

CONFRONTO SPERIMENTALE TRA MICROFONO B-FORMAT SOUNDFIELD E SONDA INTENSIMETRICA DI PRESSIONE E VELOCITÀ MICROFLOWN

Giulio Cengarle (1), Toni Mateos (1), Davide Bonsi (2)

1) Centre d'Innovació Barcelona Media, Barcellona

2) Fondazione Scuola di San Giorgio, Venezia

1. Introduzione

Il funzionamento dei microfoni B-Format si basa sull'elaborazione dei segnali ottenuti da una configurazione coincidente tetraedrica di capsule microfoniche direzionali, che vengono combinati linearmente per fornire in uscita quattro canali, indicati con W, X, Y e Z, proporzionali rispettivamente alla pressione sonora ed alle tre componenti cartesiane del vettore di velocità acustica. Questi segnali vengono equalizzati per compensare effetti di interferenza dovuti alla non perfetta coincidenza spaziale delle capsule [1]. Le sonde intensimetriche di ultima generazione Microflown[®] sono costituite da un microfono di pressione e tre trasduttori di velocità operanti in base al principio dell'anemometria a doppio filamento caldo, permettendo così una misura diretta e pressoché coincidente delle variabili acustiche p e v . Per via del particolare principio di funzionamento i sensori di velocità sono caratterizzati da una curva di risposta in ampiezza e fase descrivibile con una serie di tre filtri passa-basso con diverse frequenze di taglio, che devono essere accuratamente compensati nella fase di acquisizione del segnale [2].

Le tipologie di applicazione di questi due sistemi rivelano una marcata affinità, che viene confermata dalla sostanziale equivalenza dei segnali forniti in uscita dai due dispositivi [3]. In questo lavoro viene presentato un confronto di questi due sistemi in diverse condizioni di campo acustico, con lo scopo di validare la loro equivalenza e di valutare le reciproche discrepanze ed i limiti di accuratezza.

1.1 Condizionamento del segnale nelle sonde Microflown

L'equalizzazione dei sensori di velocità nelle sonde Microflown viene normalmente effettuata mediante un sistema hardware di filtri analogici fornito dal costruttore. Tale soluzione risulta non ottimale soprattutto a causa della distorsione e del rumore di fondo introdotto sul segnale. L'implementazione di filtri di tipo digitale può essere ottenuta dalla curva di risposta dei sensori mediante il metodo della sorgente sferica, che prevede l'utilizzo di un microfono di pressione di riferimento e la conoscenza analitica dell'impedenza acustica del campo generato [4]. Nota la risposta, è possibile ricavare i parametri per realizzare filtri digitali di compensazione mediante interpolazione dei dati e l'inversione analitica della funzione di trasferimento [5]. La figura 1 riporta le risposte all'impulso di questi filtri digitali per i canali di pressione e velocità x .

L'equalizzazione dei canali di velocità richiede un guadagno di circa 20 dB a 20 kHz, e l'attuale implementazione analogica di questa caratteristica peggiora notevolmente il rapporto segnale-rumore del trasduttore. Per testare la differenza in termini di rumore di fondo tra i due filtri, abbiamo effettuato una misura comparativa in ambiente silenzioso. L'analisi FFT dei segnali registrati, mostrata nella figura 2, rivela la superiorità del filtro digitale in tutta la banda udibile, con un miglioramento del rapporto segnale-disturbo fino a 20 dB nella regione centrale dello spettro.

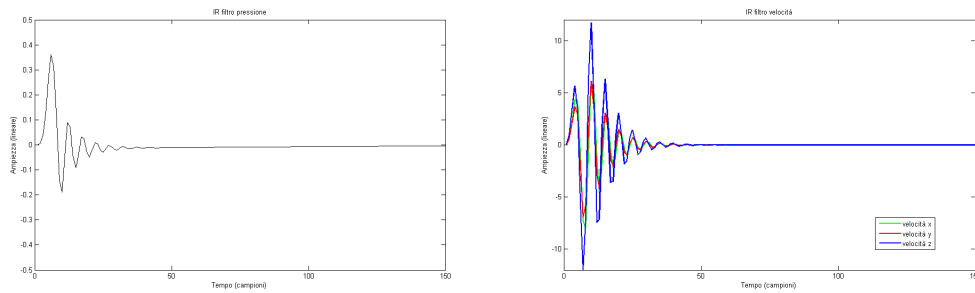


Figura 1 – Risposte all’impulso dei filtri di correzione digitali della sonda Microflow. A sinistra: pressione. A destra: velocità x (verde), y (rosso) e z (blu).

