

TARATURA ASSOLUTA DI SONDE INTENSIMETRICHE P-V

Giorgio Sacchi (1), Domenico Stanzial (2)

(1) Dipartimento di Fisica, Università di Ferrara, via Saragat 1, 44100 Ferrara

(2) Consiglio Nazionale delle Ricerche, Laboratorio di Acustica del Dipartimento di Fisica – Imamoter, Stanza G115, v. Saragat 1, 44100 Ferrara, Tel. 0532.974396, E-mail: domenico.stanzial@cnr.it

1. Introduzione

Facendo seguito a precedenti comunicazioni [1,2] il presente lavoro riguarda la taratura assoluta delle sonde intensimetriche p-v basate sul sensore velocimetrico termoacustico Microflown® [3]. Mentre il processo di taratura relativa ha come obiettivo la determinazione della curva di correzione in ampiezza e fase dei segnali di pressione e velocità rilevati con la sonda stessa in un campo di impedenza nota (nel nostro caso un campo di onda piana progressiva [1]), la taratura assoluta richiede invece il confronto dei segnali rilevati con la sonda p-v con quelli ottenuti, per la pressione acustica, con un microfono di riferimento, calibrato secondo un procedimento simile a quello già in uso per la taratura delle sonde p-p [4].

A tale scopo si è fatto uso di un analizzatore FFT bi-canale, basato su PC, appositamente calibrato tramite un microfono di riferimento B&K 4939 ¼ ” e un dispositivo di calibrazione B&K 4231. L’analizzatore così calibrato è stato successivamente utilizzato per la misura della risposta in frequenza in un punto del campo all’interno della guida d’onda già descritta in [1]. Tale risposta è stata rappresentata come densità spettrale (PSD-rms) del segnale di pressione ottenuto col microfono di riferimento ed il suo valore a 1000 Hertz è stato registrato per la successiva operazione di confronto. L’ultimo passo della procedura è consistito infatti nella ripetizione della stessa misura con il microfono a pressione assemblato nella sonda p-v determinando così – per confronto diretto con il valore calibrato – la costante di calibrazione assoluta, o fattore di calibrazione, della sonda stessa.

A monte del procedimento di calibrazione occorre tuttavia eseguire un test preliminare sulle sonde p-v sotto esame allo scopo di determinare la loro banda passante acustica. A tal fine è stato utilizzato il concetto di coerenza spettrale tra due segnali. Il modello teorico che sottende a questo tipo di indagine è un’immediata conseguenza dell’equazione acustica di Eulero che lega tra loro linearmente le soluzioni delle equazioni d’onda di pressione con quelle di velocità in campi acustici lineari generali. Ogni sonda esaminata è stata perciò sottoposta al test di coerenza dei segnali p-v rilevati, su tutta la banda audio, nel campo di onda piana progressiva di riferimento determinando così il range di frequenza all’interno del quale effettuare la calibrazione.

I dettagli dei metodi utilizzati ed i risultati ottenuti dalla loro applicazione sperimentale sono di seguito riportati.

2. Materiali e metodi

2.1 Studio della coerenza

Come si è detto un importante test preliminare alla taratura vera e propria delle sonde p-v consiste nel valutare l'intervallo di frequenza all'interno del quale esse funzionano correttamente, cioè forniscono misure in linea con le caratteristiche note a priori dei campi acustici di riferimento. È infatti noto teoricamente che, in regime di acustica lineare, la pressione e la velocità concatenate di un'onda sonora sono tra loro linearmente dipendenti poiché possono essere ricavate da un unico potenziale scalare (potenziale cinetico) per mezzo di derivate parziali [5]. Prima di effettuare qualsiasi operazione di taratura, è pertanto necessario accertarsi che questa relazione venga effettivamente convalidata, entro un ragionevole limite, nelle misure sperimentali dei campi di riferimento. L'intervallo di frequenza in cui la sonda non ancora calibrata fornisce segnali che rispettano questo vincolo, rappresenta dunque il limite entro il quale lo strumento funziona correttamente e dipende esclusivamente dalle sue caratteristiche intrinseche (caratteristiche costruttive, geometriche, etc.), cioè da quelle caratteristiche che risultano impossibili da correggere con la calibrazione.

