

SIMULAZIONE NEL DOMINIO DEL TEMPO DEL CONTROLLO ATTIVO DEL RUMORE SU UN MODELLO A ELEMENTI FINITI

Francesco Mori (1), Paolo Bonfiglio (2), Patrizio Fausti (1), Francesco Pompoli (1), Andrea Santoni (1)

1) Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara, Ferrara, francesco.mori@unife.it

2) Materiacustica s.r.l., Ferrara, paolo.bonfiglio@materiacustica.it

SOMMARIO

Questo articolo presenta l'applicazione di alcuni tipi di sistema di controllo attivo del rumore a un modello acustico a elementi finiti con geometria tridimensionale. Le simulazioni sono effettuate nel dominio del tempo, valutando con un algoritmo adattivo la condizione al contorno da applicare al modello a ogni istante temporale, per eliminare il suono generato da una sorgente di rumore. I risultati mostrano la potenzialità di questo metodo come studio preliminare in fase di progettazione.

1. Introduzione

Un sistema di controllo attivo del rumore (ANC) è un dispositivo elettroacustico che elimina un rumore esistente per sovrapposizione degli effetti con un segnale di uguale ampiezza e opposto in fase, calcolato mediante un algoritmo adattivo e generato da una sorgente di controllo.

Questo articolo propone di verificare ed estendere un nuovo metodo di progettazione preliminare di un sistema ANC, proposto inizialmente in [1] per un sistema feedback. In particolare, vengono analizzati gli effetti dei principali tipi di sistema ANC applicati a un modello acustico a elementi finiti con geometria tridimensionale. Il modello FEM è stato realizzato con il software COMSOL Multiphysics e viene risolto numericamente svolgendo analisi nel dominio del tempo. A ogni istante temporale l'algoritmo adattivo implementato in MATLAB interagisce con il modello FEM mediante Livelink™ con MATLAB per modificare la condizione al contorno associata alla sorgente di controllo e generare il segnale di cancellazione. Nella sezione 2 vengono illustrati in dettaglio il modello a elementi finiti utilizzato e le analisi numeriche svolte. Nella sezione 3 sono descritti i sistemi ANC esaminati e l'algoritmo implementato in MATLAB, con il quale viene calcolato il valore della condizione al contorno da applicare a un nuovo istante temporale. Infine, le sezioni 4 e 5 mostrano i risultati della stima offline delle risposte all'impulso del sistema necessarie per il funzionamento dell'algoritmo ai minimi quadrati (FXLMS) e i risultati dell'applicazione di controllo attivo per il caso di un tono puro.

2. Descrizione del modello a elementi finiti

Il modello FEM realizzato con COMSOL Multiphysics è illustrato in figura 1. La geometria è costituita da un cilindro di lunghezza 2 m e diametro 0.1 m, in cui si innesta un tubo secondario dello stesso diametro e con inclinazione 30°. A un'estremità del cilindro principale è assegnata una condizione di pressione che rappresenta la sorgente primaria di disturbo, mentre all'estremità opposta, più vicina all'innesto, è assegnata una condizione di impedenza per onde piane per simulare una terminazione anecoica. All'estremità dell'innesto è applicata una condizione di pressione, il cui valore viene valutato a ogni istante temporale dall'algoritmo adattivo implementato in MATLAB. I due punti che rappresentano il microfono di errore e quello di riferimento (quest'ultimo utilizzato solo per i casi feedforward) sono posti rispettivamente a 5 cm dal fondo del tubo e a 5 cm dalla sorgente primaria. In tutto il volume è presente aria con

velocità del suono pari a 343 m/s, mentre alla superficie laterale dei cilindri è stata attribuita una condizione di parete rigida. Per la mesh sono stati usati elementi tetraedrici con formulazione quadratica di Lagrange e dimensione massima pari a un sesto della lunghezza d'onda associata alla frequenza di 400 Hz.

Le analisi sono state svolte nel dominio del tempo, con una frequenza di campionamento pari a 1600 Hz e avviando il controllo attivo dopo 0.5 s di storia temporale per attenuare due toni puri a 200 Hz e 300 Hz emessi dalla sorgente primaria.

