

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA INFORMATICA

ELABORAZIONE DI MAPPE ACUSTICHE
TRAMITE ARRAY MICROFONICI

Relatore:
Chiar.mo Prof. ANGELO FARINA

Correlatore:
Dott. Ing. SIMONE CAMPANINI

Tesi di laurea di:
LORENZO ROTTEGLIA

ANNO ACCADEMICO 2012–2013

alla mia famiglia.

Indice

1	Premessa	9
2	Elementi di acustica	12
2.1	Introduzione	12
2.2	Grandezze fondamentali	12
2.2.1	Frequenza e Periodo	13
2.2.2	Velocità di propagazione e lunghezza d'onda	14
2.3	Onde acustiche	14
2.3.1	La scala dei deciBell	15
2.3.2	Livello di pressione	17
2.3.3	Livello equivalente	18
2.4	Sistema uditivo umano	19
2.4.1	Effetti di non linearità dell'orecchio umano	20
2.4.2	Bande frequenziali	21
2.4.3	Filtri di ponderazione	25
3	Array microfonici	26
3.1	Array sferico: <i>EigenmikeTM EM32</i>	30
3.1.1	Composizione del sistema	30
3.1.2	Limiti intrinseci teorici del sistema	32
3.2	Altri array	35
3.2.1	Array lineari	35

3.2.2	Array planari	36
3.2.3	Array cilindrici	36
4	Sintesi di microfoni virtuali	38
4.1	Sistema di Elaborazione	38
4.1.1	Approccio innovativo di inversione numerica	40
5	Ambiente di Sviluppo: l'host <i>Audacity</i>[®]	42
5.1	Libreria per la costruzione di interfacce grafiche <i>wxWidgets</i>	44
5.2	Altre librerie	45
5.3	Libreria di elaborazione e codifica audio e video: <i>FFmpeg</i>	47
6	Descrizione plug-in: un manuale d'uso	48
6.1	Selezione dell'intervallo temporale da analizzare	49
6.2	Finestra di configurazione	50
6.3	Interfaccia principale	52
6.4	Esportazione dei risultati	55
7	Dettagli di Implementazione	56
7.1	Acquisizione dei dati in ingresso	57
7.2	Organizzazione del carico computazionale	58
7.3	Livello di fondo scala	59
7.4	<i>Mirroring</i> dei microfoni virtuali	60
7.5	<i>Meshing</i> della superficie mediante l'operazione di triangolazione di <i>Delaunay</i>	62
7.6	Interpolazione dei valori acquisiti e filtraggio in bande d'ottava . .	64
7.7	Mappatura con scale cromatiche e <i>auto-scaling</i>	66
7.8	Esportazione dei risultati	67
8	Conclusioni	69

A Appendix	70
A.1 Propagazione di onde sonore	70
A.2 Intensità, densità di energia e potenza	72
A.3 Livelli sonori	73
A.4 Curve di ponderazione	75
A.5 Trasformata di Fourier	75

Elenco delle figure

1.1	Esempio di mappa acustica generata dal plug-in <i>Microphone Array Analyzer</i>	10
2.1	Moto delle particelle di un fluido elastico compresse e decomprese alternativamente da un pistone, creando l' <i>onda sonora</i>	13
2.2	Livello sonoro di una sorgente intermittente e relativo livello equivalente L_{EQ}	18
2.3	Apparato acustico umano.	19
2.4	Risposta non lineare della coclea	20
2.5	Grafico delle curve isofoniche	21
2.6	Grafico delle curve di ponderazione	25
3.1	Tecniche di registrazione con array discreti di tipo INA-5	27
3.2	Tecniche di registrazione con array discreti di tipo OCT surround	27
3.3	Il microfono <i>SoundField™</i> di Gerzon e Craven	28
3.4	Diagramma polare delle armoniche <i>Ambisonics</i>	29
3.5	Struttura del sistema <i>Eigenmike™EM32</i>	30
3.6	Disposizione delle capsule dell'array microfonico <i>Eigenmike™EM32</i>	31
3.7	Angoli di riferimento e loro direzioni relative per la descrizione sferica rispetto al sistema di riferimento antropometrico secondo la norma ISO2631.	32
3.8	Array lineare e relativo diagramma polare a 1 kHz	35

3.9	Array planare	36
3.10	Array cilindrico	37
4.1	39
4.2	Possibili microfoni virtuali a ordine di direttività crescente (sulla destra) calcolati a partire da armoniche sferiche <i>Ambisonics</i> fino al terzo ordine (sulla sinistra).	40
4.3	Diagramma polare di un microfono virtuale cardioide in funzione dell'ordine di direttività.	41
5.1	Interfaccia utente dell'host utilizzato, <i>Audacity</i> [®] sotto diverse piattaforme.	43
5.2	Intorno per la costruzione di interfacce grafiche <i>wxFormBuilder</i> . . .	46
6.1	Selezione dello spezzone di materiale audio da analizzare con il <i>plug-in</i>	49
6.2	Messaggio di errore in caso di memoria insufficiente per le operazioni di <i>precalcolo</i>	50
6.3	Finestra di configurazione del modulo <i>Microphone Array Analyzer</i>	51
6.4	Finestra principale del modulo <i>Microphone Array Analyzer</i>	53
7.1	Rappresentazione schematica del processo di <i>mirroring</i> , necessario a garantire la continuità ai bordi della mappa.	61
7.2	Direzioni di puntamento delle capsule dell' <i>Eigenmike</i> TM sovrapposte ad una foto panoramica del Teatro alla Scala di Milano, svolta secondo lo schema di proiezione visto nella sezione 7.4.	62
7.3	Descrizione della proprietà dei triangoli formati con l'algoritmo di <i>Delaunay</i>	64
8.1	Graphic User Interface sotto le tre diverse piattaforme principali: <i>Windows</i> , <i>Mac OS X</i> e <i>Linux</i>	69

Elenco delle tavelle

2.1	Velocità del suono in alcuni mezzi (fonte:).	15
2.2	Valori di pressione e di SPL relativi a alcuni suoni comuni.	16
3.1	Coordinate sferiche antropometriche delle direzioni delle capsule fornite sia in gradi che in radianti secondo la norma ISO2631 descritta in figura 3.7	33

Capitolo 1

Premessa

Il presente progetto di tesi si pone l'obiettivo mappare il campo acustico dinamico di un ambiente (interno o esterno) tramite una sonda, nella fattispecie un *array microfonico*. Il risultato richiesto quindi è quello di ottenere un videoclip composto dalla sovrapposizione di:

un videoclip di sfondo ottenuto da una particolare videocamera, che rappresenta l'ambiente circostante e contenente quindi un'informazione visiva.

la mappa acustica dinamica composta di bande colorate rappresentanti i livelli sonori istantanei nel campo acustico.

eventuali metadata quali le posizioni delle singole capsule microfoniche dell'array, o i valori dei livelli sonori in determinate posizioni di interesse.

Il problema è stato affrontato programmando un software di nome *Microphone Array Analyzer*. Si tratta di un *plug-in* scritto per l'ambiente di editing audio *Audacity*^{®1}, celebre software *open-source* molto versatile, dalle possibilità molto ampie per permettere gli utilizzi più disparati. Il software sviluppato in questa tesi, dialogando con l'*host Audacity*[®], acquisisce i dati in ingresso e genera da essi una *mappa acustica*, composta da bande di colore che corrispondono ai diversi

¹<http://audacity.sourceforge.net/?lang=it>

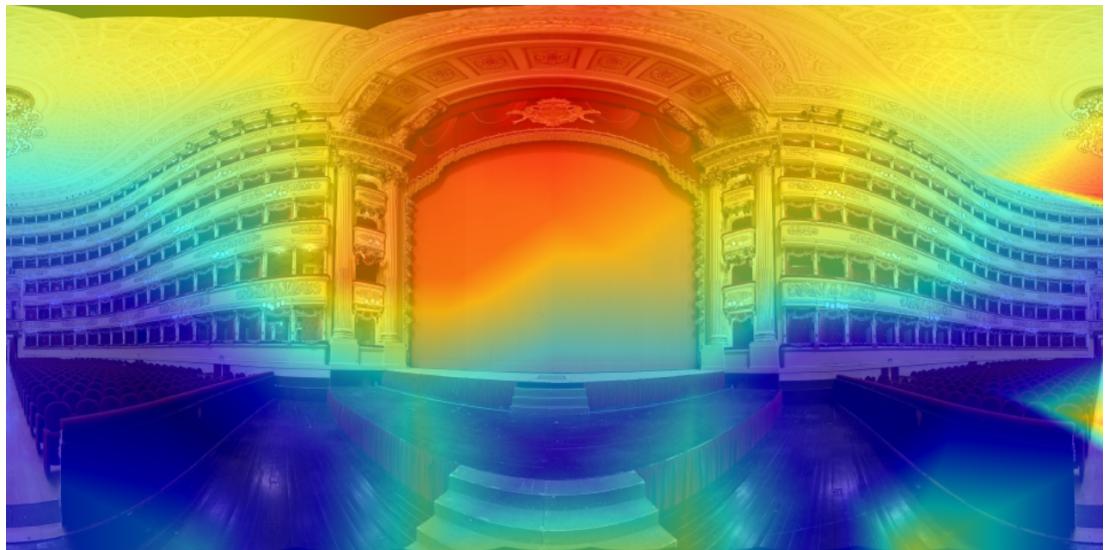


Figura 1.1: Esempio di mappa acustica generata dal plug-in *Microphone Array Analyzer*

livelli sonori attorno all'array sonda, posto nell'ambiente di misura.

Questo tipo di *tool* può avere svariate applicazioni tecnologiche in quanto è in grado di rendere visibile i campi sonori i quali contengono invece una informazione di tipo uditivo. La potenza di questa operazione sinestetica di traduzione di un'informazione uditiva in una visiva, risiede principalmente nella maggior apprezzabilità delle grandi qualità di definizione spaziale degli array microfonici.

Dal punto di vista applicativo, il sistema sviluppato può essere di estrema utilità nella precisa individuazione di sorgenti sonore, nonchè nella misura delle loro emissioni. Basti pensare per esempio ad ambienti di tipo industriale, nei quali spesso il campo acustico è complesso e generato da molteplici e varie sorgenti che spesso risultano difficili da individuare con precisione. Un altro esempio calzante riguarda gli ambienti molto ristretti come gli abitacoli di automobili o aereoplani il cui confort è una specifica di progetto che attualmente ricopre un notevole interesse.

In particolare, la principale espansione da me svolta durante questa tesi, è stata quella di rendere il software in grado di generare una mappa *dinamica* riflettendo i cambiamenti del campo acustico attorno alla sonda istante per istante

e sovrapponendo questo risultato a un video di sfondo, posto in trasparenza e acquisito mediante telecamere installate appositamente sulle sonde utilizzate e raffigurante l'ambiente stesso di misura.

Di seguito, in sintesi, il contenuto:

Capitolo 2 richiami teorici sulla acustica di base e riguardo alcune proprietà fisiche del suono, ausilio fondamentale a tutta la trattazione successiva.

Capitolo 3 introduzione agli array microfonici come tecnica di misura dei campi acustici e delle loro proprietà spaziali di direttività e direzionalità.

Capitolo ?? introduzione al concetto di microfono virtuale e relativa sintesi, ovvero possibilità offerte da questo artificio, nella fattispecie riguardo alla descrizione spaziale di un campo acustico.

Capitolo 5 descrizione dell'ambiente software definito dal programma *host* scelto (*Audacity*[®]) e delle librerie esterne utilizzate.

Capitolo 6 breve manuale d'uso per un utilizzatore del *plug-in*. Possibili analisi e parametri significativi.

Capitolo 7 dettagli sul funzionamento interno, algoritmi utilizzati e flusso di lavoro.

Capitolo 2

Elementi di acustica

2.1 Introduzione

Nel presente capitolo verranno fornite le nozioni di base riguardanti i principi fisici fondamentali della fisica del suono.

Partendo dalle grandezze fondamentali che caratterizzano l'analisi del fenomeno sonoro, si parlerà della descrizione delle diverse onde sonore per arrivare a una descrizione di campo acustico di cui si cerca di fornire una mappa visiva.

2.2 Grandezze fondamentali

Il fenomeno sonoro si genera dalla variazione di pressione in un mezzo materiale elastico (fluido o solido) la quale si propaga senza trasporto di materia. Le molecole del mezzo in cui si propagano i suoni, si muovono parallelamente alla direzione di propagazione. Un'onda sonora che viaggi attraverso l'aria non è altro che una successione di rarefazioni e compressioni di piccole porzioni d'aria; ogni singola molecola trasferisce energia alle molecole adiacenti e, dopo il passaggio dell'onda, ritorna pressappoco nella sua posizione iniziale. Consideriamo l'esempio di un fluido che viene compresso dal movimento armonico di un pistone come rappresentato in figura 2.1. Le particelle del fluido adiacenti alla superficie del

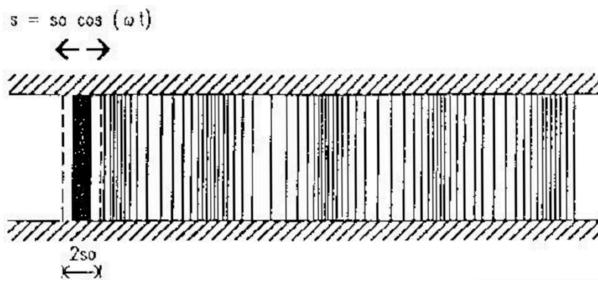


Figura 2.1: Moto delle particelle di un fluido elastico compresse e decomprese alternativamente da un pistone, creando l'*onda sonora*.

pistone saranno spostate dal suo movimento verso le particelle subito adiacenti a esse e si verificherà quindi una compressione locale. Subito dopo il pistone retrocederà lasciando un spazio libero dietro di sé che tenderà a richiamare le particelle che erano state spinte inizialmente, mentre le particelle adiacenti ad esse continueranno il loro movimento nella direzione opposta creando una regione di decompressione locale adiacente al pistone. Questo andamento alternativo è responsabile della creazione del fenomeno ondulatorio, il quale viene denominato onda sonora nel momento in cui viene percepito dalle nostre orecchie.

2.2.1 Frequenza e Periodo

Riferendoci per comodità all'esempio appena visto, definiamo che il moto armonico del pistone è caratterizzato dalla frequenza f con cui la superficie piana si muove. La frequenza indica il numero di cicli compiuti dalla superficie piana in un secondo e viene espressa in *hertz(Hz)*; il tempo necessario a compiere uno di questi cicli è detto *periodo* e viene indicato con il simbolo T . Risulta intuitivo quindi capire che *frequenza* e *periodo* siano in un rapporto di proporzionalità inversa.

Se la frequenza del fenomeno è compresa tra 20 e 20 000 Hz , la perturbazione è percepibile dall'orecchio umano e si parla quindi di *fenomeno acustico* o *sonoro*. Un suono caratterizzato da una funzione di variazione di pressione sinusoidale a *frequenza costante*, come quello dell'esempio, è detto *tono puro*. I rumori pre-

senti in natura invece sono formati da varie componenti tonali pure sovrapposte. Queste onde sovrapposte concorreranno quindi nel formare una *forma d'onda* complessa che avrà frequenza proporzionale alle frequenze componenti.

Il nostro orecchio è particolarmente abile nel percepire le variazioni di frequenza e le relazioni tra le varie componenti frequenziali presenti in un suono. Queste componenti vengono dette *armoniche*. Se le armoniche sono multiple intere le une delle altre, allora si avrà un effetto musicale piacevole detto *consonanza*, in caso contrario si otterrà un suono poco armonioso (addirittura in certi casi dall'altezza indeterminata) detto *dissonanza*.

2.2.2 Velocità di propagazione e lunghezza d'onda

Le proprietà elastiche e la massa del mezzo fluido stabiliscono la *velocità* c con cui la perturbazione si trasmette. Troviamo nella tabella 2.1 la velocità di propagazione sonora in differenti mezzi elastici. Tenendo come riferimento sempre l'esempio del pistone oscillante di figura 2.1, definiamo come *lunghezza d'onda* λ la distanza tra due picchi di compressione del mezzo elastico.