Il metodo scelto per stabilire queste caratteristiche fa uso della funzione di coerenza:

$$\gamma^2(f) = \frac{|S_{pV}(f)|^2}{S_{pp}(f)S_{VV}(f)} \quad (1.1)$$

ampiamente utilizzata in DSP proprio allo scopo di misurare il grado di linearità tra due canali sui quali si opera con l'algoritmo di FFT [6] in analogia al coefficiente di correlazione usato in statistica. Qui S_{pV} è il cross-spettro tra i segnali di pressione e velocità, S_{pp} è l'autospettro di pressione e S_{VV} è l'autospettro di velocità. Come noto la funzione di coerenza (1.1) ha valori reali compresi tra 0 e 1, che corrispondono rispettivamente all'assenza di correlazione tra i due segnali e ad una loro correlazione esattamente lineare. Come per il procedimento di taratura assoluta anche questo test è stato eseguito all'interno della guida d'onda descritta in [1] eccitata con rumore bianco. I segnali di risposta registrati nel dominio del tempo per una durata di dieci secondi circa, sono stati successivamente utilizzati per il calcolo della funzione di coerenza mediando iterativamente su blocchi di 4096 campioni opportunamente finestrati (Hanning) fino ad ottenere la convergenza dello spettro di coerenza. Le funzioni di coerenza ottenute per le due sonde testate (Microflown PU Match Probe PT0702-03 e PT0702-04) sono riportate rispettivamente nei grafici a sinistra e a destra della figura 1. Da essi si vede chiaramente che la sonda 04 ha un intervallo di coerenza di circa 2000 Hz più ampio di quello della sonda 03. Se tuttavia le due sonde dovessero essere utilizzate simultaneamente è evidente che il sistema risultante non è in grado di rispondere correttamente a segnali di frequenza superiore a circa 7 KHz, cioè al limite ottenuto per intersezione dei singoli intervalli di coerenza.

Allo scopo di ottenere dati utili anche per l'uso accoppiato delle due sonde p-v (iperintensimetria acustica) il limite di 7 KHz è stato perciò osservato in tutte le operazioni di taratura.

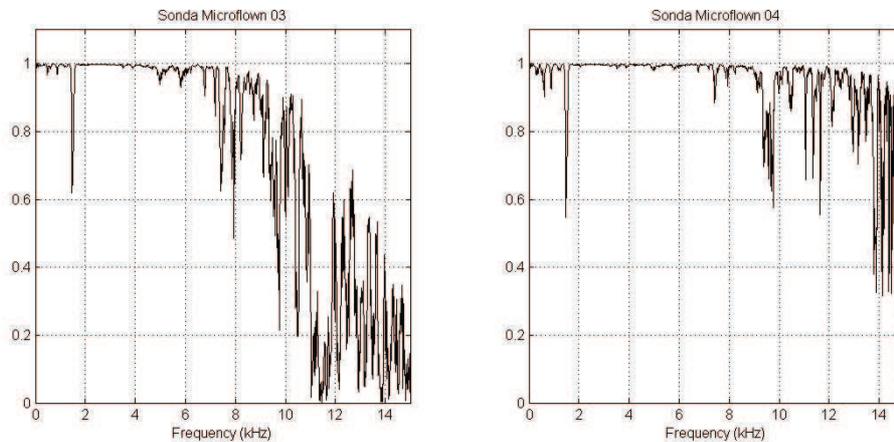


Figura 1 – Funzioni di coerenza, ottenute per le sonde intensimetriche sotto esame, mediando iterativamente su blocchi di 4096 campioni.

2.2 Taratura assoluta del sensore di pressione

Una volta determinata la frequenza di taglio alle alte frequenze delle sonde p-v sotto esame, il modo più semplice per ottenere da esse segnali acustici affidabili per l'esecuzione delle operazioni di taratura è quello di decimare il campionamento dei segnali già registrati per il calcolo della coerenza fino ad ottenere una frequenza di Nyquist pari o leggermente inferiore al valore limite. Durante il processo di ricampionamento i filtri anti-aliasing usualmente integrati nel dispositivo di conversione AD provvederanno infatti ad escludere le componenti indesiderate. Nel nostro caso i segnali di risposta in pressione e velocità della guida d'onda già registrati per il calcolo della coerenza erano stati acquisiti secondo lo standard audio CD (16 bit, 44100 Hz), ed è stato dunque possibile decimarli con una nuova frequenza di campionamento di 14700 Hz restringendo così l'intervallo di affidabilità delle sonde a $14700/2$ Hz. Sui segnali di pressione così ottenuti è stata quindi eseguita la vera e propria procedura di taratura assoluta per confronto con il livello di pressione letto con il microfono di riferimento. Ricordando che l'analizzatore FFT era stato precedentemente calibrato tramite il dispositivo B&K 4231 la calibrazione assoluta si ottiene semplicemente traslando lungo l'asse delle ordinate il grafico della densità spettrale del segnale da calibrare fino a far coincidere il suo valore a 1000 Hz con quello della densità spettrale del segnale calibrato in Pascal/Hz avendo avuto cura di usare la media *rms* per ottenere entrambi i grafici. Questo semplice accorgimento infatti permette di identificare la densità spettrale (PSD) del segnale di pressione con il suo valore SPL per unità di frequenza [7]. La costante di calibrazione assoluta (fattore di taratura) risulta dunque come rapporto dei due valori PSD misurati a 1000 Hz. In tabella 1 sono riportati i risultati ottenuti per le due sonde intensimetriche esaminate.

