

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PARMA**

**CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN INGENERIA INDUSTRIALE**

**XXV CICLO**

---

**ANALISI SPAZIALE  
DELLA  
PROPAGAZIONE DEL SUONO  
NELLE SALE**

**Coordinatore:  
Chiar.moProf. Ing. MARCO SPIGA**

**Tutor:  
Chiar.moProf. Ing. ANGELO FARINA**

**Tesi di Dottorato di:  
Dott. Ing. ALBERTO AMENDOLA**



# INDICE

<b>1 INTRODUZIONE</b> .....	5
1.1 Le attuali metodologie di misura.....	5
1.2 Descrizione di alcuni parametri acustici delle sale.....	5
1.2.1 Il tempo di riverberazione, $T_{60}$ .....	6
1.2.2 Early Decay Time (EDT) .....	8
1.2.3 Initial Time Delay Gap (ITDG).....	8
1.2.4 Indice di Chiarezza, $C_{80}$ .....	9
1.2.5 Tempo Baricentrico, $t_s$ .....	9
1.2.6 Indice di robustezza (Sound Strength), $G$ .....	10
1.2.7 Lateral Fraction, $L_f$ .....	11
1.2.8 8 Inter Aural Cross Correlation (IACC).....	11
1.2.9 Balance, $B$ .....	12
1.2.10 Indice di supporto, $ST1$ .....	12
Bibliografia.....	13
1.3 Lo scopo della nostra Ricerca .....	14
1.4 Metodologie adottate .....	15
1.4.1 Configurazioni microfoniche scelte.....	16
<b>2 CONFIGURAZIONE AMBISONIC</b> .....	17
2.1 Alcuni sistemi a confronto.....	17
2.2 Il Microfono Soundfield.....	18
2.3 Microfoni di nuova generazione.....	21
2.4 Analisi spaziale tramite B-Format.....	22
2.4.1 Il Rapporto Energetico.....	23
2.5 Software di Mappatura tramite B-Format.....	24
2.6 Pregi e limiti della Mappatura tramite B-Format.....	26
<b>3 ANALISI MEDIANTE UN UNICO MICROFONO SHOTGUN</b> .....	27
3.1 Primo impiego del metodo: Grand Théâtre de Provence .....	27
3.2 Strumentazione adottata.....	32
3.3 Primi risultati ottenuti.....	37
3.4 Idea di un primo software di rappresentazione dinamica.....	41
3.5 Alcuni risultati ottenuti tramite il software di visualizzazione dinamica.....	43
3.6 Pregi e limiti dell'Analisi tramite Shotgun rotante.....	46
<b>4 ARRAY MICROFONICI: LO STATO DELL'ARTE</b> .....	47
4.1 Introduzione.....	47
4.2 Array per l'elaborazione delle mappe di rumore.....	48
4.2.1 Bruel & Kjaer.....	48
4.2.2 GFal.....	51
4.2.3 Nittobo.....	54
4.2.4 Microflown.....	55
4.3 Microfonazione direttiva.....	56

4.3.1 Acoustic Magic.....	56
4.3.2 Yamaha.....	58
4.3.3 mh acoustics.....	59
4.3.4 SquareHead Technology.....	60
4.3.5 Array LOUD.....	61
<b>5 ANALISI MEDIANTE ARRAY SFERICI ULTRADIRETTIVI.....</b>	<b>62</b>
5.1 Array di microfoni avanzati.....	62
5.1.1 Sistema di Elaborazione.....	62
5.1.2 Codifica di uscita.....	63
5.1.3 Differenti tipologie di Array.....	66
5.2 L'array sferico Eigenmike EM 32.....	69
5.2.1 I componenti del sistema.....	69
5.2.2 Il microfono sferico.....	70
5.3 Stato dell'arte array microfonici.....	74
5.4 Nuova Elaborazione Sperimentale.....	76
5.5 Inversione Multicanale.....	78
5.6 Misure effettuate con il mic. Eigenmike.....	85
5.7 La metodologia SPS.....	88
5.8 Elaborazione del materiale acquisito.....	93
5.8.1 Gli Steps dell'elaborazione.....	93
5.8.2 Il software di mappatura dinamica.....	94
5.9 Primi esempi di rilevamento Paramtri Acustici.....	104
5.10 Pregi e limiti della tecnica SPS.....	105
<b>6 CONCLUSIONI.....</b>	<b>106</b>
6.1 Conclusioni sul lavoro svolto.....	106
6.2 Possibili Sviluppi in futuro.....	107
<b>7 BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>110</b>
RINGRAZIAMENTI.....	112

# **1 INTRODUZIONE**

## **1.1 Le attuali metodologie di misura**

Lo studio della propagazione del suono all'interno di una sala di ascolto è indubbiamente la parte più importante nella fase di progettazione di una sala ed in seguito nella verifica di quanto progettato o di quanto ci viene proposto dai nostri teatri che vantano decenni, se non secoli di vita.

A volte esigenze di natura architettonica vengono anteposte a quello che dovrebbe essere lo scopo principale di una sala, in particolare il buon ascolto, ed è necessario una volta finito l'edificio correggere in modo adeguato, e nella misura permessa, lo stato delle cose.

Ma anche quando la progettazione ha come scopo principale la corretta propagazione del suono, non si può pretendere, che i programmi di simulazione prevedano l'esatta realtà delle cose, ed una verifica con relativa correzione è sempre necessaria una volta terminata l'opera.

Secondo precise normative, in particolare la ISO 3382 del 15 giugno 1997, si sono stabiliti dei parametri misurabili con strumentazioni adeguate atti a caratterizzare l'acustica di un teatro e a determinare un indice di qualità, sulla base dei dati riscontrati. È quindi stato fatto uno sforzo notevole per la caratterizzazione oggettiva delle sale, focalizzando l'attenzione sul punto di ascolto e non sulla distribuzione spaziale delle cause del risultato acustico in tale punto, e quindi lasciando molto all'intuizione ed all'esperienza, e, di conseguenza, rendendo in parte vano lo scopo di creare una metodologia di misura oggettiva

## 1.2 Descrizione dei principali parametri acustici delle sale

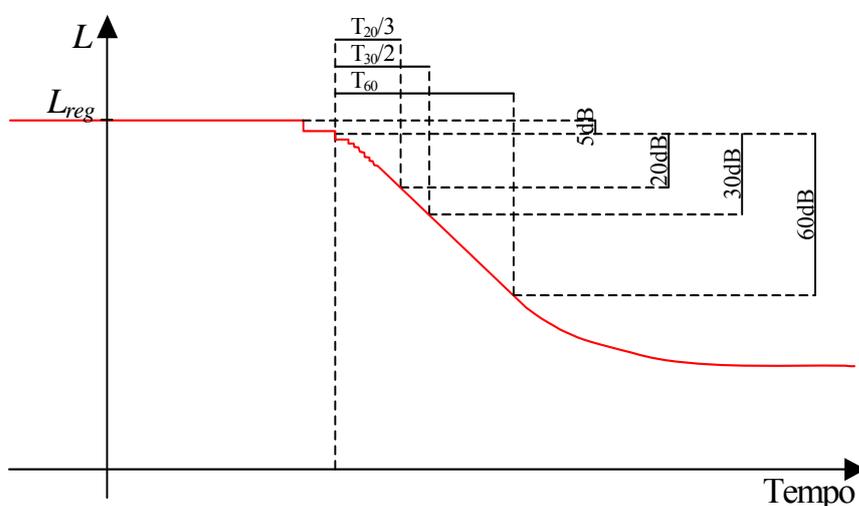
Passiamo ora in rassegna i principali parametri acustici caratterizzanti una sala; per essi, i valori ottimali varieranno a seconda dell'uso della sala stessa: conferenze, concerti sinfonici, rappresentazioni di prosa, opera lirica, cinema, ecc..

### 1.2.1 Il tempo di riverberazione, $T_{60}$

Il **tempo di riverberazione** è il tempo che impiega un suono, dopo aver spento la sorgente a decadere di 60 dB. Considerando la natura logaritmica dell'intensità sonora, ciò significa che deve diminuire di 1.000.000 di volte ( $60 \text{ dB} = 10 \log 1.000.000$ ). Praticamente è il tempo necessario per passare da un livello sonoro molto forte ad uno impercettibile. Esso viene detto  $T_{60}$ .

Nel fare la valutazione di tale parametro, secondo la normativa ISO3382 del 1997, occorre spegnere la sorgente, attendere che il livello decresca di 5dB, da questo istante comincia la valutazione del  $T_{60}$ . Occorre aspettare che il livello arrivi a -65dB e questo sarà l'istante finale del  $T_{60}$ .

Tutto ciò in pratica però è molto complesso perché, anche nelle migliori condizioni, il rumore di fondo interferisce con il decadimento e non si può raggiungere il suddetto livello sonoro finale. Ma la norma prevede un altro modo per raggiungere tale risultato: si calcola il tempo di riverbero da -5dB a -35dB rispetto al livello stazionario, il cosiddetto  $T_{30}$ , poi si estrapola dalla pendenza del tratto iniziale della curva di decadimento il tempo totale di riverbero. Analogamente si definisce il  $T_{20}$ . In alternativa al  $T_{30}$ , per ottenere il  $T_{60}$  si può impiegare il  $T_{20}$  che si definisce in maniera analoga ai due citati parametri.



*Fig. 1.1 -  $T_{20}$ ,  $T_{30}$  e  $T_{60}$  su una curva di decadimento*

### 1.2.1.1 Tempi di riverberazione ottimali

Analizzando l'intera gamma dei possibili tempi di riverberazione è facile intuire che esistono dei tempi ideali in cui il suono emesso da una sorgente non appare troppo "secco" o troppo "rimbombante". Questi tempi ottimali variano però a seconda del tipo di esecuzione che si deve affrontare. Per esempio la prosa, per motivi di chiarezza del parlato, necessita di tempi più brevi mentre la musica viene ottimizzata da tempi di riverbero relativamente più lunghi. Quindi si può dedurre che nel parlato si privilegi il suono diretto mentre nel sinfonico abbia un'enorme importanza il suono riflesso. Ma anche tra i generi musicali esistono distinzioni: l'acustica di un teatro d'opera deve essere più secca di quella di un auditorium sinfonico e così via. Inoltre è da sottolineare il fatto che il tempo ottimale è estremamente soggettivo, poiché ogni ascoltatore ha un suo gusto di conseguenza si può al massimo individuare una gamma basata sui giudizi di "esperti".

In generale si può dire che l'ambiente è molto riverberante quando il  $T_{60}$  supera i 2 secondi, è invece molto asciutto se il  $T_{60}$  non supera 1 secondo. Questo parametro, pur rimanendo nei canoni della soggettività, è quindi fondamentale per lo studio e la "regolazione acustica" di un teatro o di una sala da concerto. La tabella successiva riassume i tempi di riverbero considerati ottimali, negli ambienti sonori più indicativi.

Ambiente	$T_{60}$ ottimale
Aula piccola	0,5s
Aula grande	1,0s
Cinema	0,7s ÷ 0,8s
Teatro d'epoca	1,3s ÷ 1,5s
Concert Hall	1,7s ÷ 2,3s
Chiesa	8,0s ÷ 10s

*fig.1.2 tabella dei tempi di riverbero ottimali.*

Occorre infine osservare che il tempo di riverbero cambia anche in funzione della frequenza che di solito ci si riferisce alla frequenza di 500 Hz. Infatti, poiché il coefficiente di assorbimento delle pareti varia a seconda della frequenza anche il  $T_{60}$  segue questa variazione.

### 1.2.2 Early Decay Time (EDT)

Il tempo di riverbero, usato come unico parametro, porta con sé alcuni limiti dovuti al fatto che il suo pieno significato è dato solamente nel caso di una perfetta diffusione dell'energia riverberata entro la sala e questa è una situazione abbastanza impossibile da raggiungere nella realtà.

È necessario, quindi, integrare le informazioni del  $T_{60}$  con un altro criterio che, pur riguardando il transitorio di estinzione (la coda sonora), è più idoneo ad evidenziare le differenze acustiche di una sala: l'EDT che in pratica è il  $T_{10}$ , ma misurato immediatamente e non a partire da  $-5$  dB.

Questo parametro considera i primi 10 dB di decadimento del livello sonoro estrapolandone poi la pendenza, per avere un parametro confrontabile con il  $T_{60}$ .

Questo confronto è importante in quanto mette in evidenza la regolarità o meno della curva di estinzione: essa è di tipo lineare solo se la condizione è di perfetta diffusione. L'importanza del tratto iniziale di decadimento è giustificata anche da considerazioni psicoacustiche connesse con la durata di integrazione (ricostruzione del segnale) dell'udito umano.

Si tratta di un tempo che tiene conto del suono diretto e si avvicina a quella che è la percezione soggettiva del tempo di decadimento

### 1.2.3 Initial Time Delay Gap (ITDG)

È uno dei parametri più interessanti anche per quello che riguarda il nostro studio: è il ritardo in ms fra l'arrivo del suono diretto e la prima riflessione, molto importante per caratterizzare i fenomeni di amplificazione di una sala se essa arriva in un tempo utile, altrimenti è effetto di disturbi.

Valori buoni:

parlato:  $ITDG < 20$  ms

musica:  $ITDG < 70$  ms

Secondo Beranek questo parametro è decisamente correlato con la sensazione di intimità che si percepisce in una sala, ovvero la sensazione dell'ascoltatore che ci sia poca distanza tra lui e l'esecutore, quindi di essere a contatto con la musica

Molti studiosi però negano l'importanza di questo parametro, affermando che l'intimità di una stanza è legata all'intensità percepita quindi al parametro G (Sound Strength).

### 1.2.4 Indice di Chiarezza, $C_{80}$

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{dB}]$$

Viene anche impiegato il  $C_{50}$  (definito in maniera analoga, ma considerando i primi 50 ms), in particolare nella valutazione di ambienti dedicati al parlato (es. teatro di prosa).

Il  $C_{80}$  mostra in pratica il rapporto fra l'energia delle riflessioni pervenute al ricevitore entro i primi 80 ms, quelle che arrivano in seguito.

Per valori di  $C_{80} < -4$  dB abbiamo un suono confuso,

Per valori di  $C_{80}$  compresi fra -4 dB e 2 dB, suono buono,

Per valori di  $C_{80} > 2$  dB abbiamo un suono "secco",

Questo parametro dipende in maniera notevole dal punto in cui viene misurato e può variare molto da un punto di ascolto ad un altro.

### 1.2.5 Tempo Baricentrico, $t_s$

Analogamente alla definizione del "baricentro" di un solido (punto in cui si suppone concentrata tutta la massa per studiarne il moto di traslazione), ci da il valore in ms del tempo che tutta l'energia acustica (compressa in un unico "pacchetto") impiegherebbe a giungere al pubblico.

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{ms}]$$

Valori buoni:

parlato:  $0 < t_s < 50$  ms

musica:  $50 \text{ ms} < t_s < 250$  ms

### 1.2.6 Indice di robustezza (Sound Strength), G

L'indice di robustezza G, analizza l'intensità sonora che percepisce l'ascoltatore in un punto della sala raffrontandola con la risposta in intensità che darebbe la stessa sorgente omnidirezionale nello spazio libero.

E' espressa dalla seguente formula:

$$G = L_p - L_{p,10m} = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10m}^2(t) dt} \quad [\text{dB}]$$

dove  $p(t)$  è la risposta all'impulso per una coppia sorgente-ricevitore nella sala e  $p_{10m}(t)$  è la risposta che la stessa sorgente omnidirezionale, nulla mutato, darebbe alla distanza di 10 m nello spazio libero. E' quindi il parametro che rappresenta l'effetto di amplificazione di una sala. Naturalmente è un parametro che varia a seconda della frequenza viene quindi misurato per sei bande di ottava e si ritiene particolarmente importante  $G_m$  che sta per indicare il valore medio di G misurato con i filtri di banda ottava per frequenze che vanno da 500Hz a 1 kHz. E' ritenuto anche estremamente importante il  $G_{low}$  ovvero il valore medio legato alle frequenze basse che vanno da 125 a 250 Hz, in quanto questo indice è legato all'intensità percepita dei bassi e a certi aspetti della spazialità del suono.

Sorgente sonora	$G_m$ [dB]
Orchestra sinfonica Cantanti (top) Solisti (top)	$\geq -4$
Orchestra da camera Cantanti Solisti	$\geq 1$
Oratore allenato Attore allenato	$\geq 6$
Oratore Strumenti deboli	$\geq 11$

*Fig. 1.3 Tabella dei valori ottimali dell'Indice di Robustezza*

### 1.2.7 Lateral Fraction, $L_f$

Questo primo parametro, rappresenta la percentuale di energia laterale rispetto a quella totale:

$$L_f = \frac{\int_0^{80ms} p_8^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}$$

Essendo  $p_8(t)$  il segnale misurato con microfono a figura di 8 posto a  $90^\circ$  dalla direzione del suono diretto.

E' un parametro che indica la spazialità del suono, cioè la percentuale di suono laterale che avvolge l'ascoltatore, rispetto al suono diretto.

Valori buoni: considerando la media tra 125Hz e 1kHz, deve essere:

$$0.1 < L_f < 0.35$$

### 1.2.8 Inter Aural Cross Correlation (IACC)

Lo *IACC* è definito come il massimo valore della funzione normalizzata di crosscorrelazione interaurale (*IACF*) fra i segnali derivanti da due microfoni posti all'interno dei padiglioni auricolari di una testa artificiale:

$$IACF(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} h_d(t) \cdot h_s(t + \tau) \cdot dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} h_d^2(t) \cdot dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} h_s^2(t) \cdot dt}}$$

$$IACC = \max |IACF(\tau)| \quad \text{con} \quad -1 \text{ ms} < \tau < 1 \text{ ms}$$

dove  $h_d$  è la risposta all'impulso all'ingresso dell'orecchio destro,  $h_s$  dell'orecchio sinistro.

Si misura con microfoni binaurali posti all'interno di una testa artificiale.

Il parametro *IACC* fornisce una indicazione della spazialità di un suono, cioè della sua capacità di avvolgere lo spettatore. Valori bassi di *IACC* indicano una elevata spazialità; in

questo caso non si è in presenza di quella sgradevole situazione monofonica di avere la sorgente solo frontale e nulla che arrivi dalle direzioni laterali.

Ovviamente (in virtù della normalizzazione) *IACC* varia tra 0 ed 1. Se vale 0, siamo in presenza di due segnali completamente diversi e scorrelati, se vale 1 di due segnali identici. Ottimi valori di *IACC* per una sala da concerto sono attorno a 0,3; con valori attorno a 0,6-0,7 il pubblico avverte una musica fredda, distaccata. Approssimativamente inoltre si ha:

$$L_f \cong 1 - IACC$$

### 1.2.9 Balance, B

Questo ulteriore parametro è l'unico che tiene conto del suono di una sorgente in buca: considera le differenze (ma sempre per uno spettatore) fra il suono originato sul palcoscenico e quello derivante dalla buca:

$$B = L_{\text{stage}} - L_{\text{pit}} \text{ [dBA]}$$

$L_{\text{stage}}$  ed  $L_{\text{pit}}$  sono rispettivamente i livelli sonori con sorgente sul palcoscenico e in buca, misurati nello stesso punto (o posto in platea o posto in un palco)

E' comunque un confronto fra livelli e non tiene conto delle differenze temporali dei due segnali.

### 1.2.10 Parametri acustici per gli esecutori : Indice di supporto, ST1

$$ST1 = 10 \log \frac{\int_{10ms}^{100ms} p^2(t) dt}{\int_0^{10ms} p^2(t) dt} \text{ [dB]}$$

Parametro è stato espressamente concepito per dare una valutazione di come il singolo musicista è aiutato a suonare dall'ambiente in cui si trova.

E' un indice che cerca di quantificare il giusto equilibrio tra il suono emesso direttamente dal musicista e quello che la camera d'orchestra e la sala gli restituiscono.

Anche questo parametro è costruito come rapporto di energie sonore: **al numeratore si trovano le riflessioni** che arrivano tra i 20ms e i 100ms, cioè dopo il suono diretto. Al denominatore si trova, invece, il **suono diretto** stesso con l'inclusione della riflessione del pavimento.

Si tratta quindi di una misura di numero ed intensità delle riflessioni che pervengono con un ritardo utile all'esecutore rapportate al suono diretto.

Valori buoni:

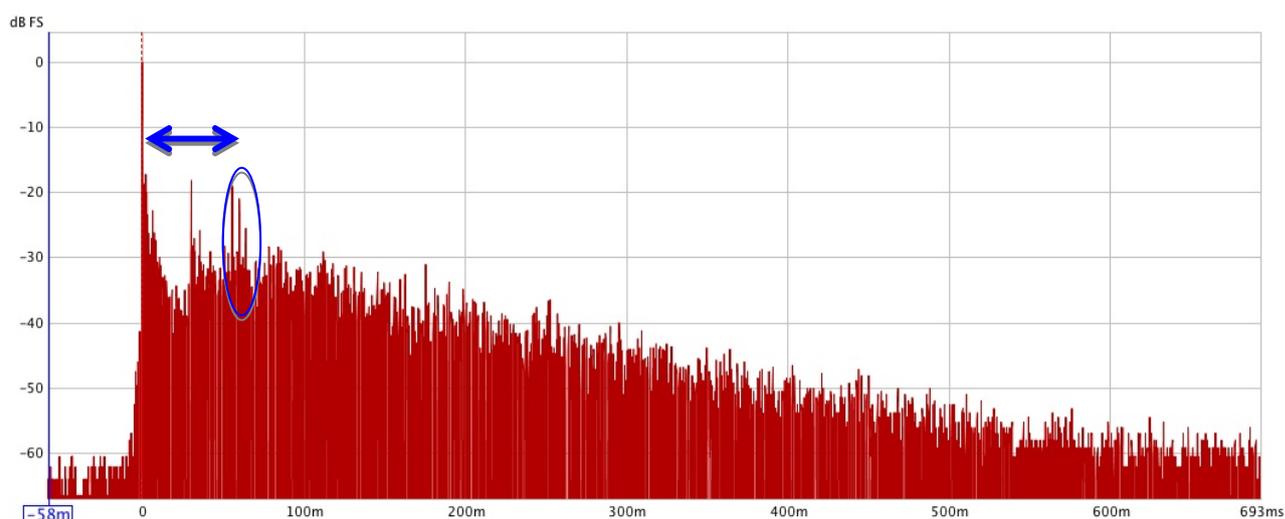
- 13 dB < ST1 < -11 dB      giudizi favorevoli sulle condizioni di esecuzione

### 1.3 Lo scopo della nostra Ricerca

La maggior parte delle misure acustiche sono fatte usando un singolo microfono di pressione omnidirezionale, ma anche le altre come lo IACC e la Lateral Fraction, che di microfoni ne usano due, e inoltre direttivi, concentrano la loro attenzione, più sulla posizione “dell’effetto” e non su quello “della causa”.

Tutto questo, quindi è buono per ricavare dalla IR ottenuta il tempo di riverbero, ed altri parametri monofonici. Ma che informazioni possiamo ottenere riguardo la provenienza del suono?

Cosa sta causando una riflessione non voluta? Se noi diamo un'occhiata alla IR possiamo individuare una riflessione, la distanza temporale fra essa ed il suono diretto, e grossomodo risalire anche alla distanza in metri fra la causa della riflessione e la sorgente dentro la sala che stiamo analizzando.



*Fig. 1.4 Esempio di individuazione di riflessioni ed eventuali distanze guardando la IR*

La cosa funziona, ma per capire quale fra le varie pareti che circondano la sorgente sia la vera causa della riflessione, occorre affidarsi alla "Intuizione" per ricreare mentalmente una sorta di spazialità del percorso sonoro, e spesso non basta neanche essa quando vi sono ostacoli o pareti quasi equidistanti dalla sorgente.

Lo scopo della ricerca intrapresa è stato dunque quello di individuare un metodo, e realizzare un relativo software, che permettesse la rappresentazione dinamica della propagazione del suono all'interno dell'ambiente sotto osservazione (teatro, auditorium, sala per concerti, etc.).

Per tale motivo si è cercato di ottenere una mappatura non solo visuale, ma dinamica (nel tempo) dell'energia sonora che arriva dalle varie direzioni. Forti di questo strumento si potrà, ad esempio:

- Individuare la direzione di arrivo di riflessioni e di echi
  
- Valutare lo spettro delle singole riflessioni
  
- Verificare che un sistema di amplificazione sonora sia correttamente posizionato e regolato
  
- Arricchire di un significato spaziale anche i tradizionali parametri acustici delle normative, non soffermando solo nel punto di misura ma gettando uno sguardo alla distribuzione spaziale delle cause che determinano il loro valore.

## **1.4 Metodologie adottate**

Innanzitutto occorre considerare che per ottenere una analisi spaziale di un ambiente non è possibile accontentarsi del valore della pressione acustica registrato in un punto, come invece è possibile fare per individuare i parametri acustici non spaziali suggeriti dalle normative.

Nel nostro caso occorre invece rilevare separatamente la pressione acustica proveniente da varie direzioni e per questo è necessario fare uso non più di un microfono direzionale ma direttivo, e più è spiccata la direttività di tale microfono e più è alta la definizione sulla provenienza di un suono in quanto l'area sottesa dal microfono è minore.

Il primo passo per giungere ad una analisi spaziale del suono sarà quindi quello di fare uso di microfoni direttivi che assicurino, in modo più o meno definito a seconda del microfono adoperato, di spezzare l'ambiente circostante in tante aree più o meno ristrette.

Tuttavia l'uso di un solo microfono non permette di poter cogliere effetti al di fuori dell'area coperta dalla sua direttività, né tanto meno di poter riprendere fenomeni contemporanei in aree diverse una volta che si decidesse di spostarlo in altre direzioni.

Per poter quindi avere una cognizione sia complessiva che contemporanea di tutto l'ambiente che circonda lo strumento di indagine occorrerà che questo non sia un unico

microfono, ma un array microfonico formato da numerosi microfoni direttivi tali da ricoprire l'intera area di indagine, che spesso coincide con l'intero ambiente che circonda la sonda a 360°.

Un metodo alternativo all'array microfonico, ed ugualmente sperimentato nell'ambito del presente studio, è stato quello di creare un "array virtuale" con un solo microfono direttivo puntato di volta in volta nelle varie direzioni che definiscono l'intero spazio di indagine. Si capisce però che tale metodo, che nel percorso della nostra ricerca ha preceduto quello dell'array a più microfoni, si potrà applicare solo nel caso in cui la sorgente sia in grado di riprodurre esattamente lo stesso segnale tante volte quante sono le posizioni lungo le quali il microfono viene puntato di volta in volta.

Tornando, infine, al caso di un array formato da più microfoni, si potrà aumentare la direzionalità dei microfoni ed anche il numero delle direzioni puntate "a beam ristretto", creando un certo numero di "microfoni virtuali" facendo uso dei microfoni che realmente costituiscono l'array.

#### **1.4.1 Configurazioni microfoniche scelte**

Nell'ottica di quanto detto precedentemente sono state utilizzate, e con un certo successo, tre configurazioni microfoniche per la mappatura dei teatri:

- 1. Il buon, "vecchio" Ambisonics (B-format 1° ordine)**
- 2. Un microfono "shotgun" su tavola rotante**
- 3. Un array microfonico sferico ultradirettivo (Eigenmike™)**

## 2 CONFIGURAZIONE AMBISONIC

### 2.1 Alcuni sistemi a confronto

Presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale la ricerca si avvale da numerosi anni di sonde microfoniche AMBISONICS, cioè capaci di creare le armoniche sferiche fino al I ordine. In particolare sono state adottati i microfoni tetraedrici:

Soundfield, DPA-4, Tetramic, Brahma, dai quali segnali è possibile ricavare, tramite una conversione A-Format to B-Format i segnali W, X, Y, Z che caratterizzano appunto le armoniche sferiche del primo ordine.



Soundfield



DPA-4



Tetramic



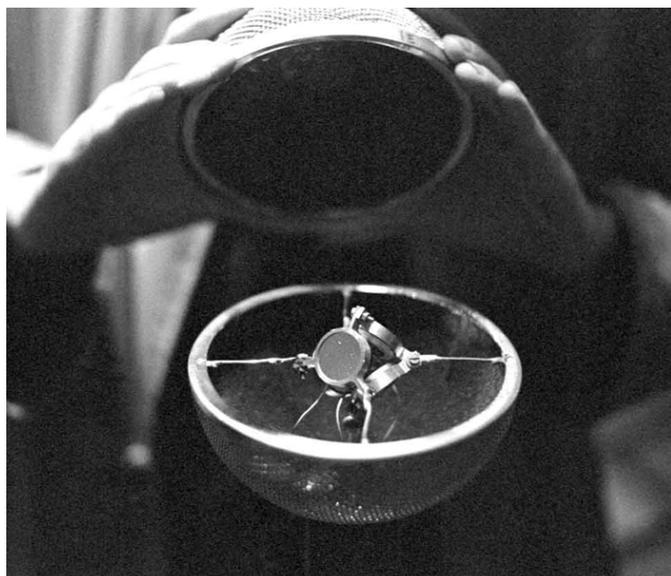
Brahma

*Fig. 2.1 - Alcuni microfoni atti all'analisi Ambisonics*

## 2.2 Il Microfono Soundfield

Si tratta storicamente del primo microfono adottato per la rappresentazione Ambisonics.

Esso venne inventato nel 1973 da venne inventato da Gerzon e Craven utilizzando configurazioni via via più perfezionate fino all'odierna realizzazione.



*Fig. 2.2 – Evoluzione nel tempo del microfono Soundfield*

Dall'uscita di un convertitore da A-Format (cioè i segnali originali) a B-Format (segnali componenti le armoniche sferiche), dal sistema Soundfield possiamo ricavare direttamente 4 segnali:

1 omnidirezionale (di pressione,  $W$ ) e 3 figure di 8 (di velocità,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ )

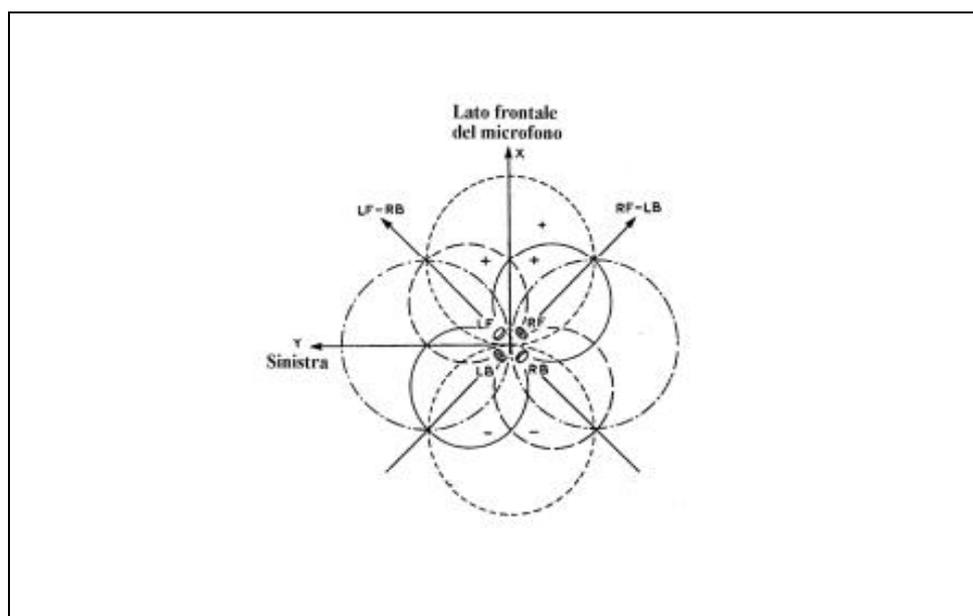


**Fig. 2.3** – a) Il microfono Soundfield ST-250;

b) I diagrammi di direttività dei 4 canali  $W$ ,  $X$ ,  $Y$  e  $Z$

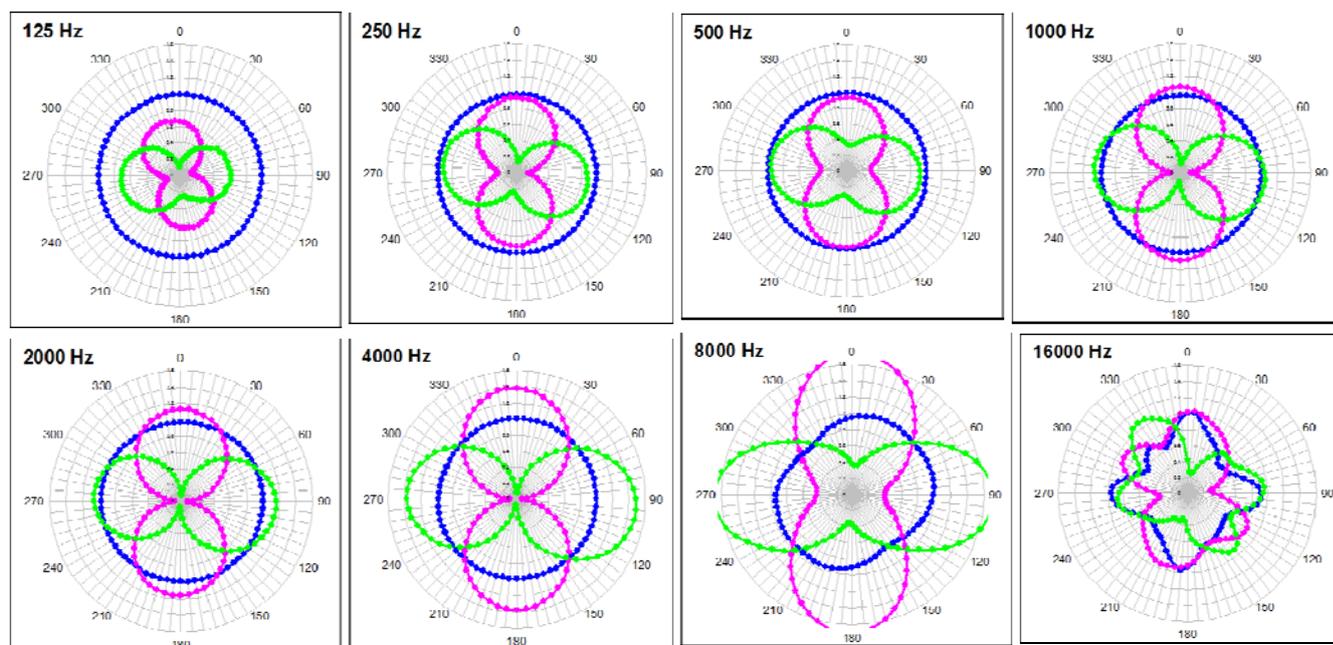
Osservando con attenzione la Figura, si nota che i canali direzionali hanno i lobi di due colori diversi; ciò indica una inversione di polarità del suono rilevato. In questo modo la polarità di un suono che, ad esempio, arriva dal palcoscenico sul microfono (stiamo considerando l'asse  $X$ ) è positiva, mentre un suono che proviene da dietro (suono riflesso) ci perviene rovesciato di fase. Di conseguenza, combinando i segnali  $X$  e  $W$ , noi riusciamo facilmente a separare i suoni che ci arrivano dal davanti dai suoni che ci arrivano posteriormente: sul canale  $W$ , infatti, i segnali hanno sempre la stessa polarità, e quindi se noi sommiamo  $W$  e  $X$  otteniamo un microfono virtuale che ci dà una risposta forte per i suoni frontali ed una risposta nulla per i suoni provenienti da dietro; se viceversa facciamo la differenza fra quanto acquisito dai canali  $W$  e  $X$ , abbiamo la situazione opposta: otteniamo un microfono sensibile solo ai suoni provenienti dal fondo del teatro (quindi, ad esempio, ottimo per alimentare il canale di surround di un sistema *Dolby*).