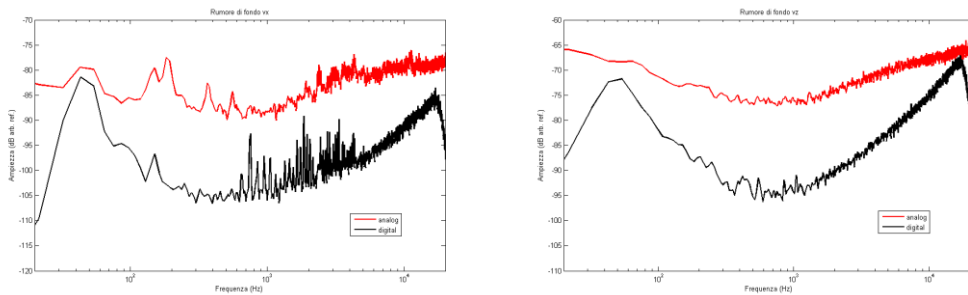


Figura 2 – Confronto del rumore di fondo misurato con filtro digitale (in nero) e con filtro analogico (in rosso). A sinistra: canale x. A destra: canale z.

2. Procedura ed apparato di misurazione

Tutte le misure sono state effettuate con la tecnica della risposta all’impulso mediante sweep sinusoidale esponenziale (durata 30 s, intervallo di frequenza 20 Hz ÷ 20 kHz). Lo studio è stato eseguito ricavando le grandezze energetiche del campo acustico, quali il vettore intensità sonora:

$$(1) \quad \mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = p(\mathbf{r}, t)\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \quad [\text{W/m}^2]$$

e l’indicatore di radiazione [6]:

$$(2) \quad \eta = \frac{|\langle \mathbf{j} \rangle|}{c \left[\frac{1}{2\rho_0 c^2} \langle p^2 \rangle + \frac{1}{2} \rho_0 \langle \mathbf{v}^2 \rangle \right]}$$

definito dal rapporto dell’intensità radiante (o attiva) e la media temporale della densità di energia totale moltiplicata per la velocità del suono.

Il vettore intensità acustica identifica la direzione di propagazione dell’energia sonora, mentre l’indicatore di radiazione, compreso tra zero e uno, esprime la frazione di energia irradiata.

2.1 Strumentazione

Il microfono B-Format utilizzato è il Soundfield ST250, dotato di un’unità di controllo ed alimentazione con uscita B-Format; la sonda Microflown utilizzata è il modello tridimensionale USP. Il microfono di riferimento è un Bruel&Kjaer mod. 4189.

La digitalizzazione ed acquisizione dei segnali è stata effettuata mediante un PC con scheda audio MOTU Traveler e software Adobe Audition. Per la calibrazione della sonda abbiamo usato la sorgente di forma sferica fornita dalla Microflown, mentre durante le misurazioni abbiamo usato un altoparlante Genelec 1030A. L'analisi dei dati è stata effettuata mediante routine scritte con software MATLAB.

2.2 Condizioni di misura

Il confronto dei trasduttori è stato effettuato in due condizioni di campo radicalmente differenti: vicino ad una sorgente in una piccola camera anecoica e ad una decina di metri dalla sorgente in una sala mediamente riverberante.

La camera anecoica, di forma parallelepipedica, ha dimensioni $4,7\text{m} \times 3,1\text{m} \times 2,8\text{m}$ ed un tempo di riverberazione T30 inferiore a 0,1s. I microfoni sono stati collocati di fronte all'altoparlante, a 1,5 m di distanza, con l'asse x rivolto verso l'altoparlante.

Il secondo ambiente è invece una grande sala rettangolare di dimensioni $34\text{m} \times 10,5\text{m} \times 7,3\text{m}$, con un tempo di riverberazione T30 di poco superiore a 2 s. In questa sala, l'altoparlante è stato collocato lungo l'asse longitudinale, ed i microfoni posizionati di fronte all'altoparlante a 9,3 m di distanza.

3. Risultati sperimentali

In questa sezione viene proposta l'analisi comparativa dei dati ricavati dai due sensori, mediante grafici di risposta in frequenza, tabelle con i valori degli indicatori in bande di ottava e grafici della proiezione sul piano orizzontale del vettore intensità sonora durante i primi 80 ms della risposta all'impulso.

