determinazione della risposta all'impulso, si utilizza solitamente l'espressione:

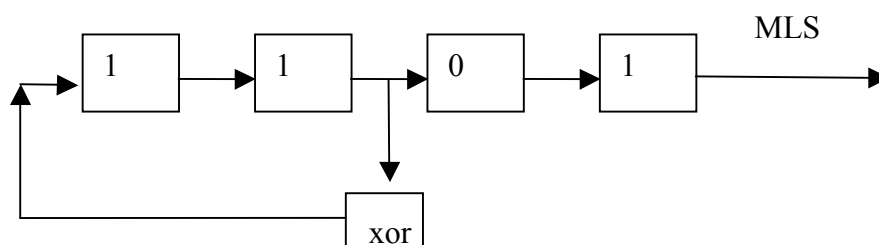
$$H_1 = \frac{G_{XY}}{G_{XX}} \xrightarrow{IFFT} h \quad (8.2.3)$$

Esistono anche programmi di calcolo commerciali che si basano sull'uso della tecnica *FFT* descritta. In alcuni casi la misura della risposta all'impulso viene effettuata impiegando come segnale di test sia rumore in banda larga, sia addirittura un segnale costituito da musica o parlato, purchè gli stessi abbiano uno spettro ragionevolmente continuo e con energia a tutte le frequenze, senza presenze di zeri.

### 8.3 Segnali particolari: *MLS*

Al posto del rumore casuale si può però scegliere il segnale in ingresso in maniera più conveniente, mantenendone le caratteristiche utili (la presenza di tutte le frequenze con componenti spettrali non nulle) ma cercando di ottenere ulteriori vantaggi.

Un segnale particolarmente efficace per la misurazione della risposta all'impulso proviene dalla teoria dei numeri e prende il nome di *MLS* (*Maximum Length Sequence*). Questo segnale è una sequenza binaria costruita tramite uno *shift register* (registro a scorrimento):



**Fig. 8.3.1** Esempio di *shift register* a 4 bit, i numeri scorrono a destra ad ogni passo temporale.

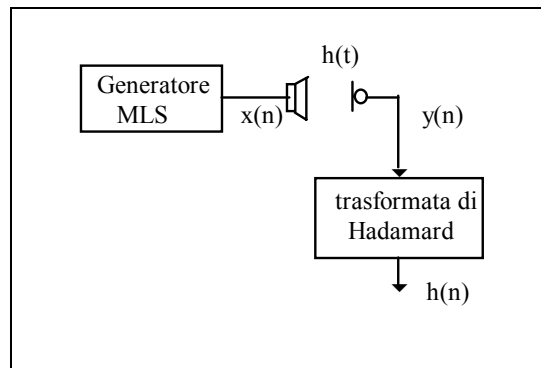
Con opportuni valori iniziali e un corretto posizionamento dell'XOR si ottiene un segnale *MLS*. Le sequenze *MLS* godono di alcune proprietà assai notevoli:

- ❑ Poiché la sequenza è nota in partenza in maniera deterministica, si trova matematicamente  $MLS^{-1}$  come inversa nel tempo della sequenza originale;
- ❑ essendo inoltre  $MLS^{-1}$  un segnale binario fatto solo di 1 e 0, il prodotto di convoluzione risulta particolarmente semplice: le moltiplicazioni diventano solamente somme;
- ❑ grazie alla semplicità di questo segnale è possibile fare in tempo reale la convoluzione nel dominio del tempo grazie ad un particolare algoritmo chiamato *Hadamard Fast Transform*;
- ❑ poiché il segnale in entrata è generato direttamente non deve più essere campionato e quindi si può usare una scheda di campionamento ad una sola entrata;
- ❑ essendo lo spettro sonoro dell' *MLS* piatto come quello del rumore bianco è possibile calcolare anche l'analisi in frequenza.

Si può dimostrare che la lunghezza di una sequenza tipo *MLS* è pari a  $2^n - 1$  dove  $n$  è il numero di celle dello *shift register*. In acustica in particolare, si usano normalmente *shift registers* a 16 o 20 celle ricavando, nel caso di 16 celle, sequenze *MLS* di 65535 campioni. Spesso le sequenze vengono poi ripetute nel tempo, allo scopo di effettuare medie su più cicli, aumentando il rapporto segnale-rumore.

La tecnica *MLS* esiste fin dal 1975, ed è stata sicuramente la più usata fino a circa il 2000. Ciò è stato anche dovuto alla diffusione di una scheda di acquisizione, costruita nel 1989 (Rife, Vanderkooy, 1989), che implementava per via hardware lo *shift register* e corredata da un software chiamato *MLSSA* («melissa») particolarmente efficace. Gli svantaggi di questa tecnica sono la fortissima dipendenza dalle caratteristiche di linearità del sistema.

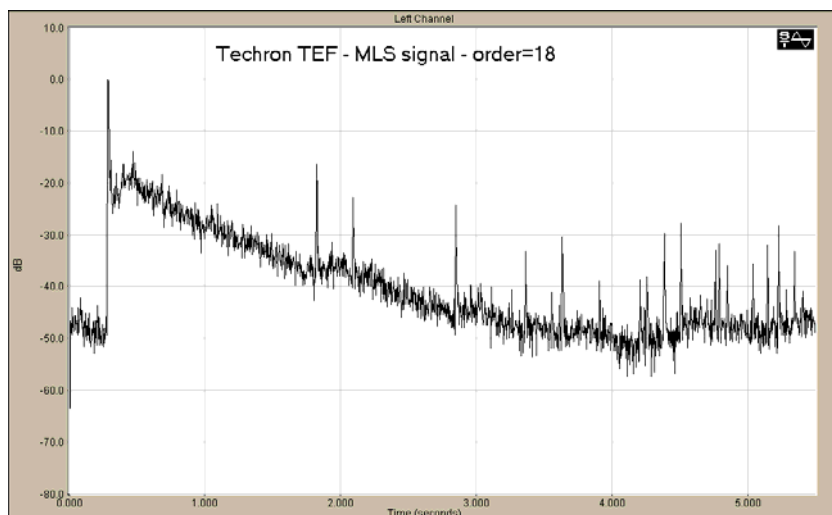
Il principale problema della misura con tecnica *MLS* è dovuta all'estrema suscettibilità a fenomeni di distorsione non lineare eventualmente presenti nella catena elettroacustica, in particolare nei trasduttori (altoparlanti e microfoni soprattutto). Tali effetti non lineari causano, a valle del processo di deconvoluzione, la comparsa di «picchi spuri» nel segnale misurato, che possono apparire come echi tardivi, e che rovinano completamente la risposta all'impulso misurata sia al fine della determinazione dei parametri acustici oggettivi, sia per la possibilità di utilizzarla come filtro numerico nei processi di auralizzazione. Inoltre, l'utilizzo di medie sincrone per migliorare il rapporto segnale-rumore, può comportare la cancellazione delle alte frequenze. Conseguentemente la tecnica *MLS* può essere usata solo con riproduttori audio molto fedeli, fatti funzionare ben al di sotto del loro limite di distorsione, e per un tempo non troppo lungo.



**Fig. 8.3.2** Schema di generazione, acquisizione e calcolo della risposta all'impulso con tecnica del rumore pseudo random *MLS*

Le limitazioni della tecnica *MLS* sono evidenziate nella Fig. 8.3.3. Si possono infatti notare numerosi picchi causati dalle distorsione armoniche riscontrate durante il processo di misurazione, e provocati da fenomeni non lineari nell'elettronica dei microfoni nonché nell'altoparlante.

Come si vedrà nel paragrafo successivo, tali fenomeni possono essere evitati utilizzando altre tecniche di deconvoluzione che consentono di separare le non linearità della catena di misura dalla risposta acustica del sistema acustico.



**Fig. 8.3.3** Misura con segnale *MLS*; sono evidenti i fenomeni di non linearità dei trasduttori

#### 8.4 Segnali particolari: *sine sweep*

La tecnica del segnale *MLS* permette di ottenere la risposta all'impulso del sistema elettroacustico mediante algoritmi molto efficienti, ma purtroppo non consente la separazione del contributo del sistema acustico dalle distorsioni armoniche del sistema elettronico. Tale separazione, come si vedrà, è invece ottenibile con la tecnica del cosiddetto segnale *sweep*. Il segnale così definito è composto da una forma d'onda di tipo sinusoidale puro che parte dalle frequenze basse e sale verso l'alto al trascorrere del tempo. Questo segnale presenta un particolare vantaggio: il suo «filtro inverso»  $x^{-1}$  non è altro che il segnale di partenza ribaltato nell'asse dei tempi. Ossia è:

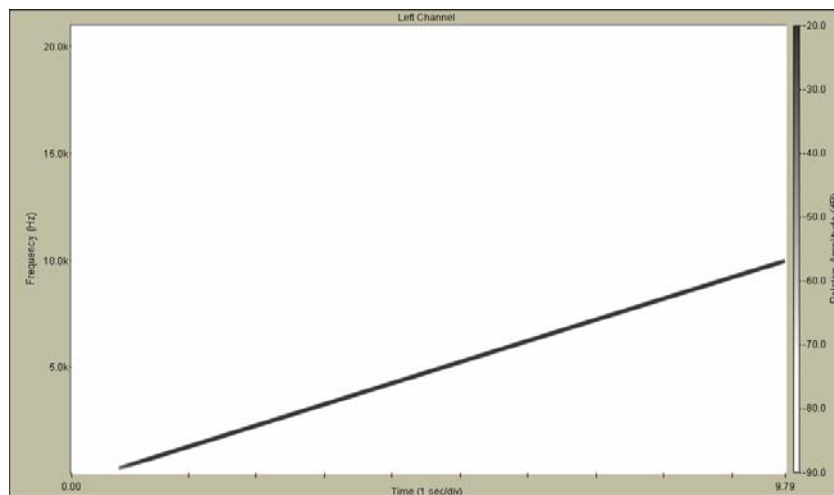
$$\begin{aligned} x &= \text{segnale di sweep} \\ x^{-1} &= x \text{ rovesciato nell'asse dei tempi} \end{aligned} \quad (8.4)$$

Pertanto la determinazione numerica di  $x^{-1}$  è immediata e precisa. Purtroppo la facilità della determinazione di  $x^{-1}$  comporta necessariamente la perdita dei vantaggi numerici ottenuti dai segnali *MLS* mediante la trasformata di *Hadamard*. Tuttavia, se negli anni novanta le possibilità di calcolo numerico, assai limitate, costringevano a sacrificare tecniche analitiche raffinate a vantaggio di metodologie meno precise ma dotate di efficienti algoritmi numerici, lo sviluppo dei processori

numerici ha consentito l'implementazione di teorie analitiche molto raffinate. Nel caso dei segnali *sweep*, per ottenere comunque una pregevole velocità di calcolo della convoluzione è possibile utilizzare un metodo di convoluzione veloce tramite FFT, chiamato *select save*. Tale algoritmo richiede molta potenza di calcolo, ma consente l'utilizzo dei segnali *sweep*, i quali non soffrono delle limitazioni tipiche del segnale *MLS*, soprattutto in presenza di sistemi non lineari e non tempo-invarianti, come i trasduttori elettroacustici.

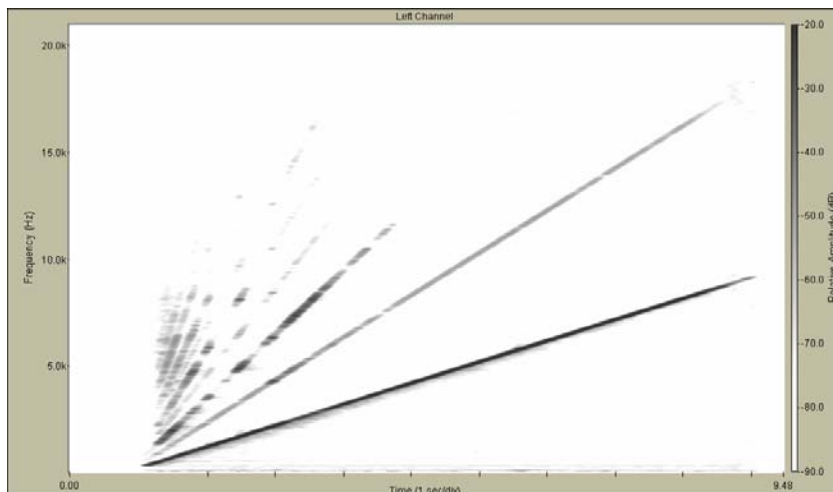
*SWEEP LINEARE*. Nel caso la generazione del segnale sinusoidale abbia variazione lineare della frequenza nel tempo, i segnali *sweep* corrispondenti vengono chiamati lineari. Più semplicemente sono stati adottati vari nomi per la loro definizione, quali *chirp*, *stretched pulse*, o TDS – *Time Delay Spectrometry*.