Operando dunque matematicamente sui 4 canali  $W$ ,  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  (ma in modo semplice, con somme e sottrazioni e facendo ricorso alle trigonometria), possiamo realizzare un microfono virtuale (direttivo a piacere) avente ogni possibile orientazione arbitraria; cioè una volta registrati i 4 suddetti canali, noi possiamo sintetizzare un qualunque microfono con qualsiasi direttività e orientazione nello spazio.



*Fig. 2.4 – Schema della direttività teorica del microfono Soundfield*

Ovviamente tutto ciò presuppone una forma perfettamente omnidirezionale del diagramma di direttività del microfono virtuale  $W$  e di quelli “a figura di 8” degli  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ . Nella realtà la situazione non è così ideale, soprattutto ad alte frequenze, e alcune prove in camera anecoica hanno proprio evidenziato questo problema:



*Fig. 2.5 – Misure sperimentali della direttività teorica del microfono Soundfield*

## 2.3 Microfoni di nuova generazione

Oggi giorno è disponibile una strumentazione molto più economica ma sempre con microfoni in configurazione tetraedrica, come ad esempio il Tetramic ed il Brahma.



Queste possono essere accoppiate a registratori digitali portatili che fanno uso di scheda SD, il che consente di testare molte posizioni in tempi molto brevi con l'ausilio di sorgenti impulsive.

Nonostante la minor complessità del sistema di registrazione la precisione ottenuta non è inferiore a quella del Soundfield, ma al contrario, con un nuovo metodo di elaborazione digitale dei segnali delle capsule, si possono ottenere diagrammi di direttività molto più accurati di quelli del vecchio Soundfield.

Una matrice di filtraggio FIR 4x4 può implementare in tempo reale la conversione A-Format – B-Format tramite il plugin “X-volver”. E' interessante notare come la matrice di filtraggio sia personalizzata su ogni capsula in modo da ottenere un comportamento fra di esse omogeneo, e quindi un risultato di insieme in linea con quello teorico

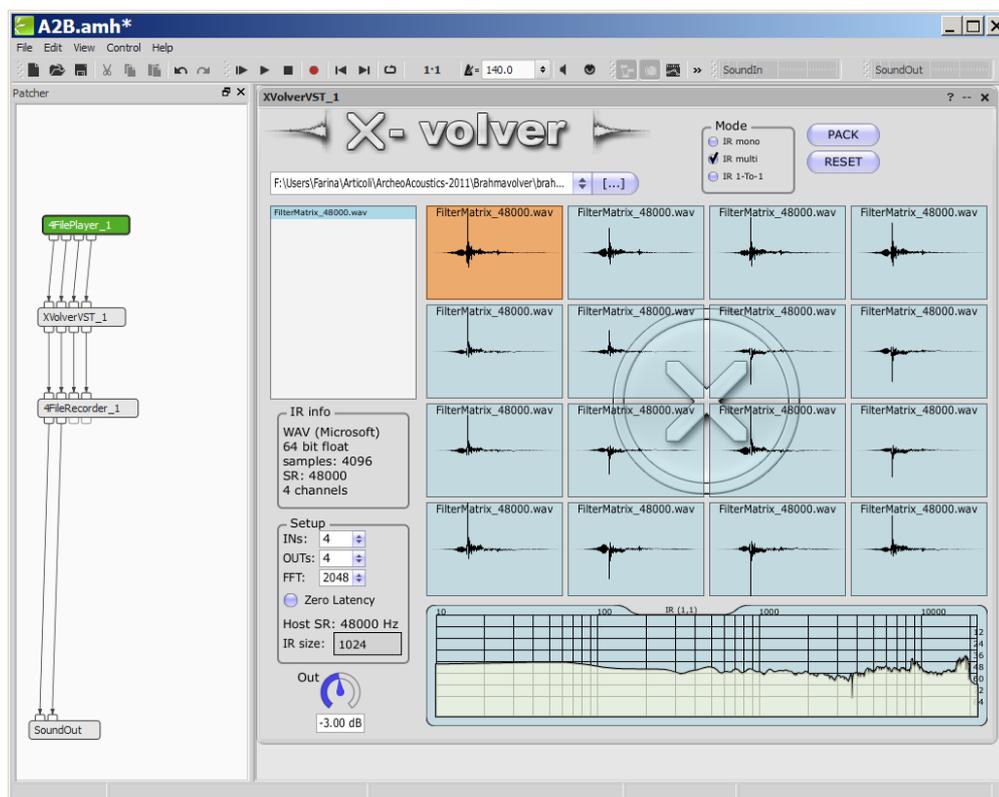


Fig. 2.6 – Plugin X-volver

## 2.4 Analisi spaziale tramite B-Format (2011)

Le componenti B-Format di un segnale Ambisonic permettono una facile individuazione delle caratteristiche energetiche del suono. Come visto le componenti  $x$ ,  $y$ , e  $z$  rappresentano le tre componenti di velocità della particella d'aria in prossimità della sonda, ma occorre ricordare che sono espresse in termini di pressione.

In pratica, se ricordiamo il legame fra pressione e velocità:

$$v = \frac{p}{\rho_0 \cdot c_0}$$

Avremo che, normalizzando la velocità rispetto l'impedenza acustica ( $\rho_0 \cdot c_0 = 1$ ), numericamente

la pressione diventa uguale alla velocità pur mantenendo le dimensioni di una pressione.

Così quindi sono da intendersi le componenti  $x$ ,  $y$ , e  $z$ : numericamente uguali alle velocità lungo i tre assi, esse sono in realtà delle pressioni, e quindi omogenee alla componente  $W$ .

Poiché, direttamente dalla definizione di Intensità acustica abbiamo che

$$I = p \cdot c_0$$

Numericamente si avrà, quindi, che le tre componenti del vettore  $I$  sono date da:

$$I_x = w \cdot x, \quad I_y = w \cdot y, \quad I_z = w \cdot z$$

E il cui modulo è dato da:

$$|I| = \sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}$$

La Densità di Energia sonora  $D_e$ , sarà invece data dalla somma di Energia Potenziale e Cinetica per unità di volume e quindi dall'espressione:

$$D_e = w^2 + x^2 + y^2 + z^2$$

### 2.4.1 Il Rapporto Energetico, $r_E$

Definiamo il Rapporto Energetico  $r_E$  nel seguente modo:

$$r_E = \frac{|I|}{D_e}$$

E' importante ricordare a questo punto che essendo  $x$ ,  $y$ , e  $z$  delle pressioni,  $I$ , che solo numericamente rappresenta l'Intensità nel punto analizzato, in realtà ha le dimensioni di una Energia. Da questo ne consegue che il Rapporto Energetico è un **numero puro** compreso fra 0 e 1.

Infatti, poiché  $|I|$  tiene conto della energia legata alla risultante delle velocità delle particelle, mentre  $D_e$  identifica l'energia complessiva nel volumetto che contiene la sonda,  $r_E = 1$  indicherà un campo perfettamente propagativo, in perfetta onda progressiva, mentre  $r_E = 0$  sarà indice di un campo stazionario, reattivo, riverberante: tanta energia va e tanta ne torna facendo annullare l'Intensità. Avremo molta energia nel volumetto, ma che non sta propagando.

Se avessi usato come indice unicamente  $|I|$ , avrei avuto una indicazione su quanto è "forte" un suono, con  $|I| / D_e$ , si ha una informazione sulla natura del campo. Analogamente il solo  $D_e$  indica quanta energia potenziale o cinetica ho nel volumetto interessato, ma non indica se il campo sia propagativo o meno. Possiamo quindi considerare  $r_E$  un indice di reattività del campo, che indica, cioè, quanto il campo sia propagativo oppure reattivo.

AmMESSO ora di essere in presenza di un campo propagativo, e con questo intendiamo aver verificato che  $r_E$  sia sensibilmente maggiore di zero (es. ,  $r_E > 0.3$ ), può aver senso determinare la direzione di provenienza della propagazione calcolandone Azimuth ( $\vartheta$ ) ed Elevation ( $\varphi$ ).

Si avrà, infatti, usando una notazione "informatica":

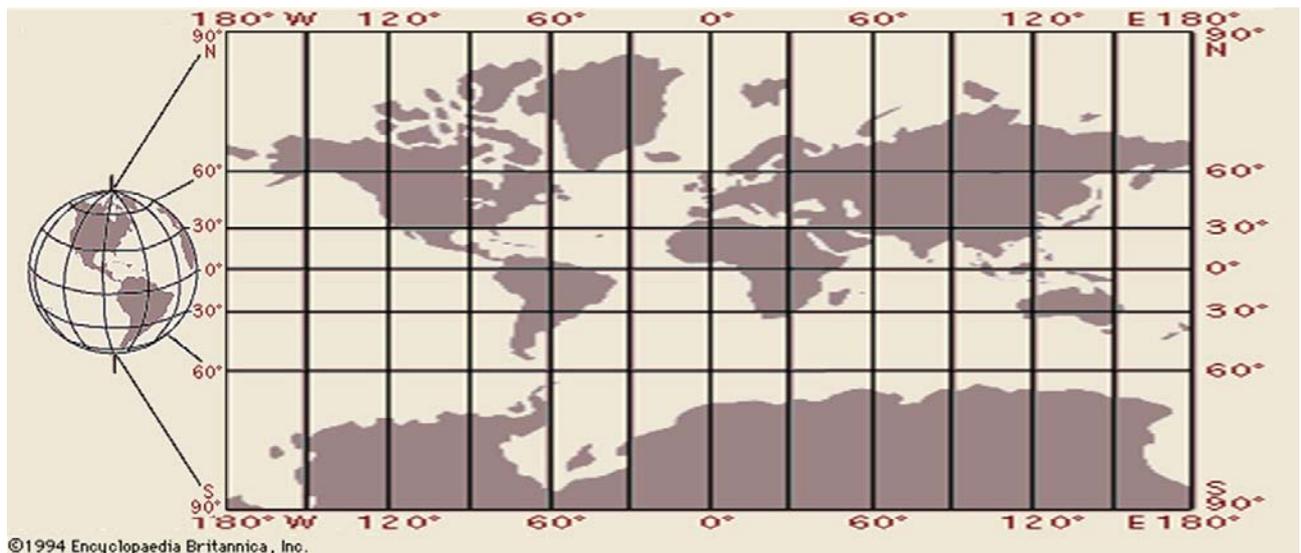
$$\vartheta = \text{atan2}(I_x, I_y); \quad \varphi = \text{asin}(I_x / |I|)$$

Ottenendo, così, un "puntatore" che ci indica la direzione di provenienza del suono, una volta che sia stata accertata, dell'indice di reattività  $r_E$ , la presenza di una buona percentuale di campo propagativo rispetto al totale di Energia acustica in quel punto.

## 2.5 Software di mappatura tramite B-Format

Una volta stabilite le coordinate sferiche della direzione del suono sarà ora possibile individuare il punto di provenienza sopra un piano che ci rappresenta l'ambiente che circonda la sonda microfonica, una sorta di "immagine di sfondo".

A tal proposito viene utilizzata la proiezione di Mercatore per trasformare un orizzonte sferico in una immagine rettangolare di formato 2:1.



*Fig. 2.7 – Proiezione di Mercatore adottata nella mappatura*



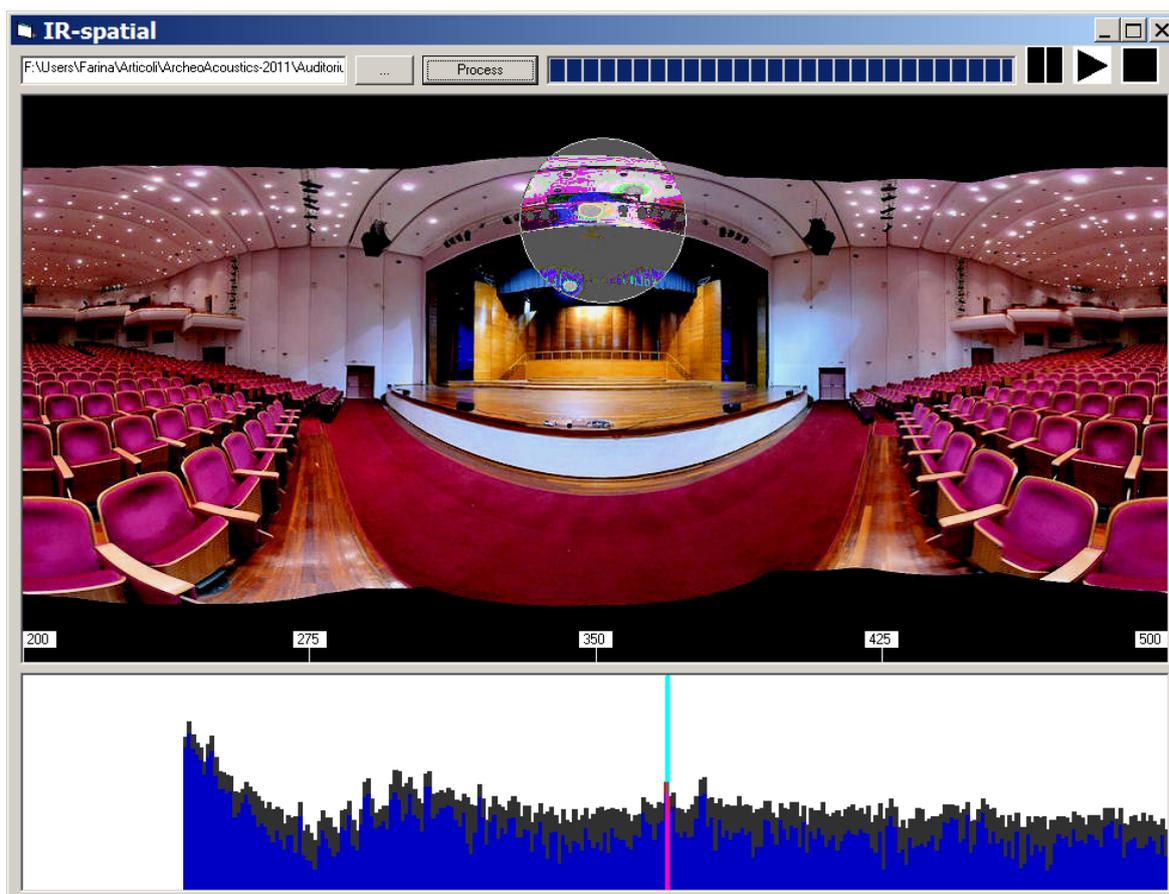
*Fig. 2.8 – Microsoft Image Composite Editor*

Per ottenere tale immagine dall'ambiente circostante, ad esempio un teatro, viene adoperato "Image Composite Editor" della Microsoft, che permette di ottenere una immagine panoramica che copre 360° in orizzontale (Azimuth) e 180° in verticale (Elevation), semplicemente inserendo una serie, piuttosto numerosa di fotografie rigorosamente scattate dal punto di ripresa microfonica (vedi Figura Sopra).

A questo punto il software (fatto in Visual Basic) plotterà un cerchio sopra l'immagine centrato sulle coordinate ( $\theta$ ,  $\varphi$ ) trovate precedentemente. Il raggio di tale cerchio sarà proporzionale a  $|I|$  e la trasparenza sarà proporzionale al Rapporto Energetico, cioè:

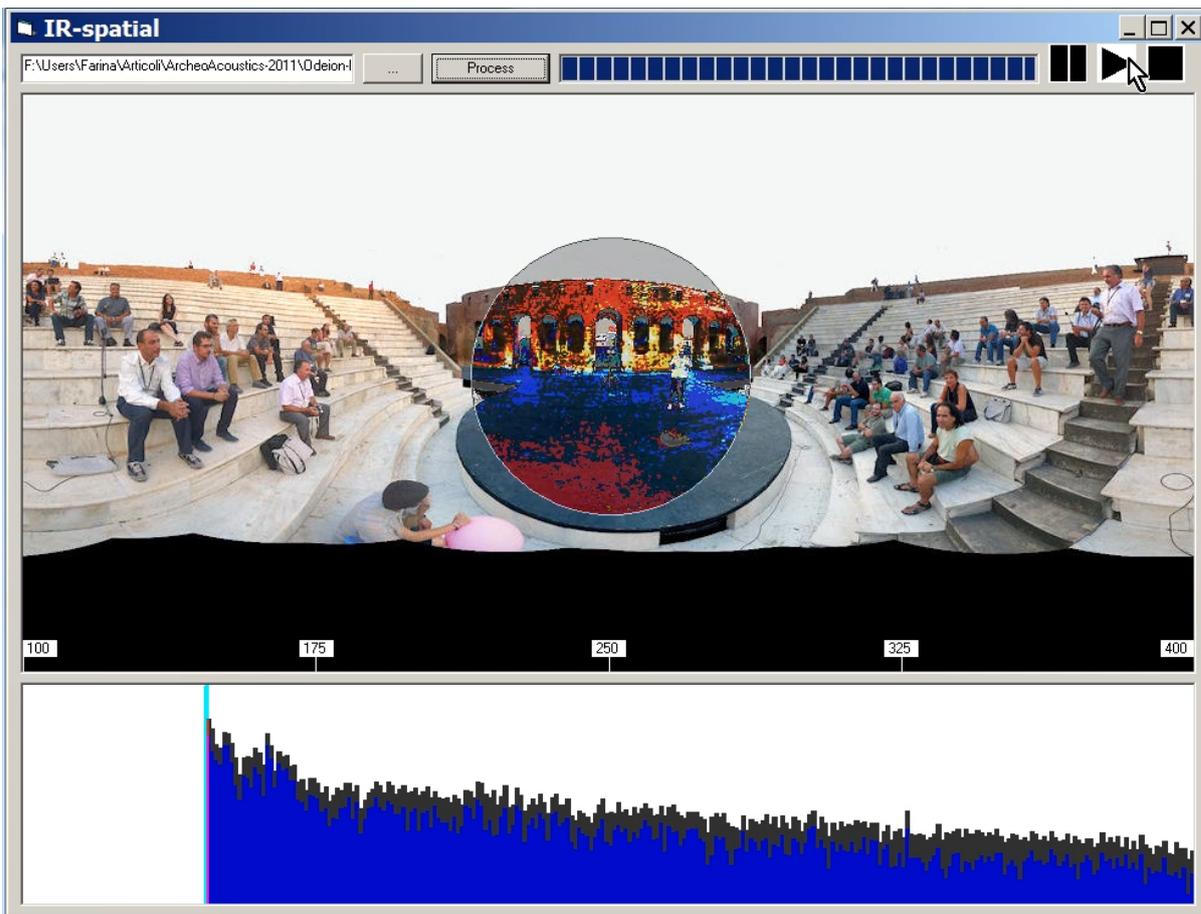
quando  $r_E$ , è piccolo il vettore intensità non localizza più la reale direzione di provenienza del suono (campo diffuso): **il cerchio sarà trasparente**.

quando  $r_E$ , è grande (vicino ad 1), il campo sonoro è fortemente orientato nella direzione del vettore intensità e tale orientamento è facilmente percepito: **il cerchio sarà opaco**.



*Fig. 2.9 – software di rappresentazione dinamica IR-Spatial*

Istante per istante viene fatta la somma vettoriale mediata su 1 msec sia del vettore Intensità che della Densità di Energia ed il valore di entrambe viene plottato nel tempo man mano sull'immagine si evolve la posizione del cerchio che individua la direzione di tale media.



*Fig. 2.10 –IR-Spatial testato nel teatro Odeion (Patras)*

## 2.6 Pregi e limiti della mappatura tramite B-Format

Indubbiamente il software ha presentato il grande pregio della precisione e della portabilità: basta avere una sorgente impulsiva ed una sonda tetraedrica di nuova generazione con registratore a batteria (Brahma) che si può avere immediatamente l'analisi mappata dell'ambiente e capire quale è la sequenza delle riflessioni e l'Intensità proveniente da esse.

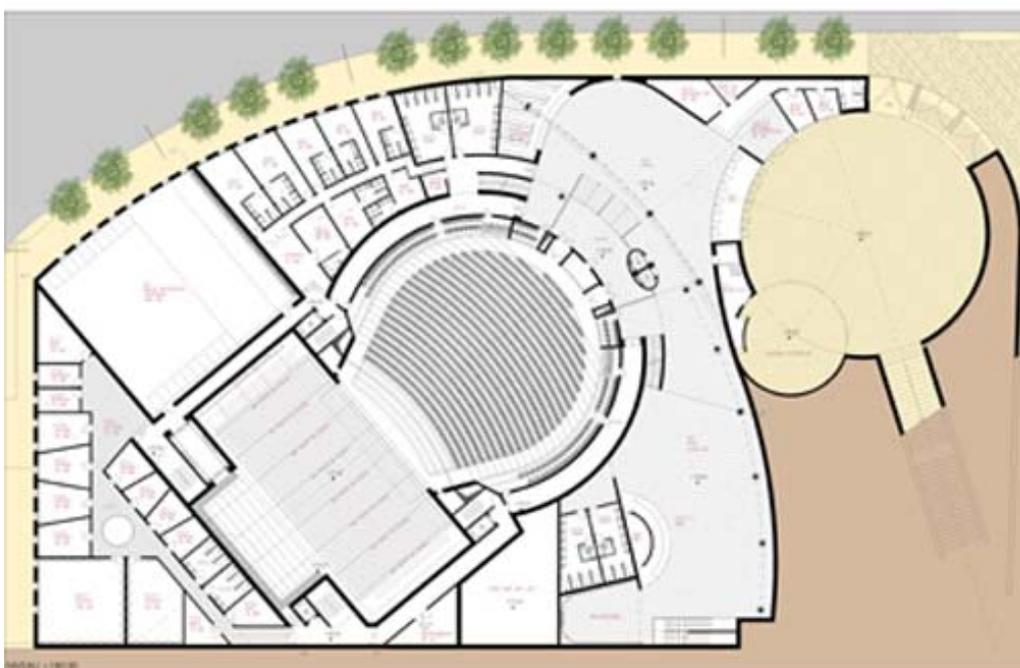
Grazie all'impostazione energetica è possibile anche capire quanto un campo sotto osservazione sia propagativo o stazionario.

Un limite del metodo è dovuto al fatto che esso visualizza istante per istante l'Intensità intesa come somma vettoriale dei vettori Intensità componenti, per cui se ho due provenienze diverse del suono ne vedo una unica che identifica la somma vettoriale nello spazio, e quindi non è detto che mostri la reale provenienza del suono, bensì la somma vettoriale mediata su 1 msec.

La tecnica funziona bene, quindi, se siamo in presenza di alcune riflessioni discrete nel tempo. Man mano che le riflessioni tendono a sovrapporsi, ad esempio nella coda riverberante, il metodo Ambisonics basato sulla B-Format, cade in errore

### 3 ANALISI MEDIANTE UN UNICO MICROFONO SHOTGUN

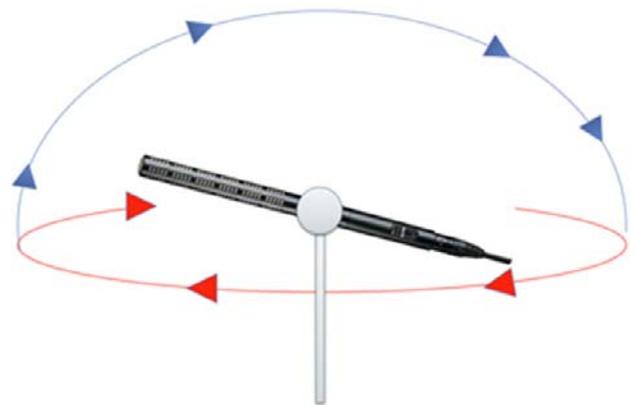
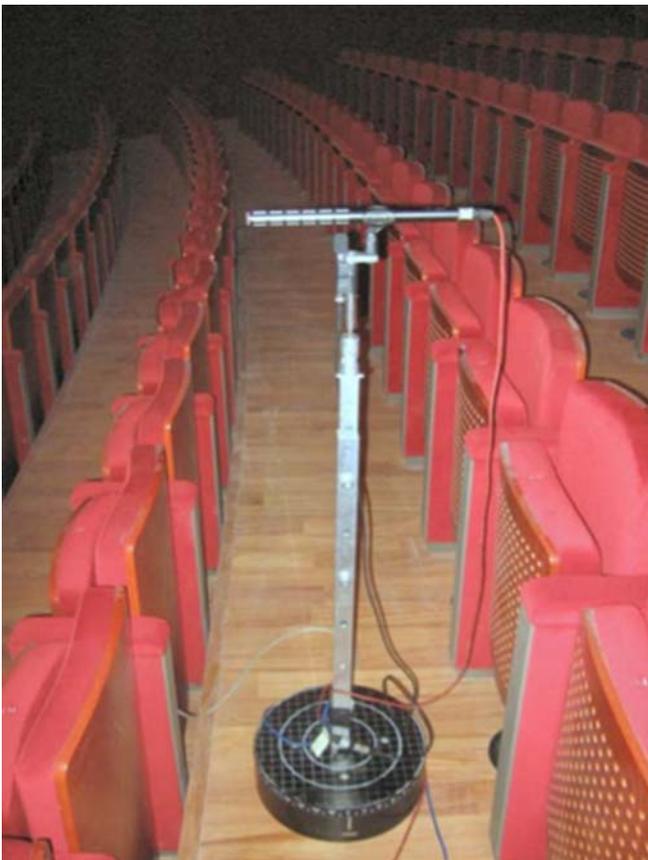
#### 3.1 Primo impiego del metodo: Grand Théâtre de Provence (2007)



*Fig. 3.1 – Grand Théâtre de Provence*

Questo secondo metodo è stato sperimentato per la prima volta nel 2007 nel Grand Théâtre de Provence ad Aix, per l'analisi di alcune riflessioni indesiderate delle quali non si conoscevano le origini.

Questa esperienza diede luogo all'inizio della scrittura di un software che elaborando i risultati ottenuti da tale metodologia potesse portare ad una descrizione dinamica del comportamento del suono all'interno di un teatro. Tale software per la prima volta è stato adoperato nel 2008 in due successive esperienze, al Teatro Comunale di Modena ed al Teatro Sociale di Como, che hanno decretato la grande efficacia del metodo di localizzazione usato in Francia, e l'utilità di visualizzazione dinamica della prima versione del software.



- Azimuth: 18 steps ( $20^\circ$  )
- Elevazione: 8 steps ( $22.5^\circ$  )

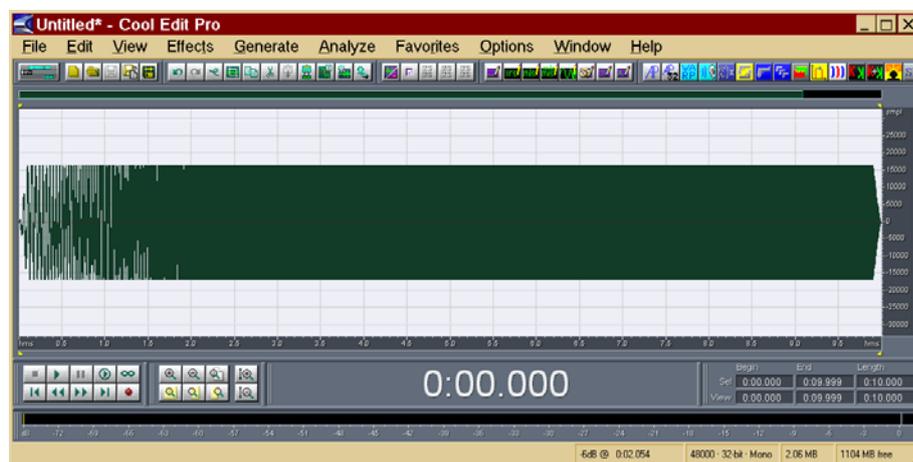
**Fig. 3.2** – Microfono shotgun su tavola rotante

Il metodo consiste nel posizionare un microfono ad elevata direttività “shotgun” su una tavola rotante, atto a registrare di volta in volta, coprendo con vari step i  $360^\circ$  la risposta impulsiva della sala. Finito un giro completo di Azimuth, si eleva l'inclinazione del

microfono e facendo una altra serie di registrazioni, e così via fino ad arrivare ad avere il microfono completamente verticale.

Tutto ciò è reso possibile solo perché è assicurata la più assoluta ripetibilità del segnale della sorgente. Esso infatti è generato da Exponential Sine-Sweep (ESS) rigorosamente identica per tutti gli step di registrazione del microfono rotante.

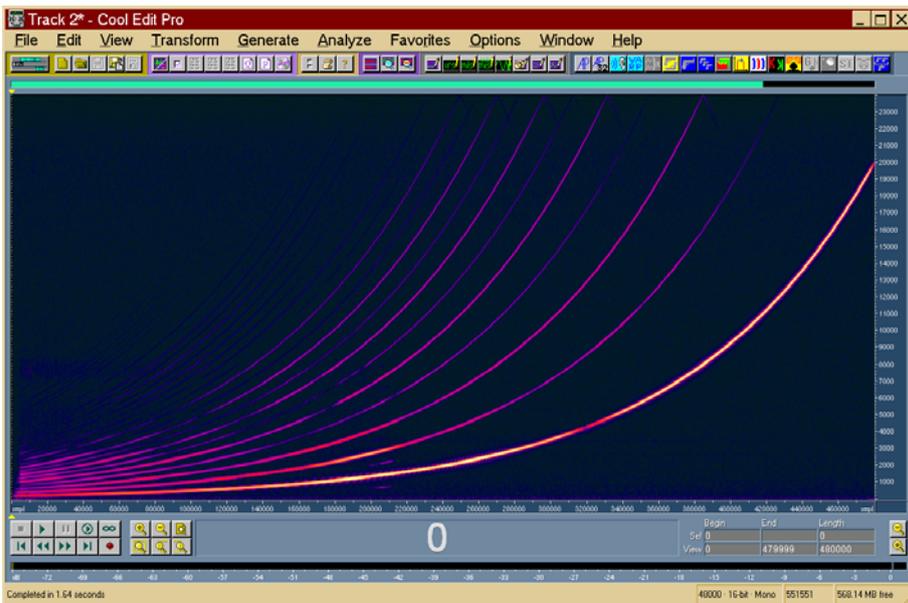
La ESS, tramite l'operazione di convoluzione con la sua funzione inversa appositamente studiata, si trasformerà in una perfetta Delta di Dirac anteceduta dalle armoniche dei prodotti di distorsione lontani da essa, e quindi permettendo potere separare la parte non distorta da tutti i disturbi comprese le distorsioni introdotte dalla sorgente fisica del segnale (Dodecahedron LookLine D300).



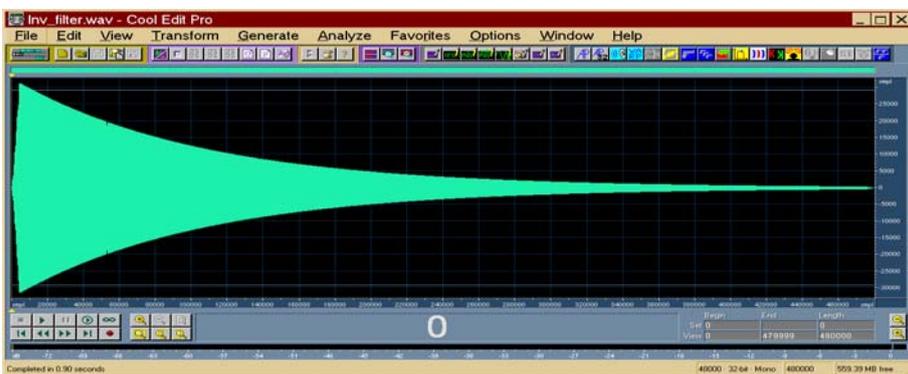
*Fig. 3.3 – Test Signal: Exponential Sine Sweep*



*Fig. 3.4 – Sonogramma della ESS*



**Fig. 3.5** –  
 Sonogramma della  
 risposta della sala  
 alla ESS: le non  
 linearità della  
 sorgente provoca la  
 comparsa di molte  
 armoniche



**Fig. 3.6** –  
 InvESS: Funzione  
 inversa della ESS



**Fig. 3.7** – Prodotto di convoluzione fra la risposta alla ESS e la InvESS:  
 compaiono le distorsioni armoniche ma separate nel tempo e quindi  
 facilmente eliminabili

Fin dalla sua nascita, la metodologia della ESS ha riscosso sempre grande successo, ma in particolare in queste misure tale metodologia si è dimostrata indispensabile. Solo la presenza di questo segnale, infatti, ha assicurato un insieme di tante risposte all'impulso ottenute **come se fossero state registrate contemporaneamente, per un totale di  $18 \times 4 + 1 = 73$  IR distribuite su una semisfera**. Sono, infatti, 18 step di Azimuth distanziati di  $20^\circ$ , 4 step di Elevation, ed 1 a  $90^\circ$ .

A questo setup è stato anche aggiunto un microfono omnidirezionale di precisione per la determinazione corretta di alcuni parametri acustici relativi alla posizione di misura.



*Fig. 3.8 – Grand Théâtre de Provence: posizionamento del Dodecahedron LookLine D300*

## 3.2 Strumentazione adottata

**Generatore di segnale omnidirezionale (Dodecaedro + subwoofer):**

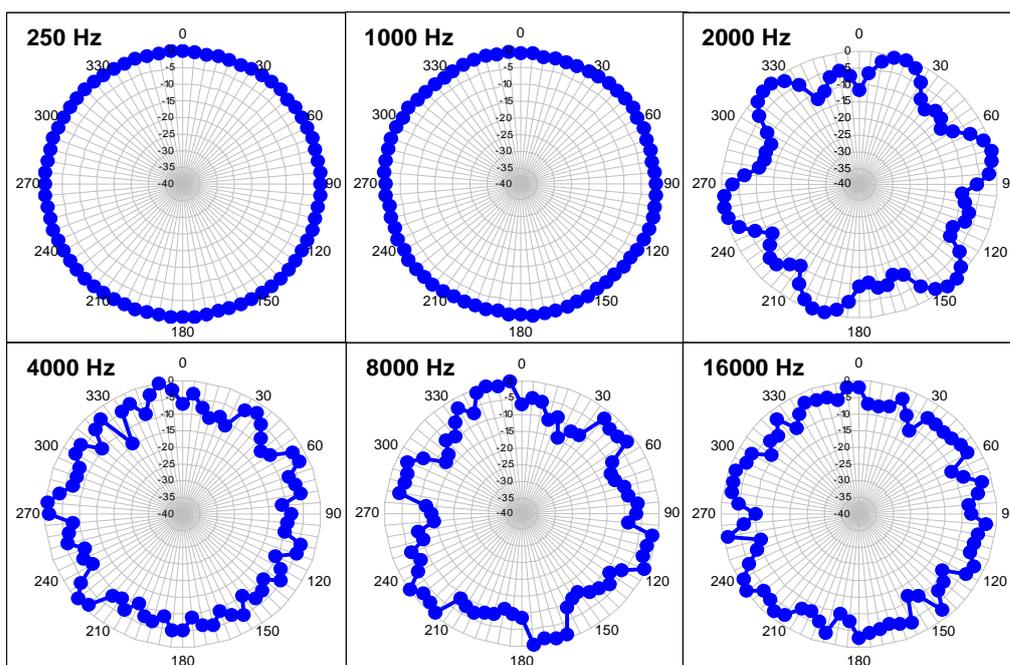
**Dodecahedron LookLine D300 + Sub Audio Pro mod. B2.27**



La norma ISO 3382 prevede che la sorgente debba essere di tipo omnidirezionale ma si limita a dire che la risposta in frequenza debba essere “adeguata” ed emettere un “segnale sufficiente” tra i 125 Hz e i 4 kHz.

La sorgente da noi utilizzata è un dodecaedro collegato con un subwoofer per l’amplificazione dei bassi, questo genera un segnale omnidirezionale che si propaga in tutto il teatro. Il segnale utilizzato è stato poi equalizzato per avere una potenza pressoché costante nelle bande di frequenza di interesse.