3.1 Ambiente anecoico

La risposta in frequenza ricavata per i canali di pressione e velocità con i due sensori e le due tipologie di filtri è riportata nella figura 3. I filtri di correzione digitali forniscono una risposta compatibile con l'equalizzazione analogica fornita dal costruttore, con una tolleranza di 1 dB tra 100 Hz e 10 kHz. La risposta del microfono Soundfield presenta invece picchi al di sopra di 5 kHz, in particolare nei canali y e z, dove sono evidenti effetti di interferenza dovuti alla combinazione di capsule non perfettamente coincidenti. Nella regione centrale dello spettro entrambi i trasduttori mostrano un'attenuazione di circa 20 dB dei canali ortogonali alla direzione di propagazione dell'onda. Nel Soundfield le alte frequenze appaiono indistintamente in tutti i canali di velocità. L'analisi complessiva dell'indicatore di radiazione ha fornito i valori 0.88, 0.95 e 0.78 rispettivamente per la sonda con correzione digitale, la sonda con correzione analogica ed il Soundfield. I valori ottenuti per bande d'ottava, mostrati nella figura 4, mostrano l'andamento parallelo dei dati ricavati con la sonda intensimetrica. I segnali filtrati digitalmente forniscono un valore prossimo a 1, come previsto teoricamente quando la lunghezza d'onda è di molto inferiore alla distanza dalla sorgente. I valori più bassi forniti dal sistema analogico sono interpretabili come effetto del rumore di fondo decorrelato nei canali di velocità, che produce gli stessi effetti di un campo diffuso, nel quale il valore dell'indicatore di radiazione diminuisce. Nel caso del Soundfield invece, a parte un'anomalia a 250 Hz, si nota un andamento decrescente a partire da 4 kHz, probabilmente dovuto alla perdita della coerenza di fase tra le capsule microfoniche.

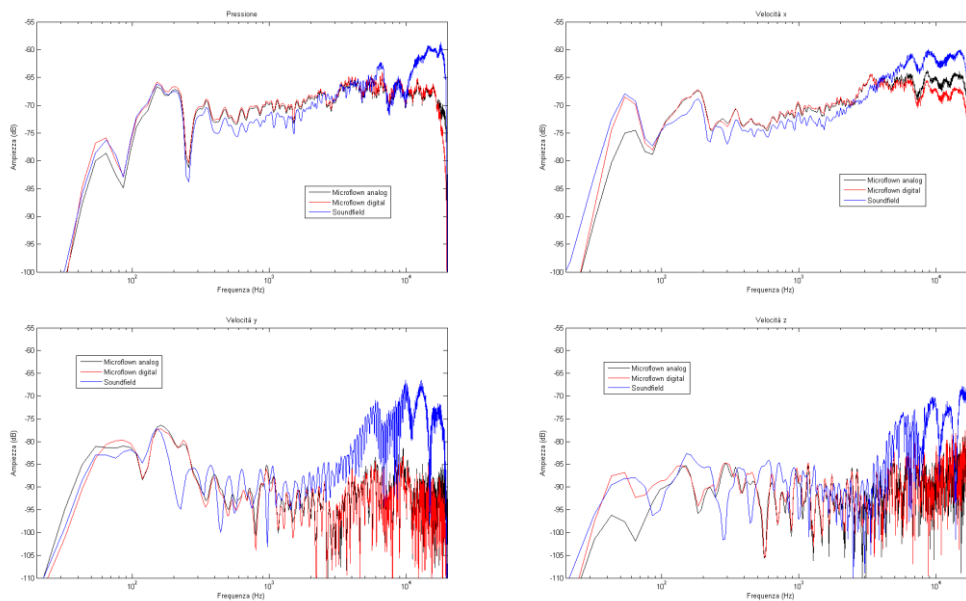


Figura 3 – Confronto della risposta in frequenza del campo acustico generato da un altoparlante in camera anecoica. In alto, da sinistra: pressione, velocità x; in basso da sinistra: velocità y, velocità z.