Tabella 1 – Costanti di calibrazione assoluta ottenute con lo strumento di riferimento per confronto diretto tra le sonde da calibrare e il microfono di riferimento.

Sensore di pressione	Misura SPL @ 1 kHz	Costante di calibrazione assoluta
B&K® mod. 4939	85.9 dB	1.00
Microflown® PU Match Probe PT0702-03	79.9 dB	2.01
Microflown® PU Match Probe PT0702-04	81.4 dB	1.70

2.3 Taratura assoluta del sensore di velocità

Nel caso qui trattato, la taratura assoluta del sensore di velocità assemblato nelle sonde p-v consiste semplicemente nell'applicazione del metodo di taratura relativa già esposto in [1]. Tale metodo infatti rimane sostanzialmente inalterato, ma viene ora applicato al segnale di pressione che è stato precedentemente calibrato secondo la procedura delineata nel paragrafo 2.2. L'unica variazione introdotta riguarda il segnale di eccitazione della guida d'onda che, in questo lavoro, è stata scelta per generare un rumore bianco. Le curve di correzione relativa in ampiezza e fase nell'intervallo di coerenza comune alle due sonde in esame sono riportate in figura 2.

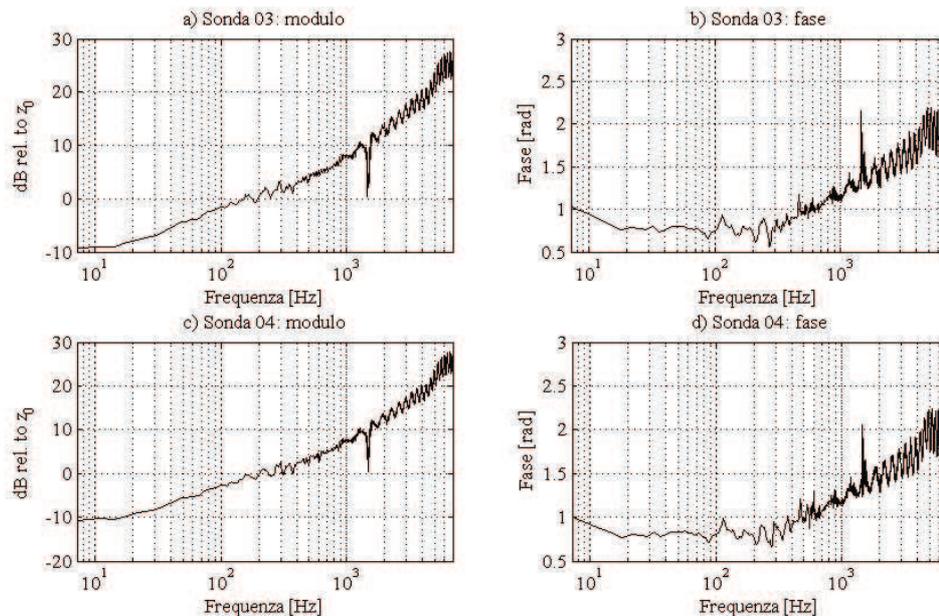


Figura 2 – Curve di correzione relativa (ampiezza e fase) per le due sonde p-v assiali sotto taratura; $z_0 = \rho_0 c$ è l'impedenza caratteristica del mezzo.

3. Risultati sperimentali

In figura 3 si riportano i grafici dei livelli di pressione sonora (SPL) in dB relativi a $2 \cdot 10^{-5}$ Pa e quelli di velocità acustica (AVL) in dB relativi a $5 \cdot 10^{-8}$ ms⁻¹ misurati per unità di frequenza nella guida d'onda durante il processo di taratura assoluta delle due sonde p-v esaminate (sinistra: pressione, destra: velocità, alto: sonda 03, basso: sonda 04).