*Fig. 3.9 – Dodecahedron LookLine D300 + Sub Audio Pro mod. B2.27*



*Fig. 3.10 – Diagrammi di Direttività del Dodecahedron LookLine D300*

## Microfoni:



### 1) Microfono di precisione omnidirezionale Bruel&Kjaer 4188.

Questo microfono percepisce il suono proveniente da tutte le direzioni dello spazio circostante

Fig. 3.11 – microfono omnidirezionale



### 2) Microfono Shotgun Sennheiser ME66

Tale microfono capta prevalentemente il suono proveniente dalla direzione in cui è puntato

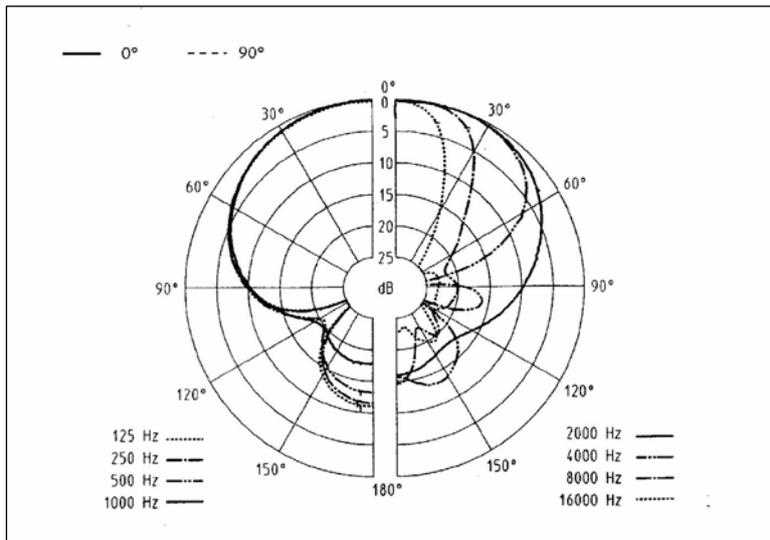
Fig. 3.12 – microfono direttivo

Seguono alcune specifiche dei microfoni

## Specifications 4188

<p><b>OPEN-CIRCUIT SENSITIVITY (1000 Hz):</b> -30 dB <math>\pm 2</math> dB re 1 V/Pa, 31.8 mV/Pa<sup>2</sup> <b>POLARIZATION VOLTAGE (external):</b> 0 V <b>FREQUENCY RESPONSE:</b> 0° incidence free-field response: <math>\pm 1</math> dB, 12.5 Hz to 8 kHz <math>\pm 2</math> dB, 8 Hz to 12.5 kHz In accordance with IEC 651, Type 1 and ANSI S1.4 – 1983 <b>LOWER LIMITING FREQUENCY (-3 dB):</b> 1 Hz to 5 Hz (vent exposed to sound) <b>PRESSURE EQUALIZATION VENT:</b> Rear vented <b>DIAPHRAGM RESONANCE FREQUENCY:</b> 8 kHz (90° phase shift) <b>CAPACITANCE (POLARIZED, 1000 Hz):</b> 12 pF <b>EQUIVALENT AIR VOLUME (101.3 kPa):</b> 65 mm<sup>3</sup> <b>CALIBRATOR LOAD VOLUME (250 Hz):</b> 208 mm<sup>3</sup> <b>PISTONPHONE TYPE 4228 CORRECTION</b> (with DP 0776): +0.02 dB <b>CARTRIDGE THERMAL NOISE:</b> 14.2 dB (A), 14.5 dB (Lin.)</p> <p>* Individually calibrated</p>	<p><b>UPPER LIMIT OF DYNAMIC RANGE (3% distortion):</b> &gt;146 dB SPL <b>MAXIMUM SOUND PRESSURE LEVEL:</b> 157 dB (peak)</p> <p><b>Environmental</b> <b>OPERATING TEMPERATURE RANGE:</b> -30 to +125 °C (-22 to +257 °F) Max. 70 °C (158 °F) when fitted with Random-incidence Corrector DZ 9566 <b>OPERATING HUMIDITY RANGE:</b> 0 to 100 % RH (without condensation) <b>STORAGE TEMPERATURE:</b> -30 to +70 °C (-22 to +158 °F) <b>Data Disk:</b> 5 to 50 °C (41 to +122 °F) <b>TEMPERATURE COEFFICIENT (250 Hz):</b> +0.005 dB/°C (for the range -10 to +50 °C (14 to +122 °F)) <b>PRESSURE COEFFICIENT (250 Hz):</b> -0.021 dB/kPa <b>INFLUENCE OF HUMIDITY:</b> &lt;0.1 dB/100 % RH <b>VIBRATION SENSITIVITY (&lt;1000 Hz):</b> 63.5 dB equivalent SPL for 1 m/s<sup>2</sup> axial acceleration</p>	<p><b>MAGNETIC FIELD SENSITIVITY:</b> 7 dB SPL for 80 A/m, 50 Hz field <b>ESTIMATED LONG-TERM STABILITY:</b> &gt;1000 years/dB (dry air at 20 °C (68 °F)) &gt;10 hours/dB (dry air at 125 °C (257 °F)) &gt;40 years/dB (air at 20 °C (68 °F), 90% RH) &gt;6 months/dB (air at 50 °C (122 °F), 90% RH)</p> <p><b>Dimensions</b> <b>Diameter:</b> 13.2 mm (0.52") (with grid) 12.7 mm (0.50") (cartridge housing) 14.35 mm (0.56") (with DZ 9566) <b>Height:</b> 14.9 mm (0.59") (with grid) 14.0 mm (0.55") (without grid) 16.7 mm (0.66") (with DZ 9566) <b>Thread for preamplifier mounting:</b> 11.7 mm – 60 UNS</p> <p><b>Note:</b> All values are typical at 23 °C (73.4 °F) 101.3 kPa and 50% RH, unless measurement uncertainty or tolerance field is specified. All uncertainty values are specified at 2<math>\sigma</math> (i.e. expanded uncertainty using a coverage factor of 2)</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fig. 3.13 – Specifiche del microfono Bruel&Kjaer 4188



**Fig. 3.14** – *Diagramma direttivo ME66*

Il motivo per cui si fa uso di due microfoni è il seguente: il microfono omnidirezionale (B&K 4188) è di grande precisione ed è utile per ricavare i parametri acustici in modo più preciso, inoltre essendo non direttivo non privilegia una particolare direzione e quindi avverte le riflessioni ed i riverberi indipendentemente dal suo puntamento. Non sarà così necessario individuare a priori la direzione da cui perviene il suono diretto o le prime riflessioni.

Diverso l'uso del microfono shotgun (Sennheiser ME66) atto a percepire l'andamento della pressione acustica in una determinata direzione senza il timore che l'osservazione sia perturbata da sorgenti o riflessioni al di fuori della direzione sotto analisi.

Ognuno di loro ha pregi e difetti, per esempio, la misura dei tempi di riverbero con un microfono direttivo verrebbe falsata: tali tempi risulterebbero più bassi in quanto si toglierebbe buona parte delle riflessioni circostanti.

### **Tavola rotante Outline ET1**

Entrambi i microfoni sono stati montati su di una tavola rotante come in fig7. La tavola rotante è un dispositivo di posizionamento microfoni: questi vengono applicati all'asta verticale. La tavola è sincronizzata al segnale sweep. Infatti dopo ogni sweep gira di un certo numero di gradi (nel nostro caso 20) automaticamente fino a coprire l'intero angolo giro.

Per ogni posizione della tavola viene ripetuta l'operazione di emissione del segnale e registrazione della risposta in modo sincronizzato.

Questo dispositivo permette di puntare il microfono in ogni direzione sia sull'asse verticale che orizzontale per avere la risposta impulsiva che arriverebbe virtualmente al nostro orecchio, analizzandone tutte le varie possibilità di riflessione.



*Fig. 3.15 – Tavola rotante Outline ET1.*

La tavola rotante è comandata dalla **Console di comando**, vedi Fig8. Essa viene collegata alla tavola rotante e la comanda nella rotazione.



*Fig. 3.16 – Console di comando.*

## Gli strumenti di acquisizione ed elaborazione del segnale

Per l'acquisizione del segnale è stata adoperata la scheda **Edirol FA101**, collegata col pc portatile **ASUS A6 JC** tramite collegamento firewire



*Fig. 3.17 – Scheda di acquisizione audio Edirol FA101*



*Fig. 3.18 – Vista di insieme del sistema di acquisizione*

### Software utilizzati:

- 1 - Adobe Audition 1.5
- 2 – Plugins per Audition Aurora 4.2

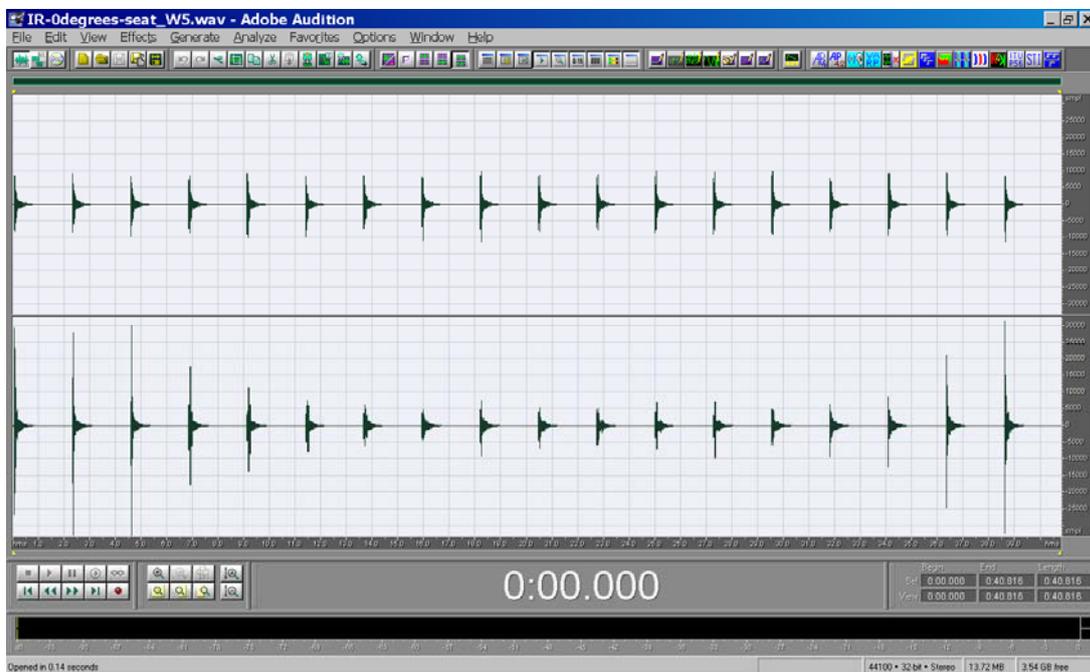
### 3.3 Primi risultati ottenuti

Le prime elaborazioni in Francia pur essendo fatte a mano, e non con poco sforzo di ordinamento delle IR ricavate, hanno dato risultati molto interessanti ed hanno contribuito a trovare le direzioni e quindi le cause delle riflessioni nocive.

Alcune immagini che seguono mostrano come sia stato possibile individuare con precisione, con il solo ausilio s dei frafici di un foglio di lavoro Excel, sia il suono diretto che le prime riflessioni.

Nella prima immagine la tiupica sequenza delle IR date da un microfono su tavola rotante:

mentre nel canale superiore appartenente al microfono omnidirezionale non vi sono vistose variazioni fra una IR e l'altra, nel canale inferiore si vede bene come un microfono direttivo cambi vistosamente l'ampiezza delle IR a seconda dell'orientamento rispetto alla sorgente. Nella seconda, invece, l'ingrandimento di una IR con relativa analisi spettrale



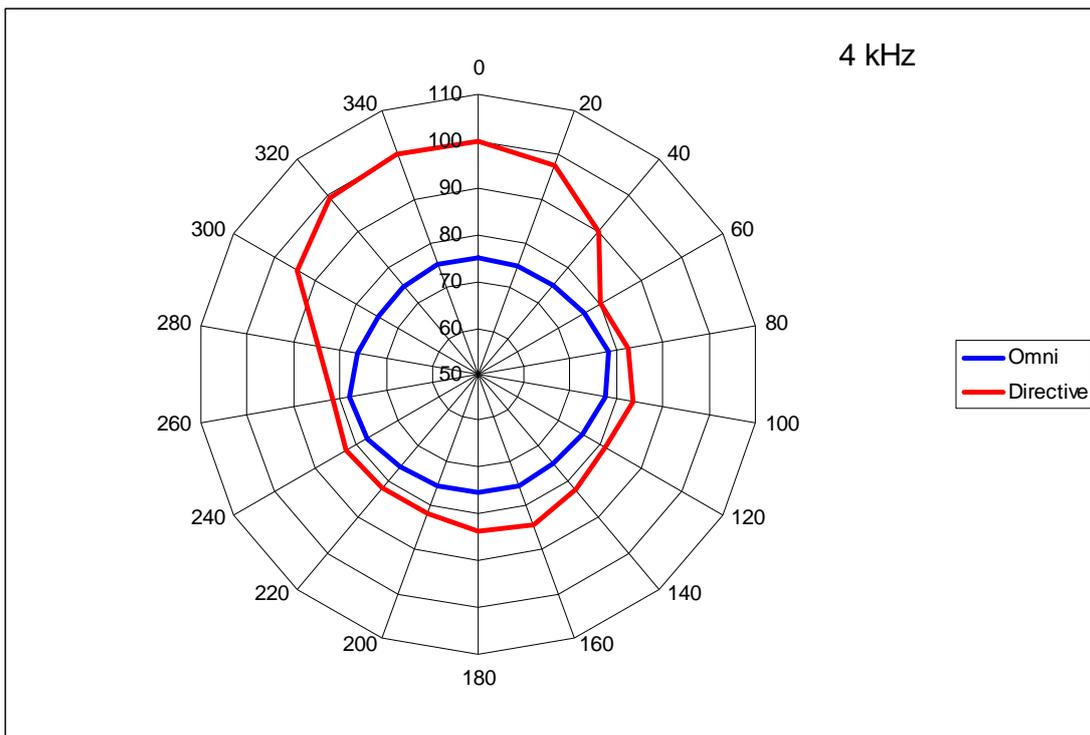
*Fig. 3.19 – Rappresentazione delle IR dopo un giro completo della tavola rotante: traccia superiore: microfono omnidirezionale, traccia inferiore: microfono direttivo*



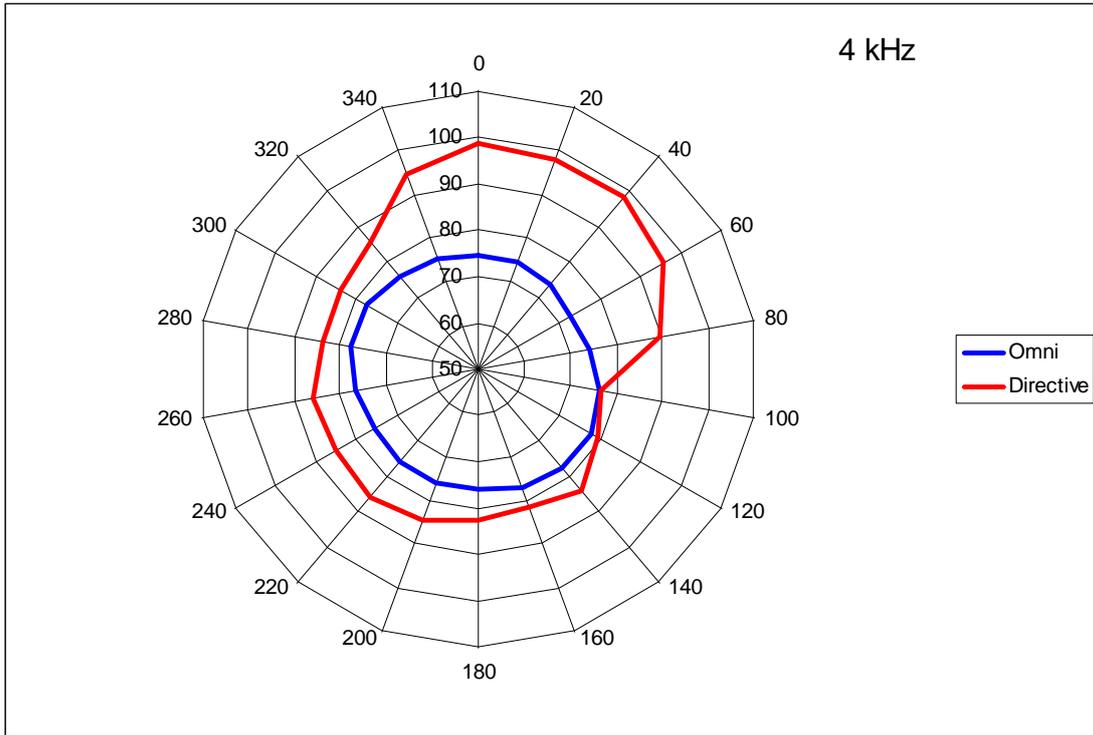
**Fig. 3.20** – Rappresentazione delle IR: ingrandimento e relativa analisi spettrale

Nelle immagini seguenti si possono apprezzare distintamente i risultati del metodo, sia per quanto riguarda il suono diretto, che per le riflessioni conseguenti. Da queste si è potuto individuare immediatamente la direzione di provenienza della riflessione sia in Azimuth che in Elevation.

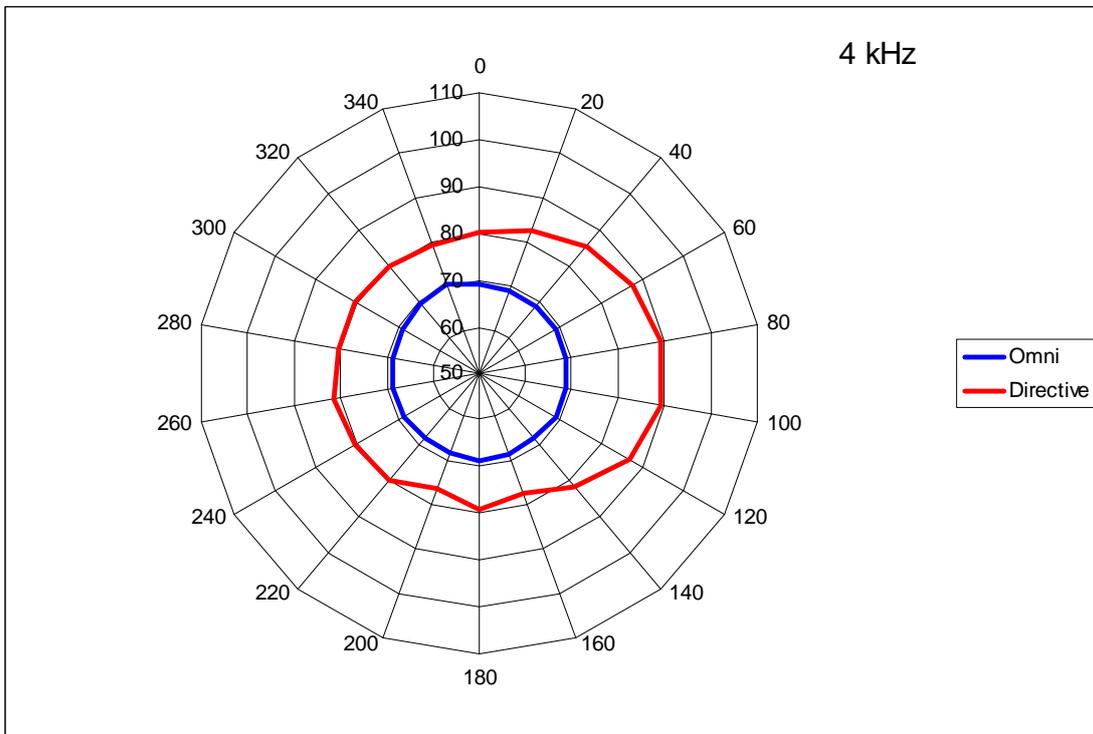
Seguono inoltre le relative immagini del punto di provenienza delle riflessioni direttamente puntato dal microfono Sennheiser



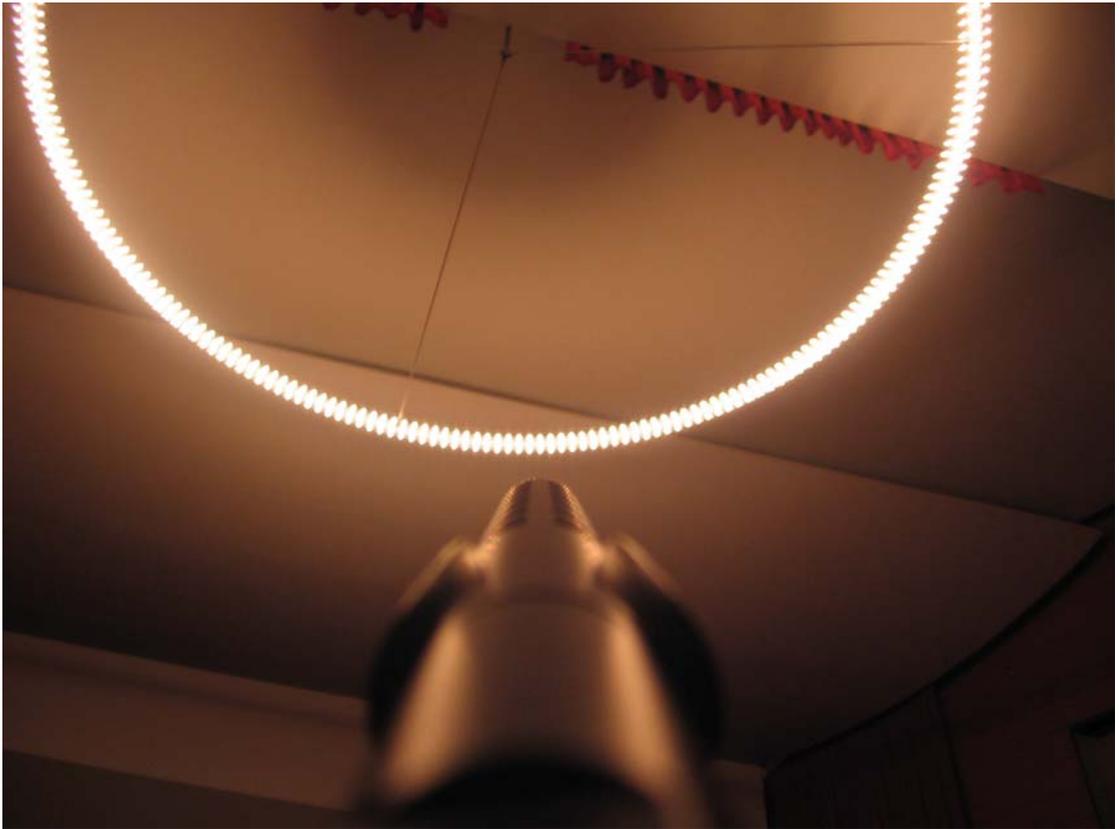
**Fig. 3.21** – Direct Sound



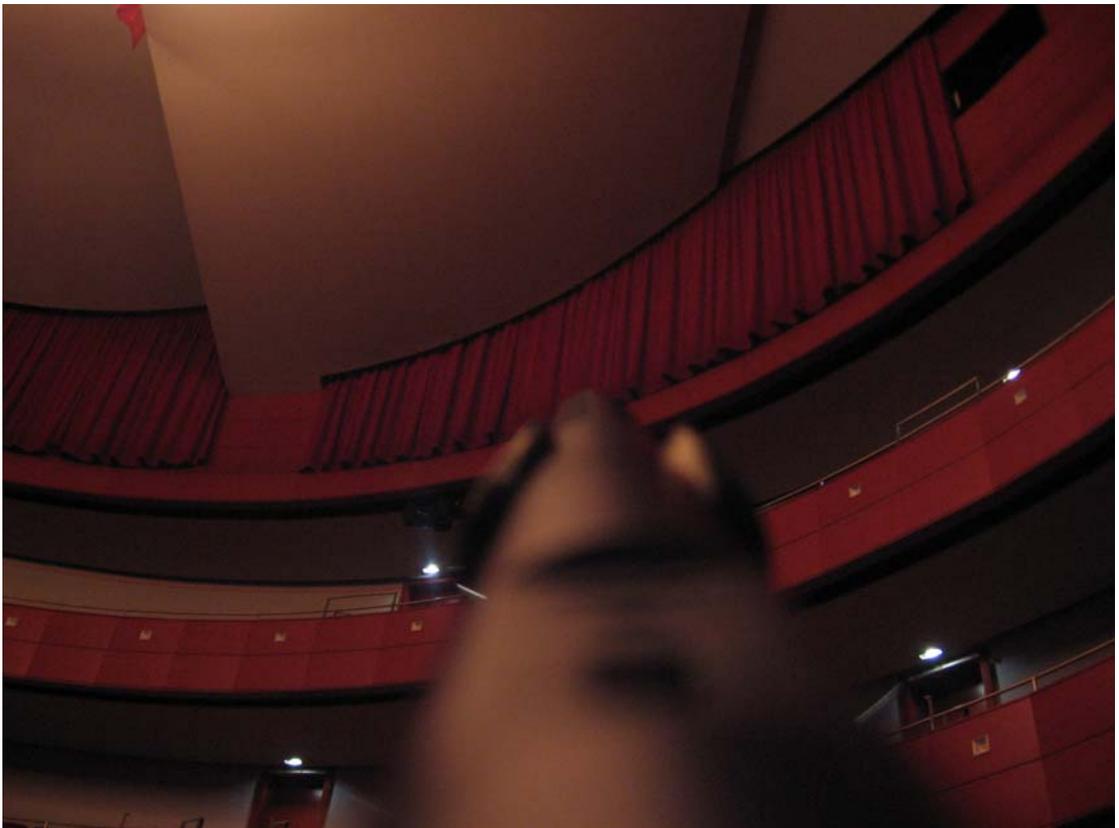
**Fig. 3.22** – 1<sup>st</sup> reflection (44 ms)



**Fig. 3.22** – 2<sup>nd</sup> reflection (89 ms)



*Fig. 3.23 – Provenience of the reflection n.1 (44 ms): the ceiling.*

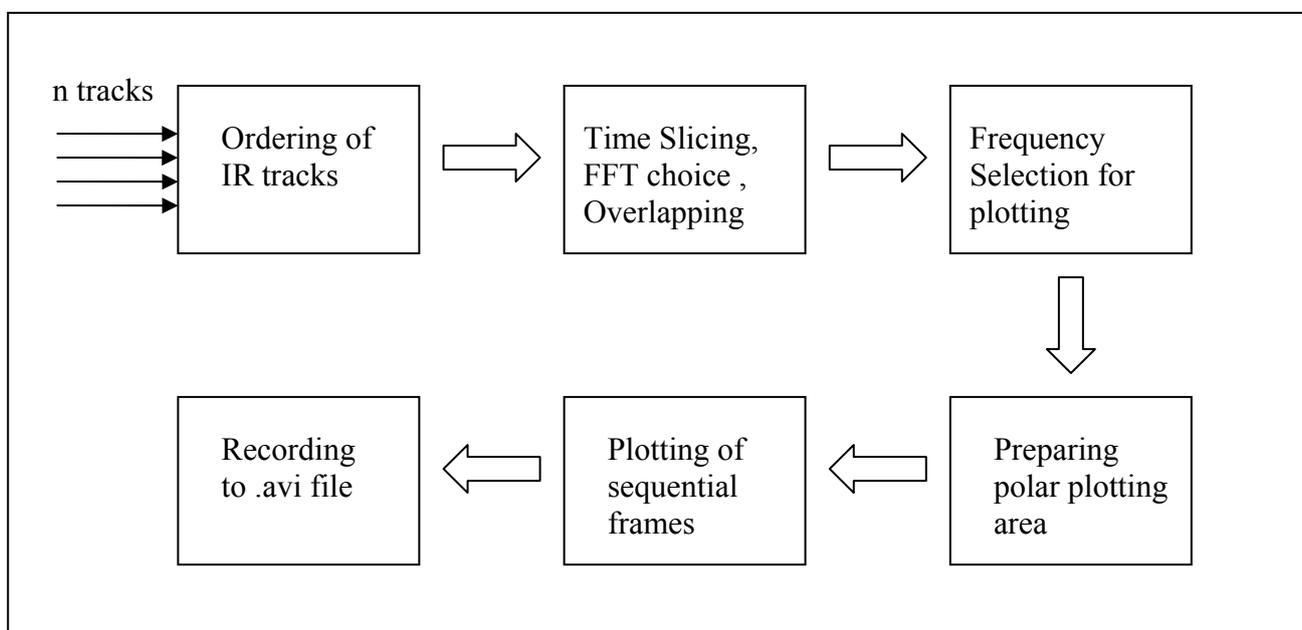


*Fig. 3.24 – Provenience of the reflection n.2 (89 ms): the side of the curved lateral surface*

### 3.4 Idea di un primo software di rappresentazione dinamica

Le successive esperienze nei teatri di Modena e Como, sono servite per studiare il percorso del suono proveniente dalla buca d'orchestra, ed in particolare per studiare i problemi di un cantante sul palcoscenico quando si deve sincronizzarsi col suono dell'orchestra in buca.

Per l'elaborazione dei risultati ottenuti tramite lo shotgun rotante, in questa occasione, per la prima volta, è stato applicato il software studiato appositamente, che oltre a ridurre i tempi di calcolo permette una rappresentazione dinamica dei risultati.

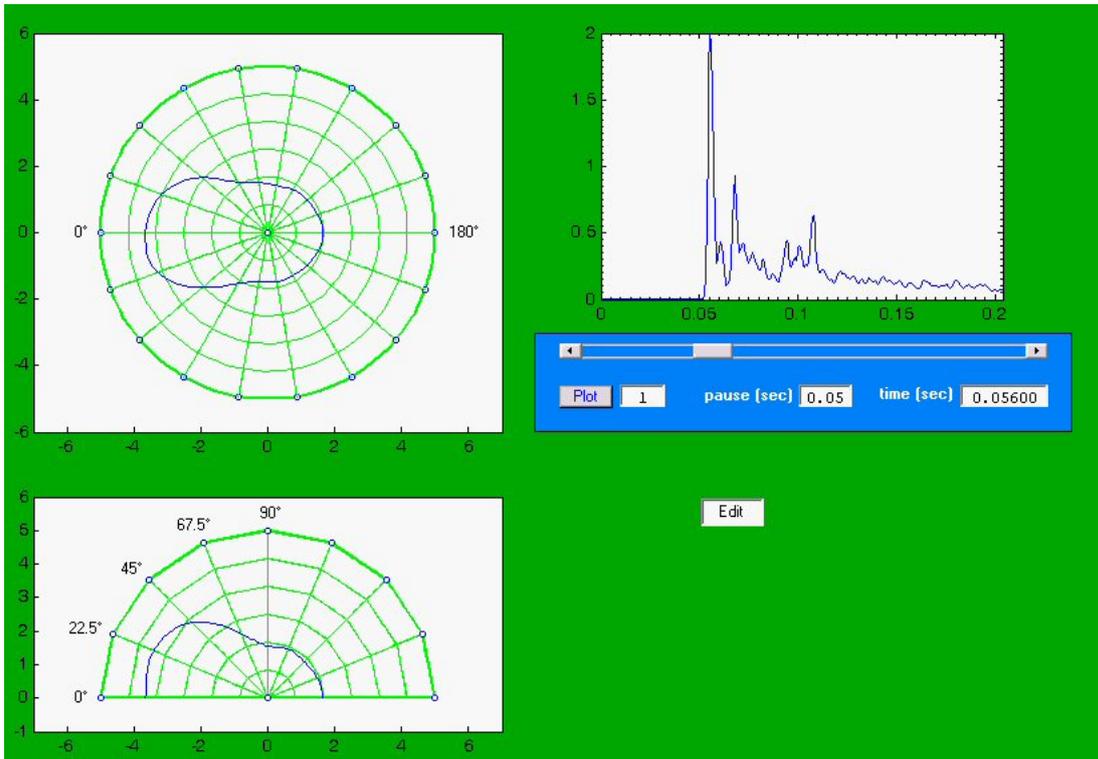


*Fig. 3.25 – Schema a blocchi del primo software di rappresentazione dinamica*

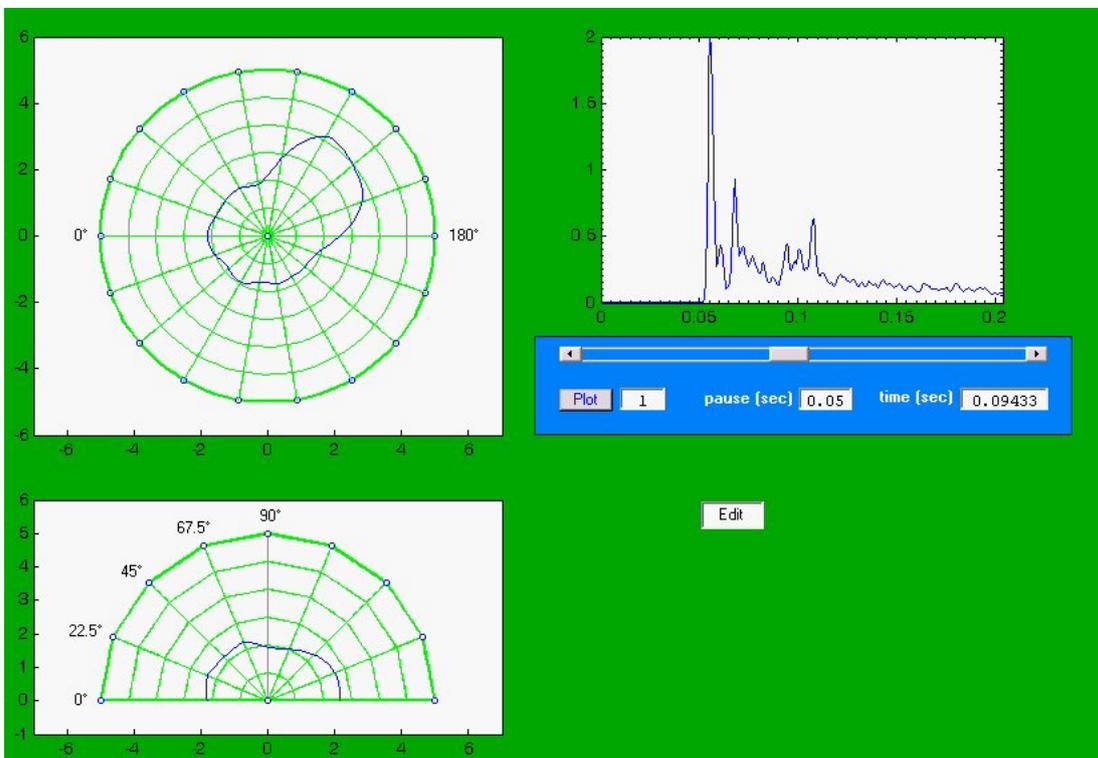
Come mostra lo schema, tale software oltre ad ordinare correttamente le tracce dalle quali ricavare le singole IR, elabora le stesse suddividendole nel tempo, facendo la FFT con una opportuna overlapping desiderata, il cui valore deciderà la definizione temporale, e quindi in quanti frames avrà la rappresentazione grafica dinamica. Fatto questo si potrà scegliere una particolare banda di frequenza su cui fare la nostra analisi, e di seguito costruire la base grafica ove, infine, verrà plottato il diagramma polare del suono che circonda la posizione di indagine, sia in un particolare istante, sia lo sviluppo dinamico nel tempo.

Il fatto di avere indagini a 360° di Azimuth con 90° di Elevation permetterà di avere due polar: uno **orizzontale** sui 360° sulla Elevation che si desidera, l'altro **verticale**, da 0 a 180°, a sua volta con l'Azimuth desiderato, che si sviluppano nel tempo **perfettamente sincronizzati**.