L'andamento della forma d'onda così definita può essere facilmente rappresentata in un diagramma tempo-frequenza, come in Fig. 8.4.1:



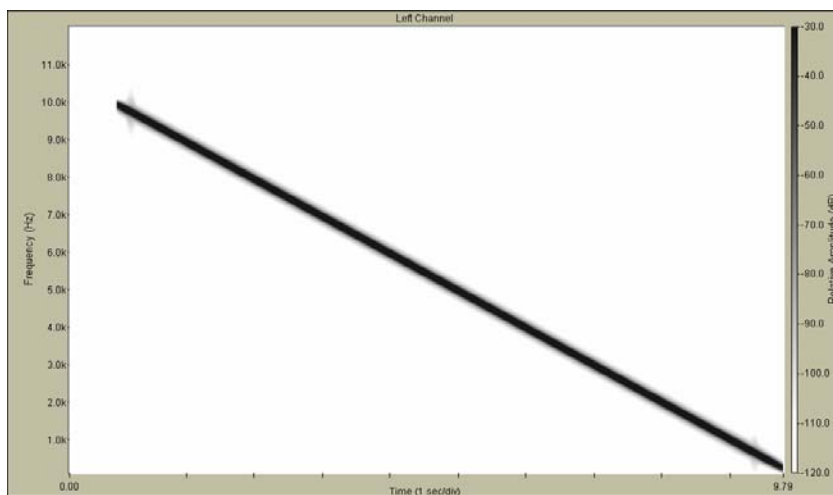
**Fig. 8.4.1** Rappresentazione di un segnale sweep lineare

Si supponga di applicare come segnale  $x$  in ingresso ad un sistema elettroacustico, costituito preponderatamente dai trasduttori elettronici, il segnale *sweep* lineare appena descritto. Per effettuare questa sperimentazione è sufficiente svolgere la misurazione in un ambiente semi-anecoico collocando il microfono molto vicino all'altoparlante, o addirittura corto-circuitando *input* e *output* dell'apparato di misura. In uscita dal sistema si otterrà un segnale  $y$ , evidenziato in Fig. 8.4.2. Esso sarà stato modificato dalle caratteristiche del sistema acustico, caratterizzato dalla fondamentale dalla componente elettronica e quindi distorto dalle caratteristiche non lineari del sistema elettronico, in particolare dall'altoparlante utilizzato per la diffusione del segnale.



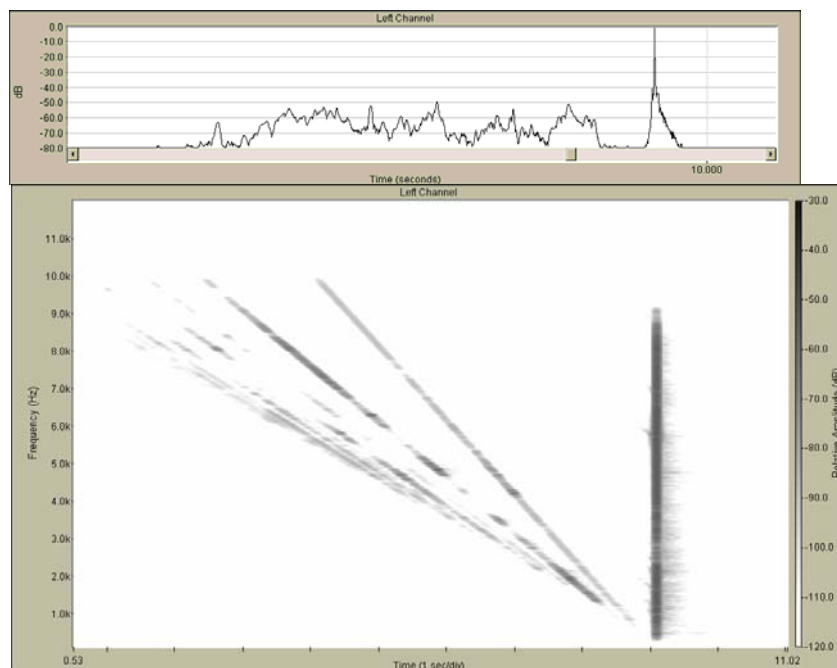
**Fig. 8.4.2** Segnale sweep lineare in uscita dal sistema elettroacustico

Per procedere con la misurazione sarà necessario determinare il corrispondente «filtro inverso», ossia il segnale  $x^{-1}$  descritto nel par. 8.1, che nel caso dello sweep lineare sarà costituito da una forma d'onda sinusoidale con frequenza decrescente linearmente nel tempo, rappresentata in Fig. 8.4.3, ottenuta ribaltando il segnale  $x$  lungo l'asse del tempo.



**Fig. 8.4.3** «Filtro inverso» o segnale  $x^{-1}$  corrispondente ad uno *sweep* lineare

Effettuando quindi la convoluzione tra segnale in uscita  $y$  e «filtro inverso»  $x^{-1}$  si ottiene la risposta all'impulso del sistema elettroacustico. Come si può notare è possibile separare i contributi del sistema acustico, caratterizzato da una risposta all'impulso lineare, molto netta, dalle componenti non lineari dovute alle distorsioni indotte dalla catena di misura. In particolare, la risposta all'impulso del sistema acustico è costituita dall'ultimo impulso più a destra, dacché il sistema era costituito prevalentemente dalla catena di misura impiegata.

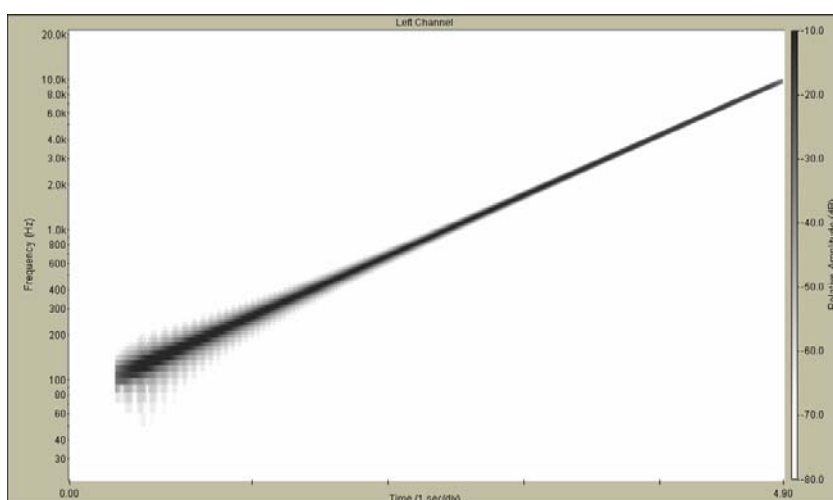


**Fig. 8.4.4** Risposta all'impulso nei domini del tempo (a) e nel piano tempo-frequenza (b) ottenuta da un segnale *sweep* lineare

Il segnale *sweep* lineare ha consentito quindi la separazione dei due contributi, ossia ha fornito la risposta all'impulso del sistema separando effetti non lineari dei trasduttori elettronici (Farina, 2000).

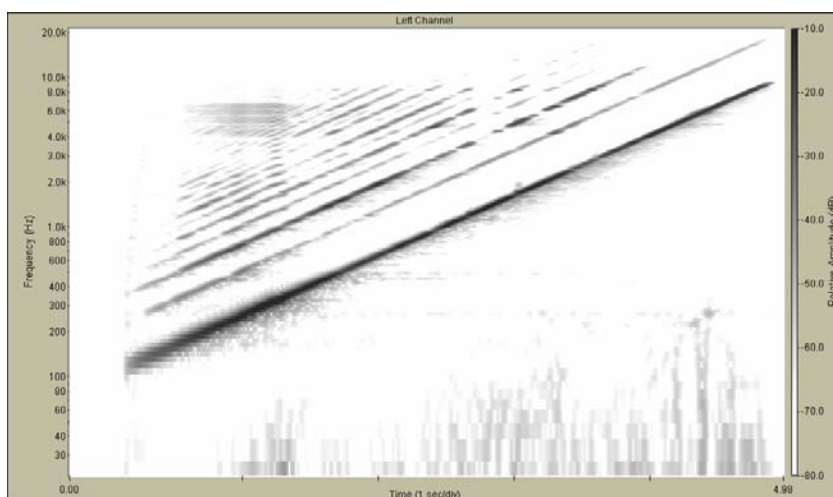
**SWEET ESPONENZIALE.** Un risultato ancora migliore è ottenibile con l'utilizzo di un segnale *sweep* esponenziale, rappresentato in Fig. 8.4.5, nel quale la crescita della frequenza corrispondente alla forma d'onda sinusoidale si sviluppa esponenzialmente con il trascorrere del tempo. In tale maniera la velocità con cui aumenta la frequenza percepita dal segnale *sweep* risulta costante su un asse logaritmico. In altre parole, la frequenza varia nel tempo per ottave, ossia al raddoppio dell'intervallo di tempo la frequenza diventa doppia. Si tratta quindi di

un segnale molto più vicino alla normale pratica musicale rispetto allo *sweep* lineare.



**Fig. 8.4.5** rappresentazione nel dominio tempo-frequenza di un segnale sweep esponenziale

In questo caso, la risposta del sistema elettroacustico, ossia il segnale  $y$ , assume un andamento diverso dal caso dello sweep lineare. Osservando la Fig 8.4.6 si nota che le distorsioni armoniche prodotte dalle componenti elettroniche mantengono la stessa pendenza sul piano tempo-frequenza (quest'ultima su scala logaritmica) del segnale di ingresso, a differenza dalla Fig. 8.4.2.

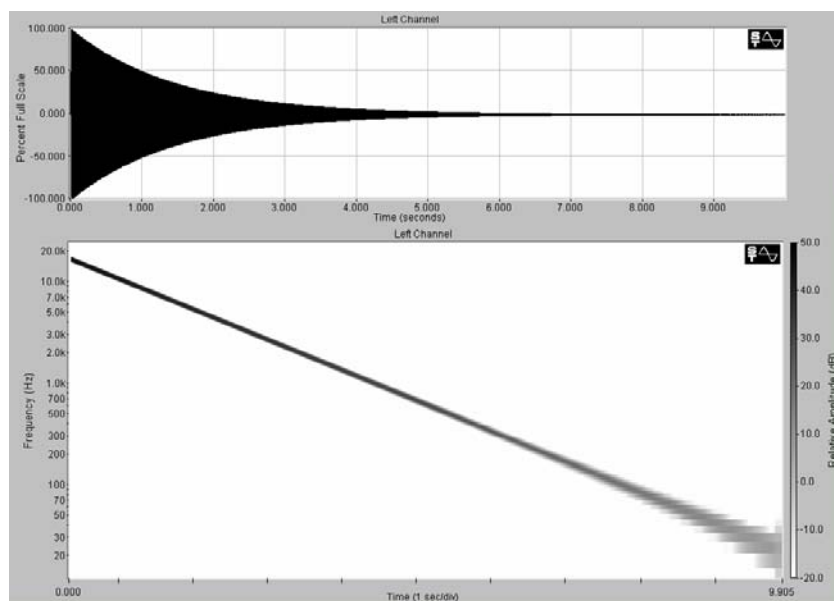


**Fig 8.4.6** Segnale sweep esponenziale in uscita dal sistema elettroacustico

Nel caso del segnale *sweep* esponenziale il «filtro inverso» da utilizzare per la deconvoluzione, costituito dal segnale di test originario ribaltato lungo l'asse dei tempi, deve essere modificato. Infatti, il solo ribaltamento nell'asse dei tempi opererebbe un pesante filtraggio della risposta in frequenza misurata, in quanto già di per se il segnale di test a sweep esponenziale possiede uno spettro che non è piatto, ossia simile ad un rumore bianco. Esso ha invece uno spettro rosa, cioè un spettro il cui livello sonoro decresce proporzionalmente con la frequenza, con pendenza pari a 3 dB/ottava.