Perciò, fissata la frequenza f del moto armonico del pistone, λ dipende dal valore della velocità di propagazione c_0 secondo la relazione:

$$\lambda = \frac{c_0}{f}, \quad (2.1)$$

o alternativamente sfruttando la proporzionalità inversa tra *frequenza* e *periodo*:

$$\lambda = c_0 T. \quad (2.2)$$

2.3 Onde acustiche

I fenomeni acustici consistono quindi essenzialmente in una perturbazione di pressione che si propaga in un mezzo elastico. Ciò che caratterizza il fenomeno è l'entità di questa perturbazione rispetto a un valore di equilibrio preso come riferimento. Nel caso applicativo più frequente, la propagazione nell'aria, si prende

Materiale	Densità ρ [kg /m ³]	Velocità del suono c [m /s]
Acciaio	7800	5000
Alluminio	2700	5820
Calcestruzzo	2000 ÷ 2600	3500 ÷ 5000
Gomma	1010 ÷ 1250	35 ÷ 230
Legno	400 ÷ 700	3300
Marmo	2600	3800
Mattoni pieni	2100	3600
Piombo	11300	1260
Rame	8900	4500
Sabbia	1600	1400 ÷ 2600
Stagno	7280	4900
Sughero	240	480
Vetro	2300 ÷ 5000	4000 ÷ 5000
Zinco	7100	3750

Tabella 2.1: Velocità del suono in alcuni mezzi (fonte:).

come riferimento la pressione atmosferica.

Essendo P_0 la pressione di riferimento del mezzo, la *pressione acustica istantanea* viene definita come segue:

$$p(t) = p'(t) - P_0 \quad (2.3)$$

dove $p'(t)$ è il valore di pressione atmosferica nell'istante t in un punto dato in cui si vuole misurare la pressione acustica.

2.3.1 La scala dei deciBell

Il valore minimo di perturbazione di pressione p_0 udibile varia da persona a persona, ma il valore standard considerato come riferimento di misura è:

$$p_0 = 20 \mu Pa \quad (2.4)$$

<i>Evento sonoro</i>	<i>Variazione di pressione</i> [Pa]	<i>Livello di pressione</i> (SPL) [dB]
Jet militare al decollo, 50m	200	150
Arma da fuoco, 3m	63	130
Concerto rock, 2m	20	120
Motosega, 1m	14	117
Passaggio di un Aeroplano	6,3	110
Clacson, 7m	2	100
Metropolitana, interno	1	94
Strada trafficata, 1m	$2 \cdot 10^{-1}$	80
Automobile, interno	$6 \cdot 10^{-2}$	70
Conversazione	$2 \cdot 10^{-2}$	60
Ambiente casalingo	$2 \cdot 10^{-3}$	40
Stormire delle foglie	$2 \cdot 10^{-4}$	20
<i>Soglia di udibilità</i>	$2 \cdot 10^{-5}$	0

Tabella 2.2: Valori di pressione e di SPL relativi a alcuni suoni comuni.

Invece i valori massimi a cui il sistema uditivo può venire sottoposto sono dell'ordine delle centinaia di pascal. Normalmente viene considerata come soglia del dolore $P_{max} = 20 \text{ Pa}$. Si pensi però che alcuni rumori comuni superano di gran lunga questa soglia.

Sono stati riportati nella tabella 2.2 alcuni valori di pressione in pascal relativi a suoni comuni. Dunque è evidente che la dinamica a cui è sottoposto l'apparato acustico umano, e che quindi è necessario misurare, è molto ampia. Infatti:

$$\frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{200 \text{ Pa}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}} = 10^7 \quad (2.5)$$

Per evitare quindi di utilizzare sette ordini di grandezza, nonché per rispettare le proprietà di non linearità della risposta dell'apparato acustico umano¹, viene

¹Vedi sezione 2.4.1

introdotta la scala logaritmica dei *decibell*. Data una grandezza da misurare G e un suo valore di riferimento g_0 rispetto al quale effettuare la misura, si definisce il *decibell (dB)* come:

$$\text{grandezza } G \text{ espressa in dB} = 10 \cdot \log \left(\frac{G}{g_0} \right) \quad (2.6)$$

Perciò il *dB* non rappresenta un'unità di misura ma semplicemente una scala logaritmica con cui rappresentare il valore. La scala dei decibel può quindi essere applicata a qualunque grandezza. Nel momento in cui essa viene applicata alla variazione di pressione di un suono si parla di *Livello di Pressione* (o *Sound Pressure Level SPL*).

2.3.2 Livello di pressione

Quasi mai in acustica si fa riferimento alla pressione direttamente in pascal, si usa piuttosto misurare in dB e, per dare un significato energetico alla misura, si usa considerare il quadrato del valore di variazione di pressione. Si definisce quindi il *livello di pressione acustica L* (o SPL: Sound Pressure Level):

$$L = \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \text{ dB}, \quad (2.7)$$

o più comunemente

$$L = 20 \cdot \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ dB}, \quad (2.8)$$

dove p_0 sia il valore di scostamento di pressione usato come riferimento, scelto dal sistema internazionale uguale a $20 \mu\text{Pa}$ che come abbiamo visto poco sopra nell'equazione 2.4 corrisponde alla soglia di udibilità a 1000 Hz nell'atmosfera in condizioni standard².

²Per una spiegazione più dettagliata sui livelli sonori si veda l'appendice A.3

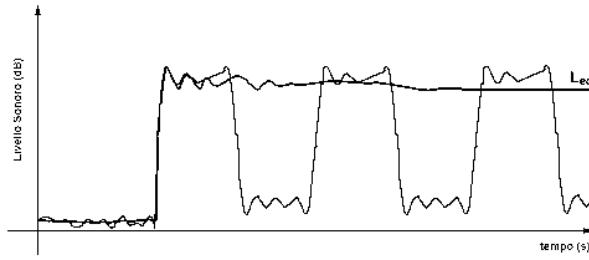


Figura 2.2: Livello sonoro di una sorgente intermittente e relativo livello equivalente L_{EQ} .

2.3.3 Livello equivalente

In applicazioni reali, usualmente ci si trova in presenza di sorgenti caratterizzate da un valore *SPL* non costante nel tempo, delle quali occorre valutare la *rumorosità*. Descrivendo il fenomeno sonoro con la funzione matematica che ne regola l'andamento del *livello di pressione* nel tempo, otteniamo una valutazione precisa in un dato istante. Questo però non ci fornisce un'informazione sulla rumorosità globale. Se ad esempio avessimo una sorgente che si accende ad intermittenza, conoscere esattamente l'andamento del tempo non aiuterebbe nel valutare il livello sonoro che la sorgente produce in un determinato periodo di tempo.

Si definisce quindi un *livello equivalente* (L_{EQ}) che si calcola come:

$$L_{EQ} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (2.9)$$

Il livello equivalente rappresenta una sorta di media del livello sonoro sul periodo di tempo T considerato. In figura 2.2 è rappresentato l'andamento (quantitativo) del livello emesso da una sorgente intermittente ed il corrispondente livello equivalente: Come si vede dal grafico, il livello equivalente raggiunge valori sempre più stabili all'aumentare della lunghezza della finestra di integrazione considerata. L'importanza di questo valore misurabile è quella di consentirci di quantificare il livello sonoro complessivo emesso da una sorgente in un determinato intervallo di tempo, attraverso un unico numero. Infatti il livello equivalente è usato nella legislazione come riferimento principale sul quale normare il rumore. In parti-

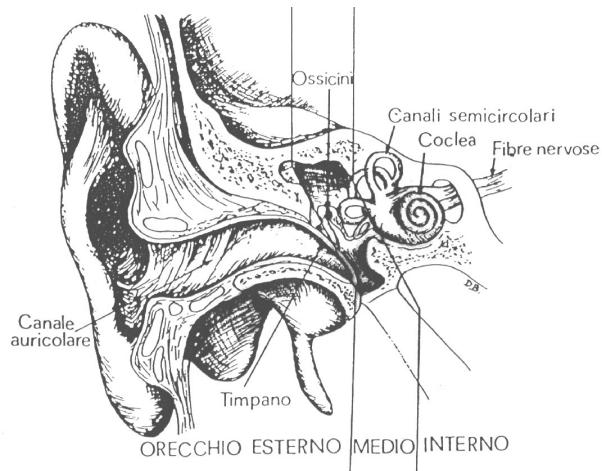


Figura 2.3: Apparato acustico umano.

colare la legge italiana stabilisce tre intervalli di tempo diversi per effettuare le rilevazioni:

dalle 6:00 alle 22:00 corrispondente al periodo diurno.

dalle 22:00 alle 6:00 corrispondente al periodo notturno.

8 ore che corrispondono a una giornata lavorativa. Da utilizzare per normare la rumorosità sul luogo di lavoro.

2.4 Sistema uditivo umano

l'apparato uditivo umano, come si evince dalla figura 2.3, è molto complesso e composto da moltissimi elementi dalle svariate funzioni, ognuno dei quali influenza sulla percezione acustica in maniera rilevante e addirittura alcuni degli effetti legati alla sensazione uditiva, che vengono chiamati *psicoacustici*, riguardano la sola interpretazione, da parte del cervello, dei segnali elettrochimici provenienti dall'apparato uditivo.

In questa sede ci interessano solamente alcuni effetti di non linearità dell'apparato uditivo, le quali comportano conseguenze fondamentali nelle modalità di

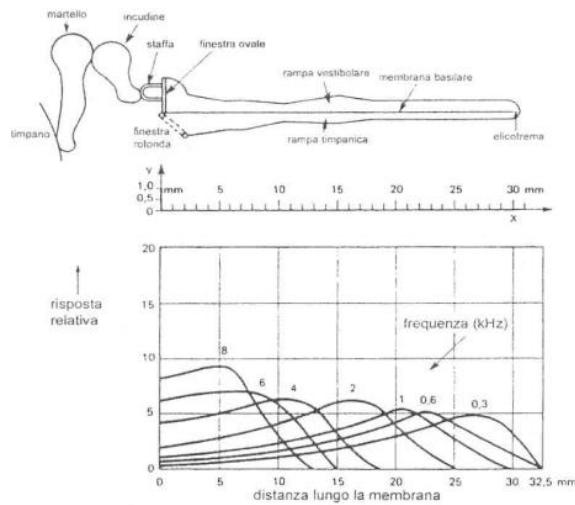


Figura 2.4: Risposta non lineare della coclea

analisi di un qualsiasi fenomeno sonoro, quali la descrizione mediante suddivisione in *bande frequenziali* e l'introduzione dei *filtri di ponderazione*, che verranno descritti successivamente.

2.4.1 Effetti di non linearità dell'orecchio umano

Uno degli organi sensoriali principali dell'apparato acustico è la *coclea* rappresentata in figura 2.4; è lei la responsabile di gran parte degli effetti non lineari di cui discuteremo in seguito.

Sezionando la coclea, si trova una sorta di doppia lamina la quale è caratterizzata da una diversa sensibilità lungo la sua estensione, a seconda delle frequenze di eccitazione del segnale acustico, alla maniera, ad esempio, di una corda o di una frusta. Si osservi nel grafico di figura 2.4 come le basse frequenze interessino la parte terminale mentre le alte frequenze la parte iniziale. Si evince facilmente inoltre che due rumori con bande sovrapposte (in tutto o in parte) si mascherino in modo tale che il segnale di maggiore intensità copra il segnale più debole, a meno che quest'ultimo non abbia una larghezza di banda sufficientemente lar-

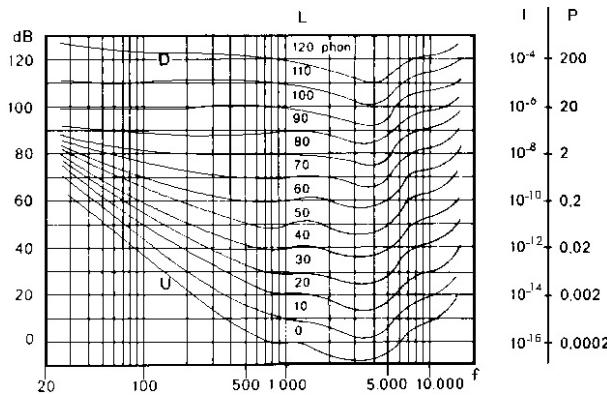


Figura 2.5: Grafico delle curve isofoniche

ga. Per il sopraccitato ed altri motivi che non approfondiremo in questa sede, il sistema uditivo umano presenta una sensibilità meno accentuata alle frequenze molto basse (poche decine di Hz) ed a quelle elevate (oltre i $15kHz$). Inoltre per procurare la stessa *sensazione sonora* (che si misura in *phon*) occorrono, a frequenze diverse, livelli di pressioni sonore diverse, allo stesso modo suoni di stessa intensità ma frequenza diversa vengono percepiti dall'orecchio in modo diverso³. Tutti questi effetti sono osservabili nel grafico in figura 2.5.

Essendo dunque tutto il sistema uditivo umano, nella sua risposta all'eccitamento acustico, molto soggetto alla frequenza dell'onda incidente, è spesso comodo analizzare i fenomeni acustici *filtrati* solo per alcune *bande* di frequenza.

2.4.2 Bande frequenziali

La descrizione della composizione in frequenza dei segnali sonori può essere condotta valutando il contenuto di energia sonora all'interno di prefissati intervalli di frequenze, le *bande di frequenza*, ognuna di esse definita all'interno dell'intervallo delimitato da una frequenza di taglio superiore f_s e da una frequenza di taglio inferiore f_i , e caratterizzato dalla propria frequenza di banda centrale f_c . A seconda del numero e della posizione delle bande che si decide di utilizzare al

³Si veda [7] al capitolo 2.

fine di dividere lo spettro sonoro, si possono condurre principalmente due tipi di analisi:

analisi a banda costante: In questo tipo di suddivisione si utilizzano bande frequenziali di uguale larghezza, nello specifico che godono della proprietà:

$$\Delta f = f_s - f_i = \text{costante} \quad (2.10)$$

analisi a banda percentuale costante: se la larghezza di banda Δf è una percentuale costante del valore della frequenza nominale di centro-banda (f_c) che caratterizza la banda stessa. La scelta di questo metodo di suddivisione dello spettro delle frequenze avviene in special modo perchè il sistema uditivo umano risponde agli stimoli in modo maggiormente somigliante allo schema dell'apertura percentuale costante che a quello dell'apertura costante.

Si parla di *ottave* (o bande da 1 /1 di ottava) nel caso che le frequenze di taglio siano conformi alla legge

$$\begin{cases} f_s = 2 \cdot f_i \\ f_i = \frac{f_c}{\sqrt{2}} \\ f_s = f_c \cdot \sqrt{2} \end{cases} \quad (2.11)$$

Sparla invece di *terzi d'ottava* (bande da 1 /3 d'ottava) se invece le frequenze di taglio seguono questa legge

$$f_s = \sqrt[3]{2} \cdot f_i \quad (2.12)$$

Essendo l'intervallo frequenziale di interesse compreso tra 20 e 20 000 Hz^4 sono necessari “banchi” di 10 filtri (ottave) o 30 filtri (terzi d'ottava) per coprire tutto lo spettro udibile.

⁴intervallo di sensibilità dell'orecchio umano, come visto nella sezione 2.2.1

Entrambe le analisi vengono ottenute tramite un'operazione detta di *filtraggio*, il quale può essere ottenuto passando al dominio della frequenza, con una tecnica di elaborazione matematica detta *FFT (Fast Fourier Transform)*⁵, o in alternativa, effettuando un filtraggio nel dominio del tempo, anche se più oneroso.

Nella seguente tabella sono definite le diverse bande e relative frequenze di centro-banda per le due diverse analisi descritte.

⁵si veda l'appendice A.5 per la definizione e il capitolo 5.2 per l'implementazione

<i>Bande di 1 /1 ottava</i>			<i>Bande di 1 /3 ottava</i>		
<i>fi</i>	<i>fc</i>	<i>fs</i>	<i>fi</i>	<i>fc</i>	<i>fs</i>
			22,4	25	28,2
22	31,5	44	28,2	31,5	35,5
			35,5	40	44,7
			44,7	50	56,2
44	63	88	56,2	63	70,8
			70,8	80	89,1
			89,1	100	112
88	125	177	112	125	141
			141	160	178
			178	200	224
177	250	355	224	250	282
			282	315	355
			355	400	447
355	500	710	447	500	562
			562	630	708
			708	800	891
710	1 000	1 420	891	1 000	1 122
			1 122	1 250	1 413
			1 413	1 600	1 778
1 420	2 000	2 840	1 778	2 000	2v239
			2 239	2 500	2v818
			2 818	3 150	3v548
2 840	4 000	5 680	3 548	4v000	4 467
			4 467	5 000	5v623
			5 623	6v300	7 079
5 680	8 000	11 360	7v079	8 000	8 913
			8 913	10 000	11 220
			11 220	12 500	14 130
11 360	16 000	22 720	14 130	16 000	17 780
			17 780	20 000	22 390

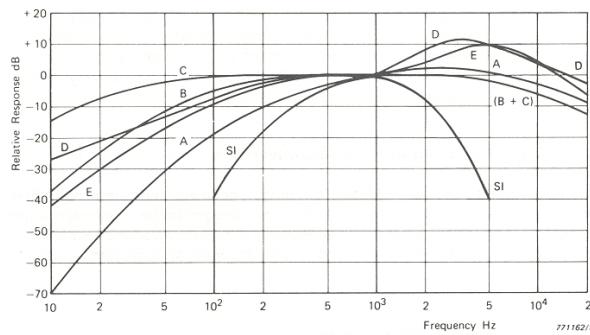


Figura 2.6: Grafico delle curve di ponderazione

2.4.3 Filtri di ponderazione

come descritto nel paragrafo 2.4.1, la sensibilità dell’orecchio varia al variare della frequenza. Per tale motivo il livello di pressione SPL che misuriamo in realtà non corrisponde a una reale sensazione acustica, cioè variazioni del valore di SPL non necessariamente corrispondono a uguali variazioni nella percezione acustica (variazioni di *volume*). Per rendere più aderente alla sensazione umana e quindi rendere più intuitiva la misura di un fenomeno sonoro, occorre utilizzare dei filtri di pesatura o *ponderazione*. Quelli attualmente utilizzati sono rappresentati in figura 2.6. Analizzando il grafico notiamo le curve più importanti⁶:

filtro di ponderazione “A” : il più comunemente impiegato e il cui andamento si conforma alla risposta dell’orecchio umano a livelli medio-bassi. Il livello misurato con la ponderazione del filtro A viene chiamato $dB(A)$.

filtro di ponderazione “C” : impiegato per rumori molto forti o esplosioni misurate quindi in $dB(C)$.