Le figure che seguono mostrano un esempio di quanto sopra esposto.



*Fig. 3.26 – Frame a 56 msec*



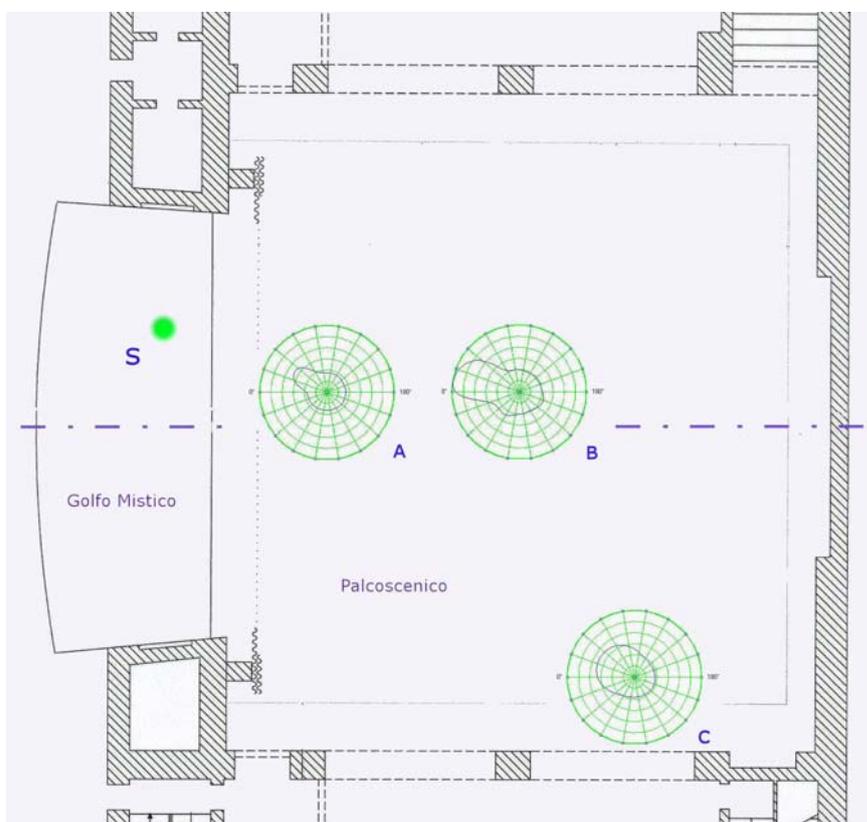
*Fig. 3.27 – Frame a 94 msec*

### 3.5 Alcuni risultati ottenuti tramite il software di visualizzazione dinamica

Il metodo ha messo in mostra diverse modalità di propagazione del suono proveniente dalla buca ed a suo tempo ha aiutato anche a capire la differenza fra la situazione naturale e quella che si aveva con l'aiuto di monitor sul palcoscenico che prendevano direttamente il suono da un microfono in buca, i così detti "riporti".

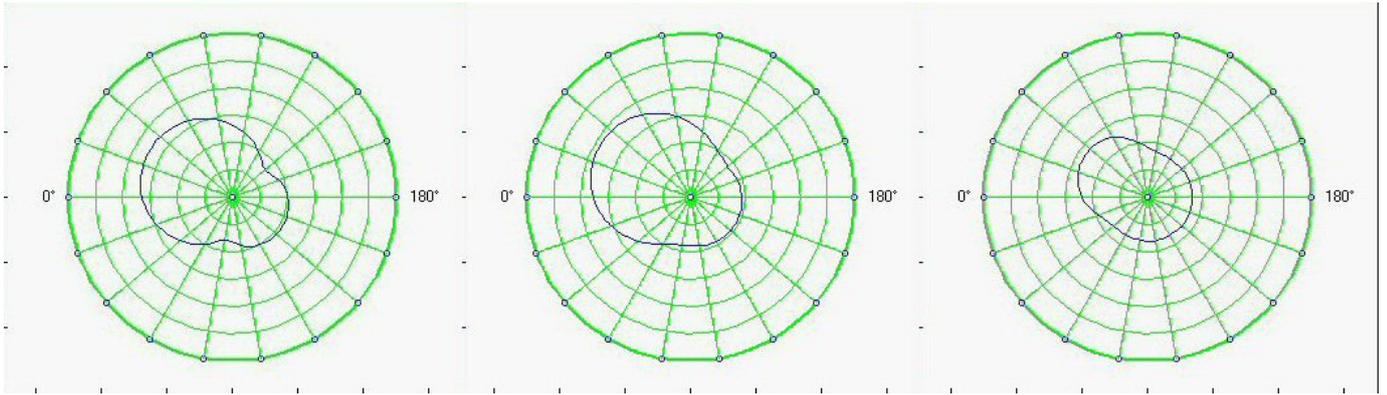
Riportiamo in questa sede solo un paio di esempi.

Come primo esempio prendiamo alcune riprese dal teatro Comunale di Modena e possiamo notare come la metodologia di analisi evidenzia la diversa evoluzione nel tempo di tre frequenze della stessa sorgente posta in buca nella posizione ed ascoltata dal cantante nella posizione A, così come indicato dalla figura sotto

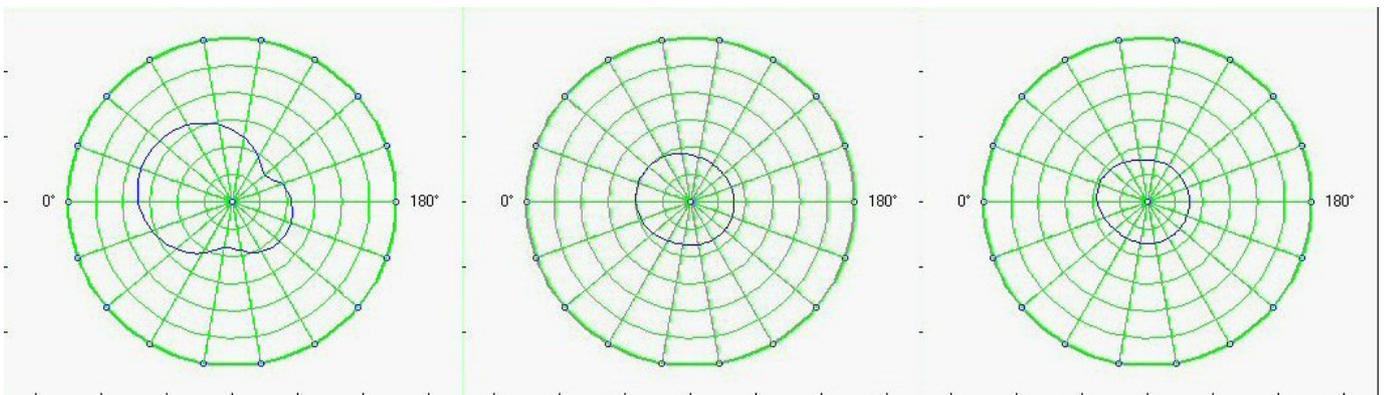


**Fig. 3.28** – Pianta del palcoscenico di Modena: Posizione di Sorgente e Ricevitori

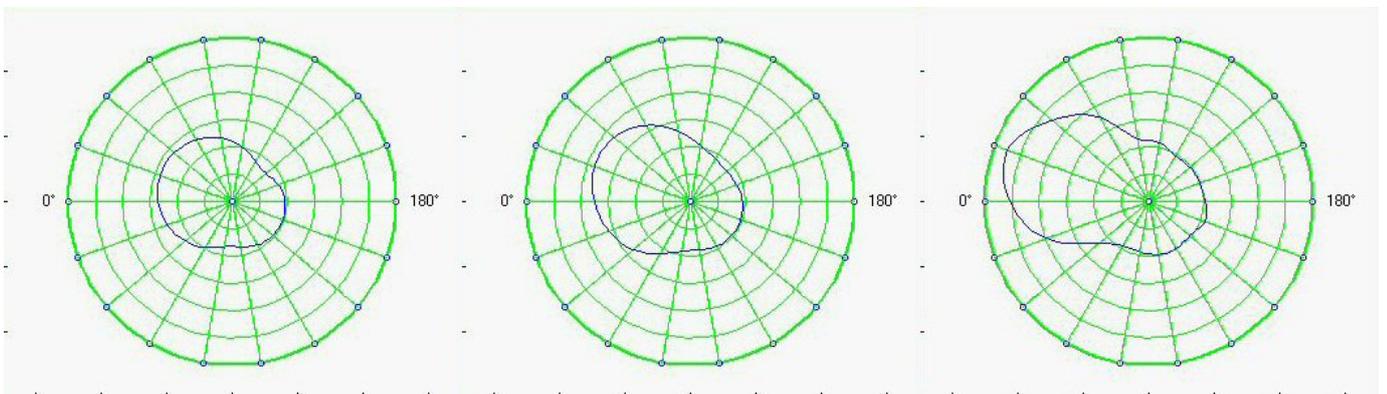
Visti in sequenza temporale dall'alto verso il basso vediamo qui sotto l'evoluzione diversa di tre componenti frequenziali (125 Hz, 1000Hz e 4000Hz) a 24 msec , 30 msec e 40 msec. Si può notare facilmente come il suono diretto (a 24 ms, sia ricco di basse frequenze a causa della diffrazione sul bordo della buca, e solo dopo 16 ms dal suono diretto arriva la prima riflessione ricca di alte frequenze, probabilmente portata dalla parete della buca antistante.



**Fig. 3.29** – Modena: PuntoA: 125Hz, 1000Hz, 4000Hz a 24msec

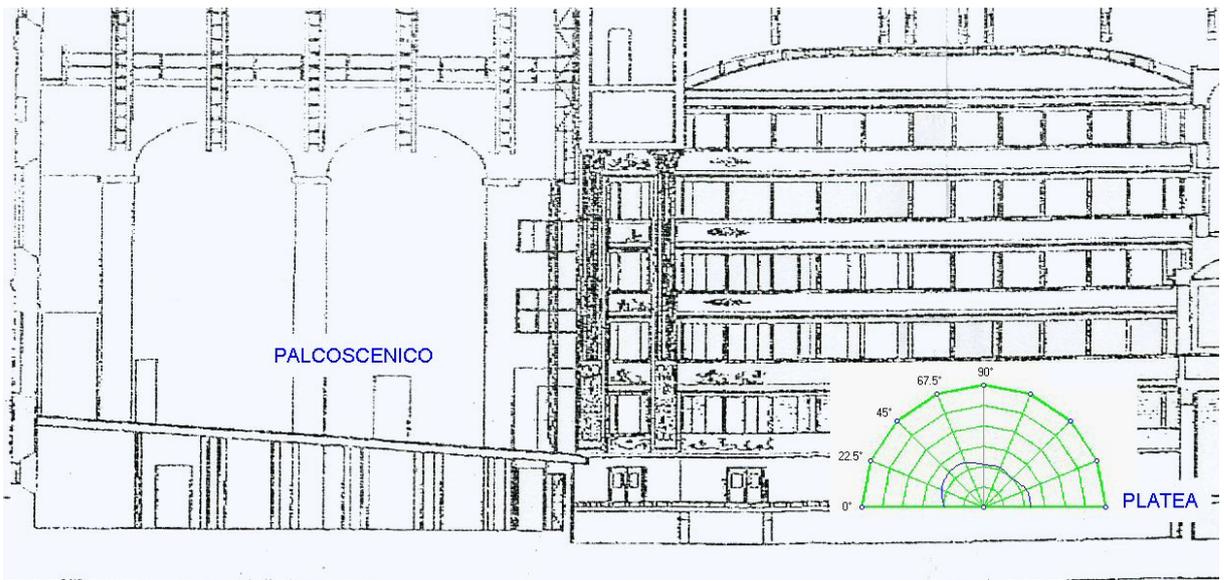


**Fig. 3.30** – Modena: PuntoA: 125Hz, 1000Hz, 4000Hz a 30msec

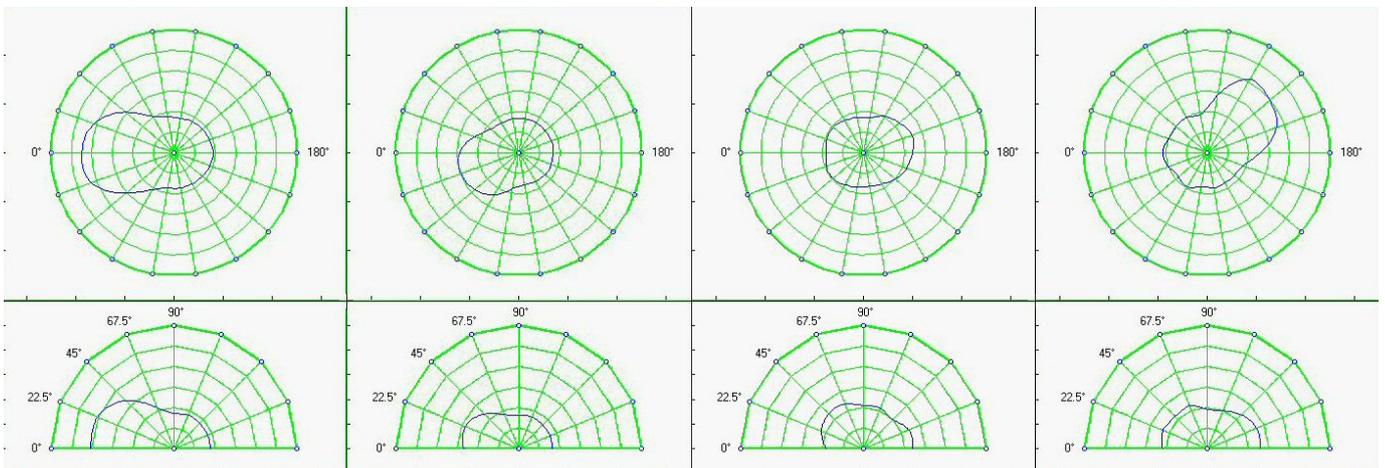


**Fig. 3.31** – Modena: PuntoA: 125Hz, 1000Hz, 4000Hz a 40msec

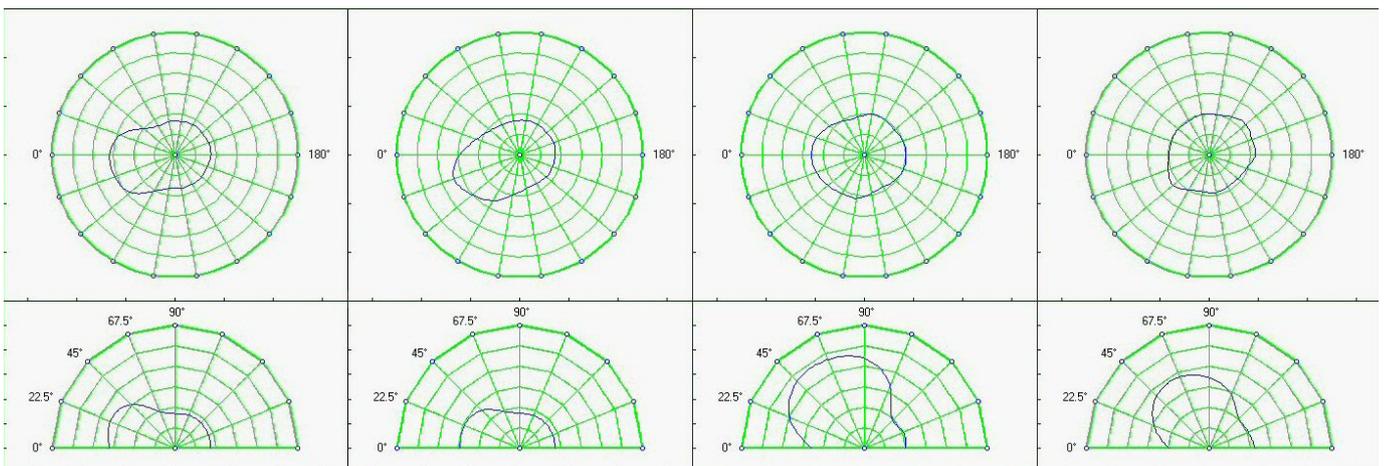
Come secondo esempio passiamo al Teatro Sociale di Como, e vediamo l'evoluzione del suono proveniente prima da una sorgente in palcoscenico e poi da una sorgente in buca, ma ascoltato, questa volta, da uno spettatore in platea. Dalle figure possiamo vedere l'evoluzione orizzontale e, contemporaneamente anche verticale del suono, in istanti successivi



**Fig. 3.31** – Teatro di Como, posizione del Ricevitore in platea



**Fig. 3.32** – Posto in Platea, sorgente in Palcoscenico, 4000Hz: 55msec, 67msec, 91msec, 94msec



**Fig. 3.33** – Posto in Platea, sorgente in Buca, 4000Hz: 46msec, 55msec, 102msec, 106msec

E' stato interessante visualizzare come il suono della buca arrivi al pubblico con un discreto ritardo dopo che la sua riflessione sull'arco scenico. Questo era l'effetto voluto da Richard Wagner, per il quale lui stesso seguì la costruzione del **teatro di Bayreuth**, sede principale delle sue opere, ove il pubblico non vede neppure l'orchestra il cui suono giunge ad esso solo dopo la riflessione sull'arco.

### 3.6 Pregi e limiti dell'Analisi tramite Shotgun rotante

Sicuramente come grande pregio vi è la definizione dell'indagine: si pensi che ben 73 microfoni sono distribuiti su una semisfera, il che implicherebbe facendo l'analisi su una superficie sferica completa ben 146 posizioni microfoniche.

L'aiuto del software ha reso possibile una visualizzazione completa dell'immagine acustica che essendo basata sulla pressione acustica, grandezza scalare, non presenta il problema del metodo vettoriale intensimetrico della configurazione Ambisonic. In questo caso, infatti potremo vedere contemporaneamente tutte le possibili sorgenti di suono che giungono al punto di ascolto, e non solamente un unico vettore risultante.

Altro vantaggio, dato dal fatto di usare un unico microfono, è che non è necessario apporre un filtro per correggere le diverse risposte ottenute. Nel caso di un array reale, multi-microfonico, infatti, è necessario, per lo meno, controllare che tutti i microfoni abbiano lo stesso comportamento cosa che non capita spesso, e di conseguenza correggere le varie differenze. Qui, invece, usando un microfono unico siamo sicuri dell'omogeneità delle caratteristiche sulle varie IR registrate.

I limiti principali sono sicuramente dati dal fatto di avere un unico microfono, anche se dotato di particolari caratteristiche di direttività. E questo implica una certa "scomodità" sotto vari aspetti.

Innanzitutto occorre una sorgente che ci assicuri sempre lo stesso determinato segnale e che lo ripeta perfettamente tante volte quante sono le posizioni puntate. Significa, quindi, anche che dovranno esserci sensibili cambiamenti ambientali durante le registrazioni.

Un secondo limite è dato dal tempo dalla registrazione in serie di ogni singola IR: considerando anche un tempo minimo di sweep di 15 secondi più altri 5 di silenzio durante i quali la tavola prende la nuova posizione, si ha un tempo di rilevamento totale di  $20 \times 74$  secondi, cioè di quasi mezz'ora, e sempreché tutto vada bene... il che non è certo cosa scontata: a volte è stato necessario ripetere l'intera sessione di misure. A questo, poi bisogna aggiungere il tempo di allestimenti di tavola e microfoni, con relativi cablaggi.

In ultimo: la necessità una sorgente di segnale deterministico, a causa della registrazione seriale, dovuta all'uso di un unico microfono, impedisce di poter acquisire registrazioni su eventi reali o particolarmente lunghi nel tempo, o di qualunque altro genere che non sia una risposta impulsiva.

Questo, naturalmente, sarà possibile solo mediante un array formato da più microfoni che lavorino in parallelo.

## 4 ARRAY MICROFONICI: LO STATO DELL'ARTE

### 4.1 Introduzione

Dopo la realizzazione dell'array "virtuale" con lo shotgun, prendiamo in considerazione gli array "reali", formati da più microfoni e vediamo prima di tutto quale è l'attuale stato dell'arte nell'attuale offerta del mercato.

Gli ultimi anni hanno visto il moltiplicarsi di case produttrici e di modelli, nel seguito per ragioni di spazio ne vengono citati solo alcuni, perché considerati particolarmente esemplificativi di una categoria o particolarmente interessanti. Hanno inoltre subito un notevole incremento anche le possibilità di impiego già a disposizione e gli ambiti di ricerca.

Ultimamente, ad esempio, sono in atto ricerche per quello che riguarda la possibilità di valersi di array microfonici per monitorare il traffico aereo in alternativa ai sistemi radar grazie ai vantaggi rappresentati da costi inferiori, assenza di emissioni, non rilevabilità dei sistemi, caratteristica utile per le applicazioni militari, anche se ci sono limitazioni quali il basso range (circa 10 km), la risoluzione (circa 100 m a 5 km con 512 microfoni) e la dipendenza dalle condizioni meteo.

Ma soprattutto, a fianco dell'ormai ben noto impiego di array per la valutazione dell'isolamento acustico di edifici, è molto intensa l'attività di ricerca relativa allo studio del rumore all'interno dei veicoli, dove il range di frequenze da tenere in considerazione è veramente molto ampio, a causa anche dei vari tipi di sollecitazione a cui un veicolo è normalmente sottoposto. Questo ha incrementato la diffusione degli array sferici, di cui saranno citati alcuni esemplari, e di conseguenza l'elaborazione di nuovi algoritmi come il beamforming sferico e il NAH (Near-field Acoustical Holography) sferico. In particolare da numerosi articoli è risultato che il primo può dare un'informazione corretta se il campo può essere considerato *quasi* campo libero, mentre il secondo è in grado di calcolare sia pressione sonora che velocità delle particelle vicino alla superficie sferica dell'array, sono informazioni ottenibili anche se il campo non può essere trattato come campo libero, ma la regione per il calcolo è limitata attorno alla superficie. Per chiudere questa parentesi si può dire che il Sp-NAH è applicabile per il problema delle basse frequenze in uno spazio piccolo e chiuso, ma è necessario tenere conto di come l'array sia composto da una sfera rigida, perciò possono verificarsi fenomeni quali riflessioni multiple o scattering tra la sfera stessa e la struttura

vibrante in analisi, fenomeni che possono essere osservati alle alte frequenze, dove le dimensioni dell'array risultano relativamente grandi se confrontate con la lunghezza d'onda.

Gli array presi in considerazione in questo capitolo sono divisi in due gruppi, corrispondenti ai due utilizzi di interesse in questa tesi: nel primo gruppo vengono presentati quelli adatti alla localizzazione delle sorgenti e alla mappatura acustica, la carrellata si chiude con un accenno alle sonde Microflown, le quali rappresentano una soluzione alternativa ai microfoni; il secondo gruppo di array, presentato nel sottocapitolo indicato con il titolo “array per microfonaione direttiva”, comprende alcuni esempi di sistemi per videoconferenze, un altro progetto dell'Università di Parma e per concludere, più che altro si tratta di una curiosità, il più grande array del mondo. I titoli delle varie sezioni corrispondono al nome delle ditte che commercializzano i prodotti.

## **4.2 Array per elaborazione di mappe di rumore**

### **4.2.1 Bruel & Kjaer**

La Bruel & Kjaer è l'unica ditta produttrice di array di microfoni che rilascia pubblica documentazione sugli algoritmi utilizzati. Il documento in questione è la Technical Review [1] ed è da questo che è stata attinta parte della teoria del Beam Forming presentata.

In particolare in questo documento la ditta dichiara di utilizzare fondamentalmente un beamforming con un particolare set di guadagni riportando lo studio con cui sono stati ricavati. Il BF da loro implementato elabora delle tracce preregistrate e per segnali non stazionari permette di creare il “film acustico”, ovvero una mappa acustica dinamica, sovrapponibile e sincronizzabile all'immagine dinamica di una telecamera.

Una dichiarazione importante di questo documento sul sistema array-software è che esso non dà mai in uscita livelli acustici assoluti. Ciò è legato al fatto che, a prescindere dalla precisione e calibrazione dei microfoni, non è possibile quantificare a priori il rumore spaziale in un punto della mappa, e di conseguenza non è possibile quantificare il livello assoluto dovuto ad una sorgente identificata. Non si parla nemmeno però di livelli relativi tra le sorgenti mappate, problema legato anche al set di guadagni utilizzato.

La B&K produce vari array dedicati a diverse applicazioni. Dopo una certa ricerca sulle disposizioni microfoniche, per trovare delle distribuzioni random ottimizzate, corrispondenti quindi alla minimizzazione dell'Array Pattern, il cosiddetto Wheel Array rappresenta la soluzione di compromesso tra la difficoltà che risiede nell'impostare i gradi di libertà della configurazione casuale, e quanto risulti difficoltosa a livello realizzativo la

struttura di sostegno che una disposizione troppo casuale richiede. Esso si compone di un numero dispari di line array inclinati di un angolo fisso rispetto ai raggi della ruota, ognuno dei quali ospita la stessa configurazione random, ottimizzata con l'array pattern. Il design meccanico dell'array è completamente modulare: tutti i raggi possono facilmente essere staccati dagli anelli di supporto, uno interno e uno esterno, che possono essere essi stessi deassemblati.



Figura 2.1 - A sinistra Wheel Array a 90 elementi e software PULSE™ associato. A destra la versione con 66 microfoni

La versione rappresentata in figura a sinistra è quella a 90 microfoni, 15 raggi identici da 6 microfoni, per un diametro totale di 2.43 m, non ha telecamera propria ma il software consente la sovrapposizione e l'allineamento di un'immagine visiva, catturata a parte, con quella acustica, individuando due punti noti comuni alle due immagini. Nella stessa figura a destra è mostrato un array più piccolo: ha 66 elementi con 11 raggi e diametro di circa 1 m, è munito di telecamera incorporata ed è più adatto ad acquisizioni in campo vicino, il diametro dell'array determina l'ampiezza del mainlobe e di conseguenza la risoluzione angolare.

Il pacchetto comprende anche il sistema hardware di acquisizione dedicato, PULSE, che offre particolari utilities di calibrazione multicanale e garantisce la sincronia tra i canali e l'alta qualità di conversione.

In Figura 2.2 si vede una mappa ricavata dall'array Wheel. Si nota che la “macchie colorate” compaiono solo in corrispondenza delle sorgenti, per cui l'algoritmo prevede la visualizzazione solo al di sopra una certa soglia non si sa se questa soglia sia manuale o automatica, in questo secondo caso dovrebbe prevedere una stima del rumore-spaziale medio.



Figura 2.2 - Esempio di mappa acustica

L'ultimo modello che si presenta per questa casa produttrice è un array sferico che presenta sulla superficie 12 videocamere ed è disponibile in due versioni, una con 36 e l'altra con 50 microfoni. I dati vengono acquisiti posizionando la sfera al centro dell'area di misurazione, l'algoritmo utilizzato è il beamforming sferico, una tecnologia che consente una mappatura omnidirezionale indipendentemente dall'ambiente acustico, in più è presente la funzione Conformal Mapping Optics.



Figura 2.3 - Spherical Beamformer

Per concludere la sezione dedicata a questa casa produttrice è opportuno menzionare lo studio di un algoritmo [ ] denominato SONAH (Statistically Optimal NAH), che consente di utilizzare la NAH utilizzata in combinazione con il Beamforming, conciliando così la capacità della prima di fornire mappe calibrate di intensità, pressione e velocità delle particelle vicino alla sorgente, ma a patto di avere una griglia di misurazione uniforme con spaziatura inferiore a metà della lunghezza d'onda che copra completamente la sorgente sonora, e le elevate prestazioni del secondo alle alte frequenze con disposizioni irregolari.

In particolare SONAH è usata per il calcolo dell'olografia e la scalatura dell'intensità sonora dell'uscita del BF, a partire da misure raccolte con un array disegnato ad hoc, il Sector Wheel Array, il quale mantiene la simmetria rotazionale del Wheel Array visto in precedenza ma è composto da settori identici contenenti 12 elementi ciascuno in un pattern irregolare ottimizzato per minimizzare il Maximum Sidelobe Level al posto dei line array. Ci si limiterà a questo accenno in quanto l'applicazione di questa tecnica [ ] prende le mosse da due misurazioni: la prima è svolta con la NAH ad una distanza di pochi centimetri e la seconda con il BF a circa sei decimi del diametro dell'array, di conseguenza si ha a che fare con spazi ampiamente inferiori a quelli con cui l'array oggetto di questa tesi è stato progettato per operare, si parla di distanze dell'ordine dei tre metri.

#### 4.2.2 GFal

È la casa di Berlino che ha prodotto Acoustic Camera, il primo array di microfoni per visualizzazione acustica comparso sul mercato. La GFal è esperta ed impegnata a livello di ricerca in molte branche della tecnologia multimediale e propone vari modelli di array, ognuno fornito di videocamera.

Il primo modello è il Ring Array, riportato in figura nella versione a 48 microfoni, si tratta di un sistema di misurazione disegnato per applicazioni in laboratori acustici, adatto ad acquisizioni in campo vicino, è disponibile nelle versioni con 32, 36, 48 e 72 microfoni, il materiale utilizzato per l'anello è fibra di carbonio.



Type	Ring 36	Ring 48
Size	Ø 0.35 m	Ø 0.75 m
Recommended measurement distance	0.4 m to 2 m	0.7 m to 5 m
Number of 1/4" electret pressure microphones	36	48
Maximum sound level	130 dB (standard)	130 dB (standard)
Recommended mapping frequency	1 kHz to 20 kHz (50 kHz)	400 Hz to 20 kHz

Altri due modelli compaiono nelle prossime due figure.

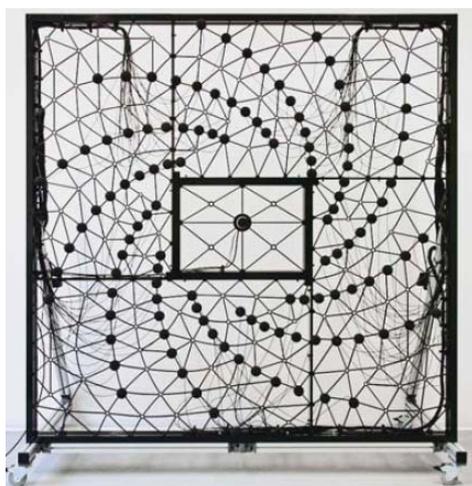
La prima ritrae lo Star Array: esso è costituito da tre raggi, la massima ampiezza di apertura è 3.40 m, ed è adatto per il campo lontano, cioè per lunghe distanze e basse frequenze. Il sistema può essere ripiegato, e poi riposizionato, velocemente, perciò è facilmente trasportabile. La struttura brevettata non planare garantisce la massima attenuazione per i segnali che arrivano da dietro, che è un requisito per misurazioni in ambienti non liberi da disturbi.



Type	Star 48
Size	Max span width 3.4 m
Recommended measurement distance	3 m to 300 m
Number of 1/4" electret pressure microphones	48
Maximum sound level	130 dB (standard)
Recommended mapping frequency	100 Hz to 7 kHz (>6dB)

Figura xx - A sinistra uno Star Array a 48 microfoni, a destra la tabella relativa

Sotto si può osservare lo Spiral Array che è stato sviluppato per misure di oggetti larghi e applicazioni speciali, come ad esempio la galleria del vento, dà un eccellente range acustico dinamico.



Type	Spiral 120
Size	2 x 2 m
Recommended measurement distance	3 m to 150 m
Number of 1/4" electret pressure microphones	120
Maximum sound level	130 dB (standard)
Recommended mapping frequency	200 Hz to 20 kHz

Figura 2.6 - Uno Spiral array con 120 elementi e relativa tabella

Pensati per ambienti chiusi, dove il suono è in genere più o meno diffuso per cui serve una risoluzione buona su tutto l'angolo solido, sono invece gli Sphere Arrays adatti per misurazioni su tutto lo spazio attorno, sono costruiti per spazi molto ristretti, anche interni di veicoli, e alte frequenze. La struttura è in fibra di carbonio e garantisce la massima trasparenza acustica, inoltre il design minimizza gli effetti dell'aliasing e le riflessioni.



Type	Sphere 48	Sphere 120
Size	Ø 0.35 m	Ø 0.6 m
Recommended measurement distance	0.3 m to 1.5 m (longer distances possible for frequencies >3kHz)	0.3 m to 1.5 m (longer distances possible for frequencies >3kHz)
Number of 1/4" electret pressure microphones	48	120
Maximum sound level	130 dB (standard)	130 dB (standard)
Recommended mapping frequency	1 kHz to 10 kHz	600 Hz to 10 kHz

Figura 2.7 - A sinistra uno Sphere Array a 48 elementi e a fianco la tabella con il confronto tra la versione a 48 microfoni e quella a 120

Non vi è nessuna descrizione degli algoritmi utilizzati, si accenna solo vagamente al beamforming.

Un'altra opzione offerta è infine quella dei microfoni configurabili liberamente, sotto un esempio a 24 elementi, nel sito è presentato come il risultato dell'integrazione tra hardware per il beamforming della GfaI e software per NAH (Nearfield Acoustic Holography) di SenSound (USA).



Figura 2.8 - Free configurable 24 channel microphone bundle (10 Hz – 10 kHz)

Anche Acoustic Camera plotta i colori solo in corrispondenza delle sorgenti, per cui è in grado di reiettare nella visualizzazione i lobi laterali di diffrazione ed aliasing: non si sa se

ciò sia fatto solo considerando una soglia di rumore e plottando i contributi ad essa superiori, o utilizzando degli algoritmi di processamento dell'immagine più evoluti, da non escludere viste le competenze della casa madre. Anche AC lavora in post-processing, ma permette anche un'”anteprima” real-time, che come tale lavora probabilmente con un algoritmo semplificato da una risoluzione di schermo limitata.

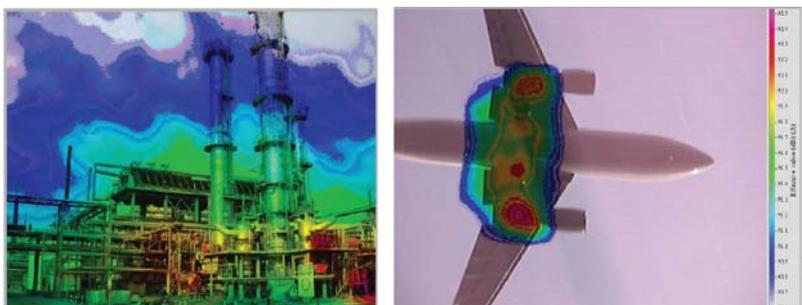


Figura 2.9 - Esempi di mappature acustiche con Acoustic Camera

#### 4.2.3 Nittobo

Si mostra qui qualche immagine relativa a Noise Vision l'array prodotto dalla giapponese Nittobo. Il sistema consiste in un trasduttore sferico dotato di 31 microfoni e 12 telecamere, per un peso totale di circa 12 kilogrammi, e un notebook con software, consente di ricavare la mappa acustica in ogni direzione in riferimento al trasduttore sferico. La rappresentazione delle mappe del rumore possono essere sia in forma statica per l'analisi dei fenomeni stazionari, sia in forma 'animata' per l'analisi dei fenomeni di sorgenti non-stazionarie o in movimento, l'intervallo di frequenze dichiarato per l'utilizzo è 200Hz ~ 5.000 Hz .