Il corrispondente «filtro inverso», pertanto, deve contenere uno spettro in grado di compensare l'andamento del segnale di ingresso. Tale compensazione si ottiene applicando un filtraggio delle ampiezze con pendenza positiva di 6 dB/ottava.

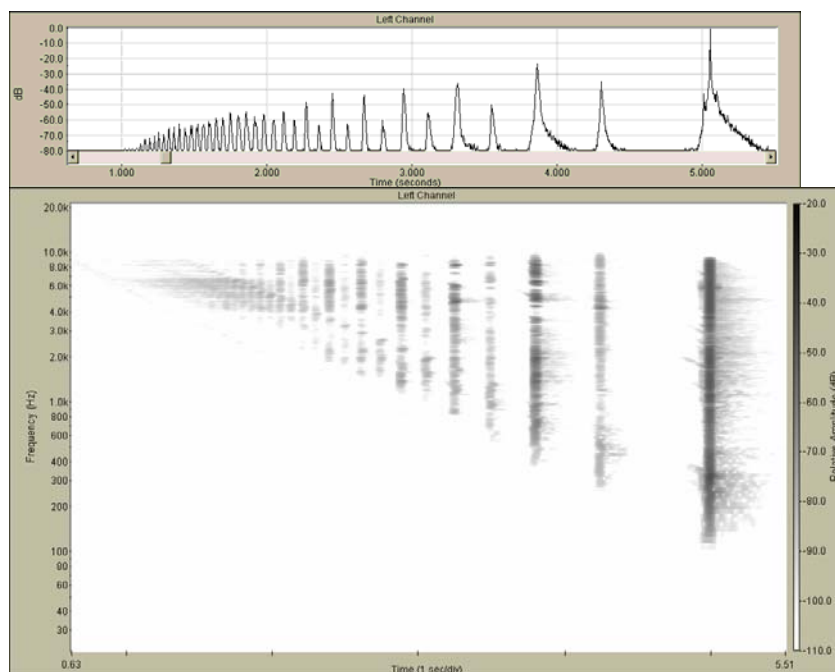
Normalmente tale filtraggio viene effettuato direttamente durante la generazione del filtro inverso. A seguito del ribaltamento nell'asse dei tempi, visibile in Fig. 8.4.7, tale filtraggio appare visivamente come una diminuzione delle ampiezze alle basse frequenze.



**Fig. 8.4.7** «Filtro inverso» corrispondente al segnale *sweep* esponenziale: diagramma nel dominio del tempo (a) e nel piano tempo-frequenza (b)

Analogamente a quanto riscontrato per il segnale *sweep* lineare, dal prodotto di convoluzione tra il segnale in uscita  $y$  e «filtro inverso»  $x^{-1}$  si ottiene la risposta all'impulso del sistema elettroacustico. I vari contributi di risposte all'impulso non-lineari, ciascuna delle quali deriva dall'accumulazione della risposta ad un preciso

ordine armonico, anticipano la risposta all'impulso del sistema acustico. Nella Fig. 8.4.8, analoga alla Fig. 8.4.4, tale separazione è chiaramente percepibile, sia nel dominio del tempo, sia sul piano tempo-frequenza.

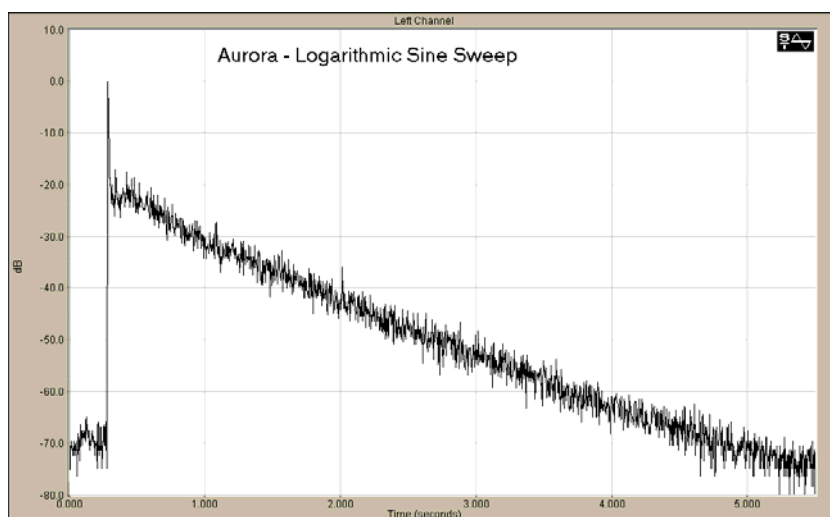


**Fig. 8.4.8** Risposta all'impulso nei domini del tempo (a) e nel piano tempo-frequenza (b) ottenuta da un segnale *sweep* esponenziale

La risposta all'impulso lineare, corrispondente al sistema acustico oggetto della misurazione, è collocata sulla destra dei diagrammi, e preceduta dall'insieme delle distorsioni armoniche indotte dalla catena di misurazione. Nel diagramma corrispondente al dominio del tempo, rappresentato dalla Fig. 8.4.8 (a) essa è costituita dall'ultimo picco a destra, più alto degli altri; gli impulsi precedenti, da destra verso sinistra, costituiscono le varie distorsioni armoniche, a partire dalla distorsione del 2° ordine, a seguire. Nella Fig 8.4.8 (b) si può apprezzare il contributo in frequenza corrispondente sia alla risposta all'impulso del sistema acustico, sia delle varie distorsioni corrispondenti.

La misurazione effettuata con *sweep* di tipo esponenziale consente non solo di estrarre la risposta all'impulso lineare, corrispondente al sistema acustico, priva di qualsiasi artefatto causato dalle eventuali distorsioni nei trasduttori, ma anche di misurare la risposta non lineare del sistema, quantificando la risposta all'impulso di ciascun ordine armonico.

Inoltre, la stessa misura della sola risposta all'impulso lineare avviene con miglior rapporto segnale-rumore e completa immunità ad artefatti causati dalla non perfetta tempo-invarianza del sistema, dacché non vengono effettuate medie sincrone.



**Fig. 8.4.9** Misura con segnale *sweep* esponenziale di risposta all'impulso

Confrontando la Fig. 8.4.9, che rappresenta la misurazione di risposta all'impulso effettuata in un teatro, con l'analoga misurazione effettuata con la tecnica MLS, riportata precedentemente in Fig. 8.3.3, si nota facilmente il maggior rapporto segnale-rumore ottenuto con il segnale *sweep* esponenziale, e la totale assenza di distorsioni armoniche presenti nella misura MLS.

## 9 Misurazioni acustiche in teatri ed auditorium

Il tempo di riverberazione e la risposta all'impulso rappresentano certamente i parametri fondamentali in grado di descrivere la qualità acustica di un teatro o un auditorium.

Le misurazioni vengono normalmente effettuate utilizzando una sorgente sonora ed un insieme di microfoni, all'interno della sala.

### 9.1 Posizioni di misura

La scelta delle posizioni in cui collocare sia i ricevitori sia la sorgente rappresenta un elemento essenziale durante una campagna di misurazioni sperimentali.

La norma ISO3328, citata nel Par. 7.2 suggerisce alcuni elementi per la corretta misurazione dei parametri acustici.

- I microfoni devono essere collocati ad una distanza non inferiore ad un quarto della lunghezza d'onda da qualunque superficie, compreso il pavimento. Nella pratica, viene suggerito di collocare i microfoni omnidirezionali ad una distanza pari a circa 1 metro da qualunque superficie;
- Le posizioni in cui collocare i microfoni devono distare almeno due metri tra di loro;
- I microfoni devono essere collocati ad una distanza minima dalla sorgente, in modo da evitare una eccessiva influenza del suono diretto. Tale distanza minima è pari a:

$$d = \sqrt{\frac{2V}{cT}} \quad (m) \quad (9.1)$$

Avendo posto:

V = volume dell'ambiente

c = velocità del suono

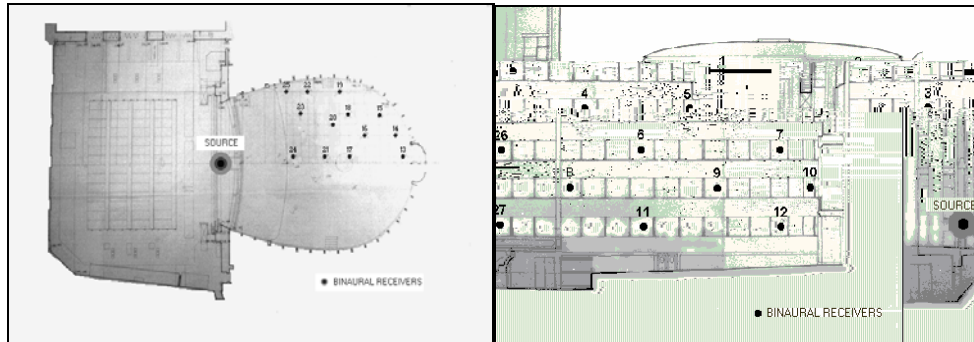
T = tempo di riverberazione approssimativo dell'ambiente

La norma ISO3382 (Annex A4) si sofferma molto sinteticamente sul numero dei punti di misura, sostenendo che <è necessario includere un adeguato numero di posizioni di sorgente e ricevitore per caratterizzare l'intera sala >. Inoltre, stabilisce un numero minimo di posizioni dei ricevitori (ma non delle sorgenti), secondo la tabella seguente:

| Numero di posti nella sala | Numero minimo di punti di rilievo |
|----------------------------|-----------------------------------|
| 500                        | 6                                 |
| 1000                       | 8                                 |
| 2000                       | 10                                |

**Tab 9.1.1** numeri minimi di punti di rilievo indicati dalla norma ISO3382

In realtà qualora si intenda effettuare una adeguata campagna di misura in un teatro i punti di rilievo devono essere assai più numerosi. Ad esempio, nel Teatro la Fenice di Venezia, i punti di rilievo utilizzati nelle uniche misurazioni svolte nel teatro (novembre 1995) prima dell'incendio del gennaio 1996 erano 27, e sfruttando la geometria del teatro corrispondevano in totale a 54 punti. Tali misure costituiscono documento storico dell'acustica del teatro veneziano prima dell'incendio del gennaio 1996. (Tronchin, Farina, 1997).



**Fig. 9.1.1** Pianta e prospetto del Teatro la Fenice di Venezia prima dell'incendio del 1996. Sono indicati i punti di rilievo acustico (2)

Anche la sorgente sonora può essere collocata in diverse posizioni. In particolare è preferibile posizionare la sorgente nel palcoscenico in almeno due punti, corrispondenti a due diverse zone in cui possono venirsi a trovare i professori d'orchestra e i solisti. Nel caso di teatri d'opera anche la fossa d'orchestra va necessariamente considerata, collocando la sorgente al suo interno.

Le variazioni dell'acustica di un teatro al variare solo della posizione della sorgente sonora sono state recentemente determinate da uno studio (Tronchin et al., 2004), nel quale sono state quantificate le variazioni della qualità acustica indotte su due punti, scelti in platea e in un palco, e modificando la posizione della sorgente sia nel palcoscenico che nella fossa d'orchestra.