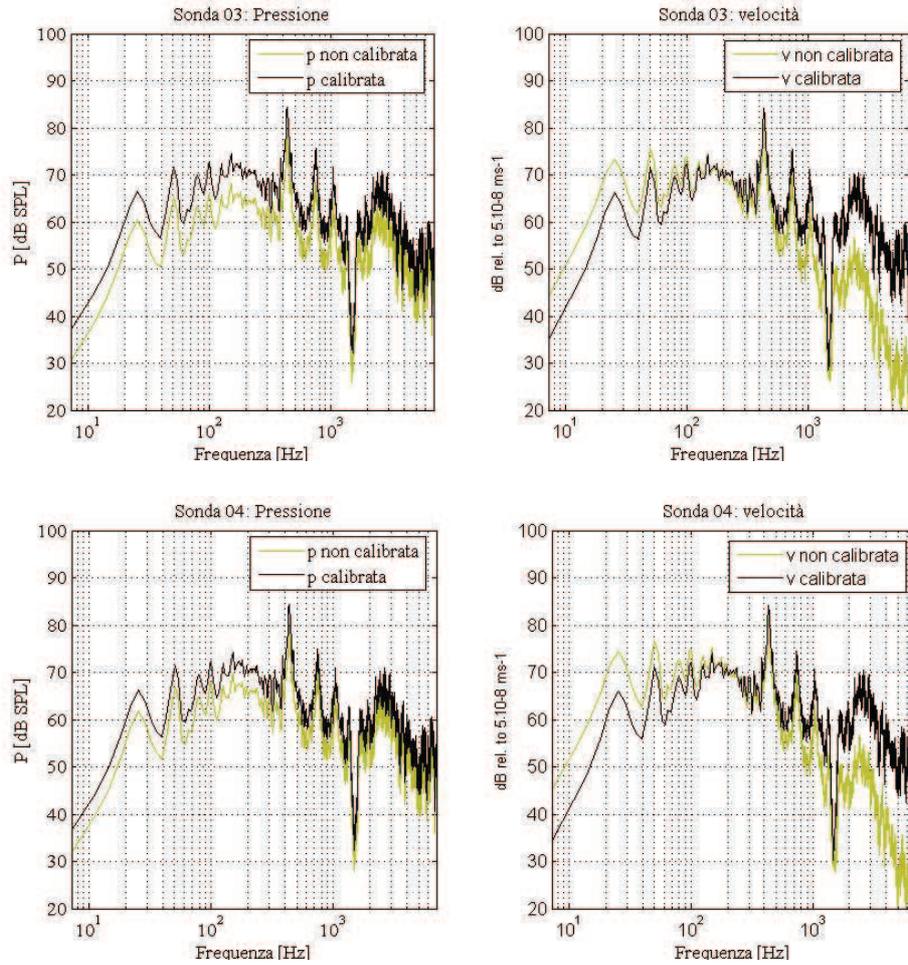


Figura 3 – Confronto dei livelli SPL e AVL misurati prima e dopo la taratura.

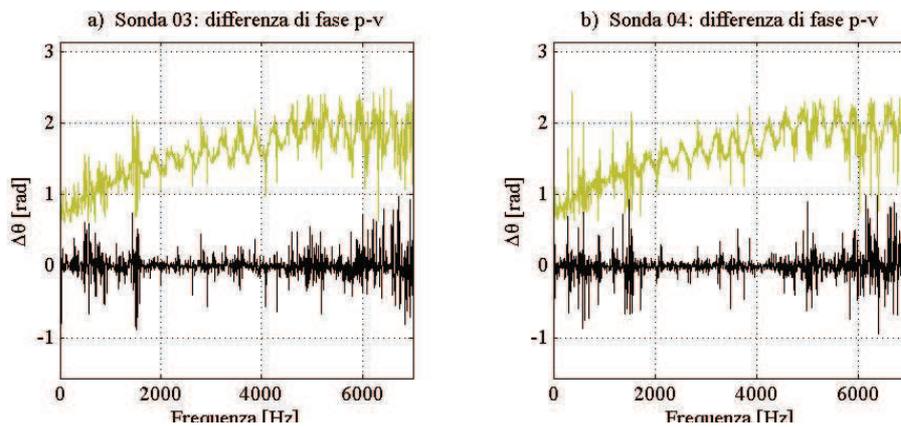


Figura 4 – Effetto della taratura sulle relazioni di fase tra pressione e velocità.