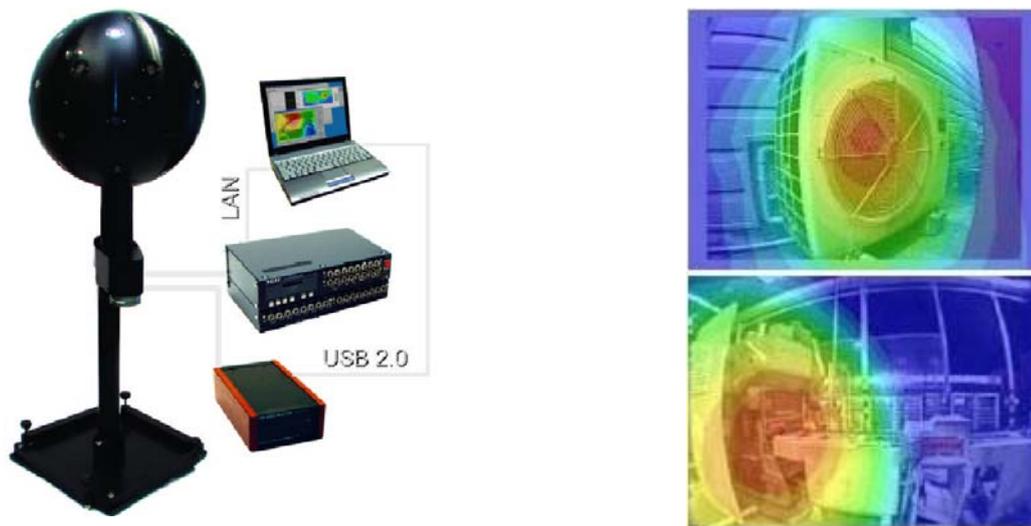


Figura 2.10 - A sinistra il sistema “Noise Vision”, sulla destra due mappe ottenute con esso

La casa produttrice non rilascia documentazione tecnica specifica, solo informazioni molto generiche; sotto una figura che riproduce due mappe ottenute con il sistema.

#### 4.2.4 Microflow

**Per completezza si accenna ad una soluzione alternativa ai microfoni costituita dalle sonde Microflow. Si tratta di** sensori di “flusso di massa”, basati su tecnologia MEMS, che grazie alla misura della differenza di temperatura nella sezione d’urto di due fili di platino molto sottili e collocati in parallelo sono in grado di rilevare il movimento delle particelle di aria, possono misurare direttamente la velocità dell’aria, assieme alla pressione sonora, senza per questo dover applicare algoritmi matematici. Tutto ciò ne consente l’utilizzo in array per la mappatura, in tempo reale e con alta risoluzione geometrica, del campo acustico, alcuni tipi sono mostrati in figura.

A differenza di beamforming e olografia la dimensione della griglia della matrice non è legata al campo di frequenze in cui il sistema lavora. La risoluzione della misura dipende solo dalla dimensione della griglia scelta; è possibile utilizzare la tecnica di zoom per aumentare la risoluzione a parità di numero di sonde disponibili.

Sul sito inoltre si dichiara che può essere utilizzata in ambienti come l’abitacolo di un veicolo, consente l’esecuzione di misure anche su piccoli oggetti in campo molto vicino ed in ambiente non necessariamente anecoico e il rumore di fondo, le riflessioni sonore o altre perturbazioni acustiche non influenzano in modo significativo le misure e tra le possibilità di

impiego annovera determinazione non distruttiva ed “in situ” delle proprietà acustiche dei materiali, misure di vibrazioni senza contatto / analisi modale, sorveglianza acustica di obiettivi strategici, prove di tenuta in ambienti e su contenitori pressurizzati.

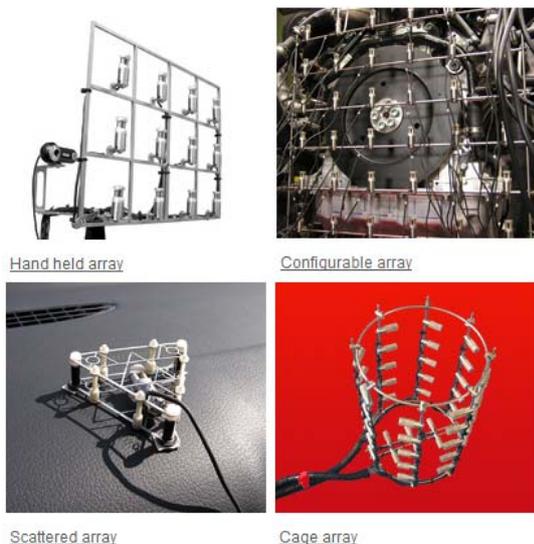


Figura 2.11 – Alcuni esempi di array con sonde Microflown

## 4.3 Microfonazione direttiva

### 4.3.1 Acoustic Magic

Il Voice Tracker™ Array Microphone di Acoustic Magic contiene un array di 8 elementi e non presenta parti in movimento. Presenta una struttura robusta con un peso ridotto ed è di facile utilizzo, non è richiesto di caricare nessun software e il suo funzionamento non pesa sulla capacità del computer, inoltre è compatibile con svariati sistemi operativi. Le dimensioni dell'array sono 45.72 cm di larghezza, 6.35 di altezza, un esemplare è riportato nella foto di seguito si notano i cinque indicatori per la posizione dell'oratore scelto e la sufficienza del segnale.



Fig 2.12 - Il Voice Tracker™ Array Microphone

Nella scheda del prodotto si asserisce che localizza automaticamente il parlante attivo e orienta elettronicamente il “fascio di ascolto” su 360° spostandosi da un oratore al vicino in un tempo dell'ordine dei millisecondi, l'utente è inoltre libero di girarsi e anche di muoversi. Il range effettivo dichiarato è di circa 9 m per la registrazione di conferenze e di qualche metro per il riconoscimento automatico del discorso mentre la risposta in frequenza va da 100 Hz a 11.250 kHz.

Oltre a focalizzare sul parlante l'array effettua un filtraggio spaziale sul rumore proveniente dalle altre direzioni, ma non ci sono spiegazioni su come venga attuato. L'accento viene posto, poi, sull'utilizzo di algoritmi proprietari di riduzione del rumore che filtrano il rumore di sottofondo e il riverbero presenti nell'ambiente, in particolare si parla, sempre senza spiegazioni, di LSD<sup>TM</sup> (Location Dependent Squelch), il quale desensibilizza i microfoni da suoni provenienti da direzioni preselezionate.

### 4.3.2 Yamaha

Un modello rappresentativo e adatto per grandi ambienti è il PJP-100UH(s) Conference Microphone Speaker, nella figura è riportata una foto da diverse angolazioni.



Figura 2.13 - Un PJP-100UH(s)

Il nome sta per Projectphone: si tratta di un sistema per videoconferenze con 32 microfoni e 12 altoparlanti, che viene connesso al PC tramite USB, è idoneo per approssimativamente otto partecipanti, quattro per ognuno dei due lati sui quali sono presenti i microfoni. I due array di 16 microfoni determinano automaticamente le locazioni delle sorgenti sonore analizzando i ritardi del segnale nel raggiungere i vari microfoni, ma volendo si possono specificare le direzioni da escludere a priori in modo da eliminare fonti di rumore già note, quali ad esempio sistemi di ventilazione o altro. Anche per questo prodotto non si fa menzione degli algoritmi utilizzati, si parla della presenza un sistema automatico di cancellazione dell'eco che aggiusta i coefficienti del filtro in accordo con l'ambiente.

Gli altoparlanti riproducono le voci in modo chiaro ad un volume sufficientemente elevato anche per ampie sale, inoltre c'è la possibilità (divide mode) di riprodurre voci diverse con diversi altoparlanti in accordo con la posizione degli oratori, cosa che può renderne più agevole l'identificazione della locazione.

Per ottenere anche il video si può collegare PJP-100UH con PJP-CAM1 attraverso il PC, essa sceglie e delimita l'immagine dell'area da cui proviene la voce.

### 4.3.3 mh acoustics

L'array microfonico Eigenmike™ EM32 prodotto da questa società americana e mostrato in figura è attualmente al centro di un progetto che vede la collaborazione dell'Università di Parma con il Centro Ricerche RAI di Torino.



Figura 2.14 - Il modello Eigenmike™ EM32

Il microfono è costituito da una sfera di alluminio anodizzato con raggio di 42 mm sulla cui superficie sono disposte in modo relativamente uniforme 32 capsule di tipo “electred” di elevata qualità. All’interno della sfera trova posto l’intera circuiteria analogica di preamplificazione con guadagno controllabile via software, nonché i convertitori analogico digitali in grado di campionare i segnali delle capsule con risoluzione fino a 24 bit e frequenza di campionamento di 48000 Hz. I segnali vengono quindi trasferiti all’interfaccia EMIB mediante un collegamento digitale (cablaggio CAT-6) garantendo immunità ai disturbi anche per lunghe distanze tra sonda e scheda audio (fino a 140m).

Il risultato della collaborazione è un sistema che consente di avere direttività modificabile in tempo reale creando uno zoom acustico, puntamento a 360° mediante interfaccia che permette la visualizzazione di un flusso video o di una foto panoramica e creazione di 7 microfoni ad elevata direttività, nello specifico si parla di cardioidi del 6° ordine.

### 4.3.4 SquareHead Technology



Figura 2.15 - Il sistema Audioscope: a sinistra una parte dell'array e a destra un Control Station

AudioScope rappresenta un esempio su vasta scala di ciò che si può realizzare con l'array planare. E' un sistema audio stand-alone disegnato per sport e spettacoli di intrattenimento live composto essenzialmente di tre parti. La prima è un array fortemente direttivo costituito da un disco in carbonio, quindi molto leggero, di 2 m di diametro in cui sono disposti in modo regolare 315 microfoni e con al centro una videocamera, questo viene posto al di sopra dell'area da riprendere ed è in grado di coprire una superficie delle dimensioni di un campo da basket.

Attraverso un'unità di connessione l'array comunica con una o più stazioni di controllo, da dove l'operatore gestisce il sistema semplicemente muovendo il cursore sull'immagine riprodotta sul monitor: in particolare una trackball consente di seguire le sorgenti in movimento e tramite una manopola è possibile riavvolgere la registrazione per i replay, il sistema permette di selezionare cinque sorgenti audio contemporaneamente.

### 4.3.5 L'array LOUD

LOUD (Large acOustic Data) è attualmente il più grande array microfonico al mondo (Guinness World Record). Si tratta di un array microfonico modulare e beamformer a 1020 nodi costruito dal MIT (Massachusetts Institute of Technology), che genera 400 *Mbit/sec* e che usa *Raw*, un'architettura specificamente disegnata per maneggiare un grande flusso di dati: è in grado di implementare un algoritmo di delay-and-sum beamforming acustico in real-time su tutti i 1020 flussi simultanei di dati dell'array.



Figura 2.16 - L'array LOUD

La struttura è composta da 510 PCB (Printed Circuit Board), ciascuna contenente due microfoni a condensatore e un convertitore analogico-digitale che campiona a 16 kHz. Le PCB sono connesse in catene di 16, per un totale di 32 microfoni, 8 catene sono collegate ad una piastra, nella realizzazione in esame dell'array di queste ce ne sono 4, per un totale di 1024 microfoni. Per gestire il flusso di dati attraverso le catene si usa la time-division multiplexing.

Le prove effettuate su questo array hanno dato come risultato un rapporto segnale-rumore di 30.9 dB contro i 35.0 dB ottenuti con microfono vicino al parlante.

## 5 ANALISI MEDIANTE ARRAY SFERICI ULTRADIRETTIVI

### 5.1 Array di microfoni avanzati

Gli array microfonici avanzati utilizzano numerose capsule microfoniche, generalmente omnidirezionali o cardioidi, organizzate nello spazio secondo differenti topologie, con lo scopo di raccogliere più informazione sul campo sonoro di quella disponibile ad un singolo trasduttore. I segnali delle capsule non sono quindi significativi singolarmente ma devono essere combinati mediante un opportuno sistema di elaborazione che rappresenti l'informazione secondo una specifica codifica di uscita.

#### 5.1.1 Sistema di elaborazione

Il sistema di elaborazione è una componente fondamentale dell'array microfonico e viene implementato quasi esclusivamente mediante processori digitali dedicati o sistemi basati su personal computer. Solo nei casi più semplici, in passato, sono stati realizzati sistemi basati su circuiti analogici.

Indipendentemente dalla tecnologia con cui tale sistema è implementato e dalla codifica di uscita scelta, i segnali generati sono sempre esprimibili come sommatoria delle capsule microfoniche trattati con filtri opportuni:

$$y_v(t) = \sum_{m=1}^M x_m(t) * h_{m,v}(t)$$

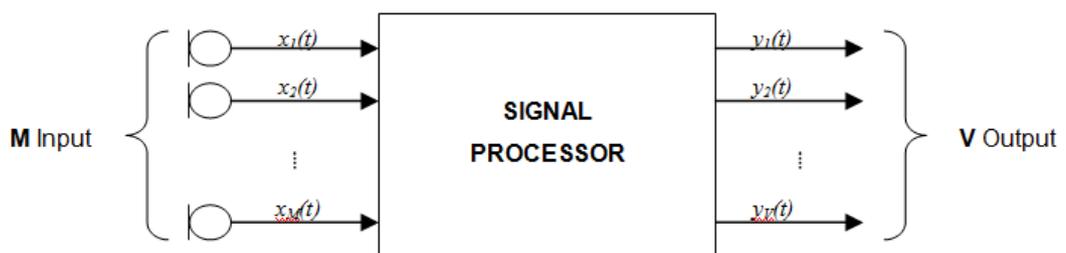


Fig. 5.1 - Schema del sistema di elaborazione

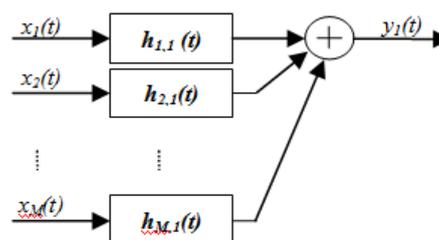


Fig. 5.2 - Schema di un singolo canale di uscita del sistema di elaborazione

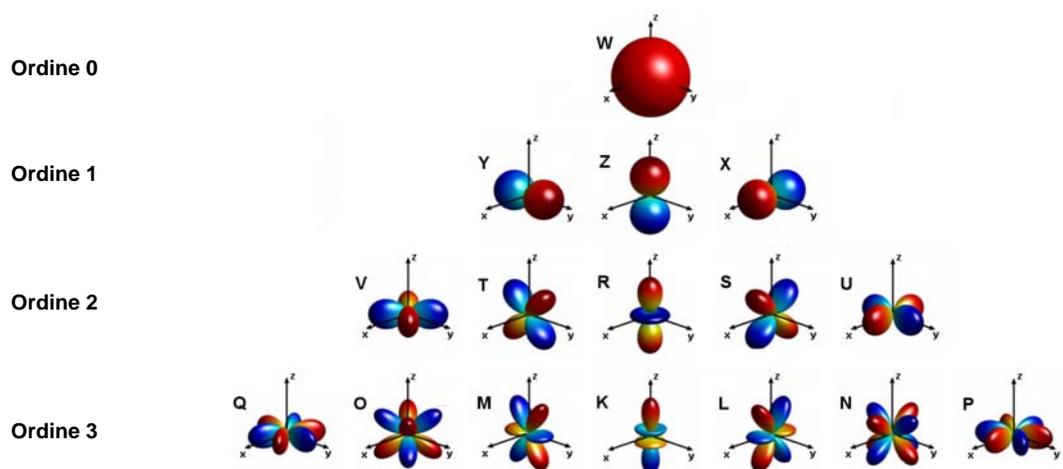
La complessità della teoria degli array microfonici avanzati non è quindi nell'elaborazione del segnale, che si riduce a semplici operazioni di filtraggio facilmente implementabili con tecniche numeriche, ma nella determinazione dei coefficienti dei filtri necessari per la generazione dei segnali di uscita secondo la codifica richiesta.

### 5.1.2 Codifica di uscita

Per rappresentare adeguatamente l'informazione acquisita dagli array microfonici avanzati, in particolare tetraedrici e sferici, è stata sviluppata la codifica Ambisonic che scompone il campo sonoro tridimensionale in armoniche sferiche, fornendone una rappresentazione indipendente dall'array microfonico utilizzato.

Ogni array microfonico è in grado, in funzione del numero di microfoni di cui è composto e della sua geometria, di acquisire l'informazione del campo sonoro necessaria a generare la serie di segnali Ambisonic troncata ad un determinato ordine.

Vengono qui di seguito riportati i diagrammi polari e le espressioni analitiche in coordinate sferiche della direttività delle armoniche Ambisonic fino al 3° ordine utilizzate nella tesi. Tuttavia esistono definizioni alternative che utilizzano differenti coefficienti di peso.



*Fig. 5.3 - Direttività delle armoniche Ambisonic fino al 3° ordine*

$$W(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{1}{2}}$$

$$Z(\vartheta, \varphi) = \sin(\varphi);$$

$$X(\vartheta, \varphi) = \cos(\vartheta) \cdot \cos(\varphi)$$

$$Y(\vartheta, \varphi) = \sin(\vartheta) \cdot \cos(\varphi)$$

$$R(\vartheta, \varphi) = 1,5 \cdot \sin(\varphi)^2 - 0,5$$

$$S(\vartheta, \varphi) = \cos(\vartheta) \cdot \sin(2\varphi)$$

$$T(\vartheta, \varphi) = \sin(\vartheta) \cdot \sin(2\varphi)$$

$$U(\vartheta, \varphi) = \cos(2\vartheta) \cdot \cos(\varphi)^2$$

$$V(\vartheta, \varphi) = \sin(2\vartheta) \cdot \cos(\varphi)^2$$

$$K(\vartheta, \varphi) = \sin(\varphi) \cdot \frac{5 \cdot \sin(\varphi)^2 - 3}{2}$$

$$L(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{135}{256}} \cdot \cos(\vartheta) \cdot \cos(\varphi) \cdot (5 \cdot \sin(\varphi)^2 - 1)$$

$$M(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{135}{256}} \cdot \sin(\vartheta) \cdot \cos(\varphi) \cdot (5 \cdot \sin(\varphi)^2 - 1)$$

$$N(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{27}{4}} \cdot \cos(2\vartheta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi)^2$$

$$O(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{27}{4}} \cdot \sin(2\vartheta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi)^2$$

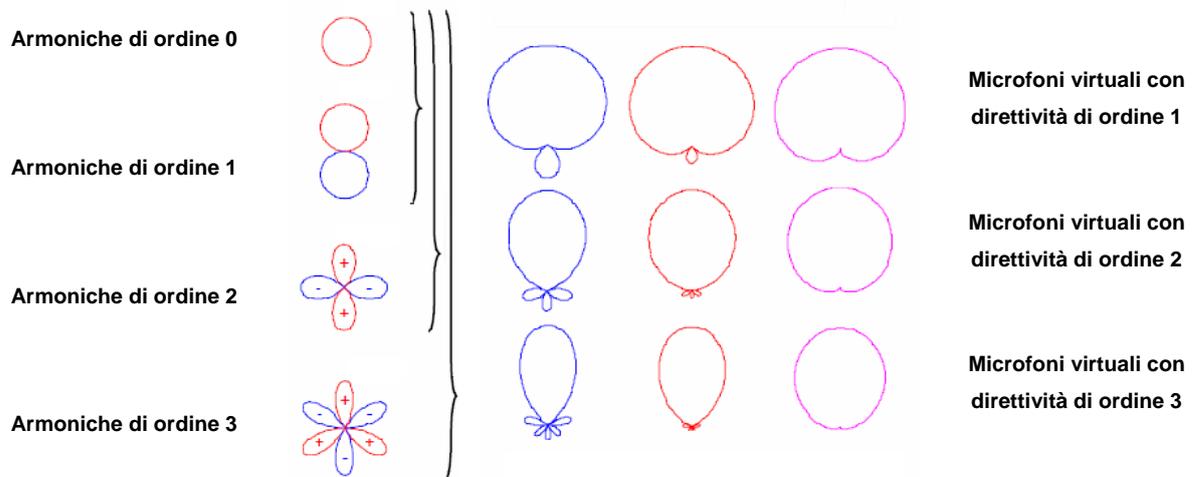
$$P(\vartheta, \varphi) = \cos(3\vartheta) \cdot \cos(\varphi)^3$$

$$Q(\vartheta, \varphi) = \sin(3\vartheta) \cdot \cos(\varphi)^3$$

**Fig. 5.4** - Espressioni in coordinate sferiche delle armoniche

Combinando tra loro un set di segnali codificati in formato Ambisonic (“B-Format”), attraverso un opportuno decoder che opera un semplice mixaggio, è possibile ricreare un segnale equivalente a quello che avrebbe registrato un microfono con orientazione arbitraria e direttività di ordine massimo pari all’ordine di troncamento del set di armoniche utilizzato: quindi un microfono virtuale.

Sono disponibili decoder Ambisonic analogici in grado di elaborare le armoniche del primo ordine, ma esistono anche decoder in grado di elaborare armoniche fino al terzo ordine sotto forma di plugin VST.



**Fig. 5.5** - Esempio di decodifica Ambisonic

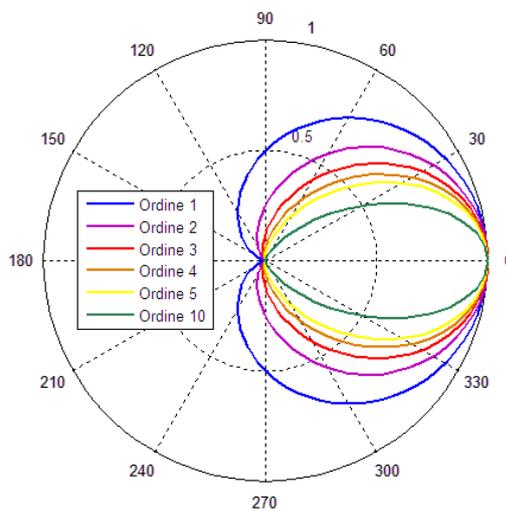
Poiché comunque dai segnali acquisiti da un array microfonico avanzato, nella maggior parte dei casi, si vogliono estrarre i segnali di un determinato set di microfoni virtuali, può risultare conveniente evitare la codifica e successiva decodifica Ambisonic, definendo direttamente le uscite del sistema di elaborazione come una serie di segnali monofonici corrispondenti ad un set di microfoni virtuali con orientazione e direttività fissate.

La direttività di un microfono virtuale di ordine  $h$  è descritta, in coordinate sferiche, dall'espressione:

$$D_H(\vartheta, \varphi, h) = \text{sign}(D_F(\vartheta, \varphi)) \cdot |D_F(\vartheta, \varphi)|^h$$

dove  $D_F(\vartheta, \varphi)$  è la direttività del microfono di primo ordine:

$$D_F(\vartheta, \varphi) = P + G \cdot \cos(\vartheta) \cdot \cos(\varphi)$$

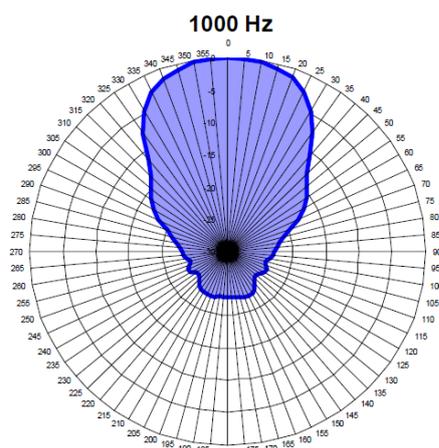
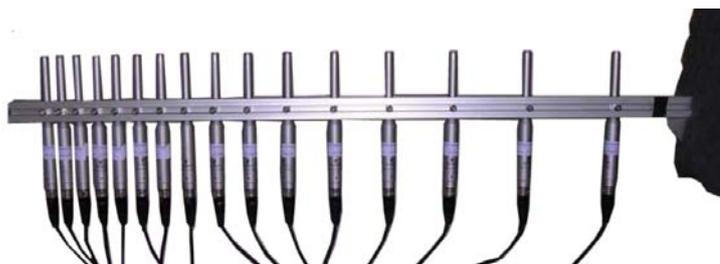


**Fig. 5.6** - Diagramma polare di un microfono virtuale cardioide al variare dell'ordine

## 5.1.3 Differenti topologie di array

### 5.1.3.1\_ Array Lineari

Negli ultimi anni sono quindi stati sviluppati e testati dal gruppo di Acustica dell'Università di Parma diverse topologie di array con elevato numero di canali, ognuna delle quali presenta particolari caratteristiche che la rendono adatta ad impieghi specifici.



*Fig. 5.7 - Array lineare esponenziale a 16 canali*

L'array lineare a spaziatura esponenziale, costituito da capsule microfoniche omnidirezionali, permette di ottenere elevate focalizzazioni della direttività in direzione assiale, mediante semplici algoritmi di beamforming o metodi numerici basati sull'inversione della risposta all'impulso dei microfoni, misurata nella direzione per la quale si desidera massimizzare la direttività. La distribuzione lineare delle capsule produce, però, una risoluzione angolare dell'array non uniforme che non consente quindi di ottenere una ricostruzione precisa del campo sonoro tridimensionale. Pertanto dall'elaborazione dei segnali di questo array microfonico si estrae un singolo segnale equivalente ad un unico microfono iperdirettivo.

### 5.1.3.2\_ Array Planari

L'array planare randomizzato è costituito da capsule microfoniche omnidirezionali, applicate sulla superficie di un pannello fonoassorbente.



*Fig. 5.8 - Array planare randomizzato a 24 canali "Acoustic Camera"*

Mediante semplici tecniche di beamforming consente di ottenere focalizzazioni della direttività su una griglia rettangolare di punti disposti frontalmente rispetto al pannello. E' possibile calcolare l'energia proveniente da ogni direzione creando una mappa acustica che può essere sovrapposta all'immagine ripresa da una telecamera posta al centro dell'array, realizzando così una "Acoustic Camera"

### 5.1.3.3\_ Array Sferici

Gli array sferici sono i più versatili poiché, grazie alla disposizione sferica delle capsule, sono sensibili in ugual modo alle onde sonore provenienti da ogni direzione. L'informazione acquisita permette un'accurata ricostruzione del campo sonoro tridimensionale in una porzione di spazio la cui ampiezza dipende dal numero delle capsule che compongono l'array e la sintesi di direttività maggiori del primo ordine. Queste caratteristiche li rendono i più adatti per applicazioni di ripresa musicale surround.



*Fig. 5.9 - Array sferico a 32 canali*

Un aspetto negativo è rappresentato dall'elevata complessità della teoria matematica alla base dell'elaborazione dei segnali di questo tipo di array.

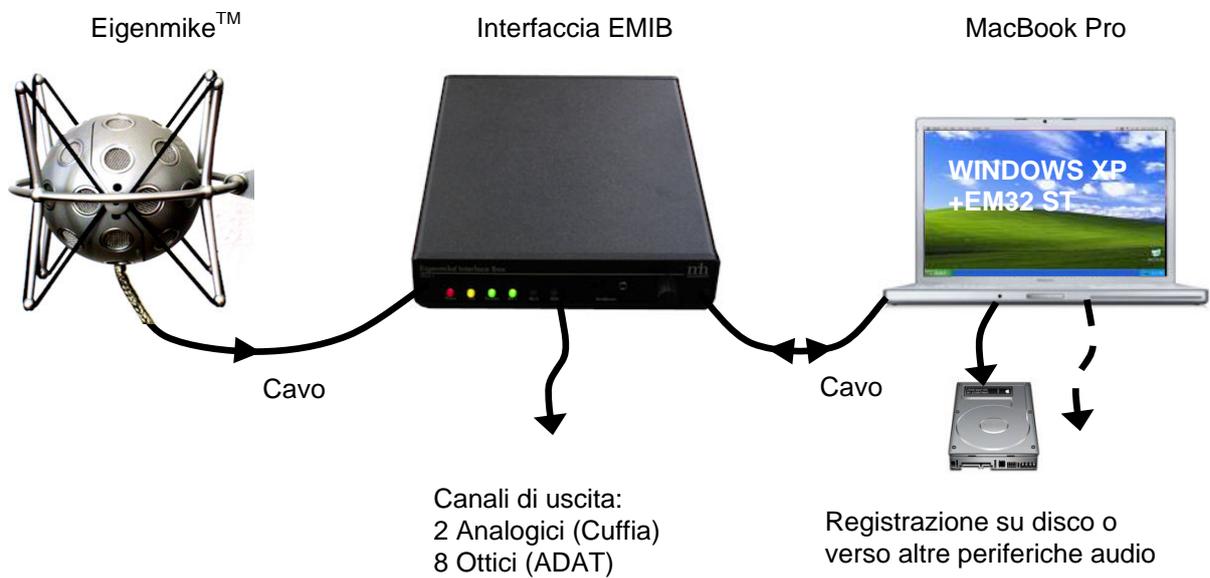
Sopra è riportata l'immagine del prototipo dell'array sferico a 32 capsule in schiuma di poliuretano realizzato presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale di Parma nel 2009

## 5.2 L'array sferico EIGENMIKE™ EM32

L'array microfonico su cui sono state condotte le sperimentazioni, fornito all'Università di Parma dal Centro Ricerche RAI di Torino nell'ambito di un progetto di collaborazione, viene prodotto dalla società americana "mh Acoustic" ([www.mhacoustics.com](http://www.mhacoustics.com)) ed è probabilmente il primo sistema di questo tipo ad essere commercializzato.

### 5.2.1 I componenti del sistema

Il seguente schema mostra tutte le componenti del sistema fornite dalla casa costruttrice e le loro interconnessioni:

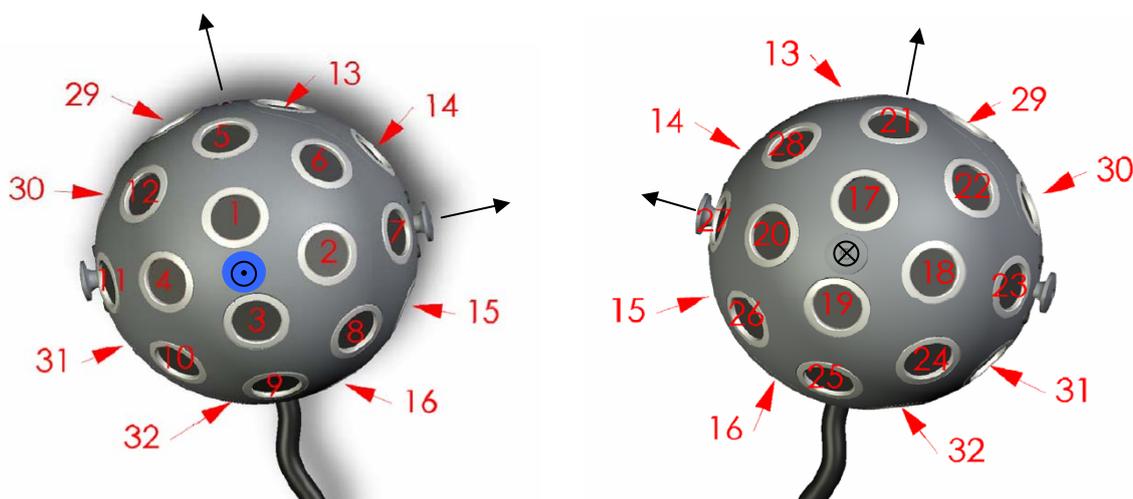


*Fig. 5.10 - Componenti e connessioni del sistema Eigenmike™ EM32*

## 5.2.2 Il microfono sferico

Il microfono è costituito da una sfera di alluminio anodizzato con raggio di 42 mm sulla cui superficie sono disposte in modo relativamente uniforme 32 capsule di tipo “electred” di elevata qualità. All’interno della sfera trova posto l’intera circuiteria analogica di preamplificazione con guadagno controllabile via software, nonché i convertitori analogico digitali in grado di campionare i segnali delle capsule con risoluzione fino a 24 bit e frequenza di campionamento di 44100 Hz. I segnali vengono quindi trasferiti all’interfaccia EMIB mediante un collegamento digitale garantendo totale immunità ai disturbi.

Lo schema seguente mostra la disposizione e la numerazione delle capsule sulla superficie della sfera, permettendo inoltre di identificare l’orientamento degli assi del sistema di riferimento del microfono.



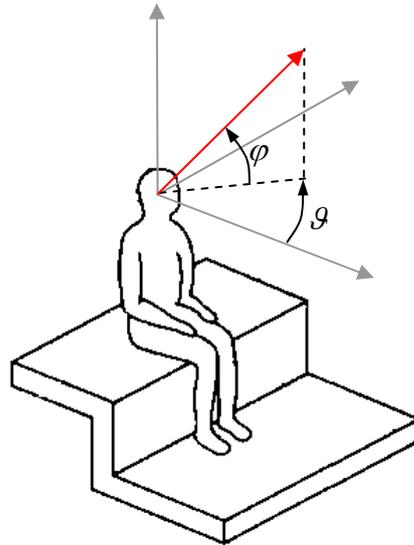
*Fig. 5.11 - Disposizione delle capsule del microfono Eigenmike™ EM32*

Vengono ora riportate le direzioni delle capsule microfoniche espresse in coordinate sferiche rispetto al sistema di riferimento antropometrico conforme alla norma ISO2631 mostrato nella figura seguente.

(Dal datasheet del microfono non è ben chiaro che sistema di coordinate venga utilizzato dal costruttore e talora c’è ambiguità nella direzione degli assi. I valori qui riportati, ottenuti da quelli forniti nel datasheet mediante opportune rotazioni degli assi per adattarli al sistema di riferimento illustrato, sono stati verificati sperimentalmente e risultano esatti.)

Mic #	$\vartheta$ [rad]	$\varphi$ [rad]	$\vartheta$ [°]	$\varphi$ [°]
1	0,000	0,367	0	21
2	0,559	0,000	32	0
3	0,000	-0,367	0	-21
4	5,725	0,000	328	0
5	0,000	1,012	0	58
6	0,785	0,611	45	35
7	1,204	0,000	69	0
8	0,785	-0,611	45	-35
9	0,000	-1,012	0	-58
10	5,498	-0,611	315	-35
11	5,079	0,000	291	0
12	5,498	0,611	315	35
13	1,588	1,204	91	69
14	1,571	0,559	90	32
15	1,571	-0,541	90	-31
16	1,553	-1,204	89	-69
17	3,142	0,367	180	21
18	3,700	0,000	212	0
19	3,142	-0,367	180	-21
20	2,583	0,000	148	0
21	3,142	1,012	180	58
22	3,927	0,611	225	35
23	4,346	0,000	249	0
24	3,927	-0,611	225	-35
25	3,142	-1,012	180	-58
26	2,356	-0,611	135	-35
27	1,937	0,000	111	0
28	2,356	0,611	135	35
29	4,695	1,204	269	69
30	4,712	0,559	270	32
31	4,712	-0,559	270	-32
32	4,730	-1,204	271	-69

*Fig. 5.12 - Direzioni delle capsule in coordinate sferiche*



**Fig. 5.13-** Riferimento antropometrico cartesiano e sferico (ISO2631)

Sfruttando le relazioni emerse dalla teoria degli array microfonicici calcoliamo i limiti teorici del microfono Eigenmike™.

La massima frequenza operativa è in prima approssimazione determinata dalla frequenza a cui insorge l'aliasing, funzione a sua volta del raggio della sfera e dell'angolo tra le capsule microfoniche. Osservando la disposizione delle capsule è possibile concludere che vi sono due possibili spaziature angolari, comunque abbastanza simili fra loro: la prima può essere facilmente calcolata tra la capsula 1 e la 5, la seconda tra la capsula 1 e la 3.

$$\gamma_{1-5} = 1.012 - 0.367 = 0.645$$

$$\gamma_{1-3} = 0.367 - (-0.367) = 0.734$$

$$f_{alias\ 1-5} \approx \frac{v}{2 \cdot R \cdot \gamma_{1-5}} = \frac{343}{2 \cdot 42 \cdot 10^{-3} \cdot 0.734} = 5.6 \text{ kHz}$$

$$f_{alias\ 1-3} \approx \frac{v}{2 \cdot R \cdot \gamma_{1-3}} = \frac{343}{2 \cdot 42 \cdot 10^{-3} \cdot 0.645} = 6.3 \text{ kHz}$$

La massima frequenza operativa sembra quindi essere attorno ai 6 kHz. Tuttavia bisogna considerare che la relazione utilizzata per il calcolo è stata ottenuta con semplici considerazioni geometriche ed è esatta solo nel caso di array lineari uniformi.