## 9.2 Strumentazione per lo svolgimento delle misure

La strumentazione utilizzata per le misurazioni sperimentali di qualità acustica può essere costituita da varie tipologie di microfoni e sorgenti sonore. Se in passato era comune utilizzare colpi di pistola e fonometri per misurare sperimentalmente la risposta all'impulso monoaurale di un teatro, attualmente le misurazioni richiedono di utilizzare una strumentazione più evoluta, in grado di avere una risposta in frequenza piatta, senza distorsioni, e con caratteristiche di direzionalità ben precise. In particolare la strumentazione tipica è la seguente:

**SORGENTE SONORA** La sorgente sonora rappresenta la causa maggiore di non linearità del sistema elettronico di misura. La norma ISO3382 prevede che la sorgente debba essere di tipo omnidirezionale e fissa alcuni limiti di deviazione massima, come rappresentato in Tab. 9.2.1, che debbono essere misurate in campo libero utilizzando un rumore rosa. Tuttavia si limita ad affermare che la risposta in

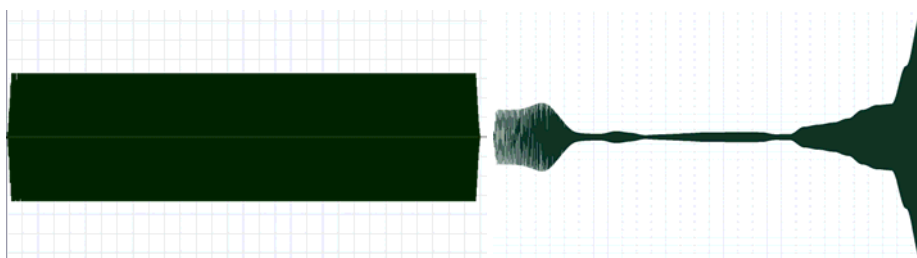
frequenza debba essere «adeguata» ed emettere un «segnale sufficiente» nel campo di frequenza compresa tra 125 Hz e 4 kHz.

| Frequenza, Hz          | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k |
|------------------------|-----|-----|-----|----|----|----|
| Deviazione massima, dB | ±1  | ±1  | ±1  | ±3 | ±5 | ±6 |

**Tab. 9.2.1** Deviazioni massime consentite per un altoparlante omnidirezionale secondo ISO3382

In realtà molti altoparlanti omnidirezionali, chiamati spesso «dodecaedri», non presentano né le caratteristiche di omnidirezionalità, né una adeguata risposta in frequenza lineare.

Per ovviare a tali limitazioni si opera un filtraggio preliminare al segnale di prova, come in Fig. 9.2.2. Dopo aver effettuato la misurazione in camera anecoica della risposta all'impulso dell'altoparlante, mediante FFT si può determinare la corrispondente analisi in frequenza. La risposta all'impulso può essere invertita, utilizzando vari algoritmi di inversione come il metodo di *Kirkeby* (Kirkeby, 1997). Infine, è sufficiente convolvere il segnale da utilizzare per le misurazioni, come ad esempio uno *sweep* esponenziale, ottenendo il corrispondente segnale equalizzato, in grado di compensare i limiti dell'elettronica dell'altoparlante, che avrà così una potenza quasi costante nelle bande di frequenza di interesse.



**Fig. 9.2.1** Segnale *sweep* esponenziale normale (a) ed equalizzato (b)

**MICROFONI.** Se il segnale  $x$  deve essere irradiato nel teatro per mezzo di un altoparlante omnidirezionale con risposta in frequenza lineare, all'uscita del «sistema acustico» il segnale  $y$  dovrà essere acquisito da alcuni trasduttori.

Nei Par. 5 e 6 sono stati introdotti alcuni microfoni tipicamente utilizzati nelle misurazioni acustiche nei teatri: la «testa artificiale» ed il microfono tipo *Soundfield*. Oltre ad essi possono essere utilizzati anche normali microfoni omnidirezionali per le riprese monofoniche, ad esempio nel caso si intenda misurare solamente il tempo di riverberazione. Oppure possono essere utilizzati

microfoni cardioidi per le misurazioni di risposte all'impulso di tipo *ORTF*, come verrà illustrato nel prosieguo. Pertanto, una configurazione completa degli apparati di ripresa microfonica, come illustrato in Fig. 9.2.2, potrà prevedere l'utilizzo del microfono *Soundfield*, di una testa artificiale, ed eventualmente di una coppia di microfoni in configurazione *ORTF* (Farina, Ayalon, 2003).



**Fig. 9.2.2** Teatro Olimpico di Vicenza (a) Teatro greco di Tarmina (b)

In Fig. 9.2.2 (b), è visualizzato un sistema di microfoni montato su una tavola rotante, che consente di realizzare le misurazioni con *virtual array* circolare di microfoni, come indicato nell'ultimo capoverso del paragrafo 6.1.

La norma ISO3382 prevede anche l'utilizzo di un microfono a «figura-di-otto» per la misurazione di alcune proprietà del campo acustico. In realtà il microfono a «figura-di-otto» è costituito molto semplicemente dai canali del microfono *Soundfield* corrispondenti alle tre componenti armoniche sferiche del 1° ordine.

SCHEDE AUDIO. Il segnale analogico proveniente dai microfoni dovrà essere acquisito da un sistema di acquisizione appropriato. Normalmente i segnali microfonici verranno convertiti in segnali digitali e infine salvati su PC. Lo sviluppo dell'elettronica delle schede audio ha consentito negli ultimi anni di poter acquisire facilmente numerose tracce audio sincrone con alta definizione (risoluzione di 24 *bit* e frequenza di campionamento di 96 kHz) utilizzando convertitori analogico/digitale con risoluzioni a 24 *bit*. Inoltre l'evoluzione di tali schede consente ormai il loro utilizzo anche su PC portatili tipo *laptop*, facilitando notevolmente lo svolgimento delle misure.

Per poter effettuare misurazioni acustiche con la strumentazione descritta, utilizzando più sorgenti sonore collocate in diverse posizioni del palcoscenico e della fossa d'orchestra, nonché un microfono *Soundfield*, una testa artificiale e due microfoni a cardioide, sono necessarie schede audio aventi più canali in uscita e almeno 8 canali in ingresso. Esse dovranno conseguentemente essere interfacciate a PC in grado di gestire, mediante opportuni *software* multitraccia, una gran quantità di dati che dovranno essere salvati su *Hard Disk* senza alcuna latenza.

### 9.3 Misurazione e rappresentazione dei parametri acustici

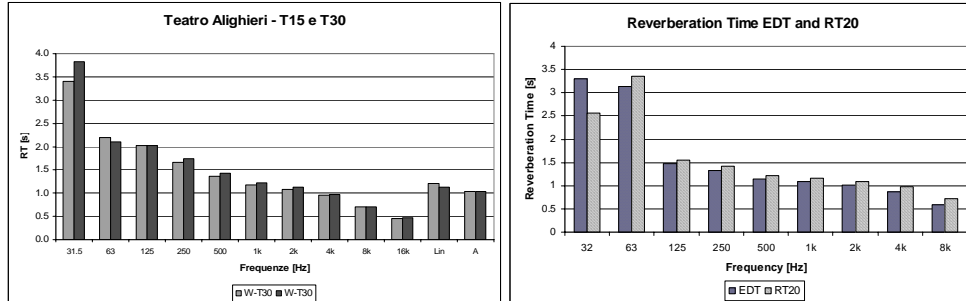
Le tecniche di misurazione descritte finora consentono di ottenere numerosi parametri fisici in grado di caratterizzare la qualità del sistema acustico presente nella sala. Storicamente, il primo parametro fisico-acustico, definito da *Sabine*, è il tempo di riverberazione. Nel Par. 7 sono state definite varie procedure per l'estrapolazione a partire sia dal decadimento di un segnale stazionario (Par. 7.1) sia a partire dalla risposta all'impulso (Par 7.2).

Normalmente sia il tempo di riverberazione sia la risposta all'impulso vengono misurate «a sala vuota», ossia senza la presenza di pubblico ad occupare i posti a sedere.



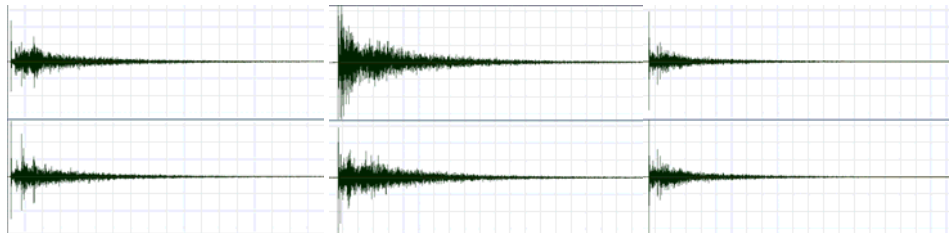
**Fig. 9.3.1** l'Auditorium Paganini di Parma: misure a sala vuota (a) e piena (b).  
Si notino i microfoni in prima fila

Tuttavia la norma ISO3382 prevede anche la possibilità di effettuare rilievi a «sala piena», purché ciò sia esplicitamente indicato nella relazione tecnica conclusiva. L'andamento del tempo di riverberazione è normalmente molto costante all'interno di un teatro, soprattutto qualora sia significativamente verificata l'ipotesi *sabiniana* di campo acustico uniformemente diffuso. Risulta pertanto più significativo riportare l'andamento in frequenza del  $T_{60}$ , differenziando i risultati a seconda dell'intervallo di decadimento considerato. In Fig. 9.3.2 si nota il tipico andamento del tempo di riverberazione di due teatri all'italiana, che decresce all'aumentare della frequenza (Tronchin, Tarabusi, 1999).



**Fig. 9.3.2** Tempi di riverberazione misurati nei teatri Alighieri di Ravenna (a) e Comunale di Treviso (b). Ravenna (a):  $T_{15}$  e  $T_{30}$ ; Treviso (b) EDT e  $T_{20}$

Oltre al tempo di riverberazione, esistono altri parametri fisici caratterizzanti la qualità acustica. Tutti discendono dalla risposta all'impulso. Essi sono facilmente calcolabili mediante numerosi *software* in grado di effettuare il calcolo numerico.



**Fig. 9.3.3** Risposte all'impulso binaurali: (a) Teatro Verdi, Firenze. Teatro Bellini, Catania (c) Teatro la Fenice, Venezia, prima dell'incendio.

Normalmente i parametri acustici vengono raggruppati in categorie che considerano soprattutto la loro caratterizzazione.

PARAMETRI ACUSTICI ENERGETICI. Essi considerano la parte iniziale della risposta all'impulso molto utile per la percezione della ricchezza del suono, a scapito della coda riverberante che viene ritenuta dannosa. Essi sono:

- ❑ Chiarezza  $C_{50}$  e  $C_{80}$
- ❑ Definizione  $D_{50}$
- ❑ Tempo baricentrico CT (o TS)

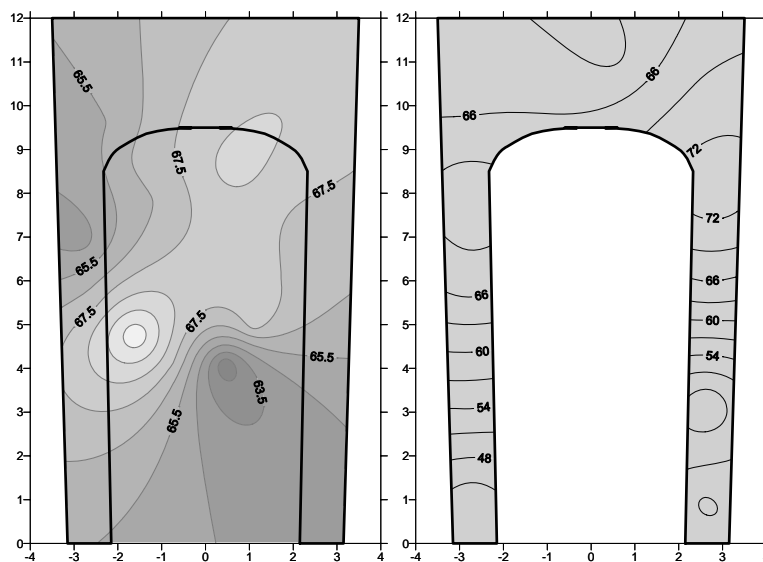
Essi sono definiti tramite operazioni sulle risposte all'impulso (9.3.1, 9.3.2, 9.3.3) ottenuti tramite post-processing della risposta all'impulso:

$$C_{50} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{\int_0^{50ms} p^2(\tau) \cdot d\tau}{\int_0^{\infty} p^2(\tau) \cdot d\tau} \right]; \quad C_{80} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{\int_0^{80ms} p^2(\tau) \cdot d\tau}{\int_0^{\infty} p^2(\tau) \cdot d\tau} \right] \quad (dB) \quad (9.3.1)$$

$$D = 100 \frac{\int_0^{50ms} p^2(\tau) \cdot d\tau}{\int_0^{\infty} p^2(\tau) \cdot d\tau} \quad (\%) \quad (9.3.2)$$

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} \tau \cdot p^2(\tau) \cdot d\tau}{\int_0^{\infty} p^2(\tau) \cdot d\tau} \quad (ms) \quad (9.3.3)$$

Normalmente tali parametri vengono considerati rappresentativi della «frazione utile» di energia, dacché sono costituiti da un rapporto energetico tra una «parte utile» al numeratore e una «coda riverberante» dannosa, al denominatore.