L'intensità attiva, misurata con entrambe le sonde su tutta la banda di coerenza, risulta dopo la taratura pari a $6.17 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$.

4. Discussione e sviluppi futuri

Osservando i grafici di coerenza spettrale riportati in figura 1 si nota che entrambe le sonde esaminate hanno rilevato un marcato scostamento dal valore unitario intorno ai 1500 Hz. Ciò, come documentato in figura 2-b di [1], è imputabile alle caratteristiche della sorgente acustica utilizzata per eccitare la guida d'onda. Tale sorgente, ottenuta dall'accoppiamento di un altoparlante bi-conico con la campana di un trombone usato come adattatore di impedenza, stenta infatti ad irradiare suono a quella frequenza e conseguentemente il campo generato all'interno della guida d'onda risulta molto rumoroso proprio nell'intorno della stessa frequenza. La conseguente perdita di coerenza dei segnali di pressione e velocità rilevati da entrambe le sonde è dovuta dunque al pessimo rapporto segnale disturbo dell'impianto di taratura che, nelle condizioni di prova, è risultato inferiore a 3 dB intorno ai 1500 Hz. Questo limite può essere chiaramente superato in futuro semplicemente aumentando il livello SPL del campo di riferimento i cui valori medi, in questa prova sono risultati, mediamente disposti intorno ai 60 dB SPL (si vedano i grafici a sinistra in figura 3). Per quanto il sistema attuale svolga bene il suo compito, soprattutto alle basse frequenze, l'attività di ottimizzazione dell'impianto di taratura sarà indirizzata comunque, nel prossimo futuro, anche alla scelta di una sorgente di eccitazione meno "colorata".

Dalle considerazioni precedenti segue che il filtro di taratura ottimale per le sonde esaminate, può dunque essere ottenuto facilmente per via grafica eliminando la "spike" presente attorno ai 1500 Hz e reintegrando la curva di correzione per semplice interpolazione lineare dei dati di taratura contigui.

Dall'esperienza sopra riportata discende inoltre che per l'esecuzione ottimale di campagne di misure intensimetriche con l'uso delle sonde p-v (anche quelle già calibrate!), è buona norma pratica eseguire preliminarmente il test della coerenza dei segnali rilevati in campo. Ciò permette infatti di sfruttare al massimo la banda passante acustica delle sonde nelle condizioni di misura aggiustando eventualmente i parametri di misura.

Per finire, si noti come l'effetto complessivo della taratura sui livelli dei segnali acquisiti nel range di coerenza delle sonde, sia semplicemente quello di "shiftare" lungo l'asse delle ordinate lo spettro di ampiezza del segnale di pressione e di comprimere i livelli AVL del segnale di velocità fino a circa 150 Hz ma di accentuare invece quelli superiori a questa frequenza (v. Fig. 3). A causa del campo di riferimento scelto, l'effetto complessivo della taratura sullo spettro di fase dei segnali è banalmente quello di azzerare a tutte le frequenze le differenze di fase riscontrate tra i segnali di pressione e velocità (v. Fig. 4).

Bibliografia:

- [1] Stanzial D., Bonsi D., Cengarle G., Sacchi G., *Procedimento ed apparecchiatura per la calibrazione di sonde intensimetriche p-v*, Atti del 35° Congresso nazionale AIA, Milano 11-13 Giugno 2008;
- [2] Stanzial D., Bonsi D., Sacchi G., *Metodologia per la taratura relativa di sonde intensimetriche p-v*, Atti del Seminario “Strumenti e metodi di misura per l’acustica e le vibrazioni”, Ancona 22 Settembre 2008
- [3] De Bree H-E. et al, *The Microflown, an acoustic particle velocity sensor*, Sensors and Actuators: A, Physical, volume SNA054/1-3, pp 552-557, 1996
- [4] Gade S., *Sound intensity (Part 1 Theory)*, B&K Technical Review, n°3 (1982), pp. 13-14.
- [5] Stanzial D., Bonsi D., Schiffrer G., *Four-dimensional Treatment of Linear Acoustic Fields and Radiation Pressure*, Acta Acustica, volume 89 (2003), pp. 213-224.
- [6] Herlufsen H., *Dual channel FFT analysis (part I)*, B&K Technical Review, n°1 (1984)
- [7] American National Standard Measurement of Sound Pressure Levels in Air ANSI S1.13-2005.