⁶Per un approfondimento sulle curve di ponderazione si veda l’appendice A.4

Capitolo 3

Array microfonici

Nell’evoluzione delle tecniche di riproduzione di un ambiente acustico, si è giunti a livelli di spazializzazione notevoli che rendono l’ascolto molto più coinvolgente. Basti pensare alla diffusione della stereofonia negli anni ’60 fino all’ormai standard de facto della riproduzione audio domestica o cinematografica, il *Surround 5.1*. Esistono anche molte altre tecniche avanzate di riproduzione sonora in grado di avvicinarsi a una simulazione realistica del campo acustico, almeno nel punto di ascolto, quali lo *stereo dipolo binaurale* o la *Wave Field Synthesis WFS* ma non è questa la sede per approfondimenti al riguardo.

Ciò che si vuole sottolineare invece è la necessaria ricerca in campo di registrazione che ha portato a inventare tecniche sempre più innovative per l’acquisizione del campo acustico nei più fini dettagli, quali definizione spaziale, direttività e composizione del segnale.

Inizialmente per creare la sensazione di definizione spaziale si utilizzava una tecnica semplice di *panning* che consiste nel processare il segnale registrato in modo da *proiettare* il suono su uno o sull’altro altoparlante. Parallelamente si sono fatti esperimenti di registrazione multicanale in modo da mantenere il rapporto 1:1 tra canali registrati e numero di altoparlanti, al fine di evitare il *post-processing* e quindi di modificare il segnale originale.

Si vogliono citare al riguardo gli schemi *INA-5* e *OCT-surround*, riportati

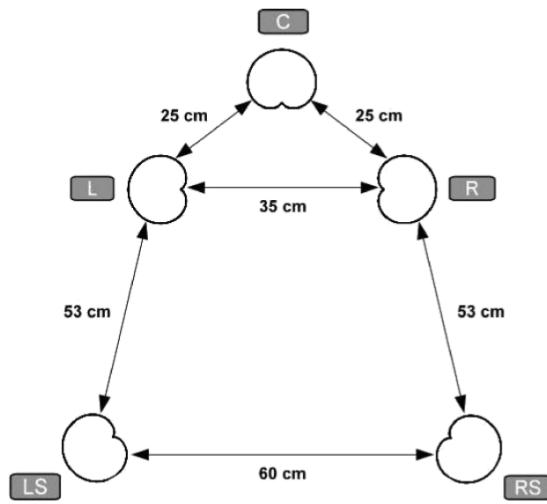


Figura 3.1: Tecniche di registrazione con array discreti di tipo INA-5

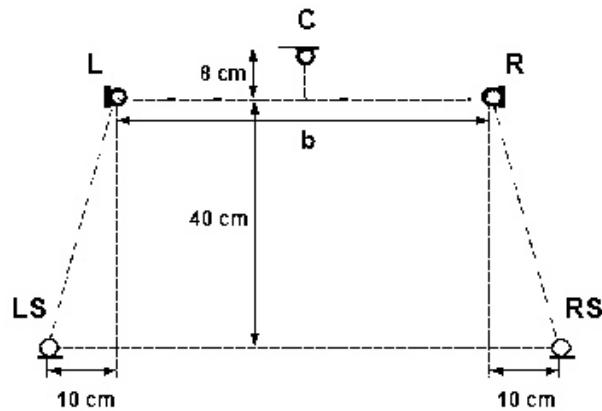


Figura 3.2: Tecniche di registrazione con array discreti di tipo OCT surround

rispettivamente in figura 3.1 e figura 3.2. Il successo di tali array risultò essere molto limitato a causa del fatto che queste tecniche non consentono un controllo in fase di registrazione; inoltre gli array forniscono un angolo di ripresa fissato non regolabile a meno di complesse strutture snodate e non danno buoni risultati in termini di missaggio dei segnali captati a breve distanza.

Un’alternativa innovativa rispetto a queste topologie venne proposta da Michael Gerzon and Peter Craven, che nel 1978 lanciarono sul mercato il microfono



Figura 3.3: Il microfono *SoundField™* di Gerzon e Craven

SoundField™. Si tratta di un array di 4 capsule cardioidi disposte sulle facce di un tetraedro regolare come mostrato nella foto in figura 3.3.

L'approccio innovativo di tale microfono fu quello di scindere completamente i concetti di registrazione e riproduzione acquisendo dei segnali che modellassero il campo acustico nelle sue caratteristiche di pressione ma anche di velocità; solo la combinazione di questi segnali avrebbe dato luogo a informazioni acustiche significative. Questo approccio costituisce la base della codifica *Ambisonics* inventata dallo stesso Peter Craven e alla base di molti impianti audio odierni. Secondo questa teoria, i quattro segnali registrati dalle capsule del sensore tetraedrico, vengono denominati *A-format* e da essi, con un processo matematico teorizzato nella da *Ambisonics*, è possibile ottenere quattro segnali che caratterizzano in prima approssimazione il campo vettoriale acustico nel punto in cui è posta la sonda:

- il segnale omnidirezionale di pressione (W),
- i tre segnali direzionali di velocità lungo i tre assi cartesiani (X , Y e Z).

Questi segnali così elaborati vengono chiamati *B-format*. Essi costituiscono le armoniche di ordine 0 e 1 della codifica *Ambisonics* e sono indipendenti dalla conformazione dell'array utilizzato; la caratterizzazione *B-format* è diventata quindi uno standard per rappresentare l'informazione acquisita dagli array microfonici avanzati.

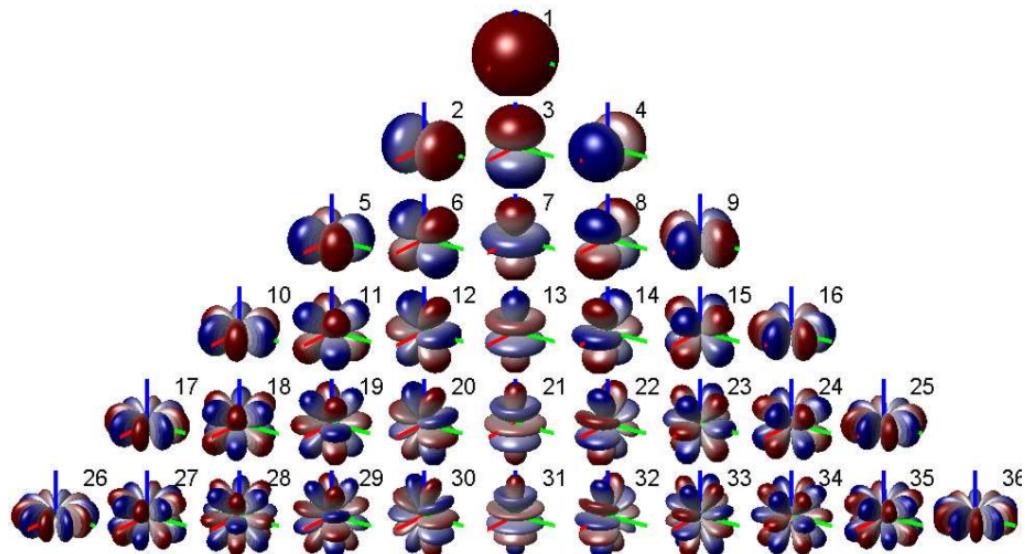


Figura 3.4: Diagramma polare delle armoniche *Ambisonics*

Oggi esistono nuove topologie di array, dal numero di microfoni molto più elevato e dalle disposizioni più disparate, in grado di sintetizzare armoniche *Ambisonics* di ordine superiore al primo il cui diagramma polare è riportato in figura 3.4. Combinando tra loro un set di segnali codificati in formato *Ambisonics* (*B-format*), attraverso un opportuno decoder che opera un semplice missaggio, è possibile ricreare un segnale equivalente a quello registrato da un microfono virtuale con orientazione arbitraria e direttività di ordine massimo pari all'ordine di troncamento del set di armoniche utilizzato.¹

Nel presente capitolo verranno presentati i tre diversi tipi di array microfonici presi in considerazione e sui quali questa tesi è stata collaudata.

Sferico: *Eigenmike™ EM32* prodotto dalla *mhAcoustics*²

Cilindrico: array progettato dal gruppo di Acustica dell'Università degli Studi di Parma³ sul modello dell'array sferico *Eigenmike™ EM32* ma con alcune

¹vedi il capitolo 4 sulla sintesi dei microfoni virtuali.

²http://www.mhacoustics.com/mh_acoustics/Eigenmike_microphone_array.html.

³si veda [4]

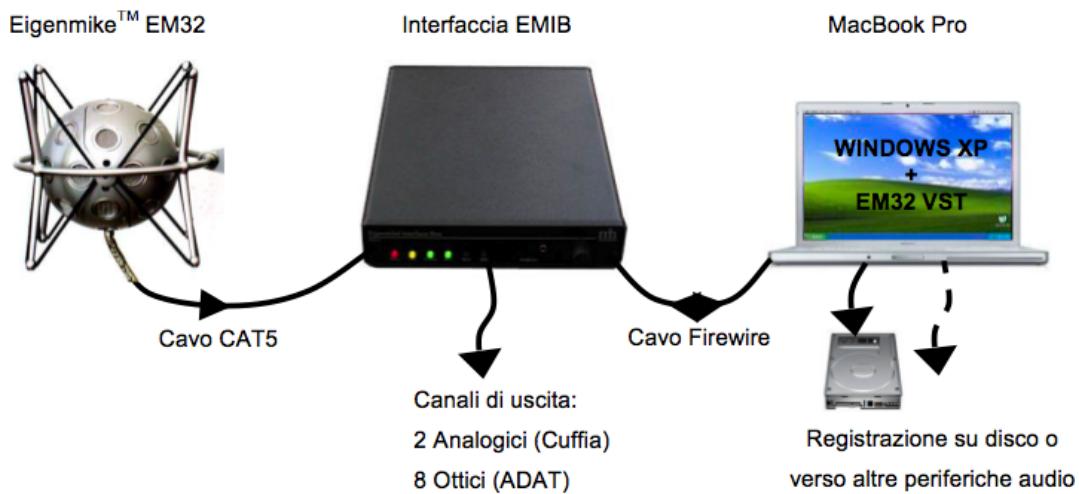


Figura 3.5: Struttura del sistema *EigenmikeTM EM32*

aggiunte di progetto.

Planare: progettato dal gruppo di acustica nel 2009⁴ e migliorato negli anni con alcune modifiche sostanziali.

3.1 Array sferico: *EigenmikeTM EM32*

Si tratta del primo array microfonico utilizzato per lo sviluppo del software, fornito all’Università di Parma dal Centro Ricerche RAI di Torino nell’ambito di un progetto di collaborazione, viene prodotto dalla società americana *mhAcoustic*⁵ ed è probabilmente il primo sistema così portatile della sua categoria ad essere stato commercializzato.

3.1.1 Composizione del sistema

Come possiamo notare dalla figura 3.5, il sistema *EigenmikeTM EM32* viene fornito dalla casa produttrice *mhAcoustic* nella composizione di un array microfonico

⁴si veda [10].

⁵www.mhacoustics.com

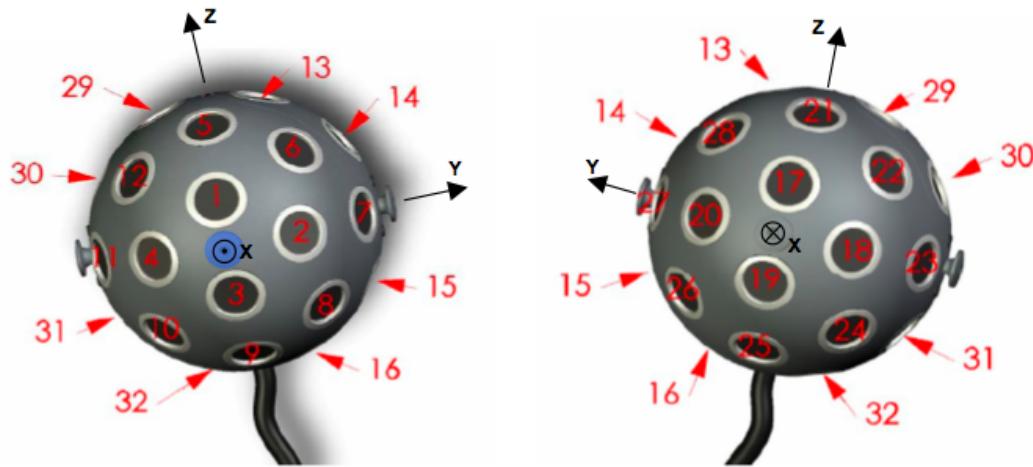


Figura 3.6: Disposizione delle capsule dell'array microfonico *Eigenmike™ EM32*

sferico a 32 capsule, relativa interfaccia di controllo *EMIB*, i quali devono venire interfacciati attraverso il software corredato, con un computer che si occuperà di salvare su hard disk le sessioni di registrazione dell'array.

L'array microfonico 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 *electret* di elevata qualità. La conoscenza della disposizione precisa delle capsule è di grande importanza al fine di mappare queste ultime su una proiezione dello sfondo, come verrà spiegato al capitolo 5.3.

Possiamo intenderne il preciso assetto dall'osservazione della figura 3.6. All'interno della sfera sono alloggiati l'intera circuiteria analogica di preamplificazione con guadagno controllabile via software, nonché i convertitori A/D 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 l'immunità ai disturbi e con grande guadagno in comodità, ingombro e risparmio di cablaggi audio XLR. Lo stesso sistema di preamplificazione analogica consente anche di compensare le differenze di sensibilità esistenti tra una capsula e l'altra per ottenere scostamenti compresi tra $\pm 0.5 \text{ dB}$. La mhAcoustics caratterizza infatti la sensibilità delle

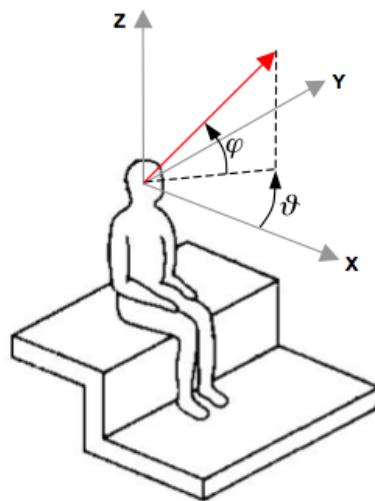


Figura 3.7: Angoli di riferimento e loro direzioni relative per la descrizione sferica rispetto al sistema di riferimento antropometrico secondo la norma ISO2631.

capsule una a una, e fornisce all'acquirente un file di testo contenente i 32 valori che corrispondono ai guadagni in dB necessari alla compensazione. Questi valori, una volta caricati sulla EEPROM contenuta all'interno del microfono stesso, vengono automaticamente sommati ad ogni variazione del guadagno in modo da effettuare la compensazione di sensibilità in modo totalmente trasparente.

Al fine di effettuare la mappatura delle capsule ricercata, sono necessarie le coordinate sferiche descritte dagli angoli di *azimut* e *elevation*. Per questa descrizione si è fatto riferimento alla norma ISO2631 che viene descritta nella figura 3.7.