**Fig. 9.3.4** Mappe di distribuzione spaziale del tempo baricentrico nel teatro 1763 di Villa Aldrovandi-Mazzacorati a Bologna. (a) platea (b) palco

Nel caso dei parametri acustici energetici, oltre alla rappresentazione in frequenza, è molto indicativa una raffigurazione in pianta (Fig. 9.3.4), in grado di evidenziare la loro variabilità all'interno della sala. Nel caso siano presenti più livelli, come nel caso del particolarissimo teatro 1763 di Villa Mazzacorati a Bologna (Tronchin et al., 2003), è consuetudine rappresentare separatamente i valori misurati.

*STRENGTH G.* Anche la distribuzione di energia all'interno della sala costituisce un parametro assai considerevole nello studio della qualità acustica. La distribuzione, chiamata *strength*, viene definita dalla ISO3382 come «il rapporto logaritmico della pressione sonora al quadrato della risposta all'impulso esaminata con la pressione sonora al quadrato della risposta all'impulso misurata con la medesima sorgente sonora collocata in campo libero a 10 metri di distanza». In sostanza può essere agevolmente calcolata dalla (9.3.4).

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h^2_{10}(\tau) d\tau} = SPL - L_w + 31 \quad (dB) \quad (9.3.4)$$

La *strength* rappresenta un parametro molto importante per la caratterizzazione di un sistema acustico. Sebbene non sia indicato nella ISO3382, dalla *strength*, misurata collocando la sorgente sonora in varie parti del palcoscenico e della fossa d'orchestra, è possibile calcolare il *balance*, ossia la variazione di energia acustica percepita nella sala al variare della posizione delle sorgenti, nel palcoscenico e nella fossa d'orchestra. (Marshall 1995)

*INITIAL TIME DELAY GAP ITDG.* Il «tempo di ritardo della prima riflessione» *ITDG* ha rappresentato a lungo un parametro acustico ritenuto essenziale per lo studio acustico all'interno dei teatri. Esso rappresenta il ritardo con cui viene percepita la prima forte riflessione nell'ambiente, dopo l'onda diretta (ed esclusa la riflessione sul pavimento).

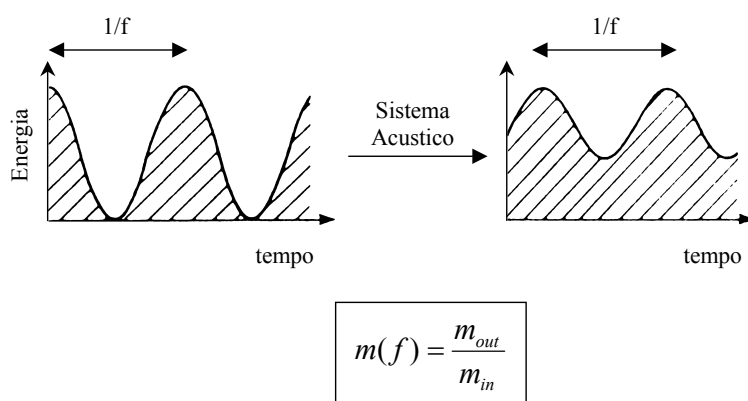
La sua determinazione sperimentale è assai complicata, dacché raramente dalle risposte all'impulso è possibile individuare univocamente una singola forte riflessione iniziale. Per facilitarne il calcolo spesso si ricorre all'operazione di elevazione al quadrato della risposta all'impulso, allo scopo di aumentarne visivamente la parte iniziale. Tuttavia non esiste al momento una procedura di calcolo automatico in grado di fornire risultati ripetibili della misura. Per questa ragione l'*ITDG* non è citato nella norma ISO3382.

**INDICI DI INTELLIGIBILITÀ.** L'Intelligibilità della parola all'interno di un teatro o auditorium rappresenta un parametro non direttamente correlato con la produzione musicale. Tuttavia la musica operistica, nonché gli spettacoli di prosa, prevedono la partecipazione di cantanti ed attori, per i quali l'intelligibilità riveste una

importanza considerevole.

Tra i numerosi parametri riguardanti l'intelligibilità certamente il più importante è l'«indice di trasmissibilità del parlato», *Speech Transmission Index*, *STI*.

Lo *STI* viene calcolato a partire dalla funzione di trasferimento della modulazione, *modulation transfer function*, *MTF*. Essa è definita dal rapporto tra l'ampiezza della modulazione pervenuta al ricevitore e la corrispondente modulazione generata dalla sorgente, generata da un rumore rosa filtrato, per bande d'ottava nel campo di frequenza compresa tra 125 Hz e 8 kHz, avente una ampiezza modulata ad una frequenza  $f$  molto bassa (Fig. 9.3.5).



**Fig. 9.3.5** Funzione di trasferimento della modulazione *MTF*:

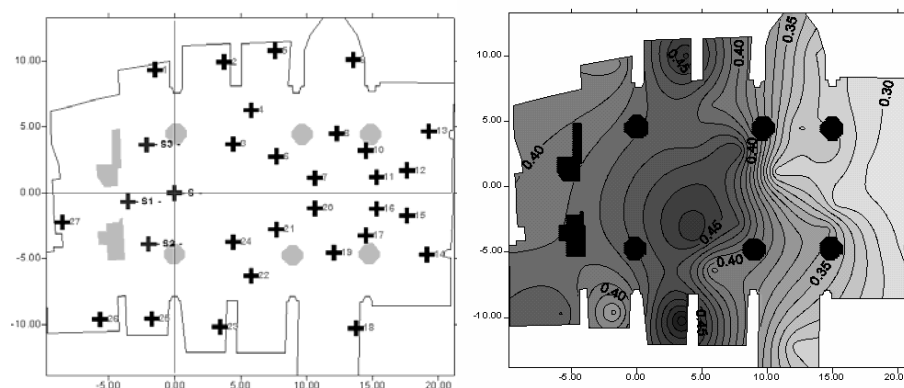
(a) segnale generato; (b) segnale percepito

Al variare della frequenza modulante tra i valori di 0.63 Hz e 12.5 Hz si ottiene un insieme di 98 valori di *MTF*, corrispondenti a 14 dati per ciascuna delle 7 bande d'ottava. Successivamente i valori vengono mediati in un solo valore, lo *STI*. Qualora i calcoli vengano limitati alle sole bande di 500 e 2k Hz, la media risultante viene chiamata *Rapid-STI*, ossia *RASTI*.

Anche in questo caso è possibile effettuare il calcolo della *MTF* e conseguentemente dello *STI* a partire dalla risposta all'impulso (Schröder, 1981), opportunamente filtrata per ciascuna banda d'ottava.

$$m(F) = \frac{\int_0^{\infty} h_f^2(\tau) \cdot e^{-j2\pi\tau} d\tau}{\int_0^{\infty} h_f^2(\tau) \cdot d\tau} \quad (9.3.5)$$

Le misure di intelligibilità, e quindi anche lo *STI* non vengono richiamate nella norma ISO3382, ma la loro importanza specie per i numerosi teatri d'opera italiani richiede certamente la loro misurazione. Si può infine dimostrare che maggiore intelligibilità comporta un rapporto segnale/rumore elevato ed un tempo di riverberazione contenuto.



**Fig. 9.3.6** Auditorium del Carmine di Parma: (a) Distribuzione delle sorgenti e dei punti di misurazione; (b) mappa della distribuzione dello *STI* (Tronchin, 2000)

**PARAMETRI ACUSTICI PER LA SPAZIALIZZAZIONE.** Le misurazioni monoaurali finora analizzate non consentono di quantificare il grado di avvolgimento dell'ascoltatore all'interno di un teatro. Come descritto nei Par. 5 e 6 è necessario avvalersi di trasduttori microfonic in grado di misurare risposte all'impulso binaurali e *B-format*. La stessa norma ISO3382 prevede la misurazione di alcuni parametri in grado di quantificare la frazione di energia laterale percepita, e precisamente:

- ❑ Frazione Laterale LF ed Efficienza Laterale LE
- ❑ Cross-correlazione inter aurale, *Inter-Aural Cross Correlation IACC*

La misurazione della «frazione laterale» o della «efficienza laterale», parametri che differiscono solamente per l'intervallo di integrazione del numeratore (9.3.6), richiede l'utilizzo di un microfono a «figura-di-otto». Mediante l'utilizzo del microfono *Soundfield* è possibile ottenere una simile direttività semplicemente facendo impiego del canale Y.

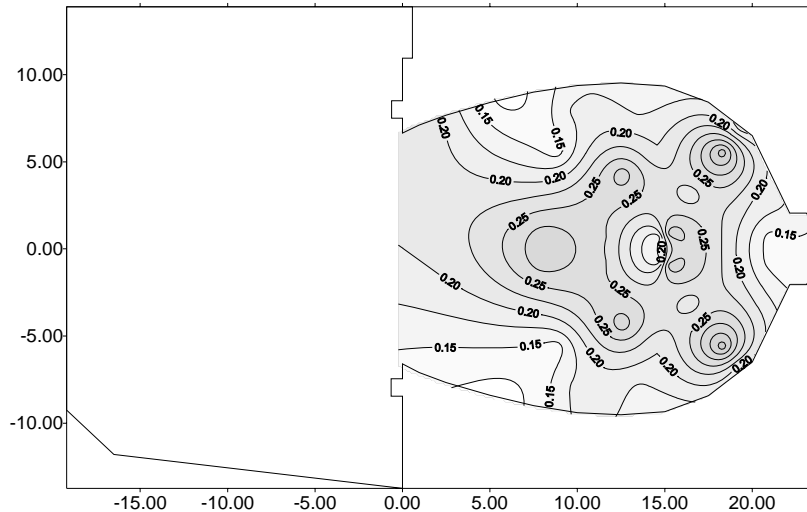
$$LE = \frac{\int_{0}^{80ms} h_{\infty}^2(t) dt}{\int_{0}^{80ms} h_0^2(t) dt}; \quad LF = \frac{\int_{0}^{80ms} h_{\infty}^2(t) dt}{\int_{0}^{5ms} h_0^2(t) dt} \quad (9.3.6)$$

La *IACC* invece richiede l'utilizzo di una testa artificiale (Fig. 6.1), e viene calcolata rapportando le risposte all'impulso misurate nelle due orecchie (9.3.7), secondo l'algoritmo di cross-correlazione tra due segnali. Il valore massimo della funzione di cross-correlazione rappresenta la *IACC*

$$\rho(\tau) = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{2T} \int_{-T}^T h_d(\tau) \cdot h_s(\tau + t) d\tau \right)}{\lim_{T \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{2T} \sqrt{\int_{-T}^T h_d^2(\tau) d\tau \cdot \int_{-T}^T h_s^2(\tau + t) d\tau} \right)}; \quad IACC = |\rho(\tau)|_{MAX} \quad (9.3.7)$$

La *IACC* può anche essere calcolata per bande d'ottava. In tal caso è sufficiente filtrare a monte le risposte all'impulso prima di effettuare il calcolo della funzione di cross-correlazione.

I parametri acustici che descrivono le proprietà spaziali del campo acustico devono necessariamente essere rappresentati in pianta (Fig. 9.3.7). Essi sono notevolmente correlati con la valutazione psico-soggettiva della qualità acustica. Nel caso del Teatro la Fenice, il valore molto basso della *IACC* misurata ha contribuito notevolmente alla formulazione del giudizio di qualità acustica che il teatro possedeva prima dell'incendio.