La banda passante del sistema processato dichiarata dal costruttore è di 10 kHz, quindi ampiamente superiore al valore teorico così calcolato.

E' inoltre possibile stimare l'ordine massimo dei microfoni virtuali e delle armoniche sferiche ricostruibili da questo microfono utilizzando la relazione vista precedentemente:

$$(L + 1)^2 \leq N$$

$$L \leq \sqrt{N} - 1 = \sqrt{32} - 1 = 4.7$$

Ove, come si vedrà in seguito, L è l'ordine di direttività, ed N il numero dei microfoni disponibili.

Il microfono risulta quindi adeguato per generare microfoni virtuali e armoniche sferiche con direttività fino al 4° ordine.

Tuttavia l'ordine il sistema di elaborazione dell'array microfonico permette la generazione di microfoni virtuali con direttività massima del 3° ordine.

### 5.3 Stato dell'arte nell'elaborazione del segnale di array microfonici

Per capire come sia possibile ottenere direttività elevate dall'insieme di segnali provenienti da microfoni omnidirezionali è necessario comprendere la teoria del beamforming, largamente utilizzata in campo elettromagnetico ma applicabile anche alle onde acustiche.

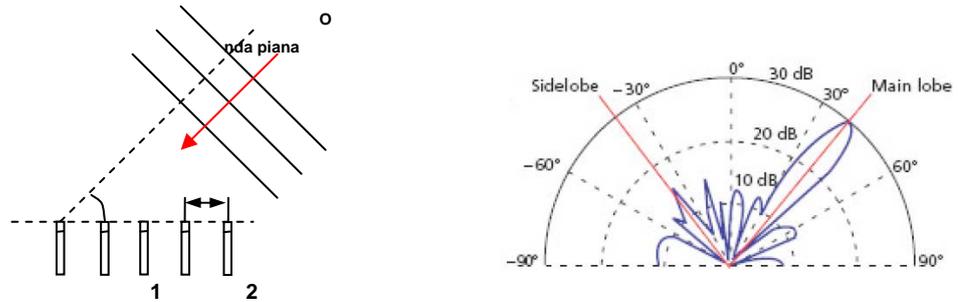


Fig. 5.14 - Onda piana incidente su un array di microfoni      Direttività dell'array elaborato

Consideriamo un array lineare di  $M$  microfoni omnidirezionali con spaziatura uniforme  $d$ . L'elaborazione da compiere sui segnali dei singoli microfoni  $p_m(t)$  proporzionali alla pressione acustica, per focalizzare l'array nella direzione individuata dall'angolo  $\alpha$ , è la seguente:

$$y(t) = \sum_{m=1}^M p_m(t - \Delta t_m(\alpha))$$

ovvero si ritardano opportunamente i segnali di ogni microfono in modo da compensare l'anticipo con cui l'onda piana lo raggiunge rispetto agli altri. Il ritardo in funzione della direzione di focalizzazione può facilmente essere calcolato con semplici considerazioni geometriche:

$$\Delta t_m(\alpha) = \frac{\Delta d_m(\alpha)}{v} = \frac{(m-1) \cdot d \cdot \cos(\alpha)}{v} \quad (\text{con } v \text{ velocità del suono})$$

La teoria del beamforming, dimostrata con questo semplice esempio unidimensionale, rappresenta lo stato dell'arte nell'elaborazione dei segnali di array microfonici planari e tridimensionali utilizzati in sistemi di tipo "Acoustic Camera" e in altre applicazioni dove si rispettino le seguenti condizioni: si operi esclusivamente con sorgenti in campo lontano (per soddisfare l'approssimazione di onde piane), non siano necessari un'elevata qualità dei segnali acquisiti e un controllo preciso della direttività.

Le tecniche di elaborazione utilizzate con array microfonici tetraedrici e sferici sono invece più complesse poiché sono state concepite per acquisire l'informazione dell'intero campo sonoro tridimensionale, al fine di permetterne una precisa ricostruzione, implementando sistemi surround musicali con caratteristiche superiori a quelli attualmente disponibili.

L'elaborazione dei segnali di questi dispositivi prevede sempre la scomposizione del campo sonoro tridimensionale in armoniche sferiche da cui possono essere ricostruiti direttamente o successivamente microfoni virtuali con direttività ben definita.

L'operazione di codifica si basa su una complessa scomposizione del campo sonoro sulla superficie del microfono in serie di Fourier-Bessel, sviluppata risolvendo le equazioni del campo sonoro per la particolare geometria e disposizione delle capsule.

Questa teoria si basa comunque su un modello necessariamente semplificato dell'array microfonico che difficilmente può considerare in modo adeguato il contributo di assorbimenti, riflessioni e diffrazioni, generate dal supporto sferico che, a frequenze elevate, possono divenire sostanziali.

Inoltre nei modelli matematici utilizzati la risposta polare in ampiezza e fase delle capsule (siano esse omnidirezionali o direttive) viene considerata ideale. Nella realtà ogni capsula microfonica, è diversa dalle altre e, anche se di elevata qualità, presenta variazioni dei parametri in funzione della frequenza. Volendo compensarle è quindi necessario ricorrere ad una caratterizzazione sperimentale di ogni trasduttore ed introdurre un opportuno filtro equalizzatore.

Anche in questo caso le sorgenti devono essere poste in campo lontano per permettere un'accurata ricostruzione del campo sonoro.

Da questa teoria si possono però ricavare semplici considerazioni sui limiti intrinseci negli array microfonici, estraendo alcune relazioni utili per la progettazione degli stessi.

In particolare è importante considerare che, in accordo con il teorema di Shannon, esiste un limite alla frequenza dei segnali decodificabili dall'array microfonico, dettato dall'insorgenza del fenomeno di aliasing spaziale.

Per poter essere decodificata correttamente ogni onda sonora, con lunghezza d'onda  $\lambda$ , deve essere spazialmente campionata dalle capsule del microfono in almeno due punti. La relazione seguente mostra quindi la dipendenza della frequenza di aliasing dalla distanza tra le capsule dell'array microfonico  $d$ , che è funzione dell'angolo tra le capsule  $\gamma$  (e quindi in definitiva dal numero di capsule del microfono) e del raggio della sfera  $R$ .

$$f_{alias} = \frac{v}{2 \cdot \lambda} = \frac{v}{2 \cdot d} \approx \frac{v}{2 \cdot R \cdot \gamma} \quad (\text{con } v \text{ velocità del suono})$$

Un'altra importante relazione emerge dalla scomposizione del campo sonoro in serie di Fourier-Bessel e consente di stimare il massimo ordine delle armoniche Ambisonic ottenibili da un microfono sferico con  $N$  capsule.

$$(L+1)^2 \leq N$$

## 5.4 Una nuova elaborazione basata su misure sperimentali

Dalle considerazioni fatte sullo stato dell'arte nell'elaborazione dei segnali degli array microfonici emerge che le tecniche utilizzate sono basate esclusivamente su modelli teorici fortemente semplificati della struttura fisica del microfono e delle caratteristiche delle capsule.

L'approccio innovativo proposto prevede di caratterizzare l'intero array microfonico sperimentalmente, determinando, mediante misure di risposta all'impulso, la funzione di

trasferimento tra un certo numero di onde piane incidenti sull'array microfonico da diverse direzioni e i segnali elettrici generati dalle singole capsule.

Elaborando mediante opportune tecniche di inversione numerica la matrice di risposte all'impulso ottenuta, si vuole determinare una matrice di filtri che, processando i segnali delle capsule microfoniche, permetta di ottenere i segnali di un set di microfoni virtuali con direttività arbitraria.

Siano:

$M$  il numero di capsule microfoniche che compongono l'array

$V$  il numero di microfoni virtuali da sintetizzare

$D$  il numero di onde incidenti da differenti direzioni  $(\mathcal{G}_1, \varphi_1), (\mathcal{G}_2, \varphi_2) \dots (\mathcal{G}_D, \varphi_D)$

Durante la fase di caratterizzazione del microfono si misurano, per ognuna delle  $D$  direzioni,  $M$  risposte all'impulso, ovvero una per ogni capsula. In particolare per la  $d$ -esima direzione si misura:  $c_{d,1}(t), c_{d,2}(t) \dots c_{d,M}(t)$ .

Volendo sintetizzare  $V$  microfoni virtuali differenti, si deve definire per ciascuno la direttività in ognuna delle  $D$  direzioni secondo cui è stato caratterizzato l'array. In particolare per il  $v$ -esimo microfono virtuale si avrà:

$$A_{1,v} = D_v(\mathcal{G}_1, \varphi_1), A_{2,v} = D_v(\mathcal{G}_2, \varphi_2), \dots A_{D,v} = D_v(\mathcal{G}_D, \varphi_D),$$

Per ognuno dei  $V$  microfoni virtuali si vogliono quindi determinare gli  $M$  filtri (in particolare per il  $v$ -esimo microfono virtuale  $h_{1,v}(t), h_{2,v}(t) \dots h_{M,v}(t)$ ) che sono le incognite del seguente sistema sovradeterminato di  $D$  equazioni, una per ogni direzione secondo cui è stato caratterizzato l'array.

$$D \text{ equazioni } \left\{ \begin{array}{l} c_{1,1}(t) * h_{1,v}(t) + c_{1,2}(t) * h_{2,v}(t) + \dots + c_{1,M}(t) * h_{M,v}(t) = A_{1,v} \cdot \delta(t) \\ c_{2,1}(t) * h_{1,v}(t) + c_{2,2}(t) * h_{2,v}(t) + \dots + c_{2,M}(t) * h_{M,v}(t) = A_{2,v} \cdot \delta(t) \\ \dots \\ \dots \\ c_{D,1}(t) * h_{1,v}(t) + c_{D,2}(t) * h_{2,v}(t) + \dots + c_{D,M}(t) * h_{M,v}(t) = A_{D,v} \cdot \delta(t) \end{array} \right.$$

Questo può essere fatto mediante metodi numerici che utilizzano tecniche di inversione basate sulla minimizzazione dell'errore ai minimi quadrati. I risultati ottenuti saranno quindi "massimamente simili" a quelli desiderati.

Questo metodo permette di calcolare i filtri numerici di tipo FIR in grado di estrarre microfoni virtuali con direttività arbitraria. Possono cioè essere generati sia microfoni direttivi con ordine compatibile con il numero di capsule del microfono utilizzato che armoniche Ambisonic di cui è stata definita nei capitoli precedenti la direttività.

Tutte le differenze di risposta in fase e frequenza dei trasduttori e tutti gli artefatti di origine acustica come assorbimenti, riflessioni e diffrazioni causate dal supporto delle capsule (sfera dell'array microfonico) vengono automaticamente compensate.

Il metodo è inoltre applicabile a qualsiasi topologia di array microfonico, scegliendo opportunamente il numero e le direzioni del set di misure di risposta all'impulso operate sul microfono in fase di caratterizzazione.

## 5.5 L'Inversione multicanale

Senza voler entrare eccessivamente nei dettagli in quanto non è oggetto della presente trattazione, accenniamo al metodo che porta alla risoluzione del sistema visto sopra che ha come incognita gli  $m$  filtri FIR da creare una volta che si sia stabilito il tipo di microfono virtuale da voler realizzare. Per ogni microfono virtuale, infatti, si imposta un sistema di equazioni in cui i coefficienti sono dati dalle risposte all'impulso con cui ho caratterizzato i microfoni, i filtri costituiscono le  $m$  le incognite e i termini noti sono impostati a seconda della direttività desiderata.

La riscriviamo qui di seguito:

$$D \text{ equazioni } \left\{ \begin{array}{l} c_{1,1}(t) * h_{1,v}(t) + c_{1,2}(t) * h_{2,v}(t) + \dots + c_{1,M}(t) * h_{M,v}(t) = A_{1,v} \cdot \delta(t) \\ c_{2,1}(t) * h_{1,v}(t) + c_{2,2}(t) * h_{2,v}(t) + \dots + c_{2,M}(t) * h_{M,v}(t) = A_{2,v} \cdot \delta(t) \\ \dots \\ \dots \\ c_{D,1}(t) * h_{1,v}(t) + c_{D,2}(t) * h_{2,v}(t) + \dots + c_{D,M}(t) * h_{M,v}(t) = A_{D,v} \cdot \delta(t) \end{array} \right.$$

se riformuliamo per il tempo discreto, il sistema precedente si modifica in

$$D \text{ equazioni} \begin{cases} c_{1,1}[n] * h_{1,v}[n] + c_{1,2}[n] * h_{2,v}[n] + \dots + c_{1,M}[n] * h_{M,v}[n] = A_{1,v} \cdot \delta[n] \\ c_{2,1}[n] * h_{1,v}[n] + c_{2,2}[n] * h_{2,v}[n] + \dots + c_{2,M}[n] * h_{M,v}[n] = A_{2,v} \cdot \delta[n] \\ \dots \\ \dots \\ c_{D,1}[n] * h_{1,v}[n] + c_{D,2}[n] * h_{2,v}[n] + \dots + c_{D,M}[n] * h_{M,v}[n] = A_{D,v} \cdot \delta[n] \end{cases}$$

Dove i termini  $c_{m,d}[n]$  sono le risposte all'impulso di lunghezza  $N_C$  campioni misurate durante la procedura di caratterizzazione sferica, i coefficienti  $A_{d,v}$  definiscono arbitrariamente la direttività dei microfoni virtuali in ogni direzione considerata dalla caratterizzazione e le incognite del sistema  $h_{m,v}[n]$  sono i coefficienti dei filtri di tipo FIR di lunghezza  $N_H \geq N_C$  che si vogliono determinare.

La soluzione di tali sistemi è possibile, mediante opportuni metodi numerici, esclusivamente operando sui segnali trasformati nel dominio della frequenza.

I sistemi mostrati, infatti, possono essere trasformati nel dominio della frequenza mediante una DFT (Discrete Fourier Transform) ottenendo quindi  $V$  sistemi, uno per ogni microfono virtuale, di cui il  $v$ -esimo:

$$\begin{cases} C_{1,1}[k] \cdot H_{1,v}[k] + C_{1,2}[k] \cdot H_{2,v}[k] + \dots + C_{1,M}[k] \cdot H_{M,v}[k] = A_{1,v} \\ C_{2,1}[k] \cdot H_{1,v}[k] + C_{2,2}[k] \cdot H_{2,v}[k] + \dots + C_{2,M}[k] \cdot H_{M,v}[k] = A_{2,v} \\ \dots \\ \dots \\ C_{D,1}[k] \cdot H_{1,v}[k] + C_{D,2}[k] \cdot H_{2,v}[k] + \dots + C_{D,M}[k] \cdot H_{M,v}[k] = A_{D,v} \end{cases}$$

Il passaggio nel dominio della frequenza trasforma le convoluzioni in prodotti, evidenziando la natura lineare del problema.

In generale, i sistemi precedenti sono sovradeterminati, cioè hanno più equazioni che incognite, essendo il numero  $D$  delle direzioni di caratterizzazione molto più grande del numero dei microfoni  $M$ , ed il grado di indeterminazione può essere piuttosto elevato.

Questa tipologia di sistemi può essere risolta solo con tecniche ai minimi quadrati, ovvero è possibile determinare i valori delle incognite che minimizzano la sommatoria del quadrato degli errori; inoltre operativamente vengono implementate nel dominio della frequenza, con il vantaggio di poter invertire il sistema ad ogni frequenza indipendentemente dalle altre.

Possiamo più agevolmente scrivere il sistema precedente in forma matriciale:

$$\mathbf{C}[k] \cdot \mathbf{H}[k] = \mathbf{A}$$

equazione valida per ogni riga spettrale, qui identificata con  $k$ , dove  $\mathbf{C}$  ( $D \times M$ ) è una matrice rettangolare di numeri complessi,  $\mathbf{H}$  ( $M \times 1$ ) è un vettore colonna degli  $M$  valori dei filtri FIR alla frequenza  $k$ , e  $\mathbf{A}$  ( $D \times 1$ ) rimane la direttività imposta.

Quindi per ogni microfono virtuale da sintetizzare e per ogni riga spettrale, bisogna risolvere un sistema sovradeterminato, le cui soluzioni, ottenute ai minimi quadrati, saranno gli  $M$  valori di altrettanti filtri per quella riga spettrale.

Moltiplicando a sinistra primo e secondo membro per la matrice Hermitiana, vale a dire trasposta e coniugata,  $\mathbf{C}^H$  si ottiene

$$\mathbf{C}^H [k] \cdot \mathbf{C}[k] \cdot \mathbf{H}[k] = \mathbf{C}^H [k] \cdot \mathbf{A}$$

ottenendo così un sistema determinato, che quindi essere risolto mediante le tecniche note.

La soluzione cercata può essere direttamente calcolata mediante la relazione

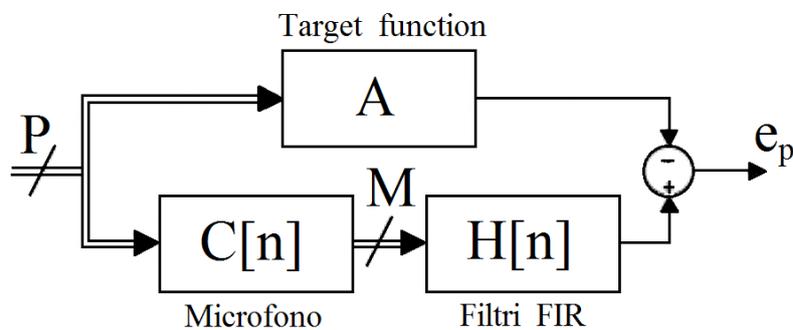
$$\mathbf{H}[k] = \frac{\mathbf{C}^H [k] \cdot \mathbf{A}}{\mathbf{C}^H [k] \cdot \mathbf{C}[k]}$$

Tale matrice di filtri  $\mathbf{H}$ , applicata alla matrice di funzioni di trasferimento che descrivono il sistema multicanale da invertire  $\mathbf{C}$ , permette di ottenere un sistema multicanale complessivo che ricalca, a meno di approssimazioni introdotte dal metodo dei minimi

quadrati, il vettore target  $A$ , che nel caso qui descritto non è dipendente dalla frequenza, ciò equivale a imporre la stessa direttività ad ogni frequenza.

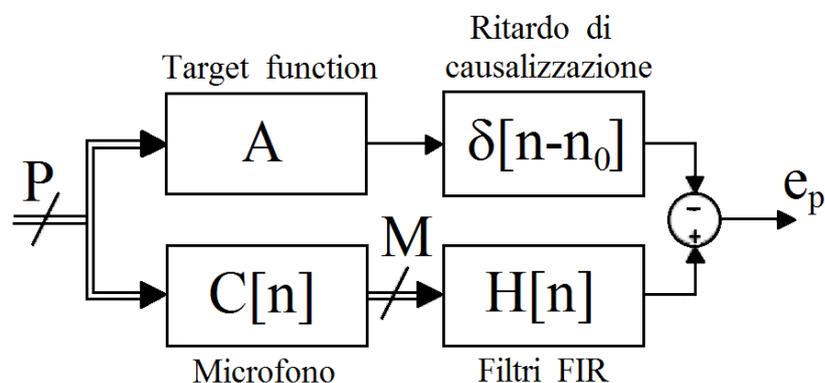
### 5.5.1 Ritardo di causalizzazione

Schema sotto è riportato lo schema a blocchi che rappresenta il sistema, nella sua formulazione ai minimi quadrati: il ramo superiore, dove compare la matrice di direttività, è un sistema istantaneo, privo di ritardo, mentre nel ramo inferiore si ha un sistema reale e realizzabile, il microfono, con risposte all'impulso causali.



Ne consegue che i filtri FIR che si ricaveranno dalla soluzione del sistema saranno forzati a compensare il ritardo introdotto dal blocco  $C$  per cui si ritroveranno ad avere risposta all'impulso non causale, il che significa non fisicamente realizzabile.

Il problema può essere risolto introducendo un opportuno ritardo di causalizzazione nel ramo superiore come mostrato nel seguente diagramma. In generale, in presenza di sequenze di  $N$  campioni è sufficiente utilizzare un ritardo di  $N/2$  campioni per assicurare la causalità.



L'operazione, mostrata nel dominio del tempo, può essere agevolmente implementata anche in quello frequenziale, determinando così un termine di fase che, moltiplicato per la matrice di direttività  $\mathbf{A}$  nell'espressione che fornisce la soluzione ai minimi quadrati del sistema, porta alla causalizzazione dei filtri FIR calcolati. Assumendo quindi un ritardo pari a  $n_0 = N/2$ , l'elaborazione da compiere sarà

$$e^{-j2\pi(k-1)\frac{n_0}{N}} \Big|_{n_0=\frac{N}{2}} = e^{-j\pi(k-1)}$$

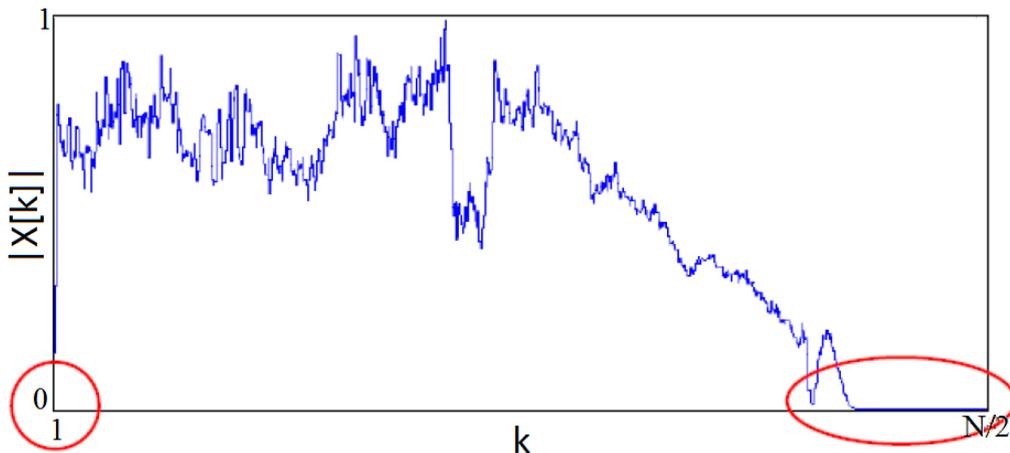
e l'espressione per determinare direttamente i filtri si modifica in

$$\mathbf{H}[k] = \frac{\mathbf{C}^H[k] \cdot \mathbf{A} \cdot e^{-j\pi(k-1)}}{\mathbf{C}^H[k] \cdot \mathbf{C}[k]}$$

### 5.5.2 Regolarizzazione di Kirkeby - Farina

La bontà della soluzione ottenuta con il metodo dei minimi quadrati dipende in larga parte dalla matrice dei coefficienti  $\mathbf{C}$ , è infatti a causa di quest'ultima che a certe frequenze i filtri realizzati non garantiscono il raggiungimento della direttività imposta tramite la matrice target  $\mathbf{A}$ . Solitamente ciò accade per due motivi.

Quando la matrice è costituita da risposte all'impulso realmente misurate, agli estremi della banda acustica, dove il microfono, seppure di buona qualità, non può garantire una risposta adeguata, il modulo della risposta in frequenza assume valori molto bassi, prossimi allo zero., come si vede dalla figura.



A queste frequenze il denominatore del rapporto sarebbe prossimo a zero e quindi il filtro esploderebbe a valori altissimi.

Il secondo motivo è di tipo geometrico: come già accennato in precedenza, alle basse e alle altissime frequenze le distanze tra i microfoni necessarie a campionare spazialmente il suono in maniera corretta sarebbero decisamente proibitive per poter realizzare un array dalle dimensioni accettabili.

In particolare a frequenze basse, con  $\lambda$  molto maggiori delle dimensioni dell'array, i segnali contenuti nella matrice  $C$  sono molto simili. Di conseguenza per queste righe spettrali il sistema (1.24) risolto con il metodo dei minimi quadrati produrrebbe risultati fortemente inaccurati, ed è inutile cercare di forzare il sistema a un risultato inarrivabile.

Per questi motivi si è introdotto il cosiddetto parametro di regolarizzazione, arrivando alla versione definitiva dell' algoritmo di inversione:

$$\mathbf{H}[k] = \frac{\mathbf{C}^H[k] \cdot \mathbf{A} \cdot e^{-j\pi(k-1)}}{\mathbf{C}^H[k] \cdot \mathbf{C}[k] + \beta[k] \cdot \mathbf{I}}$$

La regolarizzazione aggiunge al denominatore un termine proporzionale al parametro di regolarizzazione che impedisce all'operazione di inversione di generare risultati fortemente inesatti e dannosi: si rinuncia ad ottenere un filtro che garantisca la direttività richiesta in cambio di un minore errore nella risoluzione del sistema.

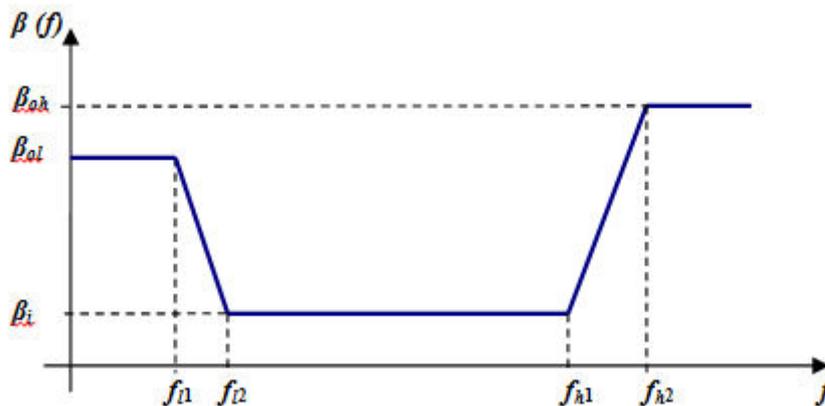


Fig. 5.15 - Definizione del parametro di regolarizzazione  $\beta$  in funzione della frequenza

Il valore della regolarizzazione viene tenuto elevato al di fuori della banda caratteristica dei trasduttori per favorire la convergenza dei filtri, mentre viene ridotto al centro della banda per ottenere una inversione precisa. Il suo andamento generale è mostrato nella figura sopra. I corretti valori del parametro di regolarizzazione vanno comunque trovati in modo empirico.

Va comunque precisato che con l'introduzione del parametro di regolarizzazione la risoluzione del sistema con il metodo dei minimi quadrati produrrà meno errore ma questo non significa che il risultato sia più accurato, il sistema che si sta risolvendo è una versione semplificata, con una matrice  $C$  meglio condizionata di quello reale.

L'inversione è in generale un problema a soluzione inesatta che va trattato di per sé come problema ai minimi quadrati, già senza aver introdotto la regolarizzazione. La regolarizzazione può essere usata per determinare meglio un sistema malcondizionato, ovvero in cui i sistemi lineari risultanti non sono ben determinati.

## 5.6 Misure effettuate tramite microfono Eigenmike®

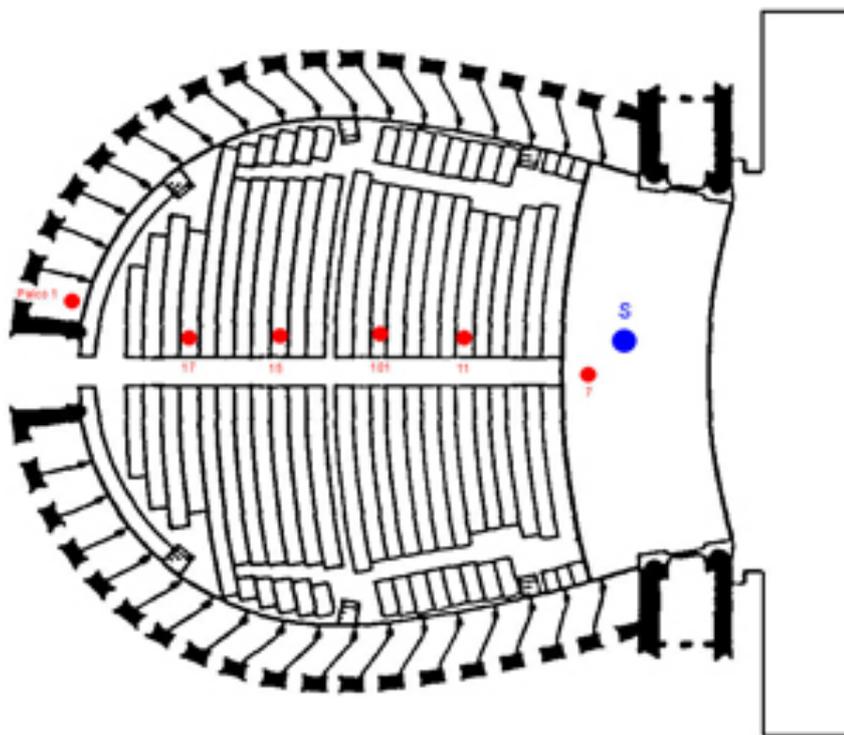
Per testare il nuovo metodo di analisi si sono svolte alcune sessioni di prova, in particolare in due sale: Teatro alla Scala di Milano e Sala dei concerti alla Casa della Musica di Parma



*Fig. 5.16 - Teatro alla Scala (altro), Sala della musica (basso)*



## Teatro alla Scala (Milano)



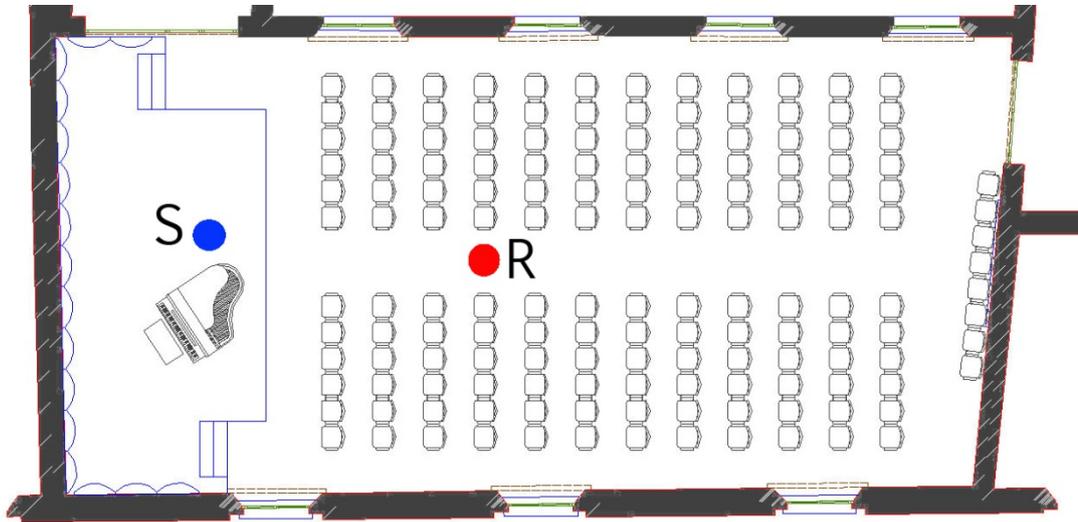
*Fig. 5.17 - Teatro alla Scala, Milano*



Nel caso del Teatro alla Scala la sorgente era nel posto del Primo Violino (Spalla), come indicato in figura, mentre la sonda microfonica, appunto l'Eigenmike®, è stata piazzata via via in diverse posizioni, cominciando da quella del podio, come si può vedere dalle figure.

*Fig. 5.18 - prima posizione di registrazione: direttore e primo violino*

## Sala dei Concerti (Parma)



*Fig. 5.19 - . Sala Concerti, Parma*

Nel caso, invece, della Sala dei Concerti, la sorgente era circa 1m dal centro del palcoscenico, ed il microfono poco prima di metà sala (vedi Fig. ...)

La **strumentazione adottata** era composta dalla sorgente: il dodecaedro Lookline con relativo subwoofer: il segnale di ingresso gestito dal computer portatile. Come sonda di ricezione il microfono Eigenmike®, collegato al laptop tramite la sua scheda audio dedicata.

La **metodologia**, questa volta, è stata la registrazione di una unica sine-sweep, e così il tutto è durato poco più di un minuto, al contrario della lunga sessione del metodo con lo shotgun. Durante l'emissione di un'unica sine-sweep dalla sorgente, vengono registrate contemporaneamente 32 tracce .wav a 64bit che riportano la risposta ambientale a tale segnale su ogni singola capsula del microfono.

In entrambe le sale, sono state fatte **numerose riprese fotografiche** che coprissero a 360° la visuale dei teatri in modo da potere avere una immagine di sfondo. Anche in questo caso, come nel caso del metodo B-Format, tutte le fotografie sono state prese rigorosamente sulle posizioni ed all'altezza della sonda ricevente.

In questo modo in un tempo relativamente corto si è potuto ricavare un grande quantitativo di materiale audio da poter elaborare successivamente.

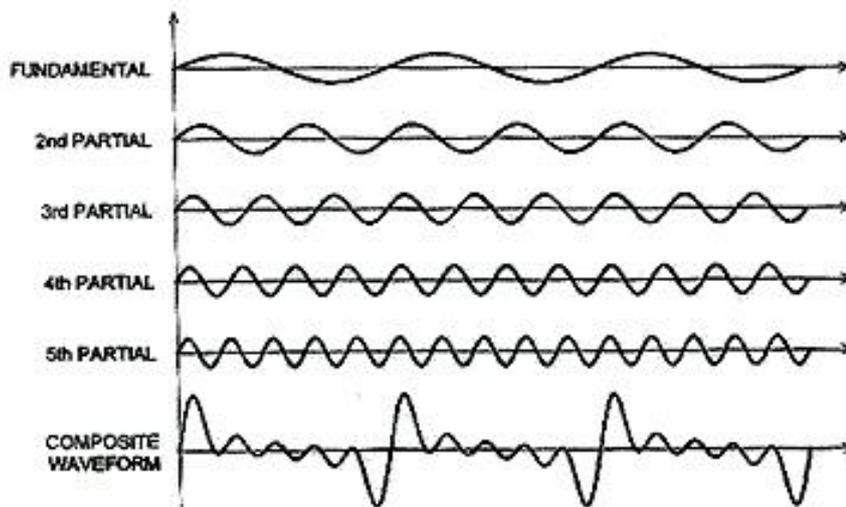
## 5.7 La metodologia SPS (Spatial PCM Sampling)

Prima di parlare dell'elaborazione delle misure effettuate si vuole descrivere qui di seguito la metodologia adottata in quest'ultimo caso, per confrontarla con quella più tradizionalmente usata.

Più precisamente introdurremo il metodo SPS (Spatial PCM Sampling) per confrontarlo con quello più tradizionalmente adottato della tecnica Ambisonics.

Per fare ciò partiamo da un esempio di funzione che si sviluppa nel tempo.

A seconda delle necessità, la storia della matematica ha messo a noi veri modi per scomporre e ricomporre una funzione. Un primo metodo, particolarmente indicato in presenza di funzioni periodiche, ma poi esteso supponendo un periodo infinito a qualunque funzione, è quello di scomporlo in funzioni parziali tramite la serie di Fourier. Tali funzioni parziali sono dette anche funzioni "armoniche" della funzione di partenza perché funzioni particolarmente semplici: seni e coseni con opportuni coefficienti, derivanti dalla funzione di partenza, che determinano Ampiezza ed Argomento per ognuna di esse. A queste funzioni reali, quando dovesse essere più comodo si può dare anche una rappresentazione complessa, tramite la rappresentazione simbolica. La semplice somma di tutte queste funzioni parziali potrà ricostruire, con la precisione voluta, la funzione originaria, si tratta infatti di una Serie di funzioni convergenti alla funzione di partenza.