3.1.2 Limiti intrinseci teorici del sistema

Per la morfologia dell'oggetto *array di microfoni* in questione è possibile calcolare alcuni limiti operativi intrinseci e confrontarli con quelli dichiarati dalla casa produttrice.

In primo luogo, secondo il *teorema di Shannon*, dovrebbe verificarsi un fenomeno di *aliasing spaziale* se si tentassero di decodificare segnali di una frequenza

<i>mic #</i>	θ [rad]	φ [rad]	θ [$^{\circ}$]	φ [$^{\circ}$]
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

Tabella 3.1: Coordinate sferiche antropometriche delle direzioni delle capsule fornite sia in gradi che in radianti secondo la norma ISO2631 descritta in figura 3.7

maggiori di quella limite. Per poter essere decodificata correttamente, infatti, un'onda sonora di lunghezza d'onda λ , dovrebbe essere campionata *nello spazio* un numero doppio di volte rispetto alla frequenza dell'onda che si vuole campionare. Si può quindi scrivere una relazione che lega la massima frequenza decodificabile prima dell'introduzione di effetti di *aliasing*, che chiameremo f_{alias} , con la distanza di campionamento, cioè la distanza minima tra le capsule d , che è funzione dell'angolo tra le capsule γ e il raggio R della sfera, e quindi anche del numero di capsule del microfono:

$$f_{alias} = \frac{v}{2 \cdot \lambda} = \frac{v}{2 \cdot d} \approx \frac{v}{2 \cdot R \cdot \gamma}, \quad (3.1)$$

essendo v la velocità del suono.

Osservando la disposizione delle capsule descritta in tabella 3.1 si può notare che ci sono due possibili spaziature angolari fra le capsule, abbastanza simili tra loro:

$$\begin{cases} \gamma_{1-5} = 1,012 - 0,367 = 0,645 \\ \gamma_{1-3} = 0,367 - (-0,367) = 0,734 \end{cases} \quad (3.2)$$

dove γ_{1-5} rappresenta la spaziatura tra le capsule 1 e 5 mentre γ_{1-3} tra quelle contrassegnate dai numeri 1 e 3.

Sostituendo queste spaziature minime nella equazione 3.1,

$$\begin{cases} f_{alias\ 1-5} \approx \frac{v}{2 \cdot R \cdot \gamma_{1-5}} = \frac{343}{2 \cdot 42 \cdot 10^{-3} \cdot 0,645} = 6,3 \text{ [kHz]} \\ f_{alias\ 1-3} \approx \frac{v}{2 \cdot R \cdot \gamma_{1-3}} = \frac{343}{2 \cdot 42 \cdot 10^{-3} \cdot 0,734} = 5,6 \text{ [kHz]} \end{cases} \quad (3.3)$$

Quindi la massima frequenza operativa sembra essere intorno ai 5,5 kHz. Tuttavia è bene precisare che tale relazione è valida sotto precise semplificazioni geometriche e quindi solamente per array lineari uniformi. La banda passante dichiarata dal costruttore, invece, è dell'ordine dei 10 kHz, quindi ampiamente superiore al valore appena calcolato.

Un'altra importante relazione emerge dalla scomposizione del campo sonoro in serie di *Fourier-Bessel* e consente di stimare il massimo ordine (L) delle armoniche



Figura 3.8: Array lineare e relativo diagramma polare a 1 kHz

Ambisonic ottenibili da un microfono sferico con N capsule.

$$(L + 1)^2 \leq N \quad (3.4)$$

dalla quale deriva, essendo il numero di ordine delle armoniche strettamente non negativo,

$$L \leq \sqrt{N} - 1 = \sqrt{32} - 1 = 4, 7 \quad (3.5)$$

Risulta quindi che il sensore è in grado di generare microfoni virtuali supercardioidi con direttività fino al 4° ordine, mentre la casa costruttrice ha impostato il sistema per la generazione di microfoni virtuali fino alla massima direttività del 3° ordine.

3.2 Altri array

Esistono altre topologie di array avanzati di cui in questo capitolo si fornirà una breve descrizione e si elencheranno le principali differenze con l'array sferico appena descritto.

3.2.1 Array lineari

Gli array lineari sono i più semplici e i più diffusi dal punto di vista commerciale. I loro utilizzi sono plurimi e diversificati, dall'individuazione di sorgenti sonore alle misure acustiche attraverso la sintesi di un microfono virtuale ultradirettivo lungo l'asse dell'array. La disposizione lineare però produce inevitabilmente una

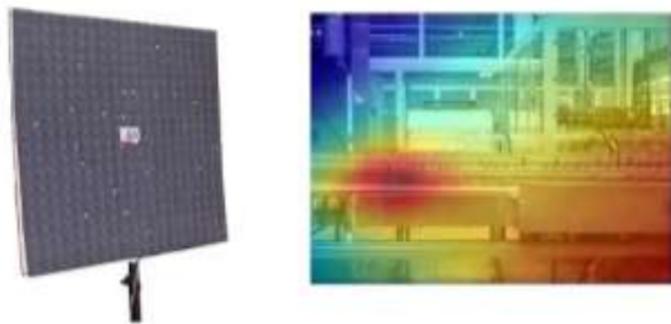


Figura 3.9: Array planare

risposta spaziale dell'array non isotropa che non consente quindi di ottenere una ricostruzione precisa del campo sonoro tridimensionale.

3.2.2 Array planari

Gli array planari hanno un campo di ripresa sonora di circa 180° sia sul piano orizzontale che verticale e sono indicati soprattutto per ottenere immagini sonore tipo *acoustic camera*, utili nell'analisi rumoristica generalmente in ambito industriale. Questa topologia consente di ottenere focalizzazioni della direttività su una griglia rettangolare di punti disposti frontalmente rispetto al pannello. Il modello planare costruito all'università di parma, dal gruppo di Acustica del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli studi di Parma, guidato dal Prof. Ing. Angelo Farina, presenta una disposizione delle capsule secondo una spirale logaritmica modificata: questa figura geometrica dovrebbe portare a una risoluzione acustica migliore rispetto alla disposizione delle capsule randomizzata.

3.2.3 Array cilindrici

Questo tipo di array si pone l'obiettivo di scansionare principalmente l'asse orizzontale a scapito della risoluzione sull'asse verticale, un po' a immagine e somiglianza della naturale percezione dell'apparato acustico umano e di conseguenza anche più utile nella maggioranza delle applicazioni. l'array cilindrico fornisce

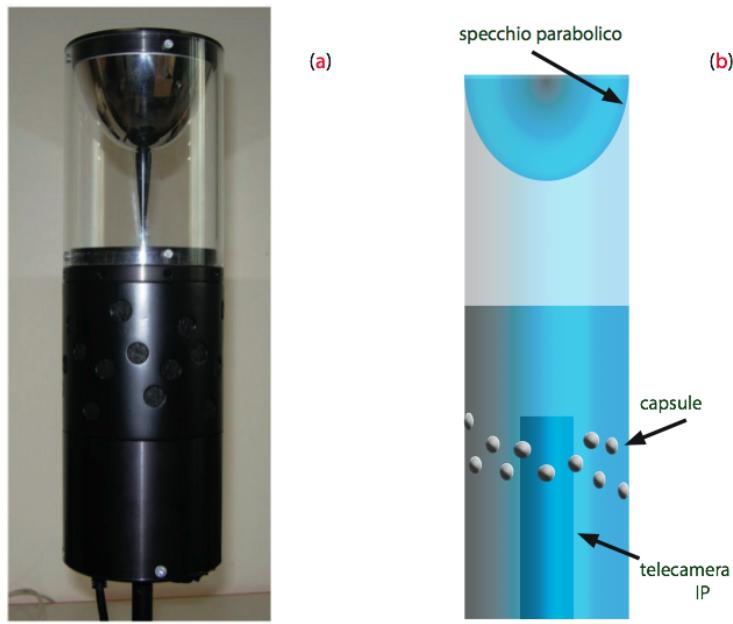


Figura 3.10: Array cilindrico

quindi la possibilità di sintetizzare microfoni virtuali a direttività arbitraria con una zona di puntamento e focalizzazione di 360° sul piano orizzontale e di circa 90° sul piano verticale ($\pm 45^\circ$ dall'orizzonte). L'array costruito dal gruppo di ricerca sopracitato è inoltre dotato di una telecamera IP che puntando ad uno specchio per visione omnidirezionale consente di avere un'immagine di servizio da utilizzarsi come background per la mappa acustica o per il sistema di puntamento real-time dei microfoni virtuali, utilizzato in un altro progetto.⁶

⁶si veda la pubblicazione [5] del gruppo di acustica di AIDA di parma in collaborazione con la RAI

Capitolo 4

Sintesi di microfoni virtuali

L'utilizzo di array di microfoni avanzati, come abbiamo visto, porta numerose possibilità di analisi, tuttavia i segnali registrati dalle capsule devono essere interpretati in qualche modo e non sono pronti per *l'utilizzo*. Come abbiamo visto, la codifica interpretativa tradizionale consiste nel generare le armoniche sferiche *Ambisonics* fino al massimo ordine possibile (*A-format*) a seconda del tipo di array. A partire da questi segnali, con opportune combinazioni e elaborazioni, si può fornire in uscita un set di registrazioni che simulano microfoni, chiamati *virtuali* appunto, dalla direzione e apertura polare arbitrarie. La parte dell'array microfonico che si occupa di passare da segnali *raw* o *B-format* ai microfoni virtuali è il *sistema di elaborazione*

4.1 Sistema di Elaborazione

Il sistema di elaborazione dei segnali *raw* delle capsule di un array microfonico è dunque di primaria importanza per dare significato alle registrazioni ottenute. Implementato solitamente da processori digitali dedicati o in alternativa da sistemi virtualizzati software generano, in ogni caso tecnologico di implementazione o di codifica, dei segnali digitali esprimibili come sommatoria dei contributi di ogni capsula filtrati opportunamente. L'*i-esimo* segnale di uscita risponderà quindi

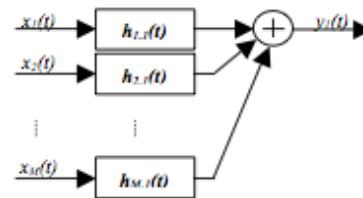
alla legge generica

$$y_i(t) = \sum_{m=1}^M x_m(t) * h_{m,i}(t) \quad (4.1)$$

Il processing compiuto da questo componente del sistema *array microfonico*



Schema del sistema di elaborazione



Schema di un singolo canale di uscita del sistema di elaborazione

Figura 4.1

non costituisce dunque un problema oneroso, infatti si tratta di una somma di convoluzioni facilmente implementabile su un calcolatore con algoritmi noti. La cosa interessante in questa fase consiste nel capire come generare i microfoni voluti cioè quali filtri utilizzare per ottenere questo risultato. Come possiamo vedere dalla figura 4.2, combinando le armoniche sferiche *Ambisonics* di ordine dallo 0 al 3 della colonna di sinistra, è possibile generare microfoni virtuali supercardioidi con direttività crescente dall'ordine 1 all'ordine 3. La direttività di un microfono virtuale di ordine h , espressa in coordinate sferiche, segue l'espressione:

$$D_H(\vartheta, \varphi, h) = \text{sign}(D_1(\vartheta, \varphi)) \cdot |D_1(\vartheta, \varphi)|^h, \quad (4.2)$$

dove $D_1(\vartheta, \varphi)$ è la direttività del microfono virtuale del primo ordine che è pari a:

$$D_1(\vartheta, \varphi) = P + G \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \varphi \quad (4.3)$$

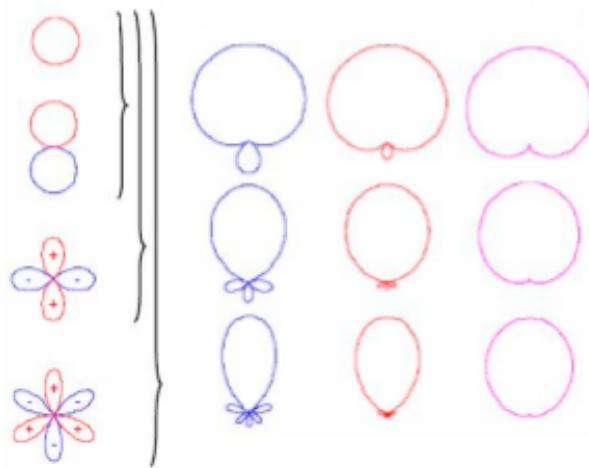


Figura 4.2: Possibili microfoni virtuali a ordine di direttività crescente (sulla destra) calcolati a partire da armoniche sferiche *Ambisonics* fino al terzo ordine (sulla sinistra).

Questo approccio costituisce la tradizione e la storia di questo tipo di codifiche fin dagli anni '70, quando vennero introdotte, con la sola migliorata dell'incremento di ordine di armoniche raggiungibile. Essendo però nella maggior parte dei casi precisa volontà del utilizzatore di questi sistemi codificare un determinato set di microfoni virtuali noto a priori, può essere conveniente evitare di passare attraverso la codifica *Ambisonics* troppo teorica e soggetta a moltissimi scostamenti dovuti a non idealità dei sistemi. Si è provato a seguire una strada alternativa, definendo direttamente le uscite del sistema di elaborazione come segnali monofonici corrispondenti ad un set di microfoni con l'orientazione e direttività cercate.

4.1.1 Approccio innovativo di inversione numerica

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 micro-

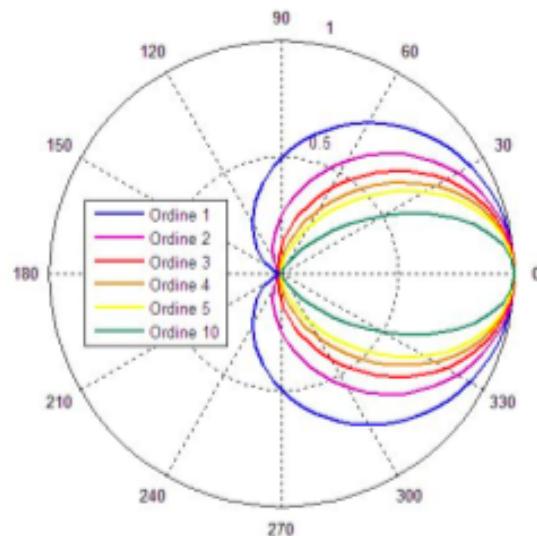


Figura 4.3: Diagramma polare di un microfono virtuale cardioide in funzione dell'ordine di direttività.

fonico 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, convoluti con i segnali delle capsule microfoniche, permetta di ottenere i segnali di un set di microfoni virtuali con direttività arbitraria. La scelta dei coefficienti che caratterizzano i filtri viene fatta 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.¹

¹si veda [3] per una descrizione più accurata del procedimento qui riassunto.

Capitolo 5

Ambiente di Sviluppo: l'host

Audacity[®]

Nell'approccio al problema presentato, si sono studiate e discusse diverse possibilità di sviluppo. Una prima possibilità presa in considerazione era quella di sviluppare un software stand-alone, completo, in grado quindi di effettuare autonomamente tutte le operazioni necessarie alla creazione della mappa, a partire dalla registrazione del materiale audio proveniente dall'array microfonico, fino alla sintesi della mappa stessa.

Per massimizzare la granularità del progetto e per sfruttare risorse già disponibili gratuitamente, si è preferito invece di sviluppare un *plug-in* che si installasse quindi su un sistema pre-esistente, in grado di svolgere tutte le funzioni di base di recording e editing audio, nonchè di poter essere in un futuro espandibile con altre funzioni attraverso l'uso di altri *plug-in* creando quindi una *suite* multifunzionale.

A questo punto si sono presi in considerazione diversi tipi di plug-in e SDK tra le più diffuse e utilizzate, che avessero le caratteristiche cercate di compatibilità multipiattaforma. Principalmente si era discusso sulla possibilità di sviluppare un plug-in utilizzando la SDK della Steinberg[®], per via della universale diffusione e implementazione su quasi tutti i tipi di host su ogni piattaforma esistente.