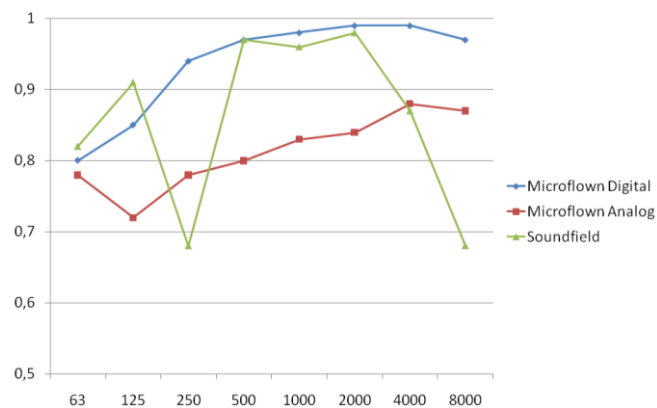


Figura 4 – Valore dell'indicatore η in bande d'ottava in camera anecoica.

Per quanto riguarda l'intensità sonora, i grafici riportati in figura 5 mostrano il vettore orientato lungo l'asse x e con verso opposto alla posizione dell'altoparlante. Il microfono Soundfield manifesta un leggero disallineamento tanto nelle frequenze gravi come in quelle acute. Inoltre l'andamento temporale della direzione del vettore rivela uno sparpagliamento maggiore attorno alla direzione media.

3.2 Ambiente riverberante

Le misure eseguite nella sala riverberante con la sonda Microflown sono state elaborate impiegando esclusivamente i filtri digitali. I valori dell'indicatore di radiazione risultano compatibili entro un intervallo di incertezza del 10% (tab. 1), salvo un decremento nel caso del Soundfield a partire da 4 kHz, come già notato nell'ambiente precedente. Per quanto riguarda la frazione di energia laterale (tab. 2), si osserva una discrepanza significativa nei dati espressi in bande d'ottava: il microfono Soundfield fornisce valori rispettivamente inferiori alle frequenze medie e basse e

superiori a quelle alte (> 4 kHz), dove è presumibile che le componenti della velocità risentano del crosstalk già discusso nella sezione 3.1.

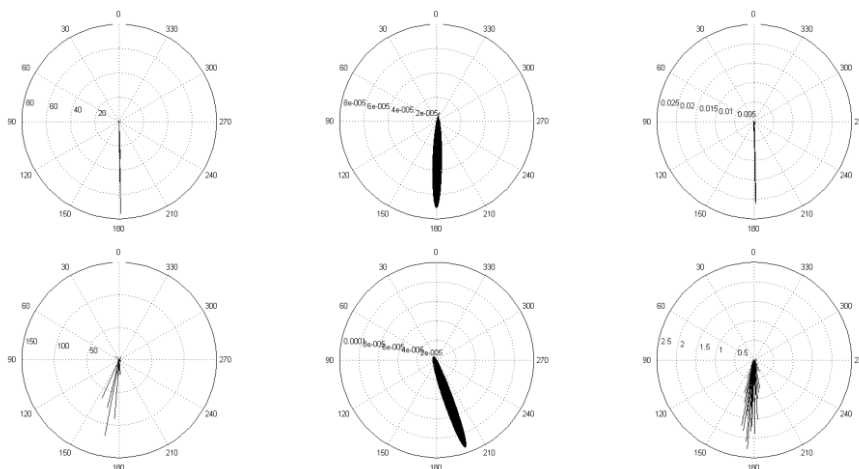


Figura 5 – Proiezione del vettore intensità nel piano xy, in camera anecoica. In alto: Microflown con filtro digitale. In basso: Soundfield. Per ogni riga, le figure da sinistra a destra mostrano rispettivamente i dati globale, a 62 Hz e a 8 kHz.

Tabella 1 - Indicatore η in bande d'ottava nella sala riverberante.

	<i>Globale</i>	<i>62,5 Hz</i>	<i>125 Hz</i>	<i>250 Hz</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
η <i>Microflown</i>	0.64	0.82	0.83	0.67	0.49	0.64	0.74	0.63	0.73
η <i>Soundfield</i>	0.57	0.73	0.53	0.55	0.45	0.73	0.72	0.55	0.46

Tabella 2 - LF in bande d'ottava nella sala riverberante.

	<i>Globale</i>	<i>62,5 Hz</i>	<i>125 Hz</i>	<i>250 Hz</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
<i>LF Microflown</i>	0.19	0.08	0.51	0.43	0.21	0.26	0.14	0.23	0.15
<i>LF Soundfield</i>	0.18	0.04	0.16	0.11	0.11	0.11	0.13	0.23	0.37

L'analisi della proiezione orizzontale del vettore intensità, illustrata in figura 6, rivela sostanziali differenze del campo acustico al variare della frequenza: mentre il valore globale indica una propagazione direzionale lungo l'asse x, alle basse frequenze la distribuzione diventa meno regolare a causa delle variazioni della direzione e del modulo del vettore dovute alle riflessioni delle pareti. L'analisi comparativa riflette le differenze già evidenziate in condizioni anecoiche: il microfono Soundfield presenta una leggera rotazione antioraria del vettore a basse frequenze, mentre alle frequenze medio-alte manifesta una evidente dispersione angolare dei contributi.

