

## Metodi per la localizzazione di sorgenti sonore

Politecnico di Milano – Dipartimento di Meccanica

Sezione di Misure e Tecniche Sperimentali

### Introduzione

L'attività del Gruppo di Misure del Politecnico di Milano finalizzata allo studio di metodi per la localizzazione di sorgenti sonore è nata alla fine degli anni '90 sotto la spinta delle ricerche volte alla riduzione dell'impatto vibro-acustico dei treni ad alta velocità (progetto europeo HipertTrack, <http://www.lbf.fraunhofer.de/HIPERTRACK/>). A fianco di tradizionali misure per determinare i livelli globali di emissione (effettuate secondo la normativa prN 3095), si aveva la necessità di separare il contributo del rumore emesso dal contatto ruota-rotaja dalle altre fonti di disturbo.

Tra le varie tecniche di identificazione presenti nella letteratura tecnica, dato il particolare caso di applicazione (*pass-by*), si è optato per la metodologia del *beamforming*. Le prime prove sperimentali sul campo sono state realizzate nell'inverno del 2001 su un tratto speciale della linea Foggia-Bari, in località Incoronata, utilizzando per le misure un array lineare composto da 24 microfoni (Figura 1, Figura 2), e successivamente è stata condotta una seconda campagna sperimentale nel 2004, con un array a 28 microfoni.



Figura 1: HipertTrack 2001 - treno test e array microfonico



Figura 2: array microfonico 24 microfoni

Successivamente l'interesse del Gruppo in questo campo si è ampliato ed è pertanto iniziata un'attività di ricerca finalizzata allo studio di diverse metodologie presenti in letteratura. All'interno di questa attività sono state condotte numerose simulazioni, parecchi test di validazione degli algoritmi sviluppati, oltre alla realizzazione di campagne sperimentali di misura volte alla risoluzione di problemi specifici. Un secondo filone di ricerca, di impronta più misuristica, ha come scopo la caratterizzazione metrologica di queste tecniche di misura e lo studio dell'incertezza intrinseca associata ai risultati ottenuti.

### Beamforming

Tutti gli algoritmi di identificazione basati sulla tecnica del beamforming sono stati sviluppati internamente. La metodologia è stata validata sperimentalmente con alcune serie di prove appositamente realizzate: una prima validazione è avvenuta tramite confronto tra casi simulati al computer (in cui il campo sonoro è stato generato tramite modelli di propagazione) e casi pratici, riprodotti in condizioni il più possibile simili alla teoria.

A titolo di esempio si riporta un confronto tra simulazione e sperimentazione, nel caso di sorgente emettente a 1000 Hz e acquisizione effettuata con array piano a 20 microfoni, posto a distanza 1 m da essa. Si può notare l'ottima concordanza tra il caso simulato e quello reale.

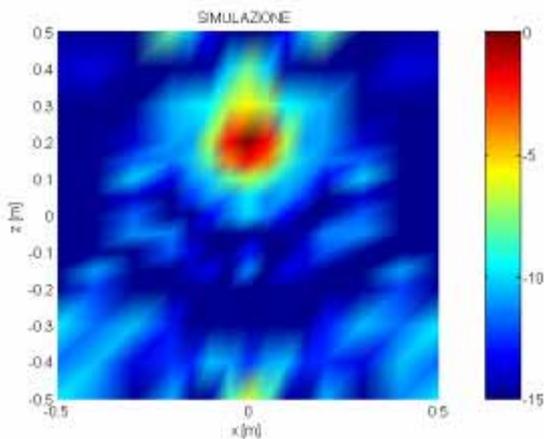


Figura 3: simulazione

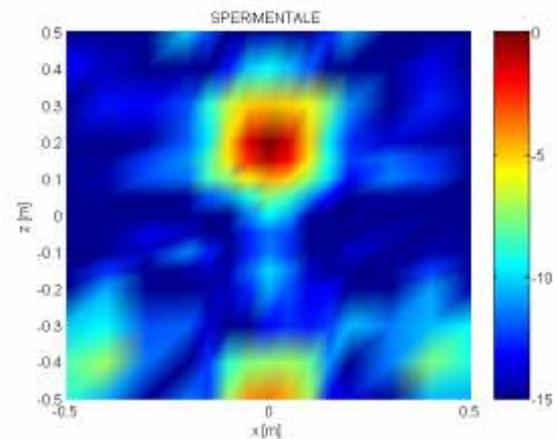


Figura 4: sperimentazione

Altri test di validazione sperimentale sono stati nello stesso tempo realizzati adottando sorgenti sia statiche sia in movimento presso la pista di Vizzola Ticino (Figura 5, Figura 6).