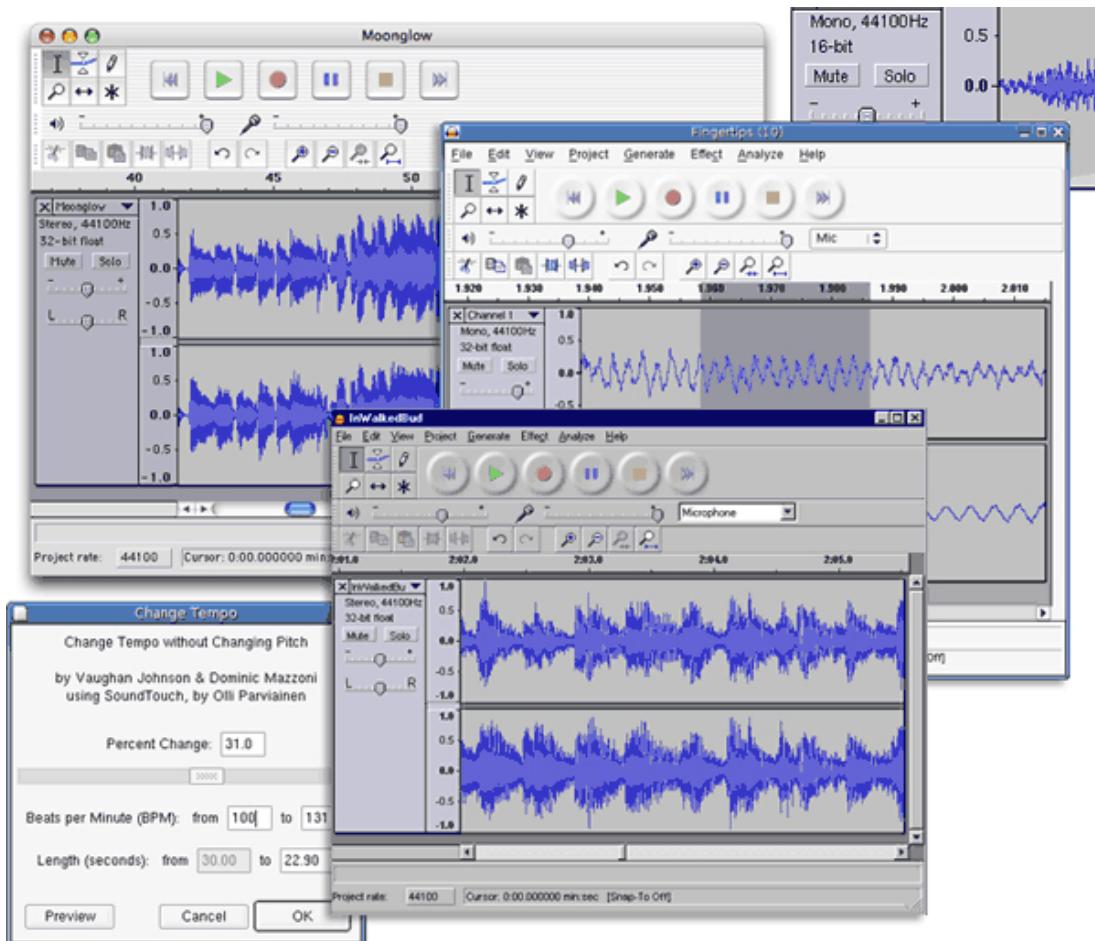


Figura 5.1: Interfaccia utente dell'host utilizzato, *Audacity*[®]sotto diverse piattaforme.

Questo tipo di software prendono il nome di **VST**. Nonostante i grandi vantaggi di portabilità e facilità di utilizzo e di reperibilità di documentazione e supporto, non è stato possibile sviluppare il software con questa **SDK**. Il problema fondamentale che si è riscontrato era l'impossibilità di effettuare analisi globali nel dominio del tempo, come una riscalatura o una semplice normalizzazione per via della rigida impostazione di questi tipi di *plug-in*, i quali cercano sempre di lavorare a blocchetti di 256 campioni alla volta in modo da simulare il più possibile un effetto *real-time*.

Si è optato quindi per la piattaforma più permissiva, comoda e personalizzabile (in quanto progetto *open source*), *Audacity*[®]. Questo *host* fornisce ai *plug-in*

che ne espandono le funzionalità (i *moduli*) tutte le informazioni di cui dispone, dall'intero *workspace* contenente il materiale audio, fino a arrivare alle preferenze che l'utente sta utilizzando. Inoltre si tratta di un programma nativamente multipiattaforma, come richiesto, e a migliorarne ulteriormente le capacità aggiungiamo che si tratta di uno dei pochissimi programmi che gestiscono registrazioni a N canali a piacimento e che implementano il formato audio *W64*. L'utilizzo di questo formato è a dir poco fondamentale in quanto può succedere di dover registrare eventi di lunghezza anche superiore a un'ora, utilizzando decine di canali. Infatti, con l'utilizzo di formati audio dotati di **header** inferiori ai 64 bit, non si supera la decina di minuti di acquisizione, se il numero di canali va oltre i 2 della normale codifica stereo o al massimo i 6 o 7 per le codifiche di tipo *surround*. *Audacity*® consente inoltre la registrazione a 16, 24 o 32 bit float con una frequenza di campionamento fino a 96 KHz.

5.1 Libreria per la costruzione di interfacce grafiche **wxWidgets**

Le **wxWidgets** sono librerie C++ che consentono al programmatore di creare e gestire facilmente interfacce grafiche compilabili sulla maggior parte delle piattaforme più diffuse sia a 32 bit che a 64 bit. Questo pacchetto non è l'unico della sua tipologia; esistono infatti alternative come Tk, GTK+, etc., ma tra le altre **wxWidgets** spicca sicuramente per via della grande maturità del progetto e per la capacità di conferire alla propria GUI il look tipico del sistema operativo sul quale il codice verrà compilato, grazie all'utilizzo delle *API* della piattaforma invece di una emulazione della interfaccia grafica. Grazie all'utilizzo di **wxWidgets**, si ha accesso in maniera nativamente multipiattaforma a una serie di funzioni avanzate già implementate e contenute in un **wrapper** che ne *incapsula* e nasconde al programmatore la dipendenza dalla singola piattaforma, fungendo da sorta

di *middle-ware* e ponendo il livello di programmazione al di sopra dei dettagli di implementazione. Per notare il livello di maturità del progetto basti pensare che vengono fornite funzionalità di *multithreading*, salvataggio e caricamento di immagini in una varietà di formati diffusamente utilizzati, supporto per *database*, **HTML**, **drag-and-drop**, **streams** multimediali, gestione della **clipboard** e altro ancora. Non è un caso che la stessa interfaccia grafica di *Audacity*[®] faccia utilizzo di queste librerie. Possiamo quindi individuare anche nella coerenza di interfaccia con il proprio host (su qualunque piattaforma si trovi a dover funzionare il programma) un nuovo motivo valido per scegliere di utilizzare proprio **wxWidget**.

Per la creazione di interfacce grafiche basate su **wxWidget**, si è individuato un programma *helper* di tipo *WYSIWYG*¹, di nome **wxFomBuilder**, sicuramente di grande utilità e immediatezza nonché di estrema completezza, tanto che si è riusciti a implementare quasi interamente l'interfaccia con questo programma.

5.2 Altre librerie

Durante lo sviluppo, si è ampiamente fatto uso di algoritmi e librerie esterne, in modo da sfruttare i risultati noti più importanti (nel caso di algoritmi matematici) e per gestire in maniera trasparente alcune *features* avanzate del software. Ne elenchiamo alcune tra le più importanti con una breve descrizione. Per chi volesse approfondire sono stati allegati a più pagina i relativi link web dove trovare informazioni supplementari

FFT algoritmo² massicciamente utilizzato in acustica come sempre in materia di elaborazione di segnali. In questo caso si è utilizzata una implementazione propria dello stesso codice sorgente dell'host *Audacity*[®].

¹(*What You See Is What You Get*)

²<https://code.google.com/p/audacity/source/browse/audacity-src/trunk/src/FFT.cpp>

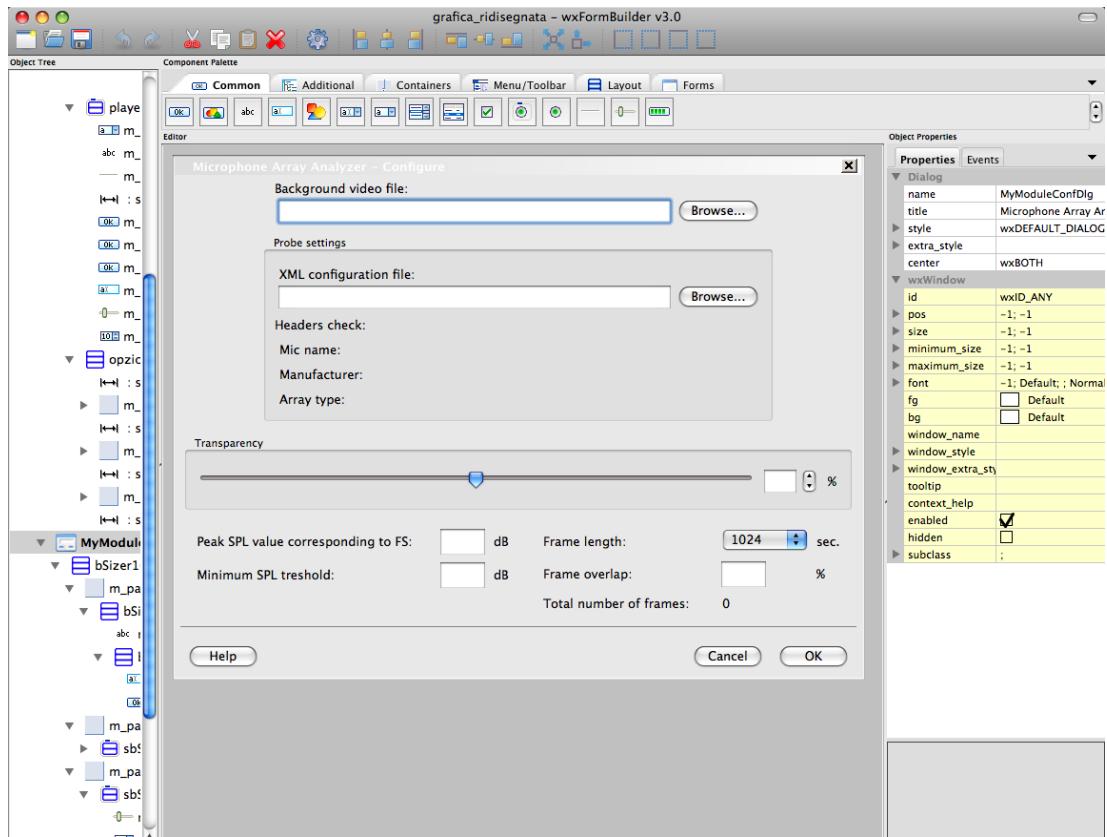


Figura 5.2: Intorno per la costruzione di interfacce grafiche wxFormBuilder

Triangle++ *wrapper* scritto nel linguaggio C++ per la libreria Triangle che implementa il famoso algoritmo della *triangolazione di Delaunay*³ utile a partizionare una superficie con sotto-superfici di area triangolare.⁴

libSndFile libreria gratuita per la lettura-scrittura e elaborazione di file audio.⁵

TinyXML libreria di ausilio alla lettura e scrittura su file xml per scambio di dati tra programmi.⁶ In questo caso è stato usato un foglio xml come file di configurazione per la caratterizzazione dell'array microfonico utilizzato.

³ Si veda il testo [6].

⁴ <http://www.compgeom.com/> piyush/scripts/triangle/

⁵ <http://www mega-nerd.com/libsndfile/>

⁶ <http://www.grinninglizard.com/tinyxml/>

Di queste librerie e del loro utilizzo si parlerà più approfonditamente nei capitoli seguenti.

5.3 Libreria di elaborazione e codifica audio e video: **FFmpeg**

Essendo lo scopo della tesi in oggetto, lo sviluppo di una mappa acustica dinamica ottenuta dalla sovrapposizione di due video generati dall'elaborazione audio, è facile intendere quanto sia di vitale importanza l'elaborazione audio-video. Per gestire le problematiche legate alla lettura, codifica, interpretazione, sincronizzazione dei due flussi audio video si è deciso di ricorrere a una delle librerie più largamente utilizzate, nonché già presenti, ancora una volta, nel bundle di *Audacity®*: **FFmpeg**.⁷ Si tratta di una soluzione completa e, ancora una volta, *cross-platform*, per registrare convertire e elaborare *stream* audio e video.

A sua volta, questa suite contiene le librerie **libavformat**, per interpretare i formati di *multimedia container* con i **muxers** e **demuxers** contenuti al suo interno, **libavcodec**, per l'utilizzo dei **codec** audio e video, la libreria **libavutil** contenente molte *core multimedia utilities*, **libswwresample** la quale è in grado di effettuare operazioni di **resampling** audio e video nonché di conversione del formato dei sample, in maniera altamente ottimizzata.

FFmpeg è gratuita e rilasciata sotto la licenza *GPL*. Le *routines* di questa libreria sono state utilizzate per decodificare il video di background nonché per esportare i risultati nella forma di frame singoli oppure di un video intero. Di questo argomento si discuterà meglio in seguito.⁸

⁷ <http://www.ffmpeg.org/about.html>

⁸ si confronti la sezione ??

Capitolo 6

Descrizione plug-in: un manuale d'uso

Le operazioni compiute dal software qui descritto si dividono sostanzialmente in tre parti:

- una prima parte di *configurazione*
- una parte di *precalcolo*
- una parte di *customizzazione* dei risultati tramite l'utilizzo di varie opzioni fornite dalla *GUI*

In questo capitolo si vogliono descrivere le funzionalità a disposizione dell'utente, nell'utilizzo del *plug-in*, sia in fase di configurazione che in fase di presentazione e analisi dei risultati, mentre la parte di calcolo verrà descritta più approfonditamente nel capitolo 7 alla luce dei parametri utilizzati e presentati ora.

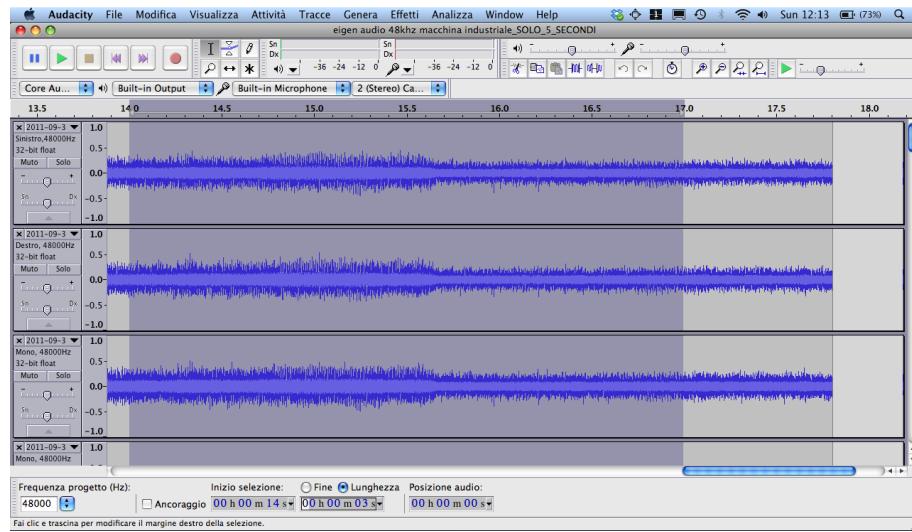


Figura 6.1: Selezione dello spezzone di materiale audio da analizzare con il *plug-in*.

6.1 Selezione dell'intervallo temporale da analizzare

Prima ancora di lanciare il *plug-in*, è necessario caricare il file audio della registrazione multicanale acquisita con l'*array microfonico* nell'host *Audacity*[®]. Di tutta la registrazione, che può in alcuni casi durare anche qualche ora, potrebbe essere necessario selezionare solo una parte, in modo da focalizzarsi nell'analisi su un particolare intervallo di tempo, all'occorrenza anche molto breve. Si pensi per esempio all'analisi delle prime riflessioni in una sala da concerto: in questo tipo di operazioni si è interessati a studiare il comportamento di un ambiente sotto l'aspetto degli echi e altri effetti che possono essere fastidiosi per alcuni utilizzi dell'ambiente stesso: a questo scopo è necessario selezionare la porzione di audio di interesse, come indicato in figura 6.1. Così facendo, *Audacity*[®] riesce a gestire il materiale audio da editare attraverso i *plug-ins* (che nel menù del programma vengono denominati *effects*).