$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{\omega=1}^{\infty} [a_{\omega} \cos(\omega \cdot t) + b_{\omega} \sin(\omega \cdot t)]$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(1 \cdot t) + b_1 \sin(1 \cdot t) + a_2 \cos(2 \cdot t) + b_2 \sin(2 \cdot t) + \dots$$

Stesso discorso, concettualmente identico possiamo farlo per una funzione che si sviluppa nello spazio, anziché nel tempo:  $f(x,y,z)$ , o adoperando le coordinate polari :  $f(\rho, \vartheta, \varphi)$ . Questo è quanto suggerito dalla tecnica Ambisonic.

Trattandosi di una grandezza tridimensionale avrà uno sviluppo con funzioni più complesse, ma sempre funzioni di seni e coseni, e la somma di tali funzioni, ognuna moltiplicata per un opportuno coefficiente mi può ricreare la funzione di partenza con la approssimazione voluta.

Un esempio di tali funzioni parziali, considerando  $\rho=1$  è dato, come si era visto nel capitolo relativo alla tecnica Ambisonic, dalle funzioni: W, X, Y, Z, ecc...

$$W(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{1}{2}}$$

$$K(\vartheta, \varphi) = \sin(\varphi) \cdot \frac{5 \cdot \sin(\varphi)^2 - 3}{2}$$

$$Z(\vartheta, \varphi) = \sin(\varphi);$$

$$L(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{135}{256}} \cdot \cos(\vartheta) \cdot \cos(\varphi) \cdot (5 \cdot \sin(\varphi)^2 - 1)$$

$$X(\vartheta, \varphi) = \cos(\vartheta) \cdot \cos(\varphi)$$

$$M(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{135}{256}} \cdot \sin(\vartheta) \cdot \cos(\varphi) \cdot (5 \cdot \sin(\varphi)^2 - 1)$$

$$Y(\vartheta, \varphi) = \sin(\vartheta) \cdot \cos(\varphi)$$

$$N(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{27}{4}} \cdot \cos(2\vartheta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi)^2$$

$$R(\vartheta, \varphi) = 1,5 \cdot \sin(\varphi)^2 - 0,5$$

$$O(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{27}{4}} \cdot \sin(2\vartheta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi)^2$$

$$S(\vartheta, \varphi) = \cos(\vartheta) \cdot \sin(2\varphi)$$

$$T(\vartheta, \varphi) = \sin(\vartheta) \cdot \sin(2\varphi)$$

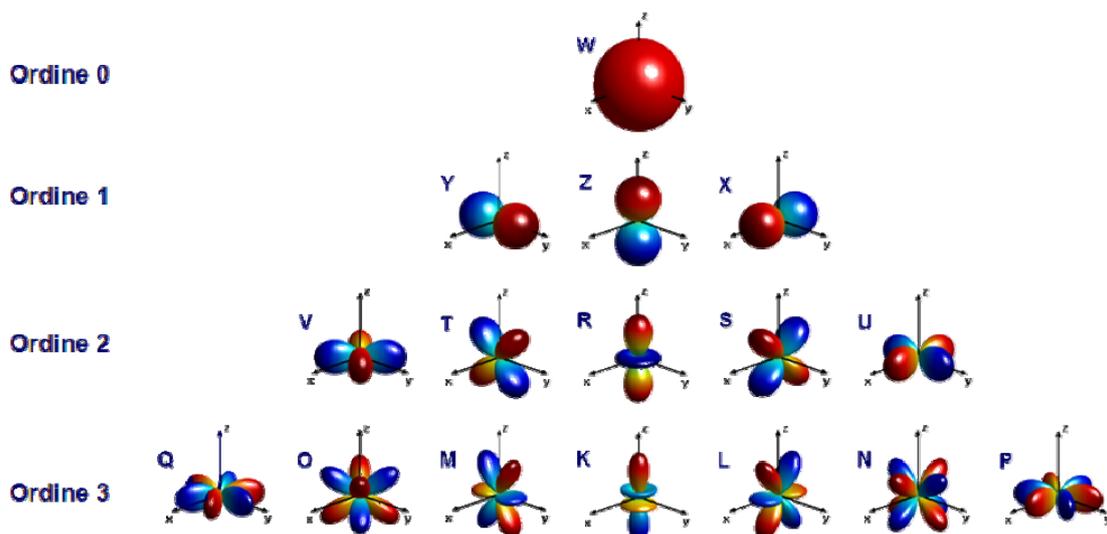
$$P(\vartheta, \varphi) = \cos(3\vartheta) \cdot \cos(\varphi)^3$$

$$U(\vartheta, \varphi) = \cos(2\vartheta) \cdot \cos(\varphi)^2$$

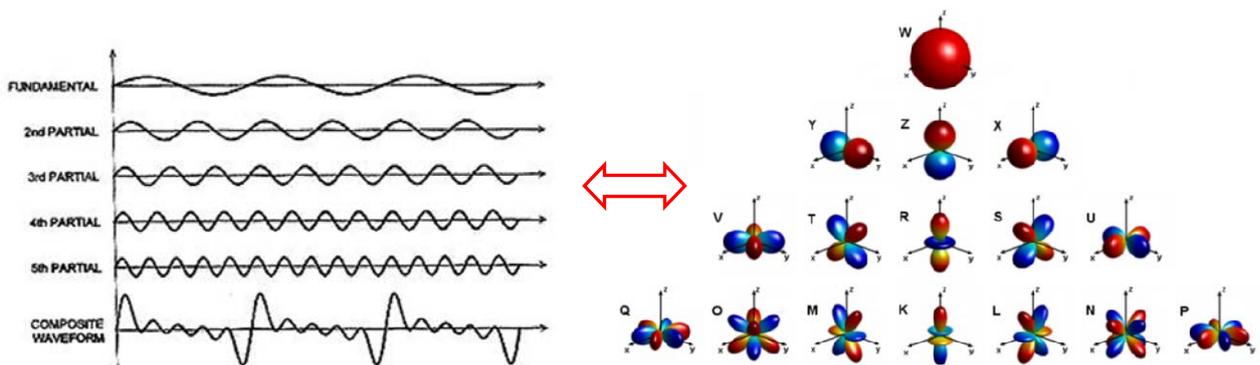
$$Q(\vartheta, \varphi) = \sin(3\vartheta) \cdot \cos(\varphi)^3$$

$$V(\vartheta, \varphi) = \sin(2\vartheta) \cdot \cos(\varphi)^2$$

La cui rappresentazione nello spazio è data da:

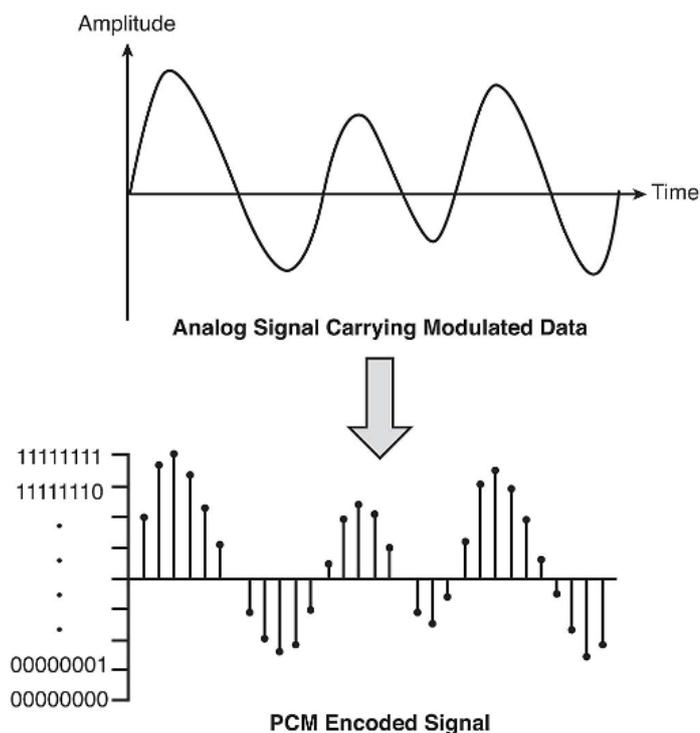


Appare quindi evidente il parallelo concettuale



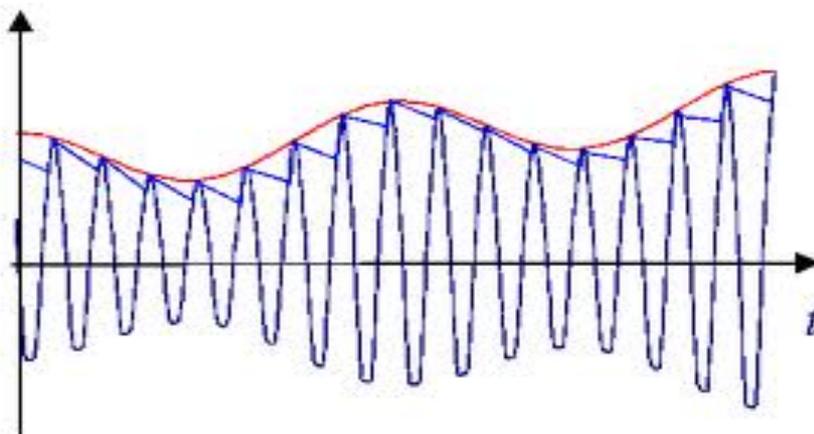
Quindi fare uso della tecnica Ambisonic equivale a fare uso delle armoniche sferiche, il che implica due cose: la prima, affrontare una trattazione matematica piuttosto complicata che necessita anch'essa di molte approssimazioni. La seconda, occorre avere un array formato da elementi così perfetti di cui poter fare conto per poter applicare la teoria pura.

Sempre ricorrendo al parallelo tempo – spazio, un secondo modo di scomporre una funzione nel tempo e poi ricostruirla è dato dalla modulazione della funzione ad impulsi nel tempo, in pratica la ben nota tecnica PCM (Pulse Code Modulation)



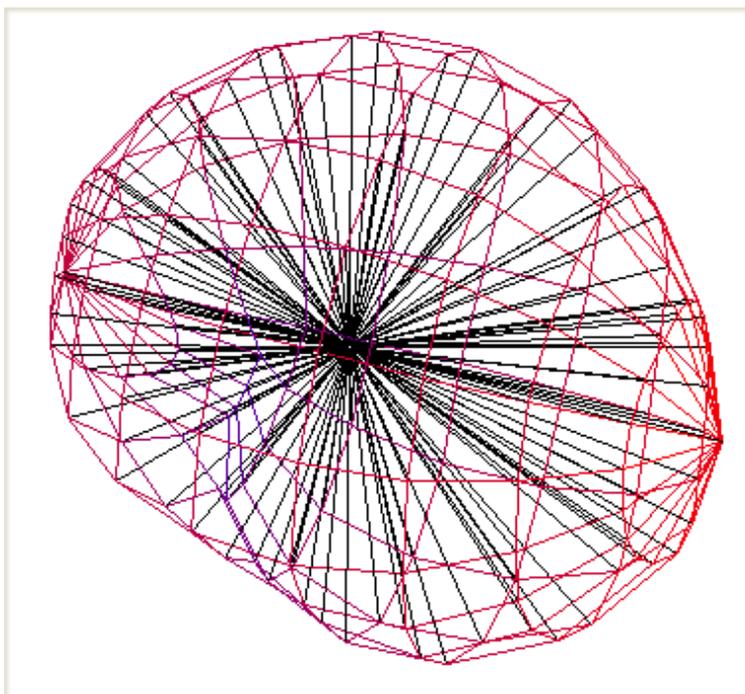
Per ricostruire un segnale PCM basterà trovare la curva che meglio approssima o, meglio, interpola i punti individuati dal campionamento (conversione D/A).

Una tecnica analoga veniva fatta nelle trasmissioni in modulazione di ampiezza, ed un segnale veniva ricostruito semplicemente col ritardo di un circuito RC che permettesse di congiungere in modo continuo i vertici della sinusoide modulata.



*Fig. 5.20 - . Esempio di ricostruzione di un segnale modulato in Ampiezza*

Orbene, l'uso di microfoni particolarmente direttivi permette di focalizzare un particolare punto dello spazio con uno spot tanto più piccolo quanto è più direttivo il microfono, di conseguenza questo diventa un vero e proprio campionamento nello spazio, analogo a quello nel tempo, poiché si vanno a rilevare i valori veri di pressione acustica indicati dalle direzioni di puntamento.

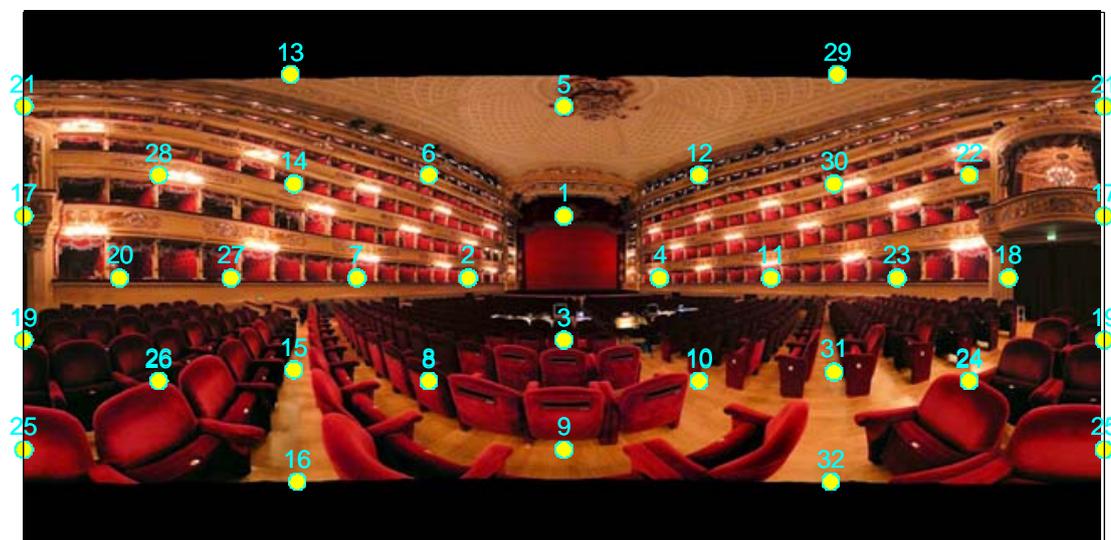


*Fig. 5.21 - Esempio di campionamento di una grandezza nello spazio e prima approssimativa ricostruzione della medesima*

Questo è quanto fa la tecnica SPS: in pratica si operano dei campionamenti del campo acustico in tutte le direzioni circostanti un una sonda, dopo di che, per ottenere la corretta mappatura del campo, di cerca la curva, in questo caso la superficie, che meglio approssima la distribuzione dei valori campionati. In pratica avevamo già usato tale tecnica nella ricostruzione dei polar dinamici nel metodo dello Shotgun, ma per la metodologia che seguirà, lo SPS sarà una tecnica indispensabile, di fondamentale importanza.

Al posto della tecnica Ambisonics è stata provata in alternativa, e con successo, la SPS per la ricostruzione sia visiva che acustica dello spazio circostante.

Il campionamento spaziale operato da noi individua 32 punti nello spazio nelle direzioni cui guardano le 32 capsule microfoniche. La posizione dei punti campionati viene riportata sull'immagine di fondo con la stessa con la stessa proiezione del Mercatore, già vista per l'analisi Ambisonic. Qui di seguito vediamo il metodo SPS applicato su una immagine di fondo presa da una postazione di misura (la n.17) della Scala



*Fig. 5.22* - Foto panoramica del Teatro alla Scala con sovrapposti i punti di SPS

32 microfoni virtuali sull'intero orizzonte sferico sono un numero molto esiguo: si pensi ad esempio che col metodo dello shotgun erano ben 73 su una sola semisfera. Occorre quindi ricorrere ad una opportuna interpolazione per realizzare mappe a colori ben graduate.

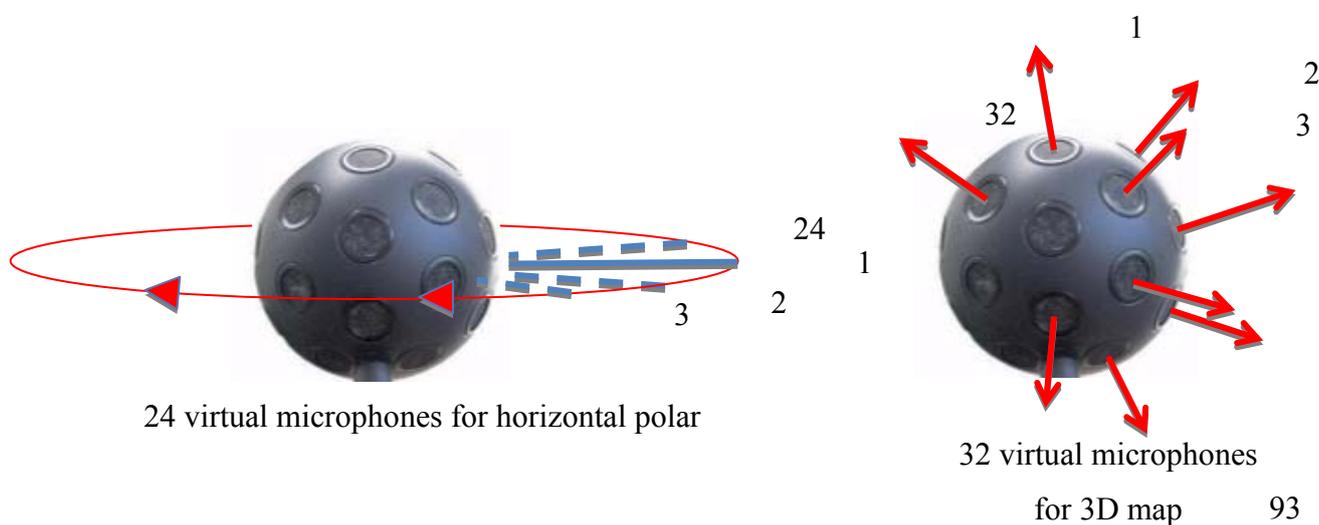
## 5.8 Elaborazione del materiale acquisito nelle due Sale

Il risultato delle sessioni di registrazione alla Scala ed alla Sala dei Concerti è costituito da una serie di files .wav, 32 tracce, a 24bit e 48000 Hz, più tante serie di fotografie scattate da quanti erano i punti di registrazione.

### 5.8.1 – Steps della Elaborazione

1) Il primo passo è stato quello di ricavare dalle risposte al Sine-Sweep, le IR con la sopracitata convoluzione delle tracce con la Inv-Sweep. Le IR ottenute rappresentano le risposte delle capsule al segnale di test.

2) Avendo scelto, come visto, di usare la SPS sui 32 punti dello spazio nelle stesse direzioni delle capsule, vengono creati, con la tecnica dell'inversione multicanale, due set di array virtuali: un primo, dato dall'insieme di 32 microfoni virtuali con diagramma polare del 4° ordine che puntassero in modo direttivo nelle direzioni dette, ed un secondo set di 24 microfoni virtuali, sempre del 4° ordine, distribuiti in modo orizzontale al punto di osservazione. Il primo set ci permetterà una rappresentazione della mappatura, il secondo quella del polar corrispondente, visto in pianta.

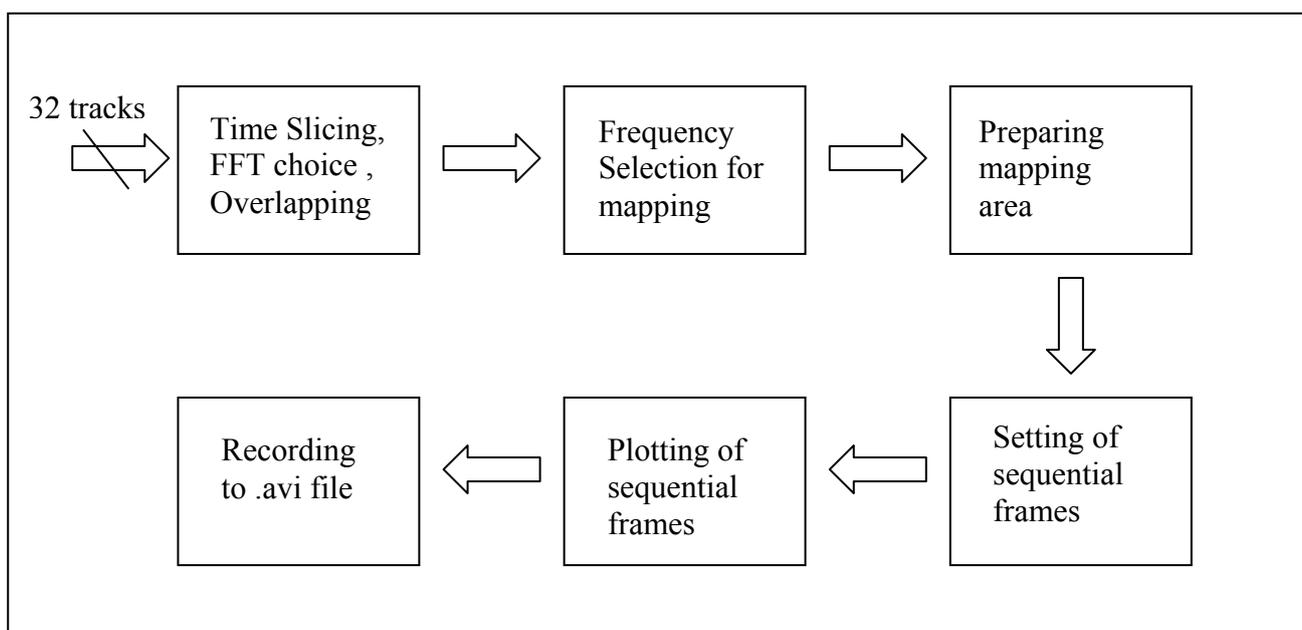


Attualmente la sonda produce microfoni virtuali non calibrati come livello assoluto in dB-SPL ma i guadagni relativi dei microfoni virtuali sono perfettamente corrispondenti, producendo quindi diagrammi polari molto accurati.

3) Grazie alle IR dei microfoni virtuali così ottenuti è possibile utilizzare il software di mappatura dinamica, scritto con codice Matlab appositamente per questo scopo e che descriveremo qui nel seguito. Il risultato sarà il filmato della mappatura dinamica che descrive la propagazione del suono nella sala, ovvero la rappresentazione temporale delle successive sorgenti delle riflessioni che giungono all'ascoltatore.

### 5.8.2 – Il Software di mappatura dinamica

Il motore del software è simile a quello adoperato per il plotting dinamico dei polar del caso dello shotgun, ma notevolmente più complesso, sia per quanto riguarda l'elaborazione dei valori acquisiti, sia per quello che concerne la rappresentazione con la metodologia SPS dello spazio circostante, e sia per quello che deve essere la corretta sequenza dei frames. Non poco lavoro ha richiesto la non ottimale gestione della memoria in Matlab, di conseguenza, anche in vista di riprese più lunghe nel tempo, si è dovuto fare ricorso all'appoggio dei risultati su file esterni. Vediamo passo passo il seguente schema



*Fig. 5.23 – Schema a blocchi del software di rappresentazione dinamica*

## 1) Creazione del file di appoggio con le informazioni su tutti i frames della mappatura

A differenza dei polar qui il file in ingresso è multitraccia per cui per prima cosa il software si occuperà di definire la lunghezza della IR da voler rappresentare. Una volta scelta la lunghezza comparirà una traccia così suddivisa, per confermare la scelta

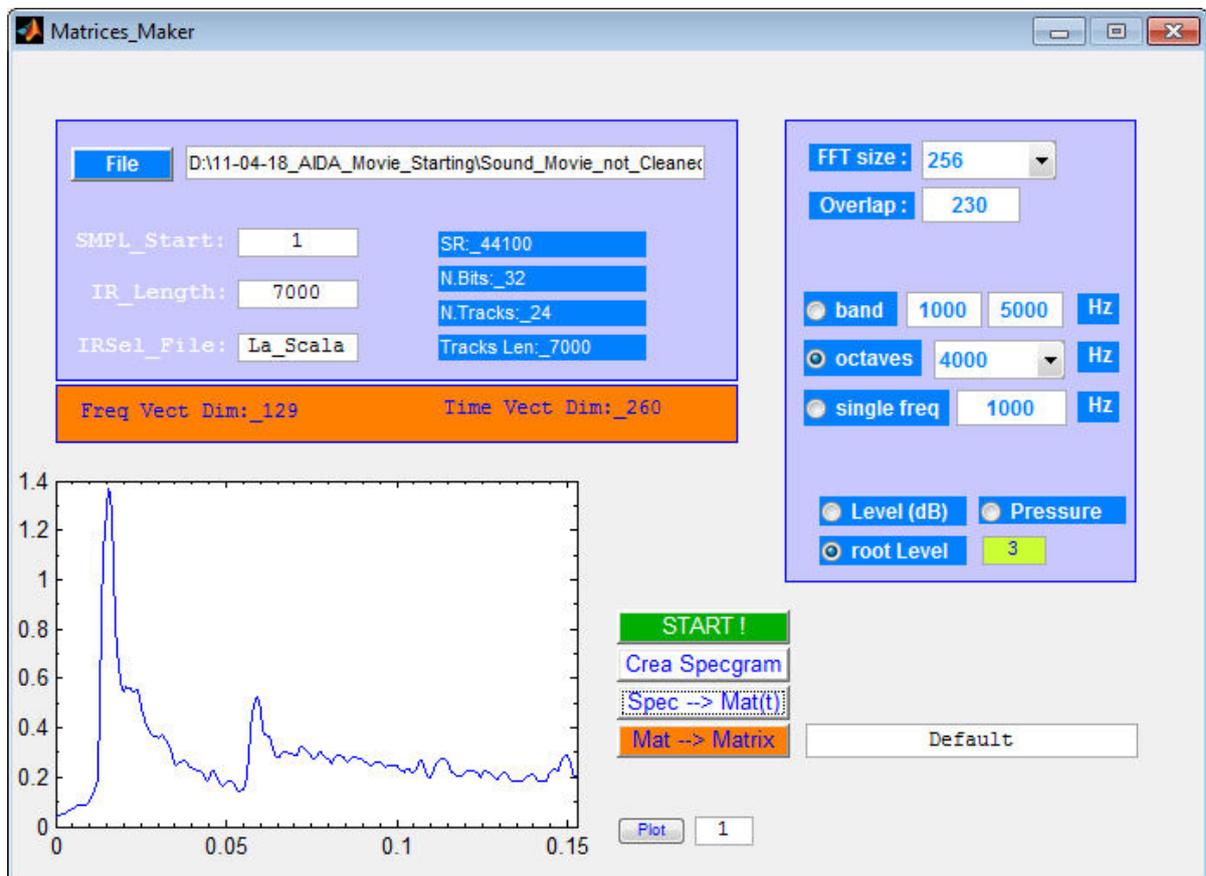


Fig. 5.24 - . Immagine della form "Maker"

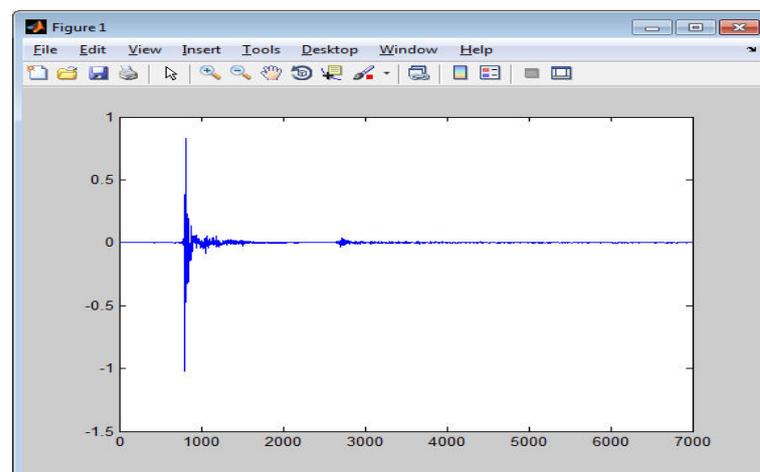
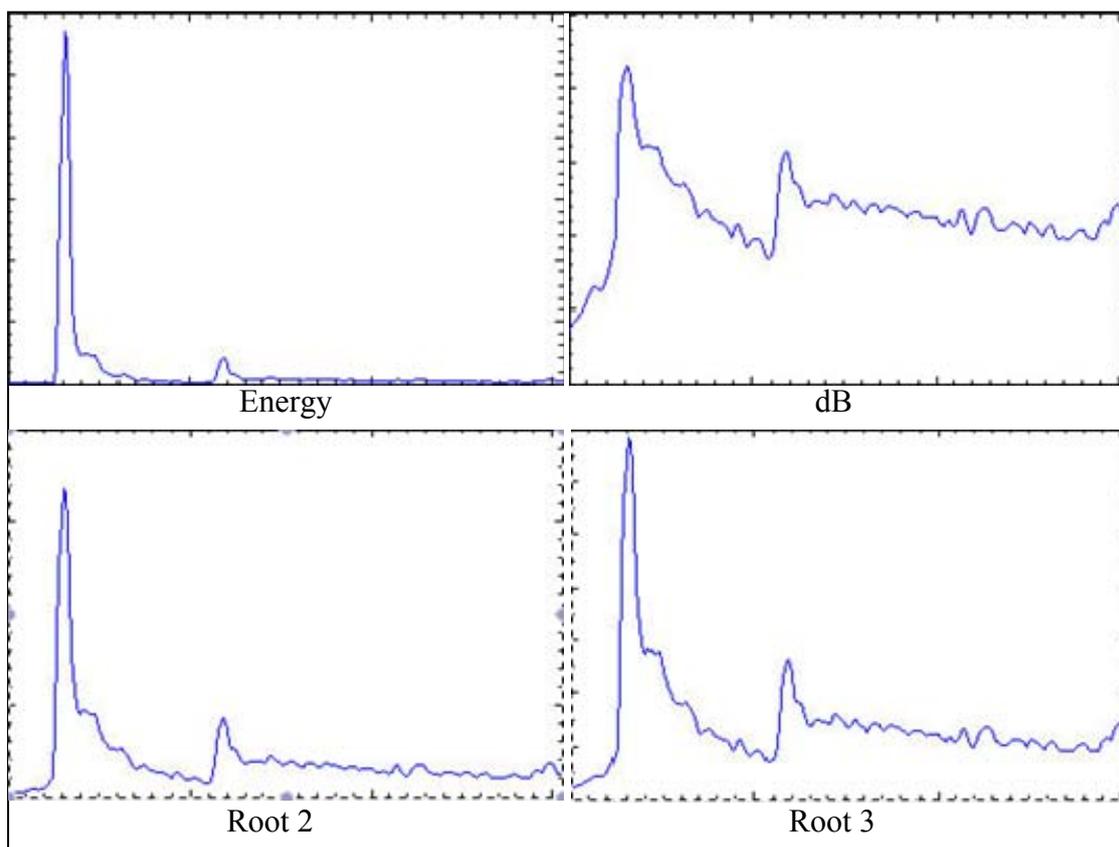


Fig. 5.25 - . Immagine della IR scelta

Nella finestra a fianco si potrà scegliere la finestra della FFT desiderata, la percentuale di Overlap, la banda in frequenza scelta di analisi, non necessariamente in ottave, ed infine il

tipo di rappresentazione: in Energy (quadrato della pressione), in dB, o in radice con indice da scegliere. Quest'ultima scelta vuole simulare la curva dei dB, ma raddolcendone la pendenza.

Se infatti la rappresentazione in Energia evidenzia, al quadrato, grandi differenze di mappatura a falsi colori, la rappresentazione in dB tende ad appiattire tutto, per cui con l'opzione "root" si è cercato di dare una rappresentazione intermedia. Questo si rifletterà molto sulla rappresentazione a falsi colori.



*Fig. 5.26 - Diverse scale di Rappresentazione*

Infine viene chiesto il nome di un file esterno ove salvare i dati appena elaborati e che verranno presi dalla form successiva, che serve appunto alla rappresentazione.

## **2) Creazione del file con le informazioni su tutti i frames del polar**

Una form analoga a quella vista sopra serve per creare un file elaborato per il polar, tramite, questa volta, il multitraccia a 24 canali che abbiamo visto sopra. Questa è stata una scelta necessaria per l'implementazione successiva che c'è stata per creare rappresentazioni molto più durature nel tempo. Il file infatti raccoglie tutti i valori che soddisfano i criteri di scelta di tutti i microfoni virtuali e questo per tutti i frames! In questo stesso file Matlab verrà messa anche la prima traccia per avere la rappresentazione visiva anche temporale suddivisa, dopo il relativo calcolo, nello stesso numero totale di frames.

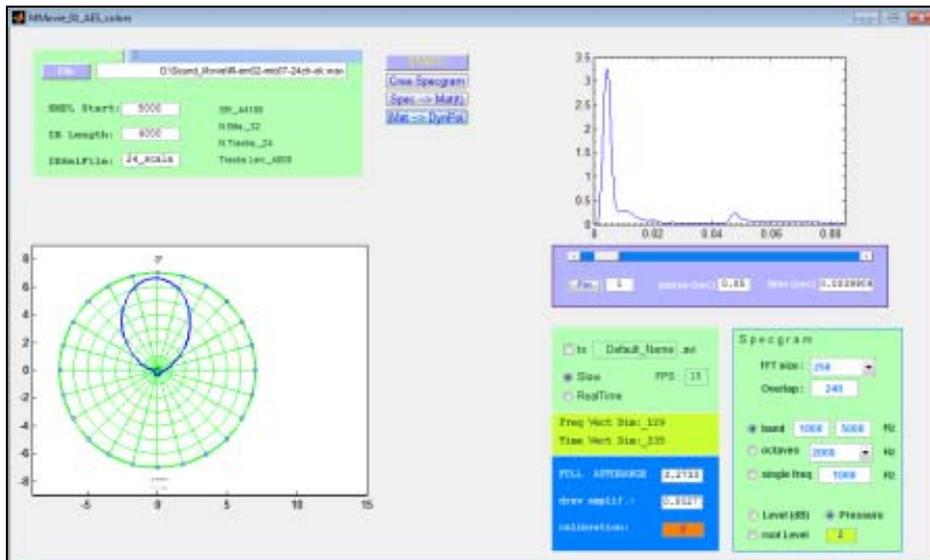


Fig. 5.27 - Form "Maker" dei polar...

### 3) Lettura dei files elaborati precedentemente e creazione dei singoli frames

La seconda sezione del programma, di cui qui non viene qui riportata la form dei comandi, legge i file creati sequenzialmente. Il problema di memoria di Matlab sussiste anche in lettura per cui per ogni singolo frame vengono aperti, letti, e chiusi i files creati precedentemente con un puntatore che di volta in volta indica il punto successivo di accesso ai files.

Per creare il singolo frame, per quello che riguarda la mappatura, viene preparata la griglia su cui praticare la SPS, con le coordinate precise dei punti. Una volta creata la mappa, vengono assegnati i valori numerici e distribuiti secondo i criteri di Matlab (la mesh).