Figura 5: pista di Vizzola (rettilinea a norma ISO)

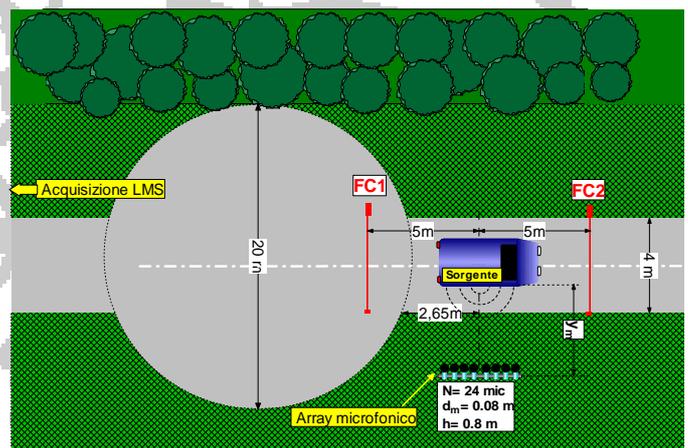
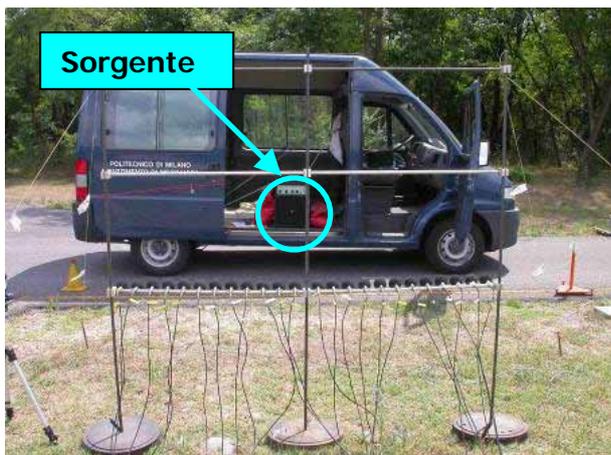


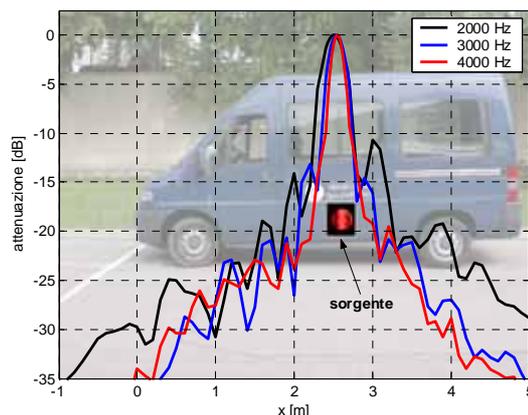
Figura 6: descrizione sito di misura

In questo caso i test sono stati condotti utilizzando un array lineare composto da 24 microfoni, acquisendo il rumore emesso da una sorgente installata a bordo di un furgone Ducato. Dapprima sono state condotte prove statiche, con il furgone parcheggiato dinanzi all'array (Figura 7); in seguito sono state condotte prove con furgone in transito, a 50 e 100 km/h. Conoscendo la posizione della sorgente è stato possibile verificare la correttezza dei risultati ottenuti.

La Figura 8 riporta i risultati nel caso di furgone in transito a 100 km/h, per varie frequenze di emissione della sorgente: 2000, 3000 e 4000 Hz (l'analisi a differenti frequenze è necessaria in quanto la capacità risolutiva del beamforming dipende direttamente dalla frequenza).