In alternativa è possibile selezionare anche l'intera registrazione, consapevoli che essendo l'analisi compiuta nel *precalcolo* computazionalmente molto onerosa,

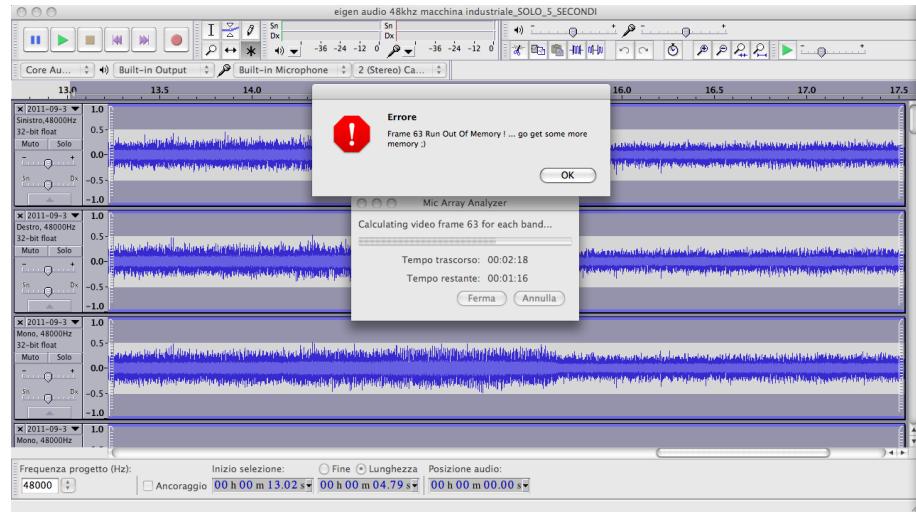


Figura 6.2: Messaggio di errore in caso di memoria insufficiente per le operazioni di *precalcolo*

nonché esigente per quanto riguarda l'utilizzo delle *risorse*, si va incontro alla possibilità che il *precalcolo* si interrompa prima di aver analizzato tutti i frame, a conseguenza dell'esaurimento delle risorse a disposizione. In tal caso verrà presentato un messaggio di avviso, come da figura 6.2, e il programma passerà alla visualizzazione dei soli risultati analizzati. Si tenga presente, a titolo di riferimento, che su un normale laptop con processore *dual core* da 2.0 *GHz* con 2 *Gb* di *RAM*, l'elaborazione più lunga complessivamente effettuabile consta di circa 60 frames e impiega circa 90 secondi per il *precalcolo*.

Sarà sempre possibile costruire un video a partire dai singoli frames esportati in diverse elaborazioni del plug-in, operando su spezzoni audio consecutivi.

6.2 Finestra di configurazione

Una volta selezionato il materiale audio da analizzare, dal menu *Effect* di *Audacity*[®] è possibile accedere al *plug-in* in oggetto, alla voce *Microphone Array Analyzer*.

La prima finestra che appare all'utente è mostrata in figura 6.3. Si tratta di una finestra di dialogo atta all'inserimento di alcuni parametri per l'analisi del materiale audio precedentemente selezionato.

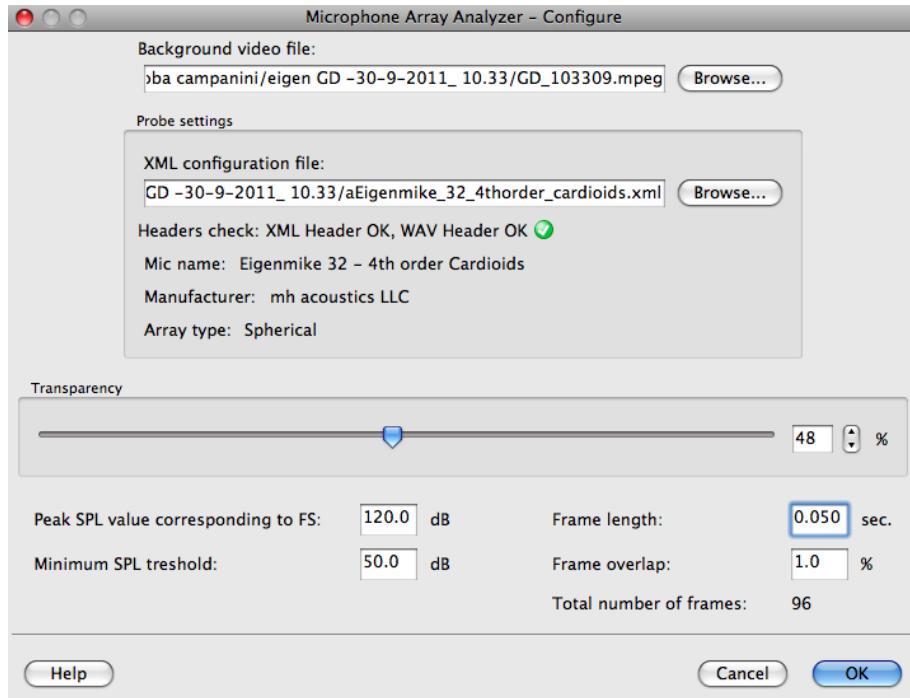


Figura 6.3: Finestra di configurazione del modulo *Microphone Array Analyzer*

Attraverso questa finestra l’utente dovrà specificare:

Un videoclip dell’ambiente di background acquisito, con una videocamera adatta allo scopo¹, durante la registrazione dell’evento sonoro, su cui mappare i livelli *SPL* con le bande di colore.

Un file di configurazione in formato *xml* contenente la mappatura in *pixel* delle posizioni delle singole capsule microfoniche sulla immagine di background, nonché il *filepath* della matrice di filtri matematici (FIR²) utilizzati per sintetizzare tali microfoni nella maniera descritta al capitolo 5.3 e la *frame rate* caratteristica della matrice di filtri, che deve essere la stessa del materiale audio importata nel progetto *Audacity*[®]. Il file contiene anche una serie di informazioni sull’array stesso, come nome e tipologia, casa produttrice ecc,

¹ per una descrizione delle telecamere nei singoli array si ritorni al capitolo 3

²vedi appendice ??

Il livello di trasparenza della colormap al sovrapporsi al video di background.

i livelli di FS e min SPL cioè i limiti della scala di *dB* che si vuole analizzare. I pixel eventualmente presenti nella *color-map* con valori SPL che eccedessero queste soglie verrebbero disegnati completamente trasparenti.

la frame length dello spezzone audio elementare in cui si vuole suddividere il materiale importato per effettuarne l'analisi. Corrisponde alla lunghezza del frame del video finale di output.

la frame overlap cioè la percentuale con cui ogni frame si sovrappone nel tempo a quello a lui immediatamente precedente in modo da aggiungere un certo grado di *smoothing* per controbilanciare l'operazione svolta a monte di suddivisione del materiale di analisi; operazione che introdurebbe una certa *scattosità* del video di output.

La coerenza dei dati verrà verificata automaticamente e, in caso di rilevamento di incongruenze, verrà visualizzato un messaggio di errore con una breve spiegazione.

6.3 Interfaccia principale

Come possiamo notare in figura 6.4, la finestra principale del *plug-in* mostra un video player contenente un video di output preliminare, ottenuto utilizzando un set di opzioni di default. Si ha però accesso anche a tutte queste opzioni direttamente dagli altri pannelli della finestra, potendo quindi modificare ciascuna di queste opzioni e di conseguenza il video di output. Si procede ora con la descrizione, una per una, di queste configurazioni ulteriormente disponibili:

Selettore di banda di frequenze secondo cui filtrare i risultati e osservare quindi al meglio il comportamento delle onde sonore in una banda particolare. Si può quindi discriminare l'emissione di energia sonora in una particolare regione di spettro. Questo tipo di analisi può essere molto utile

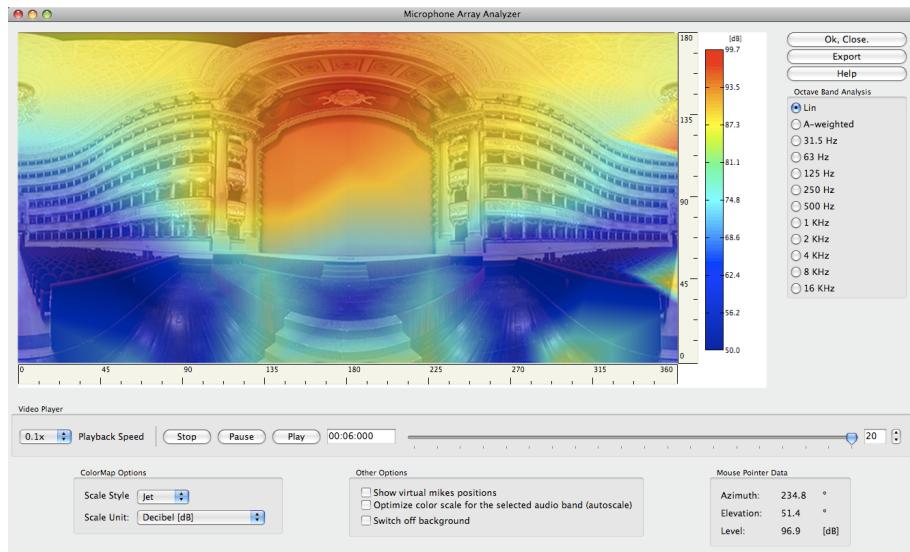


Figura 6.4: Finestra principale del modulo *Microphone Array Analyzer*

quando si cerca di studiare un campo acustico dovendo discriminare diverse sorgenti sonore o particolari riflessioni di uno stesso impulso. Grazie al *filtro passa-banda* è possibile eliminare dall’analisi del campo acustico tutto il materiale sonoro di minor interesse evidenziando quindi l’oggetto di attenzione in fase di test.

Selettore di scala di colore nella modalità di un semplice menù a tendina che fornisce una gamma di tre possibilità cromatiche, *hot* o *cold*, intuitivamente colori caldi o freddi, e *jet* che invece passa dai freddi ai caldi mano a mano che aumenta il SPL che si vuole rappresentare. Grazie a questa opzione è possibile variare la gradazione di colore usata per rappresentare i valori numerici sulla mappa, in modo da massimizzare il contrasto con il video sullo sfondo e rendere il grafico di più comoda interpretazione. Naturalmente, è possibile cambiare opzione anche durante la riproduzione video, come nel caso del cambio di *filtro passa-banda* in modo da analizzare con due scale (o filtri) diversi due parti diverse del video.

Selettore di unità di misura con cui rappresentare i livelli sonori. La scelta

può ricadere in una delle quattro possibilità offerte dal menù a tendina: decibel (dB), Pascal (Pa), radici quadrata e cubica della pressione (\sqrt{Pa} e $\sqrt[3]{Pa}$)

Mostra/nascondi i microfoni virtuali consente, selezionando l'apposita *checkbox*, di visualizzare sulla colormap le posizioni dei microfoni virtuali contrassegnati da una piccola croce bianca.

abilità/disabilità autoscale permette di modificare i valori di massimo e minimo dei livelli SPL associati alla scala di colore rispettivamente considerando il massimo e minimo rispetto al materiale audio filtrato nella banda di frequenze attualmente selezionata, o semplicemente utilizzando i valori pre-filtraggio nel caso in cui la funzione di autoscale non sia selezionata. Questo permette di apprezzare maggiormente i piccoli cambiamenti di livello di pressione misurati in punti vicini tra loro, al fine di notare maggiormente la direzione di provenienza di una sorgente piuttosto che di una riflessione particolare all'interno di un campo acustico complesso. Sarà sufficiente selezionare la banda di frequenze in cui risiede il suono che si vuole evidenziare per ottenere il risultato voluto³.

disabilità/abilità lo sfondo in modo da poter vedere correttamente i colori della mappa acustica senza *l'interferenza* del video di background visibile in trasparenza. Per esempio sarebbe utile, in un momento del video in cui il campo acustico evolve in maniera complicata, poter visionare solo alcuni frame, *spegnendo* il video di background, per poterlo poi riaccendere per la rimanente parte del video.

³Si noti che attraverso la medesima operazione è anche possibile effettuare l'analisi opposta e cioè risalire alla banda frequenziale di maggior rilievo in dB per quanto riguarda il rumore di una sorgente di cui si conosce la direzione, magari nel caso in cui ci si trovi all'interno di un campo acustico complesso in cui è impossibile isolare la sola sorgente interessata.

Oltre a questi pannelli di opzioni con cui personalizzare i risultati ottenuti, è presente nell’interfaccia grafica anche un ultimo pannello, il quale non permette di selezionare nulla e non accetta input di nessun genere, ma fornisce l’importante informazione riguardante il livello sonoro, fornito nell’unità di misura scelta, relativo alla posizione del mouse sulla mappa; fornisce inoltre le coordinate antropometriche della posizione del cursore.⁴ Al termine delle operazioni, quando ci si ritenga soddisfatti del video ottenuto è possibile esportare i risultati tramite l’apposito bottone *Esporta*.

6.4 Esportazione dei risultati

[...]

⁴secondo la norma ISO2631, come descritto al capitolo 3.1.1 e in figura 3.7

Capitolo 7

Dettagli di Implementazione

In questo capitolo si analizzeranno i dettagli del lavoro computazionale che il tracciamento della mappa comporta. La spiegazione, analogamente al flusso di implementazione, segue i seguenti step:

1. Acquisizione dei dati;
2. Organizzazione del carico computazionale;
3. Sintesi dei microfoni virtuali mediante convoluzione;
4. Scalatura delle ampiezze dei segnali risultanti in funzione del fondo scala specificato nella finestra di configurazione;
5. Mirroring dei microfoni virtuali, per garantire la continuità ai bordi della mappa;
6. Copertura dell'intera area della mappa con superfici di forma triangolare (*meshing*);
7. Interpolazione dei dati e filtraggio in bande d'ottava;
8. Applicazione della *color-map* in relazione all'opzione di *auto-scaling*;
9. Sincronizzazione audio-video.

Nei capitoli precedenti si è già analizzato lo step della sintesi dei microfoni virtuali mediante convoluzione (punto 2). Si procederà di seguito con la spiegazione in dettaglio degli altri passaggi.

7.1 Acquisizione dei dati in ingresso

Per il corretto funzionamento del *plug-in*, abbiamo visto, nel capitolo precedente alla sezione 6.2, che sono necessari i seguenti dati in ingresso:

- Una **registrazione multicanale** effettuata con l'array microfonico in uso,
- Un **videoclip dell'ambiente di background**,
- Una **matrice di filtri** in grado di sintetizzare i microfoni virtuali a partire dalle capsule dell'array,
- le **coordinate** in *pixel* delle posizioni dei singoli microfoni virtuali sulla immagine di background.

Di tutti questi dati, viene controllata la coerenza in fase di configurazione¹.

Per quanto riguarda la **registrazione multicanale** direttamente proveniente dall'array, è lo stesso host *Audacity*[®] a farsi carico di rendere disponibile la registrazione al *plug-in* tramite l'utilizzo di apposite *routines*.

La seconda componente fondamentale per la costruzione della mappa acustica è il **videoclip di background**. Essendo a conoscenza del *path* nel *filesystem*, forniti in fase di configurazione dall'utente, utilizziamo alcune *routines* basate sulle *API* fornite dalla suite *ffmpeg* per acquisire il video, salvarlo in memoria diviso in singoli frames (quindi immagini di tipo bitmap o per meglio dire *wxBitmap*). A tale scopo è stata creata una struttura dati complessa composta da due classi fondamentali:

¹ancora come già detto al capitolo 6.2

- la classe `Video` che si occupa di modellizzare il video finale di output,
- la classe `VideoFrame` la quale implementa la struttura logica dei singoli frame del video e contiene tutte le informazioni di pressione, livelli *SPL*, le varie bitmap di sfondo e di mappe di colore per ogni banda frequenziale, nonché le informazioni temporali di *timestamp* riguardanti la sincronizzazione tra audio e relativa mappa acustica e video.

Per quanto riguarda la **matrice di filtri**, abbiamo visto² che viene fornita al plugin sotto forma di file .wav, che viene caricato in memoria *heap* durante la fase di *precalcolo*³ per poi venire *deallocated* al momento della presentazione dei risultati.

Infine le **coordinate** dei microfoni virtuali vengono lette dal file `xml` attraverso le *routines* della libreria `tinyXml` e salvate in una struttura appositamente creata chiamata `MikesCoordinates`.

7.2 Organizzazione del carico computazionale

A questo punto, avendo caricato in memoria tutti i dati necessari, è possibile iniziare l'elaborazione vera e propria. Tutta la parte che segue riguarda una descrizione puramente implementativa, che chiameremo fase di *precalcolo*, la quale dal punto di vista dell'utente corrisponde a una semplice *progress bar* che comunicherà lo stato di avanzamento del programma durante l'elaborazione.

Trattandosi dell'elaborazione di un video, si è pensato di parallelizzare il *precalcolo* in modo da approfittare della ripetitività del flusso di lavoro che deve analizzare i dati dividendoli in piccoli *chunk* temporali corrispondenti ai frame video che si vorranno ottenere. Si procede dunque all'allocazione dinamica di svariati *thread* paralleli che concorreranno alla formazione del video finale, calcolando

²al capitolo 5.3

³dove ne parli?

un singolo frame ciascuno. Per l'implementazione di questa parallelizzazione si è utilizzata la classe fornita da `wxWidgets` chiamata `wxThread` in modo da mantenere lo stile di programmazione multipiattaforma prefissato. Si tratta di una implementazione che aderisce fedelmente allo standard `POSIX`, in modo da non stravolgere le abitudini implementative del programmatore, ma che contiene alcune classi avanzate in grado di semplificare abbastanza la gestione delle corse critiche e della mutua esclusione tra gli accessi concorrenti.