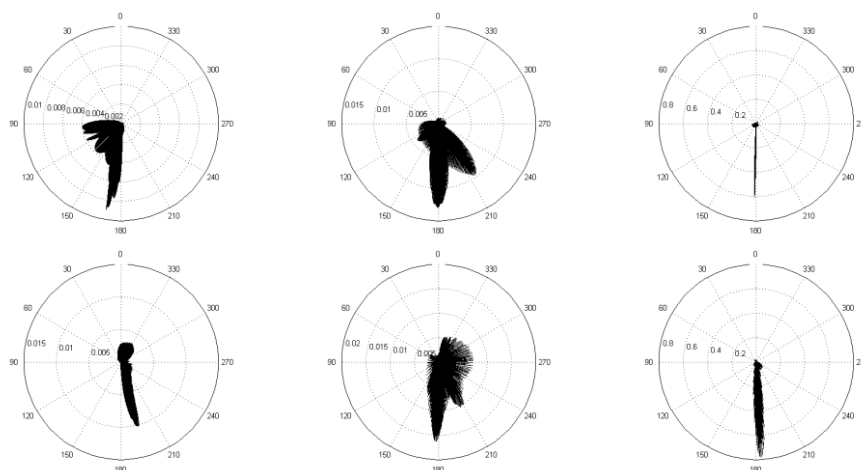


Figura 6 – Proiezione del vettore intensità nel piano xy. Misura effettuata in sala riverberante. In alto: Microflown con filtro digitale; in basso: Soundfield. Per ogni riga, le figure da sinistra a destra mostrano rispettivamente i dati a 125 Hz, 250 Hz e 1 kHz.

4. Conclusioni

Lo studio in oggetto ha evidenziato la sostanziale compatibilità dell'approccio B-Format con le sonde intensimetriche Microflown per la misura diretta di pressione e velocità acustica. Entrambi i sensori presentano tuttavia vantaggi e svantaggi da valutare in base all'applicazione ed alle finalità delle misurazioni. Il microfono Soundfield si rivela l'opzione più affidabile, robusta e di immediato utilizzo; il suo impiego è consigliato nelle applicazioni che richiedono un elevato rapporto segnale-rumore del trasduttore, come registrazioni in tempo reale o misure dirette di risposte all'impulso con scoppio di palloncino o colpo di pistola. La sonda Microflown fornisce una maggiore accuratezza nei valori degli indicatori intensimetrici, soprattutto agli estremi della banda udibile, grazie alla coincidenza spaziale ed all'indipendenza dei trasduttori. In questo caso, il confronto tra l'equalizzazione analogica e la relativa implementazione digitale ha dimostrato la superiorità del secondo metodo, grazie al miglioramento del rapporto segnale-rumore evidenziato dal significativo incremento dell'accuratezza nei valori dell'indicatore di radiazione.

5. Bibliografia

- [1] M. A. Gerzon: The Design of Precisely Coincident Microphone Arrays for Stereo and Surround Sound. Presented at the 50th AES Convention, March 1975, London.
- [2] H. E. de Bree et al.: The Microflown; a novel device measuring acoustical flows. Sensors and actuators: A, physical volume SNA 054/1-3 pp. 552-557, 1996.
- [3] D. Bonsi, D. Stanzial: Preliminary study of Ambisonics technology as a method for sound intensity measurements. Presented at ISMA, Perugia 2001.
- [4] F. Jacobsen, V. Jaud: A Note on the Calibration of Pressure-Velocity Sound Intensity Probes. JASA 120 (2), August 2006.
- [5] D. Bonsi, L. Fanucci, F. Fontana, D. L. Gonzalez, N. L'Insalata, G. Schffrer and D. Stanzial: Demonstration of measurement and recording for acoustic quadruphony. IP-RACINE deliverable 7.5.2, September 2005.
- [6] D. Stanzial, N. Prodi, D. Bonsi: Measurement of new energetic parameters for the objective characterization of an opera house, J. Sound Vib., 232(1), 2000.