**Fig. 9.3.7** Mappa di distribuzione spaziale della *IACC* nel Teatro la Fenice di Venezia prima dell'incendio del gennaio 1996 (Tronchin, Farina, 1997)

TEORIA DI ANDO. Tutti i parametri acustici analizzati possiedono un intervallo di valori conderati ottimali per la qualità acustica. Tali intervalli, tuttavia, non considerano il particolare brano musicale che può essere eseguito nella sala.

In altre parole può accadere che un ambiente sia considerato «ottimo» per brani solisti pianistici, ma «sordo» per una composizione orchestrale. Questa constatazione ha spinto Ando a sviluppare una teoria che fosse in grado di correlare la qualità acustica del teatro ad una particolare tipologia di composizioni. Nella sua teoria (Ando, 1985) viene calcolato un indice di preferenza complessivo  $S_i$  relativo ad una tipologia musicale, mediante dei fattori di peso da attribuire a quattro indici di preferenza relativi a quattro parametri acustici.

$$S_i = -w_i |x_i|^{3/2} \quad (9.3.8)$$

Le variabili  $x_i$  costituiscono i valori normalizzati dei parametri acustici responsabili dell'espressione del giudizio di qualità, che sono:

- $x_1 \propto$  livello di ascolto (*strength*)
- $x_2 \propto$  *ITDG*
- $x_3 \propto$  tempo di riverberazione
- $x_4 \propto$  *IACC*

Ciascuna variabile  $x_i$  è espressione del valore misurato del parametro acustico corrispondente, rapportata al relativo valore preferito, ricavato da indagini psicoacustiche.

I fattori di peso delle variabili (9.3.9) sono determinati da indagini statistiche.

$$w_1 = \begin{cases} 0,07, x_1 > 0 \\ 0,04, x_1 < 0 \end{cases} \quad w_2 = \begin{cases} 1,42, x_2 > 0 \\ 1,11, x_2 < 0 \end{cases} \quad (9.3.9)$$

$$w_3 = \begin{cases} 0,45 + 0,74 A_{eq}, x_3 > 0 \\ 2,36 - 0,42 A_{eq}, x_3 < 0 \end{cases} \quad w_4 = 1,45$$

I valori preferiti dei quattro parametri acustici dipendono dal brano musicale, in particolare dalla durata effettiva dell'autocorrelazione del segnale musicale. Tale durata è definita come il tempo  $\tau_e$  dopo il quale l'involuppo della funzione normalizzata di autocorrelazione (9.3.10) diventa uguale a 0,1.

$$\Phi(\tau) = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} p(t) \cdot p(t + \tau) dt}{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} p^2(t) dt} \quad (9.3.10)$$

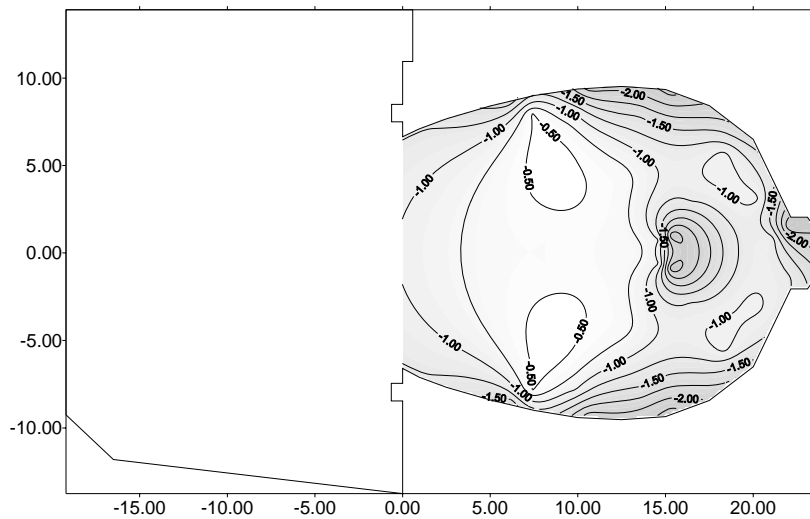
Ando fornisce i valori misurati di alcuni brani musicali e del parlato (Tab. 9.3.1), e suggerisce il loro diverso utilizzo a seconda della destinazione d'uso della sala.

| Sound source | Title   | Composer          | $\tau_e$ [ms] <sup>a</sup> |
|--------------|---|-------------------|----------------------------|
| Music A      | Royal Pavane  | Gibbons           | 127 (127)                  |
| Music B      | Sinfonietta, Opus 48;<br>IV movement;<br>Allegro con brio                 | Malcolm<br>Arnold | 43 (35)                    |
| Music C      | Symphony N° 102 in B flat<br>major; II movement;<br>Adagio                | Haydn             | (65)                       |
| Music D      | Siegfried Idyll;<br>Bar 322   | Wagner            | (40)                       |
| Music E      | Symphony in C major,<br>K-V n° 551, Jupiter<br>IV movement; Molto Allegro | Mozart            | 38                         |
| Speech S     | Poem read by a female   | D Kunikita        | 10 (12) <sup>b</sup>       |

**Tab. 9.3.1:** valori di  $\tau_e$  secondo lo studio effettuato da Ando (Ando, 1985)

L'indice di preferenza di Ando indica quindi uno scostamento da un valore ideale, posto uguale a zero. Esso assume quindi sempre valori negativi. All'aumentare della distanza da zero, la qualità complessiva diminuisce. Normalmente l'indice di preferenza complessivo si assesta su valori prossimi a  $-2$ , e raramente si riscontrano teatri con valori prossimi a  $-1$ .

L'indice di preferenza rappresenta un parametro globale, e deve essere rappresentato in pianta. In tale maniera si possono apprezzare le aree del teatro caratterizzate da migliore (o peggiore) qualità acustica (Fig. 9.3.7).



**Fig. 9.3.7** Mappa di distribuzione spaziale dell'indice di preferenza di Ando nel Teatro la Fenice di Venezia prima dell'incendio del gennaio 1996. Mozart:  $\tau_e=38$  ms.

**TECNICHE DI MISURA A CONFRONTO.** Non vi sono molti esempi in letteratura di misurazioni sperimentali di qualità acustica effettuate nel corso di numerosi anni all'interno della stessa sala. Un esempio tuttavia è rappresentato dall'Auditorium S. Domenico di Foligno (Cocchi et al., 2002). All'interno di esso sono state compiute 3 campagne di misura sperimentale mediante tecniche differenti. Nel 1986-90 le misurazioni furono effettuate utilizzando una pistola a salve, e gli «ecogrammi» sperimentali, corrispondenti a risposte all'impulso sperimentali, furono salvati su DAT. Nel 1994 le misurazioni furono svolte impiegando la tecnica *MLS* ed una testa artificiale. Nel 2001 le misure furono svolte utilizzando uno *sweep* esponenziale, affiancato ad una testa artificiale e un microfono *Soundfield*.

| Parameter                     |      | Goal          | 1986-90      | 1994         | 2001         |
|-------------------------------|------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Early Decay Time              | EDT  | 1.5 to 2.0 s  | 5.5 s        | 3.6 s        | 2.6 s        |
| Reverberation Time            | RT   | 1.8 s         | 5.8 s        | 3.9 s        | 2.7 s        |
| Clarity                       | C80  | -2 to +3 dB   | -4.2 dB      | -2.2 dB      | -1.9 dB      |
| Clarity                       | C50  | -2 to +3 dB   | -5.5 dB      | -2.7 dB      | -2.1 dB      |
| Definition                    | D50  | 0.34 to 0.60  | 0.40         | 0.51         | 0.51         |
| Central Time                  | Ts   | < 140 ms      | 570 ms       | 310 ms       | 220 ms       |
| Strength                      | G    | - 2 to + 4 dB | -1 to + 4 dB |              | - 4 dB       |
| Inter-Aural Cross-Correlation | IACC | 0.12 to 0.70  | 0.39 to 0.71 | 0.33 to 0.59 | 0.25 to 0.50 |
| Initial Time Delay Gap        | ITDG | 30 ms         | 40 ms        | 38 ms        | 36 ms        |

**Tab. 9.1** Risultati delle misurazioni svolte nell'Auditorium S.Domenico di Foligno  
(Cocchi et al., 2002)

## Appendice 1 – Tecniche di auralizzazione dei dati sperimentali

### A L'auralizzazione

Le misurazioni sperimentali descritte nei paragrafi precedenti consentono di riprodurre il comportamento acustico delle sale originarie, mediante l'utilizzo di cuffie o di altoparlanti.

Il processo di riproduzione virtuale del suono di un teatro viene denominato «auralizzazione». Tale termine è stato coniato allo scopo di completare quanto già esistente in architettura con il processo di «visualizzazione», ossia di riproduzione virtuale visiva di architetture. L'auralizzazione si basa fundamentalmente sull'ipotesi descritta in (4.2), ossia sul teorema della convoluzione. Le risposte all'impulso sono utilizzate come lunghissimi filtri «FIR» (*Finite Impulse Response*) ed applicate a registrazioni asciutte, chiamate «anecoiche», di musica o di parlato.

La convoluzione è una tecnica di filtraggio molto efficiente, in particolare a seguito dell'evoluzione verificatasi recentemente nelle architetture di gestione della memoria dei processori per calcolatori moderni. E' oggi possibile, infatti, effettuare prodotti di convoluzione in tempo reale e con bassa latenza su dozzine di canali con più risposte all'impulso di centinaia di migliaia di coefficienti ognuna.

In realtà il processo di auralizzazione ha avuto un incredibile sviluppo nel corso dell'ultimo decennio, quando i primi esperimenti erano condotti su brani anecoici semplici, monofonici, che venivano convoluti con risposte all'impulso monofoniche, a bassa risoluzione, con tempi di calcolo molto lunghi. Oggi la tecnica dell'auralizzazione arriva a riprodurre la tridimensionalità del campo sonoro, le componenti laterali, l'ampiezza del fronte sonoro percepito. Inoltre l'auralizzazione mira ad interagire sempre più con le nuovissime tendenze di sperimentazione di musica elettroacustica, avvicinando all'acustica dei teatri anche musicisti contemporanei che compongono brani musicali per appositi ambienti attrezzati per esperimenti di auralizzazione tridimensionale.

#### A.1... Le risposte all'impulso *ORTF*-stereo

Il primo esperimento di auralizzazione è finalizzato ad una presentazione stereo *standard* dei risultati della simulazione. Esso si basa sulla disponibilità di un certo numero di registrazioni monofoniche anecoiche, una per ogni sezione dell'orchestra e per ogni cantante.

Ogni registrazione monofonica deve essere convoluta con una ben specifica risposta all'impulso stereo, ottenuta da una coppia di microfoni a cardioide in configurazione *ORTF*. In linea di principio ognuna di queste risposte all'impulso dovrebbe essere misurata mediante l'esatto posizionamento della sorgente sonora.

In realtà le misurazioni sono generalmente effettuate con sole tre posizioni della sorgente sul palcoscenico (Sinistra, Centro e Destra); ciò limita il numero di sorgenti «virtuali» indipendenti che possono essere collocate sulla scena acustica.

La misurazione *ORTF* prevede di effettuare misurazioni di risposta all'impulso con 36 differenti orientazioni dei microfoni, ossia con variazioni di 10 gradi, per ciascuna posizione della sorgente. Ciò consente di poter modificare la posizione della sorgente virtuale ad intervalli di 10 selezionando la risposta all'impulso *ORTF* corrispondente. I vari esperimenti psicoacustici effettuati modificando la risposta all'impulso *ORTF* per localizzare correttamente la sorgente virtuale, hanno dimostrato la accettabilità del procedimento. I risultati della convoluzione di tutte le registrazioni anecoiche sono infine sommate in un'unica singola forma d'onda stereo, che può essere riprodotta da un normale sistema stereo di alta fedeltà dotato di due altoparlanti.

#### **A.2** Le risposte all'impulso binaurali (*binaural room scanning*)

Una seconda metodologia che prevede la restituzione finale a due canali consiste nell'effettuare una serie di misurazioni di risposte all'impulso di tipo binaurale. Anche in questo caso alla fine del processo di auralizzazione si ottiene una forma d'onda bicanale, adatta alla riproduzione in cuffia o in un normale sistema stereo a due altoparlanti.

L'effetto tridimensionale del campo acustico, chiamato spesso *surround*, può essere notevolmente migliorato con alcuni filtri opportuni.