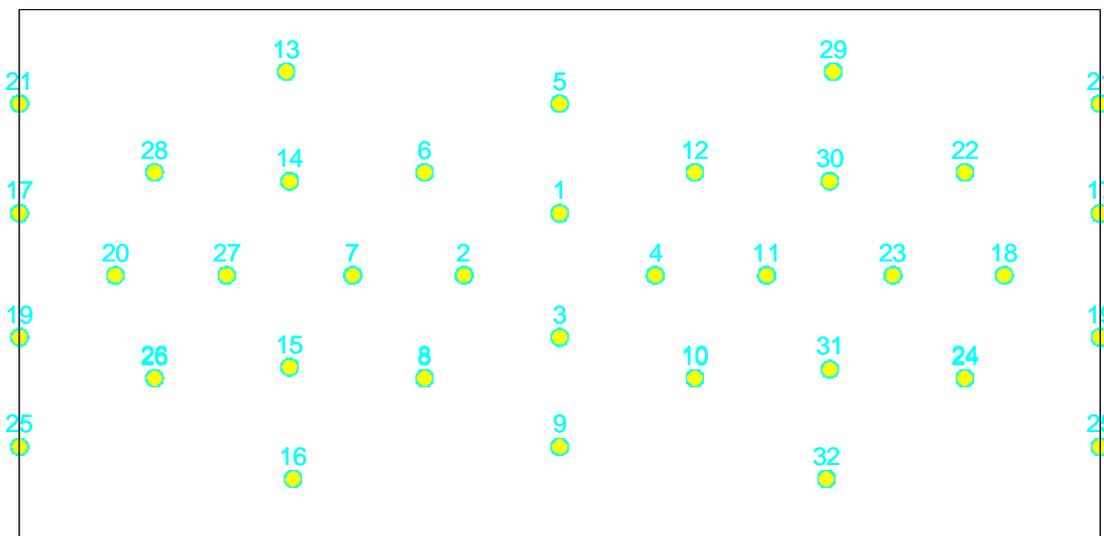


Fig. 5.28 -. Posizioni di Campionamento Spaziale ....

L'interpolazione migliore si è mostrata la bicubica, occorre, però, fare attenzione ai valori al contorno. Nelle zone di confine, infatti, deve rimanere la continuità con i valori che incontrerebbe se questo si estendesse con la parte adiacente. Occorre quindi fare i calcoli aumentando, oltre confine, i punti della SPS, come mostra la figura seguente, supponendo che la nostra immagine di fondo sia data dall'unione delle regioni [A+B+C+D]

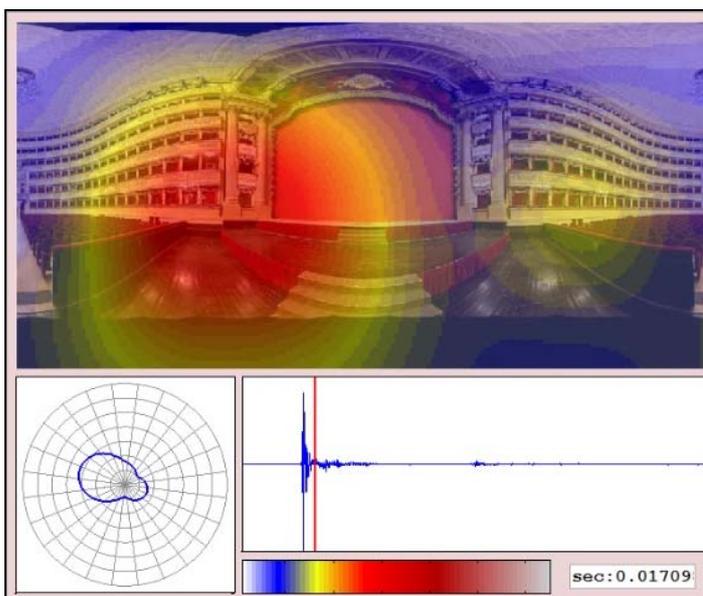
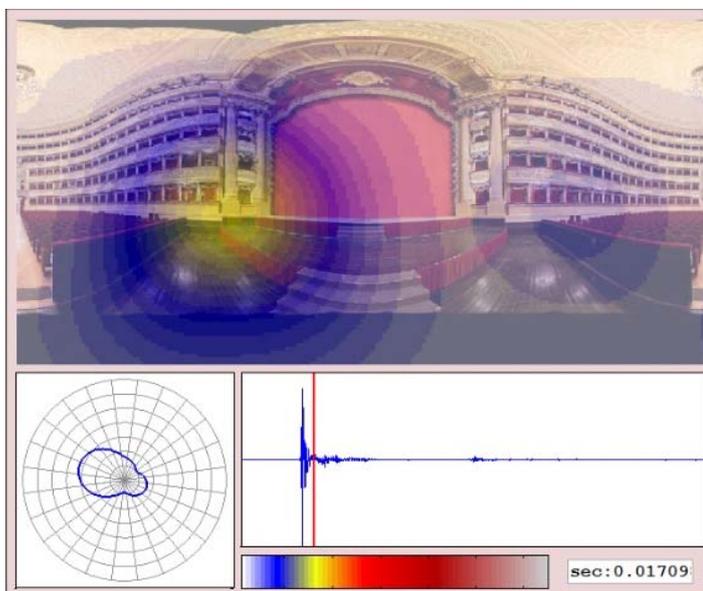
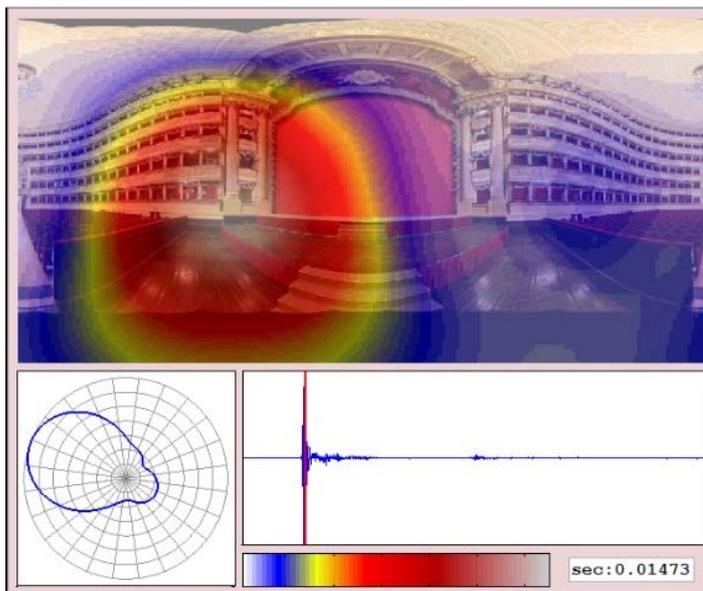
D	C	D	C	D	C
B	A	B	A	B	A
A	B	<b>A</b>	<b>B</b>	A	B
C	D	<b>C</b>	<b>D</b>	C	D
D	C	D	C	D	C
B	A	B	A	B	A

*Fig. 5.29 - Bordi e regioni adiacenti*

Scelta la mappa di colori più adeguata, assicurata la collimazione con immagine ottica e sonora, occorre sovrapporre la mappa all'immagine di fondo del teatro,.

Per quanto riguarda il polar si userà la tecnica della precedente metodologia adottata col lo shotgun, e per fare ciò il programma dovrà leggere il file relativo, e sincronizzato al precedente

### 5.8.3 – Alcuni risultati ottenuti



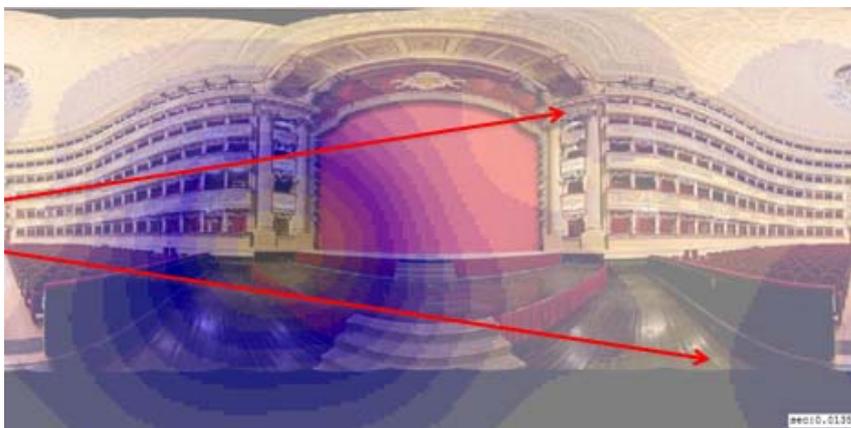
Le tre immagini precedenti illustrano i primi istanti di sviluppo della IR alla Scala quando la sorgente è nel posto del primo violino ed il microfono in quello del direttore d'orchestra.

I primi due sono con rappresentazione “Energy” a distanza di 3 msec, mentre il terzo è contemporaneo al secondo, ma con rappresentazione diversa: la root2.

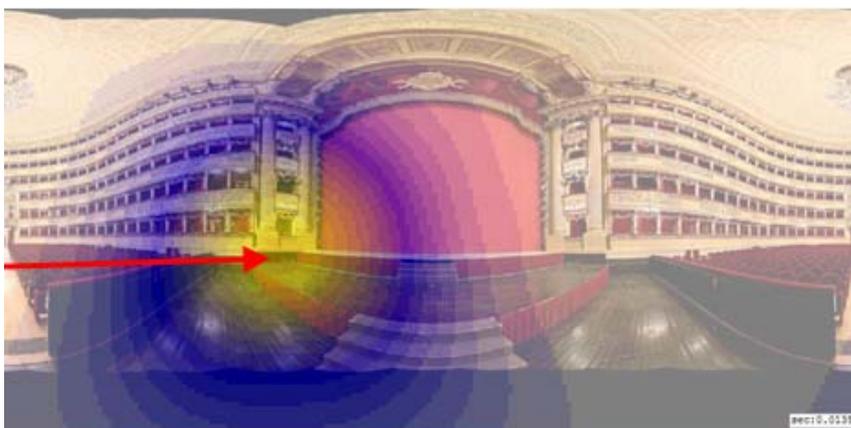
Si capisce come la possibilità di cambiare il tipo di rappresentazione o, volendo, anche la scala cromatica, possa aiutare a mettere in evidenza particolari diversi.

Di seguito alcuni esempi più dettagliati: La Scala.

a 500Hz si vedono le vibrazioni strutturali in buca e nella parete opposta

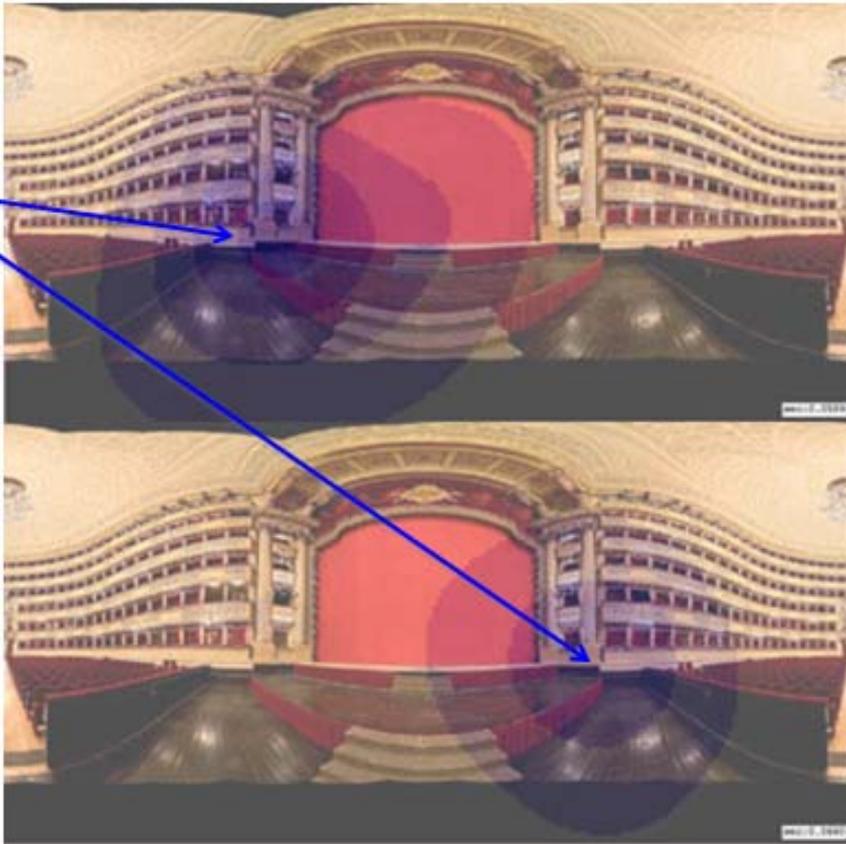


a 1000Hz spiccato la provenienza della sorgente



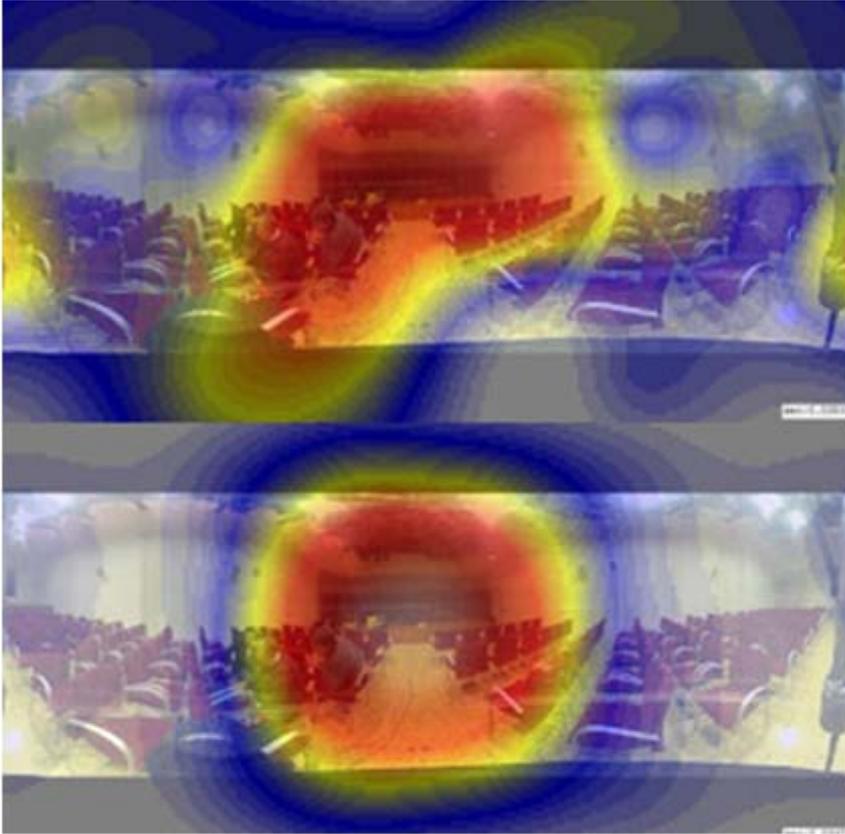
*Fig. 5.30 - Teatro alla Scala confronto di due frequenze*

Nell'immagine seguente vediamo la successione a 4 ms e 57ms delle riflessioni fra le pareti della buca

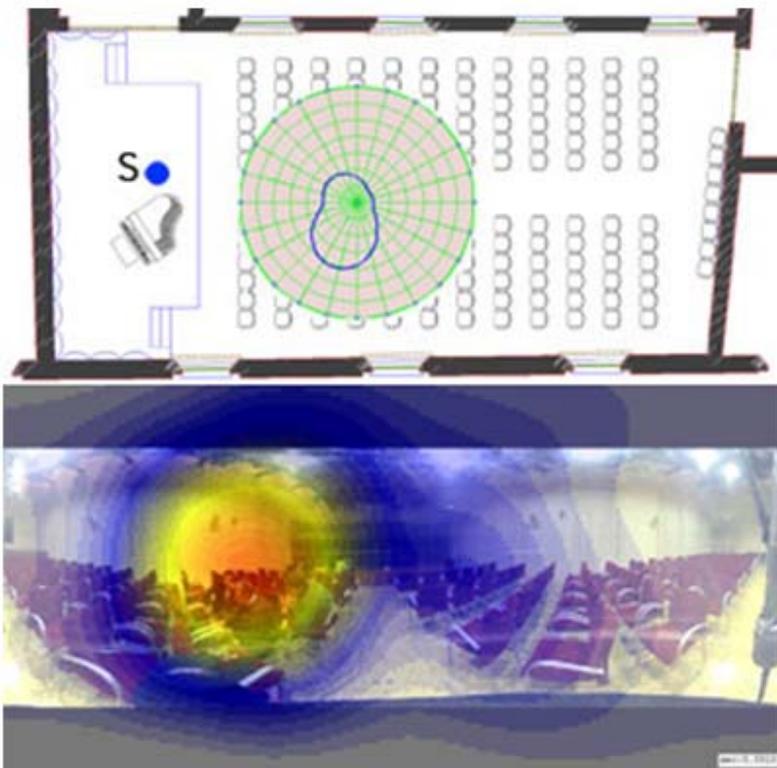


*Fig. 5.31 - Teatro alla Scala confronto di due istanti*

La Sala dei Concerti, Alcuni esempi: diverse componenti spettrali del suono diretto  
allo stesso istante a 500Hz e 4000Hz

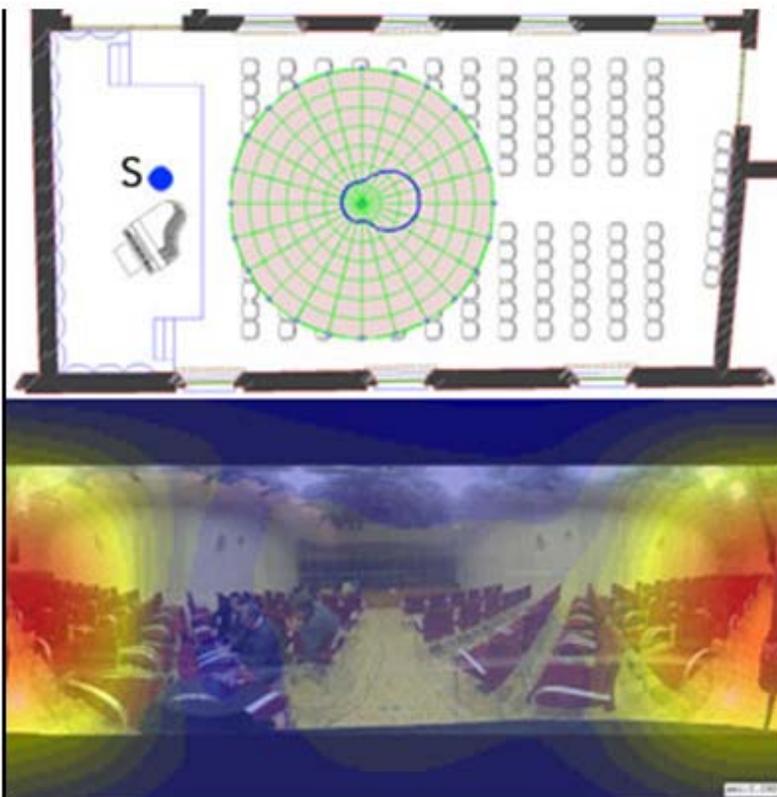


*Fig. 5.32 - Sala dei concerti suono diretto: confronto di due frequenze*



**Fig. 5.33** - Sala dei concerti prima riflessione

Prime riflessioni a 21 ms contro la parete laterale più riflettente (muro senza tendaggi)



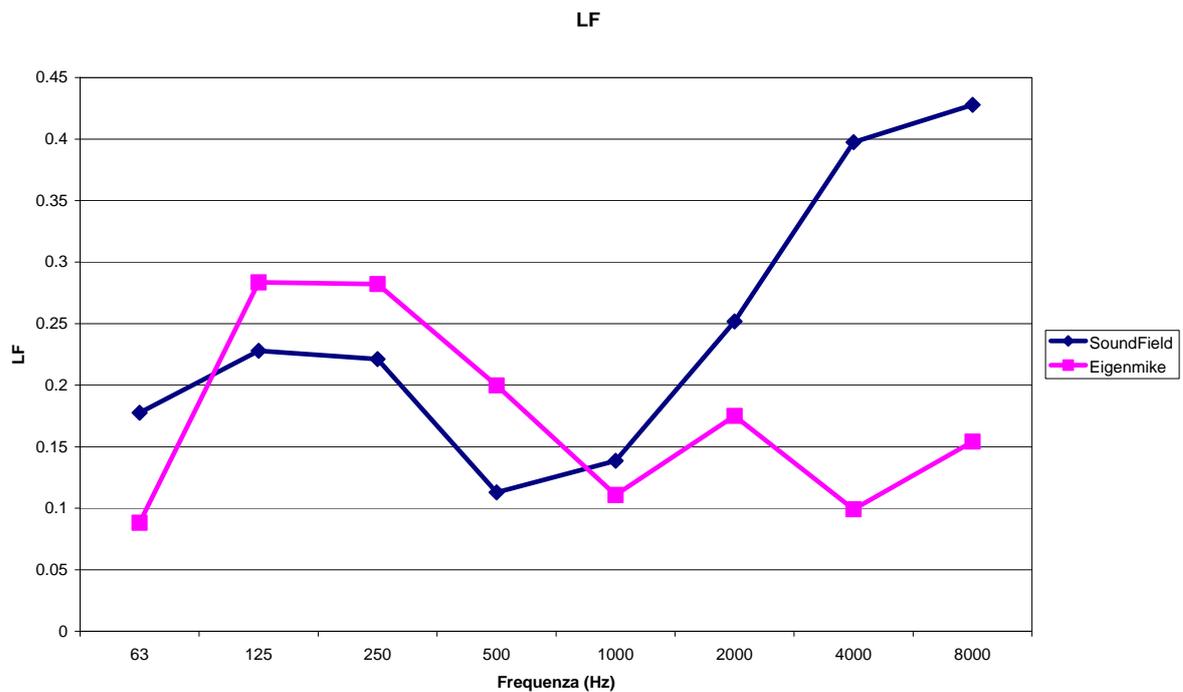
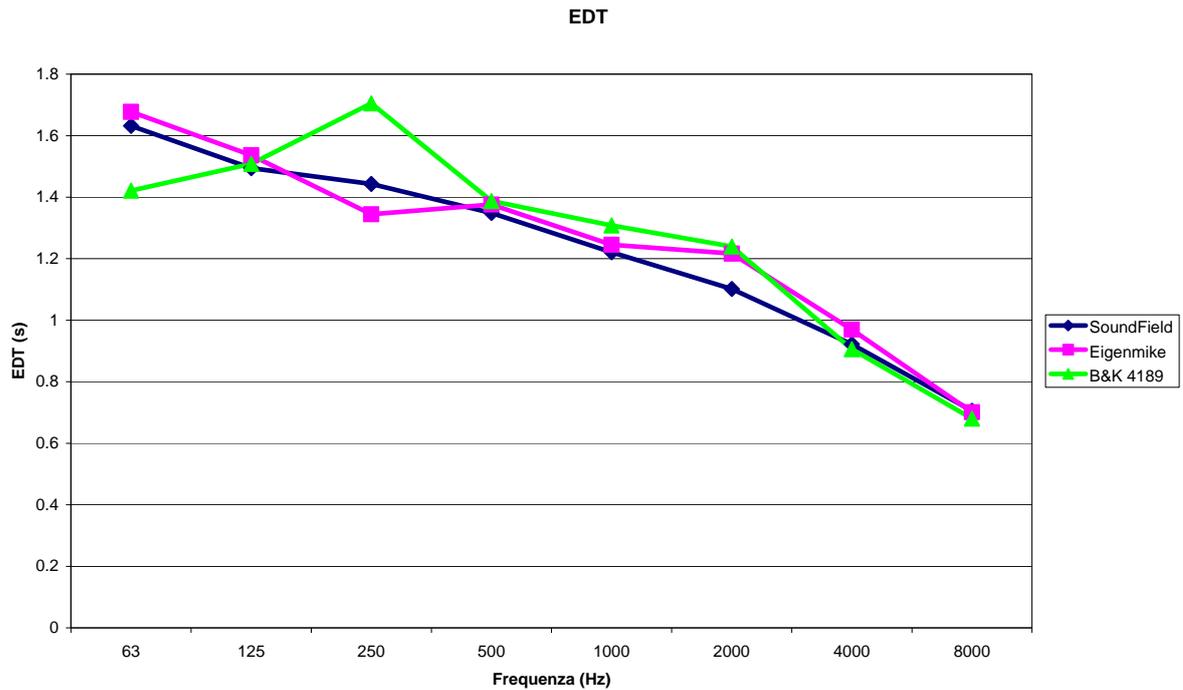
**Fig. 5.34** - Sala dei concerti riflessione sul fondo

Forte riflessioni a 97 ms (eco) sul fondo, in effetti si è riscontrato che tale eco affligge le prime 5 file di persone

## 5.9 Primi esempi di rilevamento dei parametri acustici tramite la metodologia SPS

Alcune acquisizioni sono state fatte in parallelo con altri sistemi proprio per fare un confronto con i parametri acustici ricavati in modo classico e ricavati col metodo del SPS. Seguono alcuni risultati. Si vede che quelli ricavati con la nuova metodologia poco si scostano come andamento da quelli "classici", anzi risulterebbero più regolari, in particolare in quelle bande di frequenza ove il Soundfield ha mostrato i suoi limiti.

Seguono l'esempio dell' EDT e della LF



### **5.10 Pregi e limiti della tecnica SPS con array sferico ultradirettivo.**

Con l'ultima tecnica analizzata si può dire che dal punto di vista dei risultati siano stati riuniti tutti i pregi delle altre precedenti, dal punto di vista della praticità è senza dubbio molto più agile della tecnica con shogun e tavola rotante, anche se un po' meno di quella con il Brahma. A tutto ciò va aggiunta la assoluta qualità superiore dei risultati nel campo delle indagini.

Come limite principale, indubbiamente il costo elevato dell'attrezzatura, che ne limita sia la diffusione che la disinvoltura d'uso.

## 6 CONCLUSIONI

### 6.1 Conclusioni sul lavoro svolto

Nel presente lavoro sono state affrontate le tematiche relative all'analisi spaziale della propagazione del suono ed alla necessità di potersi concentrare anche sulla provenienza del suono, e non solo, come si è fatto fino ad ora anche con la maggior parte delle normative ISO, concentrarsi sul punto di arrivo.

Sono state presentate 3 innovative tecniche di analisi spaziale della propagazione del suono nei teatri. Esse permettono di analizzare su immagini di sfondo ( $360^\circ \times 180^\circ$ ) le sorgenti di suoni diretti o riflessi, utilizzando vari tipi di microfoni.

Si sono evidenziati molti aspetti positivi, fra cui, ad esempio, la facile individuazione degli echi non voluti, l'immediata individuazione della loro origine, e la più agevole possibilità di correggere i problemi.

I trasduttori microfonici usati sono sempre necessariamente degli array più o meno complessi, array reali o virtuali creati da un unico microfono. Si è implementata la nuova tecnica Spatial Pcm Sampling che ha permesso di allargare l'indagine anche al di fuori delle zone strettamente puntate dai microfoni direttivi. Ma questo ha implicato una maggior mole di lavoro di calcolo.

Ogni metodologia è stata accompagnata da un software atto a velocizzare i numerosi calcoli, ed anche di darne una rappresentazione grafica non solo statica ma anche dinamica, il che ha permesso non solo di individuare la fonte del disturbo ma di capirne spesso la causa e la provenienza originale.

Ogni tecnica presenta pregi e limiti e si potrà decidere in base alle esigenze quale tecnica adottare nelle analisi delle sale e dei teatri.

## 6.2 Possibili sviluppi in futuro delle tecniche analizzate

Si può dire che siamo solo all'inizio di un campo inesplorato che può portare a rivolti di varia natura.

Limitiamoci al momento ad elencare alcuni aspetti dividendoli in tre gruppi

- sviluppo dei sistemi di acquisizione
- sviluppo del software
- sviluppo di applicazioni

Per quanto riguarda lo sviluppo dei sistemi di acquisizione, c'è da dire che abbiamo passato in rassegna vari tipi di array realizzati presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale: array lineari, planari, sferici. Per completare la serie si prevede l'utilizzo di un array cilindrico che permetta già la visualizzazione acustica su una superficie cilindrica reale e non creata con le apposite proiezioni del Mercatore. La presenza di una telecamera a 360° permetterà anche la ripresa video in tempo reale.

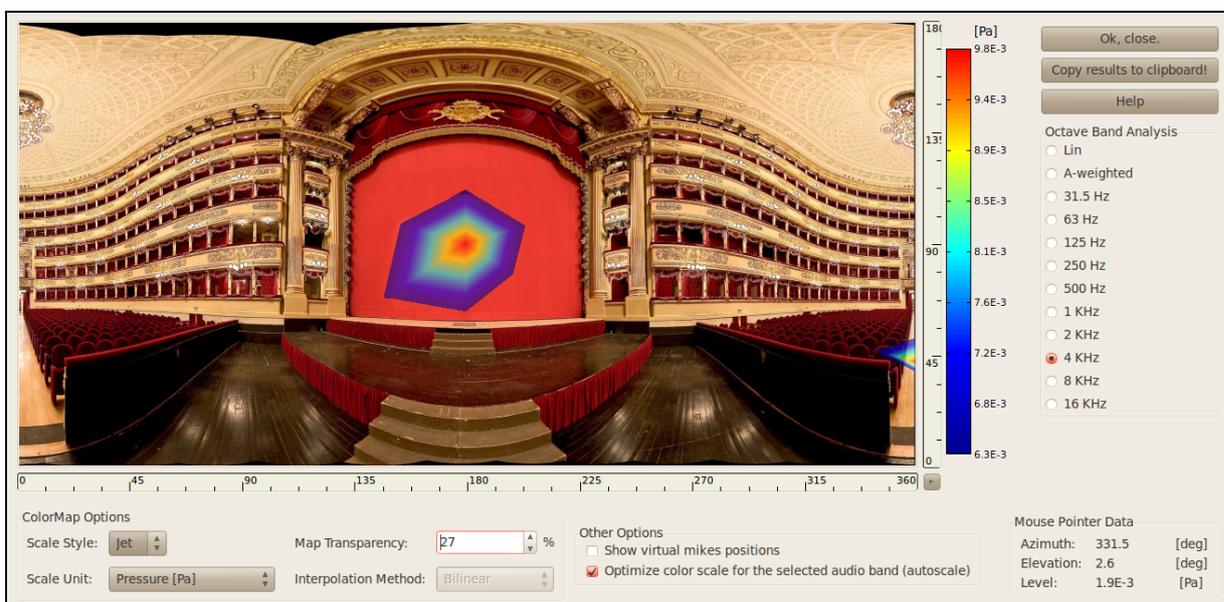
Ulteriore ricerca in programma: trovare una metodologia rapida ed oggettiva per la calibrazione della sonda sferica

Un altro obiettivo da raggiungere è l'aggiunta di una buona telecamera parabolica IP su esempio di quanto già stato fatto, per catturare istantaneamente l'immagine di sfondo



*Fig. 6.1 - Web Camera con Eigenmike*

Per ciò che invece concerne il software si è già passati dalla fase di prototipazione tramite Matlab, a quella più operativa tramite un apposito programma che è in via di sviluppo in linguaggio C++ e che si mira a far divenire un plugin VST.



*Fig. 6.2- . Inizio di implementazione in C++ del software di visualizzazione*

Per quanto riguarda, in ultimo, la future applicazioni sono già in cantiere alcuni lavori fra i quali:

- mappatura dinamica con mappe a falsi colori che identifichino non solo l'energia sonora, ma anche le varie frequenze ad essa associate distribuite nello spazio.
- la possibilità di unire alla mappatura uno sfondo dinamico che presenti anche il divenire non solo acustico ma anche visivo delle cause di suono o rumore in movimento
- la possibilità di mappare i parametri ISO 3382 sullo spazio visto nella posizione della misura, potendo individuare la distribuzione nello spazio dei contributi che alimentano tali parametri
- La tecnica dell'array sferico, inoltre, può permettere di analizzare fonti di suono e rumori in tempi lunghi potendo così estendere la tecnica vista non solo all'analisi della risposta impulsiva, ma anche all'analisi di suoni e rumori in altri ambienti, o all'aperto

Qui di seguito a titolo di esempio riportiamo un frame della visualizzazione di un treno che passa su un ponte ferroviario e relative riflessioni sulle case alle spalle dell'ascoltatore



*Fig. 6.3 - Esempio di visualizzazione dinamica su tempi lunghi con la tecnica SPS*

## 7 Bibliografia

- [1] Marco Binelli, Andrea Venturi, Alberto Amendola, Angelo Farina, "*Experimental analysis of spatial properties of the sound field inside a car employing a spherical microphone array*", 130th AES Conference, London, 13-16 May 2011
- [2] Angelo Farina, Alberto Amendola, Andrea Capra, Christian Varani, "*Spatial analysis of room impulse responses captured with a 32-capsules microphone array*", 130th AES Conference, London, 13-16 May 2011
- [3] A. Farina, A. Capra, E. Armelloni, C. Varani, A. Amendola, "*Caratterizzazione Acustica Del Teatro Alla Scala Di Milano*", Convegno AIA "Teatri d'opera dell'Unità d'Italia" Teatro La Fenice Venezia, 23 Novembre 2011
- [4] A. Farina, M. Binelli, A. Capra, E. Armelloni, S. Campanini, A. Amendola, "*Recording, Simulation and Reproduction of Spatial Soundfields by Spatial PCM Sampling (SPS)*", International Seminar on Virtual Acoustics, Valencia (Spain), 24-25 November 2011
- [5] S. Moreau, J. Daniel, S. Bertet, "*3D Sound Field Recording with Higher Order Ambisonics - Objective Measurements and Validation of a 4th Order Spherical Microphone*", 120th AES Convention, Paris (France), 20-23 May, 2006
- [6] J. Daniel, R. Nicol, S. Moreau, "*Further Investigations of High Order Ambisonics and Wavefield Synthesis for Holophonic Sound Imaging*", 114th AES Convention, Amsterdam (The Netherlands), 22-25 March 2003.
- [7] D. Malham, "*The Role of The Single Point Soundfield Microphone In Surround Sound Systems*", Microphones & Loudspeakers, AES UK Conference.
- [8] A. Laborie, R. Bruno, S. Montoya, "*A new Comprehensive Approach of Surround Sound Recording*", 114th AES Convention, 2003 March 22-25, Amsterdam, The Netherlands.
- [9] O. Kirkeby, P. A. Nelson and H. Hamada, "*The 'stereo dipole' – a virtual source imaging system using two closely spaced loudspeakers*", J. Audio Eng. Soc., vol 46, no. 5, pp. 387-395
- [10] O. Kirkeby, P. Rubak, A. Farina, "*Analysis of illconditioning of multi-channel deconvolution problems*", 106th AES Convention, Munich, Germany - May 8-11, 1999
- [11] A. Farina, R. Ayalon, "*Recording concert hall acoustics for posterity*", 24th International Audio Eng. Soc. Conf. on Multichannel Audio, Banff, Canada, paper no. 38, 2003

- [12] A. Farina, A. Capra, L. Chiesi, L. Scopece, *A spherical microphone array for synthesizing virtual directive microphones in live broadcasting and in post production*, 40th AES Conference, Tokio, Japan, 8-10 October 2010
- [13] A. Farina, *Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique*, 110th AES Convention, Paris 18-22 February 2000.
- [14] Renato Spagnolo – *Manuale di acustica* – UTET Libreria, Torino, 2001
- [15] F. Alton Everest – *Manuale di acustica* – Editore U. Hoepli, Milano, 1996
- [16] Norme ISO 3382 – *Acustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters* – International Organization for Standardization, Switzerland, 1997
- [17] Nicola Prodi – *La qualità dell'ascolto tra gli esecutori* – Università degli Studi di Ferrara, 2002
- [18] <http://www.mhacoustics.com>
- [19] [<http://www.aurora-plugins.com>]
- [20] <http://www.adobe.com/it/products/audition/>
- [21] <http://www.mathworks.com>

## **RINGRAZIAMENTI**

**Un grazie particolare, sempre, ad Angelo che ci sprona a portare sempre avanti il passo e ci permette di vedere come normali cose che per altri sembrano incredibili.**

**Un grazie a tutti gli amici del team di Angelo in cui a differenza di altri posti si può assaporare l'aiuto reciproco, e non la competizione, segreto questo per crescere tutti più velocemente.**

**Un grazie particolare ad Andrea per l'aiuto nella stesura della Tesi**

**E un grazie anche a tutti coloro che in questo momento non ho in mente e che mi pentirei di non aver ricordato...**