Ogni *thread* dunque si incaricherà di memorizzare in una sua struttura apposita i dati riguardanti il suo *chunk* di audio e procederà con l'esecuzione di tutti i passi che verranno descritti nelle prossime sezioni. Alla fine del proprio iter procedurale andrà a salvare i suoi risultati in una struttura `VideoFrame` che verrà aggiunta (nella posizione coerente con il numero di frame assegnato al thread stesso) alla struttura condivisa `video`, naturalmente rispettando i principi che regolano l'accesso concorrente.

Il main thread, dopo aver *aspettato* tutti gli altri thread⁴ libererà la memoria inutilizzata e aggiungerà informazioni globali derivanti dall'analisi dell'intero video (come il massimo assoluto di fondoscala).

7.3 Livello di fondo scala

Il livello di fondo scala (*FS*) specificato dall'utente tramite la finestra di configurazione del *plug-in*, è inteso come livello massimo con il quale fornire un riferimento di pressione acustica al sensore. Posto che non sono ancora stati scoperti metodi efficaci per la taratura degli array microfonici, si dimostra comunque necessario effettuare una sorta di *adeguamento* dei risultati per ottenere una mappa di significato fisico dal punto di vista quantitativo dei livelli sonori e non solo una corretta interpretazione proporzionale di questi. Il problema è di natura elettroacustica e di elaborazione digitale dei segnali audio: il file `wav` come altri standard

⁴operazione che nello standard `POSIX` prende il nome di `join`

di questo tipo, rappresentano il suono analogico attraverso il campionamento e la quantizzazione⁵, per poi assegnare a ogni *sample* un valore compreso tra -1 e 1. Ora, risulta chiaro che questi non possono essere direttamente la misura dei valori di pressione acustica incidente sulla capsula microfonica, ma sono invece rappresentativi del segnale elettrico in cui essa viene tradotta dal sensore.

Per ritradurre l'informazione in pascal e ottenere quindi un informazione dal significato acustico preciso, è necessaria una operazione di *taratura* dello strumento che permetta di misurare un segnale a frequenza e SPL note a priori, in modo da poter mappare la risposta del sensore ed effettuare una opportuna calibrazione applicando un guadagno in ingresso. Non si è ancora riusciti a riprodurre questo procedimento su un sensore così complesso come un array microfonico, perciò si è escogitato uno stratagemma intuitivo che permetta di effettuare questo adeguamento facilmente, anche se senza pretesa di precisione assoluta. Non si tratta infatti di un'operazione di taratura dello strumento, se non di un semplice *adeguamento* dei risultati a una condizione di *verosimiglianza fisica*.

Si rende necessario quindi misurare, durante la registrazione con l'array microfonico, un segnale di riferimento, per esempio attraverso un fonometro calibrato, dal quale risalire al livello SPL di fondoscala della registrazione. Una volta individuato il picco massimo in dB sarà sufficiente fornire questo valore al *plug-in* in fase di configurazione e il software si occuperà di computare questo semplice adeguamento dei risultati senza variare i rapporti energetici tra i contenuti frequentiali alle varie bande o nelle diverse zone del campo acustico.

7.4 *Mirroring* dei microfoni virtuali

La registrazione effettuata con un array sferico non produce una mappa dei livelli sonori come proiezione cilindrica di una mappa sferica, come ad esempio una map-

⁵appendice 5.3

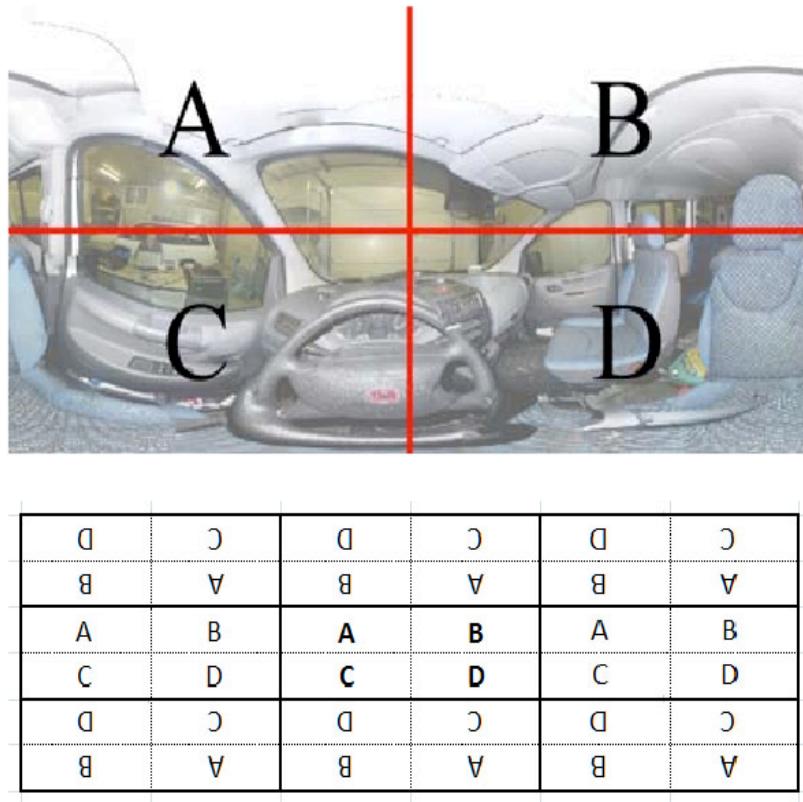


Figura 7.1: Rappresentazione schematica del processo di *mirroring*, necessario a garantire la continuità ai bordi della mappa.

pa ottenibile con un procedimento simile a quello usato per la rappresentazione della superficie terrestre sul planisfero. Muovendo dall'esempio del planisfero, è noto che, essendo la terra sferica, muovendosi lungo i bordi del planisfero si avrà una certa continuità della mappa, ovvero uscendo da nord si rientrerà da sud, uscendo da est si rientrerà da ovest etc. Nel caso particolare di tracciamento della mappa sonora, si è proceduto prolungando la mappa stessa oltre i propri bordi. Per fare ciò si è effettuata una estensione della mappa *specchiando* i punti relativi ai microfoni virtuali sintetizzati seguendo lo schema proposto nel documento [1] e riportato in Figura 7.1.

Dalla figura si osserva che i quattro quadranti in cui può essere scomposta la fotografia sferica, A, B, C e D, debbano essere *copiati e specchiati* verticalmente

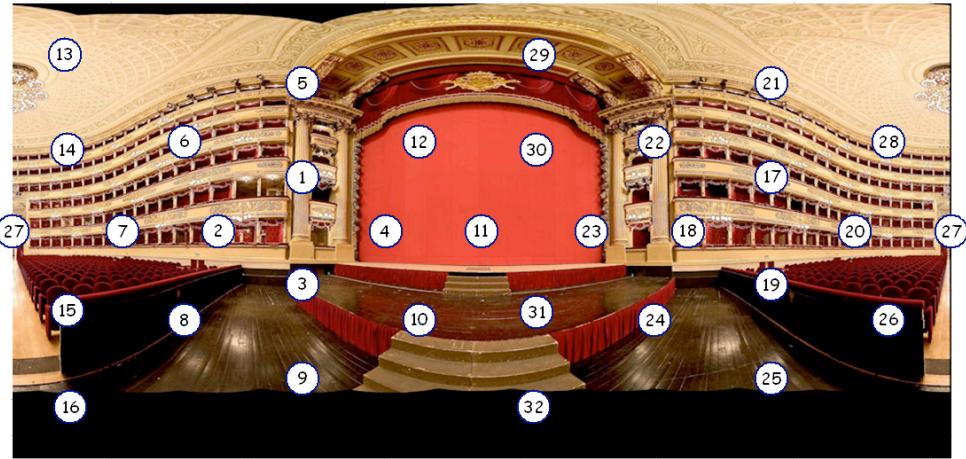


Figura 7.2: Direzioni di puntamento delle capsule dell'*Eigenmike™* sovrapposte ad una foto panoramica del Teatro alla Scala di Milano, svolta secondo lo schema di proiezione visto nella sezione 7.4.

e/o orizzontalmente attorno alla fotografia, per imporre la condizione di continuità; più precisamente si è proceduto copiando le posizioni e i livelli registrati dai microfoni virtuali in modo da riuscire a coprire con delle *mesh* triangolari anche i bordi della mappa, così come meglio spiegato nel prossimo paragrafo.

7.5 *Meshing* della superficie mediante l'operazione di triangolazione di *Delaunay*

Per eseguire l'interpolazione di una serie di livelli noti di una funzione in due variabili, l'ascissa e l'ordinata, occorre suddividere l'intero piano in aree più piccole di forma poligonale, aventi come vertici tre o più coppie di coordinate in cui i livelli siano noti; occorre poi ipotizzare, per ciascuna di queste aree, che i livelli ai vertici facciano tutti parte di un'unica funzione notevole, ed infine calcolare i valori che tale funzione assume in tutti i punti compresi quelli di ognuna delle sottoaree in cui si è suddivisa la superficie. Questo primo passaggio è detto *meshing* della superficie, mentre le sottoaree che vanno a ricoprire l'intera superficie

prendono il nome di *mesh*.

Il primo passo da fare è stabilire il metodo da seguire per determinare la griglia, ovvero la forma geometrica delle *mesh* in cui l'intero piano xy andrà suddiviso. La prima ipotesi potrebbe essere la suddivisione in aree di forma quadrata (come i meridiani e i paralleli del planisfero): questa ipotesi è valida se i microfoni virtuali, che costituiscono la griglia dei punti in cui i livelli sonori sono noti, sono disposti su una griglia uniforme.

Come si può notare dalla Figura 7.2, le posizioni delle capsule dell'*Eigenmike*TM purtroppo non lo sono, e se anche così fosse, lo sviluppo del plug-in sotto l'ipotesi di griglia uniforme avrebbe portato alla realizzazione di un software utilizzabile per un numero limitato di disposizioni dei microfoni virtuali.

La seconda ipotesi è quella di suddividere l'intero piano xy in superfici di forma triangolare; in questo modo, anche nel caso in cui le posizioni dei microfoni fossero disposte nella maniera più casuale possibile, si potrà sempre determinare un insieme continuo di triangoli che copra l'intera superficie. Nel 1925 è stato, infatti, dimostrato che ogni superficie può essere partizionata attraverso superfici di forma triangolare, ma questo può richiedere un numero infinito di triangoli. Per effettuare questa operazione si è scelto quindi di utilizzare una triangolazione particolare detta di *Delaunay* che è definita come segue:

Una triangolazione di un insieme finito di punti $P \subset R^2$ viene detta di Delaunay se il cerchio circoscritto ad ogni triangolo è vuoto, ovvero nessun punto di P vi giace all'interno.

Sono diversi gli algoritmi che consentono di determinare, dato un insieme di punti sparsi su un piano, la triangolazione di Delaunay. I principali, con complessità differente in funzione del numero di punti da triangolare, sono:

- l'algoritmo incrementale;
- l'algoritmo dividi et impera;
- l'algoritmo Convex Hull.

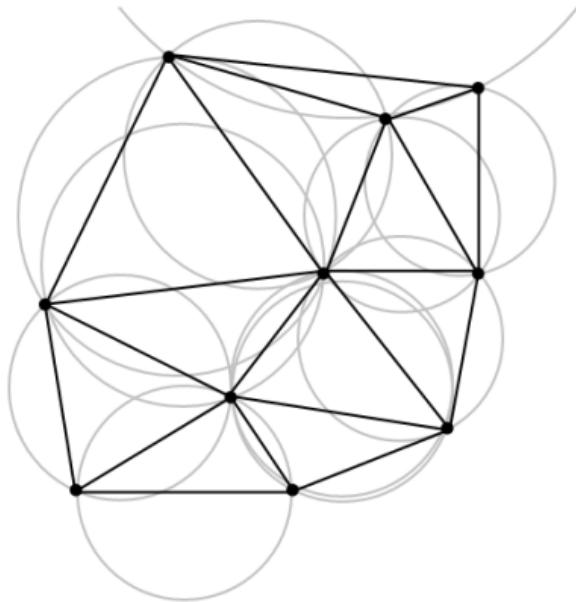


Figura 7.3: Descrizione della proprietà dei triangoli formati con l'algoritmo di *Delaunay*.

Per il presente lavoro di tesi si è deciso di utilizzare una libreria esterna, denominata **Triangle++**, per implementare l'algoritmo di *Delaunay*, essendo l'implementazione particolarmente impegnativa. **Triangle++** è il nome del wrapper C++ della libreria C **Triangle**⁶; esso fornisce la definizione di una classe molto semplice da utilizzare, la quale, dato un insieme di punti di cui si vuole conoscere la triangolazione, svolge autonomamente il calcolo delle mesh facendo uso di tutti e tre gli algoritmi sopracitati.

7.6 Interpolazione dei valori acquisiti e filtraggio in bande d'ottava

Quando si sia calcolata una ipotetica partizione del piano xy in *mesh* di forma triangolare, all'interno di ciascuna delle quali ci interessi conoscere i valori assunti dalla funzione incognita dei livelli sonori, occorre scegliere, tra le tante possibili,

⁶Si veda [9]

una e una sola funzione da utilizzare come stima approssimativa di quella incognita, imponendo che soddisfi i livelli noti presenti ai tre vertici della mesh. La soluzione più semplice è quella di scegliere come funzione approssimante l'equazione di un piano passante per tre punti generici. Il metodo di interpolazione che ne deriva va sotto il nome di *interpolazione bilineare*.

Sapendo che l'equazione generica di un piano può essere scritta nella forma:

$$z = A \cdot x + B \cdot y + C \quad (7.1)$$

e chiamando (x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}) , (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i}) e (x_{3i}, y_{3i}, z_{3i}) le coordinate degli unici tre punti noti della funzione incognita dei livelli sonori, dove i valori z_{1i} , z_{2i} e z_{3i} corrispondono proprio ai livelli misurati in corrispondenza dei tre vertici della i -esima mesh, l'imposizione del passaggio del piano per i tre punti corrisponde all'equazione matriciale:

$$\begin{pmatrix} x_{1i} & y_{1i} & 1 \\ x_{2i} & y_{2i} & 1 \\ x_{3i} & y_{3i} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{1i} \\ z_{2i} \\ z_{3i} \end{pmatrix} \quad (7.2)$$

L'equazione 7.2 rappresenta esattamente l'approccio utilizzato dalla classe **TriangularMesh**, definita all'interno del codice del *plug-in* progettato, per il calcolo dei coefficienti A , B , C e $\det(M)$ che servono per l'interpolazione. Quando si desidererà conoscere il livello sonoro in una certa posizione di coordinate (in pixel) che cadono entro una certa *mesh*, si dovrà chiamare la funzione membro dell'oggetto che rappresenta la *mesh* di interesse e che, implementando la 7.2, ci restituirà il valore interpolato.

Questa ipotesi sarebbe corretta nel caso in cui ad ogni vertice di ciascuna mesh fosse possibile associare un unico livello sonoro, ma ciò non può avvenire. Come si è visto nei precedenti capitoli, infatti, il *plug-in* consente di effettuare una analisi in bande d'ottava⁷ dei livelli sonori, ovvero si avranno non una sola mappa dei

⁷si veda la sezione 2.4.2 per la definizione delle bande utilizzate

livelli, bensì tante mappe quante sono le possibili bande d'ottava selezionabili. Per risolvere occorre usare come terza coordinata di ciascun vertice il numero del microfono virtuale posizionato nelle stesse coordinate del vertice (anzichè il livello sonoro) e memorizzare una matrice dei livelli sonori tale che, confrontando il numero del microfono virtuale con il numero identificativo della banda selezionata, fornisca il livello sonoro corretto per la determinazione dei coefficienti A , B , C e $\det(M)$ necessari per la costruzione della mappa della particolare banda selezionata. Il processo di filtraggio è stato affrontato in modo trasparente grazie all'utilizzo di una classe già progettata per la suite di plug-in **Aurora** per **Audacity**⁸ la quale già disponeva di tutte le funzioni membro necessarie ad implementare i filtri in bande d'ottava, come definiti secondo norma IEC-1260. Infine, dopo l'operazione di filtraggio, è necessario creare un *frame audio* cioè una mappa statica che rappresenti il contenuto del campo acustico nell'intervallo non infinitesimo di un frame⁹ del video che si sta andando a costruire; occorre qui un calcolo del valore L_{EQ} ¹⁰ dei segnali filtrati.