Nel caso di riproduzione con due altoparlanti è opportuno aggiungere un filtro *cross-talk*, in grado di cancellare le tracce audio incrociate che erroneamente vengono percepite dall'ascoltatore.

Nel caso della riproduzione in cuffia va aggiunto un sensore *head-tracking*, in grado cioè di indicare al sistema convolutore in tempo reale l'orientazione nel piano orizzontale della testa dell'ascoltatore.

I vantaggi che si ottengono sono assai rimarchevoli. Nel primo caso si evita di percepire dalle orecchie il segnale che proviene dall'altoparlante collocato nella direzione opposta. In tale maniera si indirizza a ciascun orecchio il segnale dell'altoparlante corrispondente, evitando quindi di confondere l'ampiezza del fronte sonoro e mantenendo le indicazioni di provenienza delle varie sorgenti. Nel secondo caso è possibile modificare in tempo reale la risposta all'impulso da utilizzare per la convoluzione, consentendo all'ascoltatore di percepire con chiarezza le collocazioni nel palcoscenico delle sorgenti sonore. In relazione alla creazione di filtri per una ottima cancellazione *del cross-talk*, sono stati pubblicati diversi lavori in anni recenti (Kirkeby et al., 1998, 1999). In relazione invece al processo di *head-tracking* in tempo reale, alcune soluzioni sono state proposte da alcune ditte (Karamustafaoglu, 1999), ma richiedono apposite e costose stazioni di lavoro o processori *DSP*. Esistono comunque tentativi di progettazione di sistemi

DSP economici che utilizzano sistemi non professionali di *head-tracking* combinati a convolutori via software particolarmente efficienti ed economici (Noisternig et al. 2003).

### A.3.. Le risposte all'impulso B-format (*Ambisonics*)

Le risposte all'impulso tipo B-format, descritte nel Par. 6, per la loro caratteristica di risposta all'impulso tridimensionale, sono particolarmente adatte al processo di auralizzazione tridimensionale.

Ogni sorgente monofonica anecoica è convoluta con l'appropriata risposta all'impulso B-format. Di conseguenza, dopo il *mixaggio* di tutte queste convoluzioni, si ottiene una uscita a 4 canali di tipo B-format. La riproduzione di questo segnale a 4 canali mediante un opportuno insieme (*array*) di altoparlanti richiede un decodificatore *Ambisonics*, allo scopo di effettuare le corrette modifiche alle tracce audio da inviare a ciascun altoparlante che costituisce l'ambiente d'ascolto.

Esistono numerosi decodificatori, soprattutto *software*, che tengono conto anche della disposizione degli altoparlanti. Infatti l'ascolto auralizzato di un segnale B-format convertito in *Ambisonics* richiede la progettazione di appropriate sale d'ascolto ad almeno 8 altoparlanti, disponibili in alcuni centri di ricerca ed Università, come a Bologna e a Graz (Tronchin et al., 2000). Tra gli esempi di decodificatori si ricordano gli esempi sviluppati presso le Università di Parma (Farina, Ugolotti, 1998) e di York (Malham 2003).

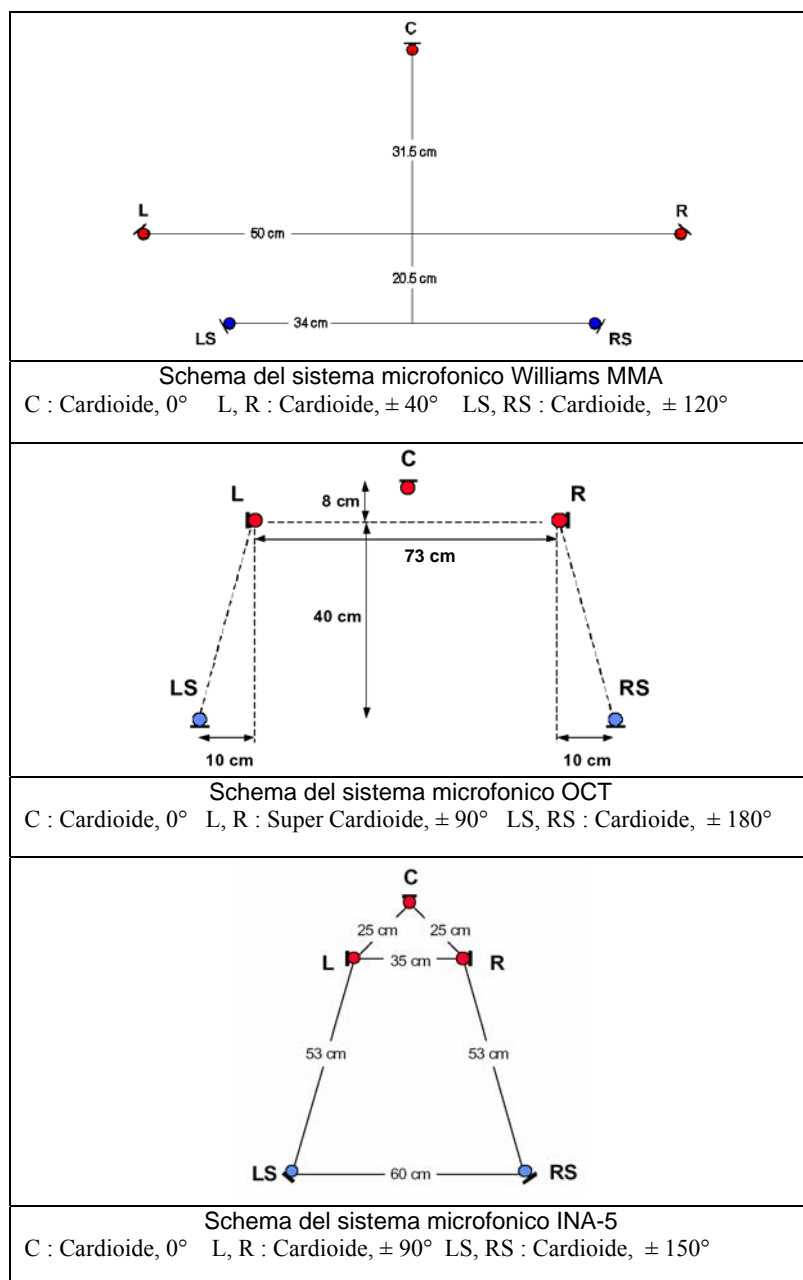
### A.4 ITU 5.1 *surround*

La riproduzione ITU 5.1, proveniente da alcune risposte all'impulso B-format, prevede l'utilizzo di 5 altoparlanti principali per l'ascolto. Notevole importanza ricopre la scelta della configurazione dei microfoni da utilizzare per la successiva riproduzione. Sono state proposte molte disposizioni, ed in un recente progetto di confronto, chiamato *Verdi Projekt*, sono state comparate la maggior parte di esse (Roland, 2002). Tra tutte le configurazioni microfoniche, le più interessanti sono risultate le configurazioni:

- ❑ Williams MMA [24];
- ❑ OCT [22];
- ❑ INA [25].

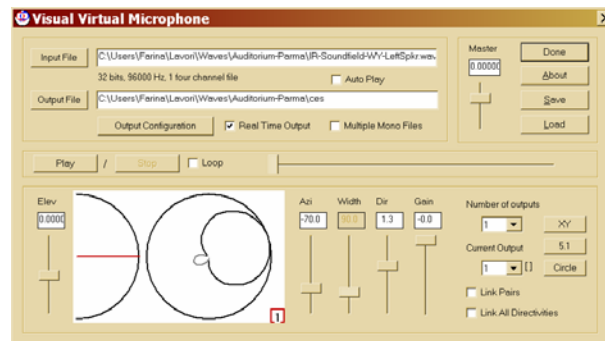
Per ognuno degli schemi (Fig. A.4.1) è possibile selezionare un insieme di 5 delle 36 posizioni ove il microfono Soundfield è collocato, prendendo quelle più vicine

alle posizioni imposte dalla configurazione scelta.



**Fig. A.4.1** Schemi microfonici Williams MMA (a); OCT (b) INA (c)

Le configurazioni richieste da ciascuna metodologia richiedono ciascuna una diversa collocazione ed orientazione dei microfoni. Ciò spingerebbe quindi a ripetere la campagna di misura per ciascuna metodologia richiesta. Utilizzando la metodologia Soundfield è invece possibile «sintetizzare» un microfono virtuale modificandone la direttività e l'orientamento. Ciò consente quindi di ottenere qualunque configurazione microfonica semplicemente partendo da una unica campagna di misura. Esistono alcuni programmi di calcolo in grado di modificare le caratteristiche di direttività ed orientazione di una risposta all'impulso B-format (McGriffy). Ad esempio, in Fig. A.4.2. è presente una configurazione dalla quale si estrae la risposta a supercardioide per il canale R di un *set-up* OCT a partire dalla risposta all'impulso proveniente dalla posizione a 20° e con la sorgente sonora sul lato sinistro del palcoscenico.



**Fig. A.4.2** *Visual Virtual Microphone* (McGriffy).

Ogni sorgente monofonica anecoica è infine convoluta con la risposta all'impulso a 5 canali ottenuta dalla corrispondente posizione della sorgente sonora sul palcoscenico. I risultati di tutte queste convoluzioni vengono quindi uniti in una singola traccia finale a 5 canali, che è adatta per una riproduzione su un impianto di altoparlanti secondo lo standard ITU 5.1.

#### A.5 I microfoni virtuali ad alta direttività di *Mark Poletti*

Secondo M. Poletti (Poletti, 2000) è possibile riassumere la direttività orizzontale secondo lo schema seguente:

- ❑ Ordine zero: microfono omnidirezionale
- ❑ Ordine uno: direttività a «figura di otto»
- ❑ Ordini successivi: direttività tipo «multilobiale»

La direttività dei microfoni può essere riassunta dalla (A.5).

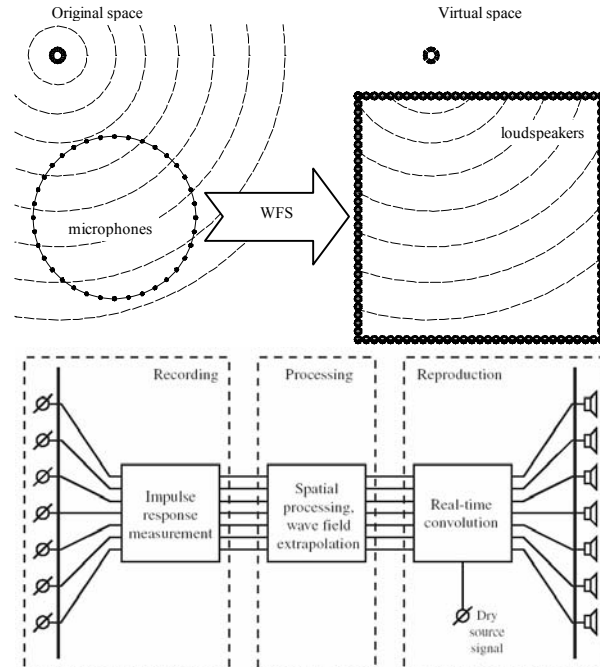
$$\begin{aligned}
 D_0 &= 1 \\
 D_{1,n} &= \cos\left(\vartheta + n \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad n = 0,1 \\
 D_{i,n} &= \cos\left(i \cdot \vartheta + n \cdot \frac{\pi}{2i}\right) \quad n = 0,1
 \end{aligned} \tag{A.5}$$

E' quindi possibile sostenere che i segnali provenienti dalle varie posizioni possono essere sintetizzati a partire dall'insieme di ciascun microfono virtuale avente la direttività indicata, e sommati tra di loro. Ciascuno di questi microfoni deve successivamente essere equalizzato allo scopo di ottenere funzioni di trasferimento piate. Una volta che le risposte dei microfoni sono ottenute, esse possono essere utilizzate come filtri di convoluzione da applicare ai segnali anecoici monofonici corrispondenti alle diverse posizioni della sorgente. Poiché l'elevato numero di microfoni virtuali consente una grande precisione nel piano orizzontale l'insieme delle risposte all'impulso verrà utilizzato per convolvere un segnale anecoico monofonico, che verrà decodificato ed inviato ad un *array* di altoparlanti tipo Ambisonics ad ordine elevato, tipicamente terzo ordine. La localizzazione delle sorgenti che si ottiene risulta pertanto migliorata

#### A.6 L'approccio WFS circolare

Il metodo *Wave Field Synthesis* (WFS) richiede l'effettuazione di 36 misurazioni B-format lungo una circonferenza avente 1 metro di raggio (De Vries et al., 2002). Il metodo si basa sul Principio di *Huygens*: se si conoscono la pressione sonora e la velocità delle particelle su di una superficie chiusa, è possibile ricreare dentro di essa lo stesso campo sonoro che era presente nello spazio originario, utilizzando un adeguato *array* di altoparlanti, posti esattamente in corrispondenza delle posizioni del microfono. La teoria comunque permette anche di estendere a regioni di spazio limitrofe la ricostruzione del campo sonoro, in virtù del fatto che esso è decomposto in fronti d'onda che avanzano.