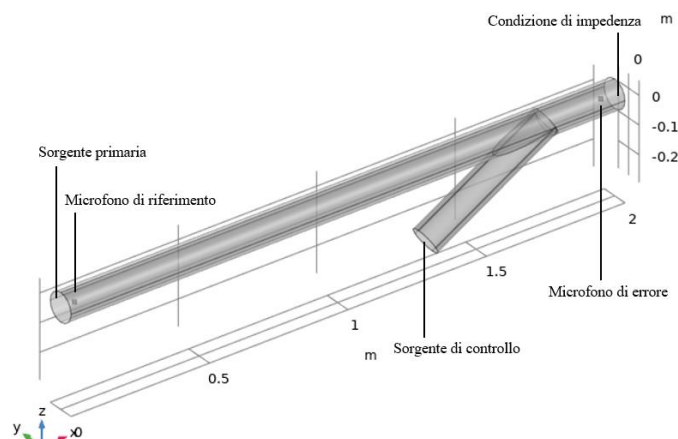


Figura 1 – Geometria del modello a elementi finiti.

3. Algoritmi per il controllo attivo del rumore

In generale, i sistemi ANC possono essere di tipo feedforward o di tipo feedback [2]. Un sistema feedforward utilizza un sensore di riferimento per catturare il segnale della sorgente di rumore primaria, mentre un microfono di errore identifica la zona di quiete dove si vuole cancellare il disturbo. I due segnali misurati vengono processati da un algoritmo adattivo che calcola il segnale antirumore da sovrapporre al rumore esistente alla posizione del microfono di errore per eliminarlo. Nel caso di un sistema feedback, il sensore di riferimento è assente e il segnale della sorgente viene ricostruito mediante una modellazione interna. L'algoritmo utilizzato in queste simulazioni per l'aggiornamento della condizione al contorno della sorgente di controllo è il classico algoritmo ai minimi quadrati con segnale di riferimento filtrato (FXLMS), che minimizza l'energia presente al microfono di errore. La scelta di questo algoritmo è stata effet-

tuata per la sua semplicità di implementazione e per la sua robustezza. Stabilito l'algoritmo adattivo, i sistemi ANC esaminati in questo articolo sono di tre tipi:

- 1) sistema feedforward semplice (FF_FXLMS);
- 2) sistema feedforward con cancellazione del feedback acustico dovuto alla propagazione di onde dalla sorgente di controllo al microfono di riferimento (FF_FBFXLMS);
- 3) sistema feedback, con modellazione interna del segnale di riferimento a partire dal segnale rilevato al microfono di errore (FB_FXLMS).

Per i tre algoritmi è stata assunta una lunghezza dei filtri adattivi pari a 600 elementi e uno step-size per l'aggiornamento dei coefficienti dei filtri pari a 0.1. Per i percorsi secondario e di feedback è stata assunta una lunghezza pari a 600 elementi.

4. Stima offline dei percorsi secondario e di feedback

La stima offline delle risposte all'impulso dei percorsi secondario e di feedback è stata effettuata seguendo la procedura descritta in [3], assegnando alla sorgente di controllo un rumore bianco filtrato fino a 400 Hz e misurando l'effetto rispettivamente al microfono di errore e a quello di riferimento. Lo spettro in ampiezza associato a queste risposte all'impulso è riportato in figura 2. Dal grafico si può notare che il feedback acustico non ha un contributo importante, eccetto per la frequenza a 340 Hz. Per le frequenze a 107, 211 e 318 Hz il microfono di errore si trova in un nodo di pressione per la sorgente di controllo. In un'applicazione reale questo fatto è da tenere in conto, perché può portare a un sovraccarico della sorgente che richiede molta potenza per raggiungere il livello sonoro richiesto.

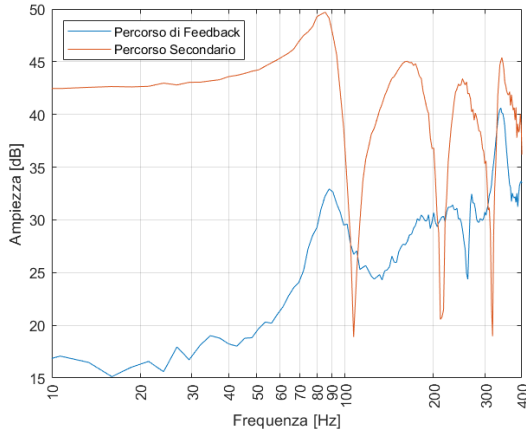


Figura 2 – Spettro in ampiezza delle funzioni di risposta in frequenza dei percorsi di feedback e secondario.