7.7 Mappatura con scale cromatiche e *auto-scaling*

La scala di colore che si utilizza è una funzione in una incognita a tre variabili dipendenti: l'incognita è il livello sonoro in un dato punto ed i tre valori di uscita della funzione coincidono con i tre canali *R (red)*, *G (green)* e *B (blue)* di una interfaccia video. A seconda della scala di colore disiderata, sarà utilizzata una *routine* diversa per determinare il valore *RGB* del pixel interessato, il quale sarà successivamente inserito in una *mappa RGB* (una bitmap, appunto). Per assegnare ai valori di *SPL* un valore *RGB* è necessario stabilire gli estremi SPL da rappresentare per poi successivamente effettuare tutta la scalatura tra i livelli in modo proporzionale. Infatti le relazioni tra i valori *R*, *G* e *B* e il livello che si

⁸si veda [2]

⁹selezionato dall'utente come al paragrafo ??

¹⁰definito alla sezione 2.3.3

vuole mappare sono parametrizzate in funzione dei valori di minimo e massimo rappresentabili. Non si tratta di un'operazione banalissima in quanto per definire univocamente questi valori è necessario analizzare tutto il video alla ricerca degli estremi. Questo comporta la perdita della possibilità di lavorare in tempo reale con una registrazione (a meno di accontentarsi di approssimazioni¹¹), sarà invece necessario analizzare un audio pre-registrato. Dopo aver calcolato tutti i livelli corrispondenti ai microfoni virtuali, filtrati per ogni banda, ed effettuata questa operazione per ogni singolo frame¹², il programma è in grado di ottenere e salvare in una struttura dati i valori di *SPL* massimi e minimi per ogni banda e per ogni frame. In questo modo sarà possibile individuare gli estremi cercati.

Con la funzione di **autoscale** si modificano i valori minimi e massimi entro i quali verrà adattata la scala colorata in base alla banda frequenziale selezionata dall'utente.

Nel caso in cui sia stata abilitata la funzione **auto-scale**¹³, saranno modificati i valori *RMS* di minimo e massimo dei segnali prodotti dai microfoni virtuali limitando la ricerca in ogni frame ai soli valori riguardanti la banda selezionata; se il livello minimo così calcolato dovesse essere inferiore a quello di soglia stabilito dall'utente¹⁴, si considererà come valore minimo il valore di soglia.

Nel caso in cui invece la funzione **auto-scale** sia disabilitata, il livello minimo verrà assunto pari a quello di soglia inserito dall'utente, mentre quello massimo verrà assunto pari al massimo assoluto tra i livelli *RMS* prodotti dai vari microfoni virtuali in tutte le bande e fra tutti i singoli frame del video di output.

7.8 Esportazione dei risultati

La struttura dati **Video** conterrà le seguenti informazioni generali:

¹¹si potrebbe per esempio...

¹²cioè in seguito al precalcolo descritto in questo capitolo

¹³con il *checkbox* descritto nella sezione ??

¹⁴si veda il paragrafo 6.2

- il livello di trasparenza delle bande colorate rispetto allo sfondo,
- l'*aspect ratio* proprio del video (in *pixel*),
- il numero totale dei frame del video
- i valori di *SPL* massimo e minimo assoluti per ogni banda

Inoltre conterrà una struttura di tipo **hash-map** contenenti i singoli **VideoFrame** contrassegnati dal numero di frame come chiave unica. Ogni **VideoFrame** dal canto suo, conterrà le informazioni seguenti:

- *timestamp* del frame ottenuta dal progetto *Audacity*[®] al momento del salvataggio del *chunck* audio,
- Immagine **bitmap** di background corrispondente al frame più vicino alla *timestamp* di cui sopra,
- una matrice contenente per ogni canale *virtuale* registrato (cioè per ogni microfono virtuale ricavato dai filtri di inversione) i valori *SPL* filtrati secondo le 10 bande frequenziali con l'aggiunta del valore filtrato A ($dB(A)$) e del filtraggio lineare in banda stretta¹⁵
- una matrice contenente il valore *SPL* per ogni pixel dell'immagine, ottenuto a seguito dell'interpolazione dei valori dei singoli microfoni virtuali.
- i valori di massimo e minimo *SPL* per ognuna delle 10 bande e per gli altri 2 filtraggi descritti ($dB(A)$ e *lineare*).

A questo punto, ogni **videoFrame** può essere salvato su disco rigido con una funzione della libreria **wxWidgets** che garantirà quindi un'operazione ad hoc funzionante su ogni piattaforma¹⁶. [...]

¹⁵???

¹⁶per ottenere il video — ???

Capitolo 8

Conclusioni

Il plug-in progettato in questa sede è funzionante ed altamente interattivo, con svariate tipologie di realizzazione della mappa grazie alla possibilità di configurare lo stile della scala di colore, la percentuale di trasparenza della mappa sovrapposta al video di background, l'unità di misura dei livelli mostrati, i valori di fondo scala, la lunghezza del frame video, la percentuale di overlap tra i singoli frame etc.).

Dal confronto degli output del modulo in oggetto con altri calcolate dallo script Matlab® descritto nel documento [1] si è inoltre riscontrata una certa coerenza tra i risultati ottenuti; ben sapendo che non è ancora stato scoperto un metodo realmente applicabile per tarare una misura effettuata con un array microfonico, si desume che i risultati ottenuti con l'uso del *plug-in* siano corretti.

figura delle tre piattaforme

[...]

Figura 8.1: Graphic User Interface sotto le tre diverse piattaforme principali: *Windows*, *Mac OS X* e *Linux*.

Appendice A

Appendice

In questa appendice finale si trovano tutte le definizioni teoriche indispensabili alla comprensione dell’elaborato qui presentato ma il cui studio è considerato prerequisito e quindi noto. Viene dunque riportato un breve riassunto delle nozioni fondamentali in modo da fornire un quadro generale ristretto ma comunque sufficiente per affrontare serenamente la lettura.

A.1 Propagazione di onde sonore

Un’onda sonora¹, come risaputo, è una perturbazione della pressione atmosferica avente la proprietà di propagarsi; affinché questo possa avvenire occorrono due elementi indispensabili: una causa ed un mezzo. Il primo potrà essere un sistema meccanico oscillante con sufficiente frequenza², mentre il secondo è, in generale, un fluido, di norma l’aria.

La descrizione fisica della propagazione delle onde suddette avviene tramite 3 leggi fondamentali che di seguito si riassumono:

¹Vedi [8], capitolo 3.

²Un’onda di pressione perché venga percepita dall’apparato uditivo umano deve avere frequenza compresa tra 20 Hz e 20000 Hz circa, a seconda dell’individuo.

L'equazione di Eulero. Siano p la pressione sonora, \mathbf{u} il vettore velocità istantanea di una particella di fluido e ρ_0 la densità dell'aria in condizioni normali, allora si ha:

$$\nabla p = -\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}. \quad (\text{A.1})$$

La relazione A.1 altro non è che l'equivalente fluidodinamico della seconda legge newtoniana della dinamica, da cui deriva, ed esprime in sostanza le condizioni di equilibrio dinamico delle forze agenti su un elemento di fluido.

L'equazione di continuità. Se si esprime con δ la variazione relativa di densità, o *condensazione*³, del mezzo e con \mathbf{s} il vettore spostamento, per un generico elemento di fluido vale la legge

$$\delta = -\nabla \cdot \mathbf{s}, \quad (\text{A.2})$$

che sintetizza il principio secondo cui il flusso netto di massa, ossia la differenza tra quello entrante e quello uscente, deve essere uguagliato dalla variazione di massa di fluido contenuta dall'elemento.

L'equazione di stato termodinamico. Ipotizzando ragionevolmente variazioni di stato talmente rapide da poter essere ritenute adiabatiche ed indicando con p_0 il valore della pressione sonora a riposo e con γ il rapporto tra i calori specifici del gas, rispettivamente, a pressione e volume costante, il comportamento termodinamico del fluido in questione è dato da

$$\frac{1}{p_0} \frac{\partial p}{\partial t} = \gamma \frac{\partial \delta}{\partial t}. \quad (\text{A.3})$$

³È data da

$$\delta = \frac{\rho - \rho_0}{\rho}$$

dove ρ è densità dell'elemento di fluido considerato.

Dalle relazioni A.1, A.2 e A.3, dopo qualche passaggio, si ricava l'*equazione di propagazione delle onde sonore*:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (\text{A.4})$$

in cui c è la velocità di propagazione dell'onda sonora nel gas, definita come

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}}. \quad (\text{A.5})$$

A.2 Intensità, densità di energia e potenza

Di seguito si riportano le definizioni di alcune grandezze fondamentali⁴:

Intensità sonora. È la quantità di energia che fluisce, nell'unità di tempo, attraverso una superficie di area unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda. L'*intensità istantanea* è data da

$$I = p_m u_m \cos^2 \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right], \quad (\text{A.6})$$

dove p_m e u_m sono i valori di picco di pressione e velocità relative alla direzione di propagazione considerata, mentre l'*intensità media* dalla relazione

$$\bar{I} = \frac{p_{\text{rms}}}{\rho_0 c} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]. \quad (\text{A.7})$$

La quasi totalità delle sorgenti reali, però, non irradia energia uniformemente in tutte le direzioni, tale caratteristica viene misurata da una grandezza denominata *direttività* ed indicata con Q ; si ha

$$Q = \frac{I_{\theta,\phi}}{\bar{I}}, \quad (\text{A.8})$$

⁴Per i dettagli si rimanda sempre a [8].

dove $I_{\theta,\phi}$ è l'intensità irradiata nella direzione specificata, in coordinate sferiche, dagli angoli θ e ϕ .

Densità di energia sonora. È l'energia contenute in un'unità di volume del mezzo ed è data da

$$D = \frac{\bar{I}}{c^2} = \frac{p_{\text{rms}}}{\rho_0 c^2} \quad \left[\frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \right]. \quad (\text{A.9})$$

Potenza sonora. Supponendo che tutta l'energia sonora fluente nel mezzo sia prodotta da una sola e ben identificabile sorgente, l'energia irradiata nell'unità di tempo da quest'ultima rappresenta la sua potenza sonora W . Se S è una superficie immaginaria inviluppante la sorgente ed I_s l'intensità sonora rilevata su un area elementare dS della superficie, risulta

$$W = \int_S I_s dS. \quad (\text{A.10})$$

A.3 Livelli sonori

Per via dell'enorme capacità dinamica dell'orecchio umano difficilmente viene adottata la scala lineare per rappresentare le grandezze acustiche: dovendo trattare con un campo di valori estremamente esteso e disperso⁵ è universalmente preferita la scala dei decibel, codificata nella norma ISO 1648. Premettendo che un valore espresso in decibel implica *sempre* un rapporto con un altro valore di riferimento, di seguito si riportano le principali grandezze impiegate:

Livello di pressione sonora.

$$\begin{aligned} L_p &= 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = \\ &= 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}], \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

⁵La minima pressione percepibile da un individuo normo udente è di 20 μPa , la soglia del dolore è, invece, attorno ai 60 Pa.

dove $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$. La A.11 si può anche riscrivere nel seguente modo, dopo aver sostituito il valore di p_0 :

$$L_p = 10 \log p^2 + 94 \quad [\text{dB}]. \quad (\text{A.12})$$

Livello di potenza sonora.

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad [\text{dB}], \quad (\text{A.13})$$

dove $W_0 = 1 \text{ pW}$. Sostituendo quest'ultimo valore nella A.13 si ricava

$$L_W = 10 \log W + 120 \quad [\text{dB}]. \quad (\text{A.14})$$

Livello di intensità sonora.

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}], \quad (\text{A.15})$$

dove $I_0 = 1 \text{ pW/m}^2$. È largamente in uso esprimere anche la direttività in decibel: in questo caso il parametro definito dall'equazione A.8 prende il nome di *Directivity Index* ed è così definito

$$\begin{aligned} DI &= 10 \log Q = \\ &= L_{I_{\theta,\phi}} - L_{\bar{I}}. \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

Se $\rho_0 c$ vale 400 rayl risulteranno uguali $\rho_0 c I_0$ e p_0^2 , cioè sarà verificata la relazione

$$L_I = L_p. \quad (\text{A.17})$$

Tale situazione si avrebbe a pressione atmosferica e temperatura di 39°C; alla temperatura di 20°C il valore dell'impedenza acustica sale a 415 rayl, tuttavia

l'errore commesso applicando ugualmente la A.17 è comunemente ritenuto trascurabile.

Se l'intensità sonora I è uniforme su una superficie S che circoscrive una sorgente di potenza W si può scrivere:

$$10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log \frac{I}{I_0} + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad [\text{dB}]; \quad (\text{A.18})$$

se, poi, $S_0 = S = 1 \text{ m}^2$, risulta esattamente

$$L_W = L_I. \quad (\text{A.19})$$

A.4 Curve di ponderazione

La sensibilità dell'orecchio umano non è costante in tutta la banda udibile, ma presenta un massimo nella regione attorno a 4 kHz ed ha i valori minimi in corrispondenza degli estremi, come evidenziato dalle curve isofoniche elaborate da Fletcher e Munson.⁶ Questo ha portato all'ideazione delle unità di misura *percettive* (la scala dei *phon*) ed ha suggerito l'adozione negli strumenti di misura di un filtraggio dei livelli rilevati in modo da renderli coerenti alla reale sensibilità umana. Il suddetto filtraggio è codificato nelle cosiddette *curve di ponderazione*, le quali non fanno altro che indicare l'alterazione della risposta in frequenza dello strumento, ossia il fattore con cui debbono essere pesate le frequenze della banda audio. In figura 2.6 sono riportate le curve di ponderazione A, B e C che sono, sostanzialmente, le curve isofoniche a 40, 70 e 100 phon rispettivamente.

A.5 Trasformata di Fourier

L'argomento è enorme, in questa sede se ne vuole solo riportare la definizione operativa. Se $x(t)$ è una funzione

⁶Si veda [7] al capitolo 2.

- limitata
- tale da presentare un numero finito di discontinuità
- assolutamente integrabile

allora la sua trasformata secondo Fourier è data dalla relazione

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt. \quad (\text{A.20})$$

La trasformata inversa del segnale $X(f)$, invece si può calcolare mediante l'equazione

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df. \quad (\text{A.21})$$

In generale affinchè esista la trasformata di Fourier del segnale $x(t)$, per il teorema di Plancherel è sufficiente che quest'ultimo abbia energia finita, caratteristica, questa, di tutti i segnali fisici.

Bibliografia

- [1] M. BINELLI, A. VENTURI, A. AMENDOLA, E A. FARINA, *Experimental analysis of spatial properties of the sound field inside a car employing a spherical microphone array*, in 130th AES Convention, London (UK), mag. 2011.
- [2] S. CAMPANINI E A. FARINA, *A new Audacity feature: room objective acoustical parameters calculation module*, in Linux Audio Conference, Parma, Italy, 2009.
- [3] L. CHIESI, *Sintesi di microfoni ad alta direttività mediante array microfonici planari* , master's thesis, Università degli Studi di Parma - Dipartimento di ingegneria industriale, 2009.
- [4] L. EBRI, *Elaborazione del segnale di array microfonici con filtri numerici basati su inversione di misure sperimentali* , master's thesis, Università degli Studi di Parma - Dipartimento di ingegneria industriale, 2012.
- [5] A. FARINA, A. CAPRA, L. CHIESI, E L. SCOPECE, *A spherical microphone array for synthesizing virtual directive microphones in live broadcasting and in post production* , in AES 40th International Conference, Tokyo, Japan, 2010.
- [6] D. T. LEE E B. J. SCHACHTER, *Two Algorithms for Constructing a Delaunay Triangulation* , International Journal of Computer and Information Sciences, 9 (1980).

- [7] R. SPAGNOLO (A CURA DI), *Manuale di acustica applicata*, UTET, Torino, Italy, 3 ed., gen. 2005. ISBN 88-7750-710-1.
- [8] S. CINGOLANI E R. SPAGNOLO (A CURA DI), *Acustica musicale e architettonica*, UTET, Torino, Italy, 1 ed., dic. 2005. ISBN 88-7750-941-4.
- [9] J. R. SHEWCHUK, *Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator*, in Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering, M. C. Lin e D. Manocha, cur., vol. 1148 di *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, mag. 1996, pp. 203–222. From the First ACM Workshop on Applied Computational Geometry.
- [10] M. ZANETTINI, *Sintesi di microfoni ad alta direttività mediante array microfonici planari*, master's thesis, Università degli Studi di Parma - Facoltà di Ingegneria, Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria delle Telecomunicazioni, 2008.

Se proprio devo ringraziare...

Typesetted on 2013 September 27 with L^AT_EX 2 _{ε}