La WFS rappresenta una riduzione bidimensionale della teoria di *Huygens*. I microfoni sono collocati lungo una linea chiusa attorno all'area di ascolto e di conseguenza la sintesi può avvenire solo sul piano orizzontale. Partendo da un *array* microfonico di misura avente 1 metro di raggio, è possibile ricavare i segnali per una batteria di altoparlanti adatta per una sala di ascolto di medie dimensioni, collocando gli altoparlanti sui 4 lati della sala d'ascolto anziché su un array circolare, come risulta nella Fig. A.6 (Hulsebos et al., 2003).



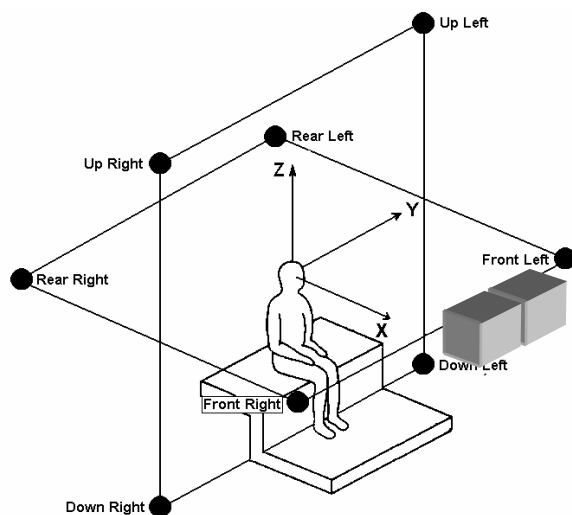
**Fig. A.6** Schema della elaborazione WFS.

L'elaborazione dell'insieme dei segnali per la ricostruzione del fronte d'onda spaziale richiede che le registrazioni microfoniche vengano effettuate a distanze molto ravvicinate, allo scopo di ridurre l'*aliasing* spaziale che si formerebbe qualora i microfoni fossero troppo lontani. In realtà i risultati migliori si otterrebbero utilizzando un quantitativo assai consistente di microfoni vicinissimi, allo scopo di ricostruire frequenze elevate. Con un numero più limitato di posizioni microfoniche la ricostruzione del fronte sonoro risulta attendibile fino a valori più limitati delle frequenze. Ad esempio, 36 microfoni distribuiti su una circonferenza avente un raggio pari a 1 metro consentono ricostruzioni fedeli fino a 1 kHz. A frequenze superiori, allo scopo di evitare alterazioni e colorazioni, è necessario convolvere il segnale che alimenta ciascun altoparlante con un rumore bianco, allo scopo di mascherare colorazioni del campo sonoro ricostruito.

#### A.7 Metodi ibridi: *Ambiophonics*

Il metodo *Ambiophonics* rappresenta una soluzione ibrida, tesa ad unire i pregi corrispondenti a due sistemi di base: la riproduzione con cancellazione del *cross-talk* di tracce binaurali mediante altoparlanti ravvicinati tipo «stereo dipolo» e il surround tridimensionale ottenuto dalla convoluzione di microfoni virtuali orientati in corrispondenza agli altoparlanti.

L'array di altoparlanti, rappresentato in Fig. A.7, corrispondente al sistema *Ambiophonics* prevede l'utilizzo combinato di un sistema «stereo dipolo» frontale affiancato ad un impianto surround tipo *Ambisonics* a 8 altoparlanti.



**Fig. A.7** schema di un array tipo *Ambiophonics*

La teoria *Ambiophonics* (Farina et al., 2001) sottolinea che gli altoparlanti stereodipolo devono fornire solo il suono diretto e le prime riflessioni provenienti dal palcoscenico, mentre gli altri altoparlanti *Ambisonics* devono fornire le ulteriori riflessioni e la riverberazione. Ciò significa che le risposte all'impulso necessitano di essere opportunamente modificate: da un lato le *ORTF*, o binaurali, che sono utilizzate nello stereo dipolo, devono essere dolcemente tagliate dopo il suono diretto; dall'altro lato le risposte all'impulso *B-format*, da cui si ricavano i canali *surround*, devono essere private del suono diretto. L'operazione di filtraggio dei due gruppi di risposte all'impulso rappresenta un punto delicato, dacché possono causare un infelice mescolamento dei due sistemi di base o possono introdurre ritardi artificiali che alterano la distanza temporale tra il suono diretto e la susseguente riverberazione.

## BIBLIOGRAFIA

- ANDO Y., 1985, *Concert hall acoustics*, Springer Series in electrophysics, Berlin.
- COCCHI A., TRONCHIN L., FARINA A., CESARE-CONSUMI M., 2002, *A comparison between some measurement techniques in the Foligno auditorium*, Proc. of Auditorium Acoustics: Historical and contemporary design and performance, IOA, Imperial College, London.
- FARINA A., GLASGAL R., ARMELLONI E., TORGER A., 2001, *Ambiophonic Principles for the Recording and Reproduction of Surround Sound for Music 19th AES Conference on Surround Sound, Techniques, Technology and Perception - Schloss Elmau, Germany*.
- FARINA A., RIGHINI F., 1997, *Software implementation of an MLS analyzer, with tools for convolution, auralization and inverse filtering*, Pre-prints of the 103<sup>rd</sup> AES Convention, New York.
- FARINA A., 2000, – “Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique”, *110<sup>th</sup> AES Convention*, Paris.
- FARINA A., UGOLOTTI E., 1998, *Software Implementation Of B-Format Encoding And Decoding*, Pre-prints of the 104<sup>rd</sup> AES Convention, Amsterdam.
- FARINA A., TRONCHIN L., 2003, *Measurement and numerical simulation of Binaural and B-format impulse responses in concert halls* Proc. of 1<sup>st</sup> Inter. Symposium on Temporal Design, Kobe.
- FARINA A., AYALON R., 2003, *Recording concert hall acoustics for posterity* Proc of 24<sup>th</sup> AES Congress.
- GARDNER W.G., 1995, *Efficient convolution without input-output delay*, *JAES* Vol. 43, Numero 3, pp. 127-136.
- GERZON M., 1975, *Recording Concert Hall Acoustics for Posterity*, *JAES* Vol. 23, Numero 7, p. 569 (1975).
- HULSEBOS E., DE VRIES D., BOURDILLAT E., 2002, *Improved Microphone Array Configurations for Auralization of Sound Fields by Wave-Field Synthesis*, *JAES* Vol. 50, Numero 10, p. 779.
- HERRMANN U., HENKELS V., BRAUN D., 1998, *Comparison of 5 surround microphone methods*, Proceedings 20<sup>th</sup> Tonmeistertagung, (ISBN 3-598-20361-6), pp. 508-517
- HULSEBOS E., SCHUURMANS T., DE VRIES D., BOONE R., 2003, *Circular microphone array for discrete multichannel audio recording*, Pre-prints of the 114<sup>th</sup> AES Convention, Amsterdam.
- JORDAN V.L., 1981, *A group of objective acoustical criteria for concert halls*, *Applied Acoustics*, Vol. 14.
- KARAMUSTAFAOGLU A., HORBACH U., PELLEGRINI R., MACKENSEN P.,

- THEILE G., 1999, *Design and Applications of a Data-based Auralisation System for Surround Sound*, Pre-prints of the 106th AES Convention.
- KIRKEBY O., NELSON P.A., HAMADA H., 1998, *The "Stereo Dipole" - A Virtual Source Imaging System Using Two Closely Spaced Loudspeakers*, *JAES* Vol. 46, Numero 5, pp. 387-395.
- KIRKEBY O., NELSON P.A., RUBAK P., FARINA A., 1999, *Design of Cross-talk Cancellation Networks by using Fast Deconvolution - 106th AES Convention*, Munich.
- MALHAM D., *B-dec High resolution First Order Ambisonic B-format decoder*, University of York, [http://www.york.ac.uk/inst/mustech/3d\\_audio/ambisyrk.htm](http://www.york.ac.uk/inst/mustech/3d_audio/ambisyrk.htm).
- MCGRIFFY D., *Visual Virtual Microphone*, <http://mcgriffy.com/audio/ambisonic/vvmic>
- MÜLLER S., MASSARANI P., 2001, *Transfer-Function Measurement with Sweeps*, *JAES* Vol. 49, Numero 6, p. 443.
- POLETTI M.A., 2000, *A Unified Theory of Horizontal Holographic Sound Systems*", *JAES* Vol. 48, Numero 12, p. 1049.
- RIFE D.D., VANDERKOOY J., 1989, *Transfer Function Measurements with Maximum Length Sequences*, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 37, pp 419-444
- ROLAND J., 2002, *MultiMedia Projekt VERDI*, TU Ilmenau Laboratory, Germany <http://www.stud.tu-ilmenau.de/~proverdi/daten/uml1en.html>
- SABINE W.C., 1922, *Collected Papers on Acoustics*, Harvard, University Press
- SCHRÖDER M., 1965, *New Method of Measuring Reverberation Time*, *J. Acoust. Soc. Am.*, **37**, pp 409-415.
- SCHRÖDER M., 1981, *Modulation Transfer Functions: Definition and Measurement*, *Acustica*, **49**, 179-182
- STAN G., EMBRECHTS J.J., ARCHAMBEAU D., 2002, *Comparison of Different Impulse Response Measurement Techniques*", *JAES* Vol. 50, Numero 4, p. 249 (2002).
- STOCKHAM T.G. JR, 1966, *High-speed convolution and correlation*, *AFIPS Proc. 1966 Spring Joint Computer Conf.*, Vol 28, Spartan Books, pp. 229 – 233.
- THEILE G., 2001, *Multichannel Natural Music Recording Based on Psychoacoustic Principles - AES 19th International Conference*.
- TORGER A., FARINA A., 2001, *Real-time partitioned convolution for Ambiphonics surround sound*, *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics - Mohonk Mountain House New Paltz, New York*.
- TRONCHIN L., LANCIOTTI L., TARABUSI V., 2004 *La variazione della qualità acustica in relazione alla localizzazione delle sorgenti sonore*, *Proc. of 32° Congresso AIA, Venezia (2004)*

- TRONCHIN L., TARABUSI V., 1999, *The sound quality of the Theatre Comunale in Treviso, Italy*, Forum99, Berlin, Germany
- TRONCHIN L., 2000, *La progettazione acustica e le applicazioni virtuali e multimediali: l'auditorium del Conservatorio di Parma*, Proc. of XXVIII AIA Trani
- TRONCHIN L., TARABUSI V., GIUSTO A., 2002, *The realization of Ambisonics and Ambiophonics listening room "Arlecchino" for car sound systems evaluation*, Proc. 21<sup>st</sup> AES Conference, St. Petersburg, Russia
- TRONCHIN L., ESPOSITO E., TARABUSI V., 2003, *Sound and vibration from a special Musical Instrument: the Mazzacorati Theatre*, Proc of SMAC03, Stockholm
- TRONCHIN L., FARINA A., 1997, *The acoustics of the former Teatro "La Fenice", Venice*, *JAES* Vol. 45, Numero 12, p. 1051
- WILLIAMS M., LE DU G., 2000, *Multichannel Microphone Array Design*, Pre-prints of the 108th AES Convention.
- INTERNATIONAL STANDARD ISO 3382, 1997, *Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*