5. Risultati dell'applicazione di controllo attivo

In figura 3 e figura 4 sono riportati i risultati dell'applicazione dei tre sistemi ANC descritti in sezione 3, eseguita dopo la procedura di stima offline, per l'attenuazione di due toni puri a 200 Hz e 300 Hz. Dalle storie temporali è possibile osservare che per entrambi i toni il sistema FF_FBFXLMS converge più rapidamente in fase iniziale, mentre dopo 1.0 s il sistema FF_FXLMS possiede una coda che decade più velocemente. Il sistema FB_FXLMS, invece, mostra una prestazione minore a causa della necessità di ricostruire internamente il segnale di riferimento. In entrambi i casi è presente un avvio impulsivo del sistema ANC, che può essere eliminato con un'opportuna inizializzazione del filtro adattivo. Le prestazioni dei sistemi per i due toni puri sono riportate in tabella 1 e tabella 2, dove l'attenuazione è stata valutata per i primi 0.6 s di storia temporale dall'avvio del controllo attivo.

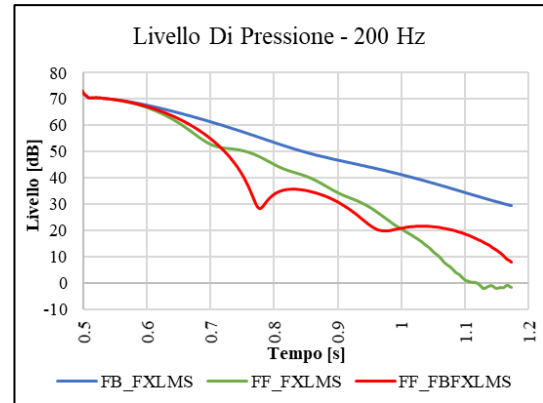


Figura 3 – Risultati per un tono puro a 200 Hz.

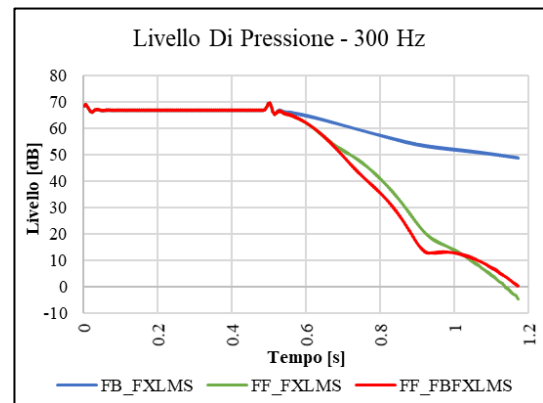


Figura 4 – Risultati per un tono puro a 300 Hz.

6. Conclusioni

In questo articolo è stata mostrata una nuova metodologia per la progettazione preliminare di un sistema di controllo attivo basata su analisi numeriche nel tempo di un modello acustico a elementi finiti. Essa può essere integrata con interazioni con solidi elastici, domini fluidodinamici o materiali dissipativi per studiare diverse tipologie di problemi. Con questo metodo è possibile studiare il numero di sensori di riferimento, di microfoni di errore e di sorgenti di controllo necessarie per raggiungere un determinato obiettivo di attenuazione, eventualmente studiando variazioni nella geometria.

Tabella 1 – Prestazioni per il tono a 200 Hz.

Sistema	FB_FXLMS	FF_FXLMS	FF_FBFXLMS
Attenuazione [dB]	41.0	72.2	62.8
Velocità media [dB/s]	61.0	116.7	93.4

Tabella 2 – Prestazioni per il tono a 300 Hz.

Sistema	FB_FXLMS	FF_FXLMS	FF_FBFXLMS
Attenuazione [dB]	18.1	71.5	66.3
Velocità media [dB/s]	26.9	106.3	98.6

7. Bibliografia

- [1] Cherkkil A., Narayanan V., George N.V., *Integrated simulation of active noise cancellation using a computational fluid dynamics approach*, in Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics, Aachen, Germania, 2019, pp. 39-46.
- [2] Kuo S.M., Morgan D.R., *Active noise control: a tutorial review*, in Proceedings of the IEEE, 1999, vol. 87, no. 6, pp. 943-973.
- [3] Kuo S.M., Panahi I., Chung K.M., Horner T., Nadeski M., Chyan J., *Design of active noise control systems with the TMS320 Family*, Texas Instruments, 1996.