**Figura 7: Ducato utilizzato per le prove con sorgente posizionata nel vano posteriore**

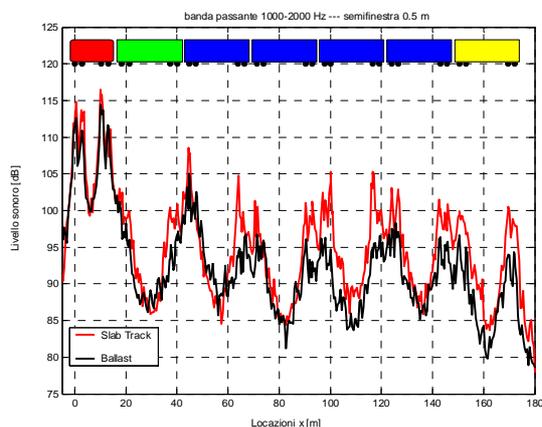


**Figura 8: caso dinamico**

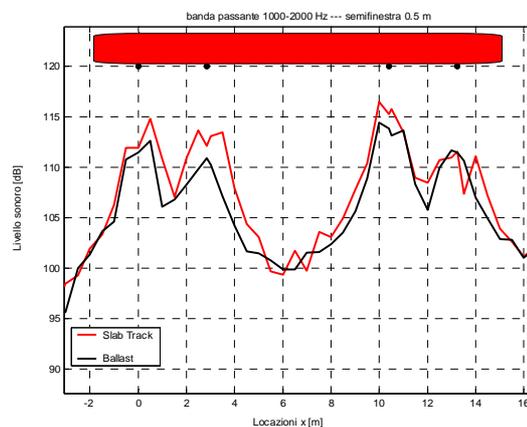
L'analisi ripetuta di queste prove, come delle precedenti, ha permesso di verificare la ripetibilità dei risultati prodotti dal metodo, e dare una prima stima numerica dell'incertezza associata alla posizione della sorgente identificata dal metodo.

### Hipertrack – Applicazione del beamforming al caso di sorgente in moto

Durante il progetto europeo Hipertrack nel 2004 si è svolta una campagna di misura durante la quale è stato utilizzato un array lineare a 28 microfoni associato alla metodologia del beamforming per l'identificazione delle sorgenti sonore durante il transito di convogli ferroviari ad alta velocità (velocità 220 km/h). Si riportano rispettivamente in Figura 9 e Figura 10 il confronto tra tipi di armamenti differenti (in rosso armamento massivo, in nero tradizionale ballast) nel caso di convoglio intero e zoom sul locomotore.



**Figura 9: confronto tra armamenti differenti - intero convoglio**



**Figura 10: confronto tra armamenti differenti – locomotore**

Si noti come sia possibile separare il contributo di emissione dovuto alle singole sale.

### Applicazione del beamforming al caso di sorgente statica con array piano – Analisi di un pantografo in galleria del vento

Applicazione particolarmente interessante è stato lo studio di emissione di un pantografo per treni ad alta velocità durante i test aerodinamici in galleria del vento. L'array utilizzato è piano a 28 microfoni, posto ad una distanza di circa 4 metri dal pantografo (Figura 11).

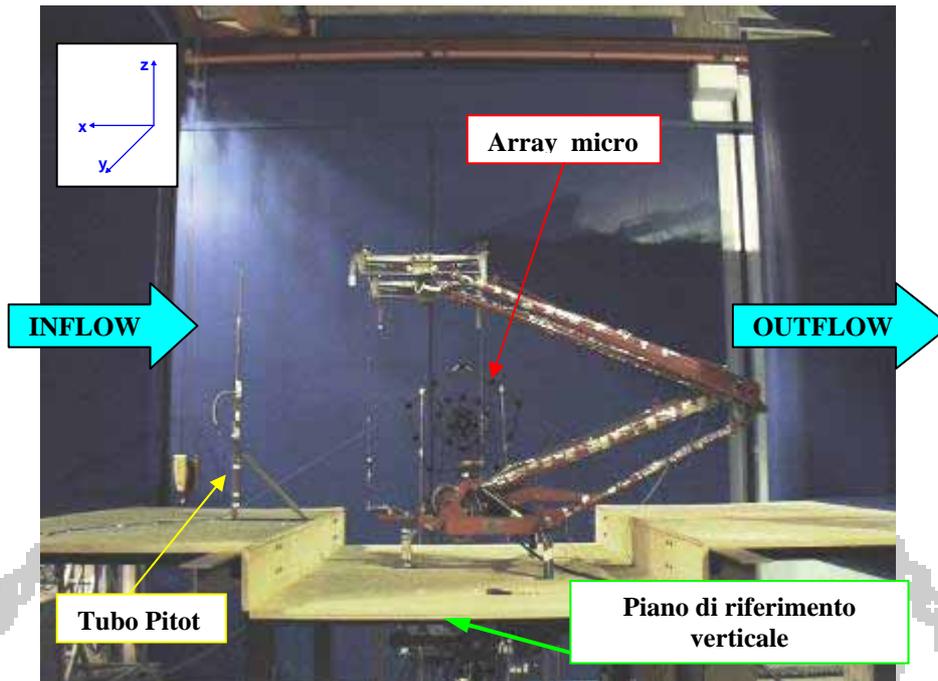


Figura 11: sito di misura - pantografo in galleria del vento

Le prime analisi, effettuate considerando tutta la banda di frequenze acquisite hanno dato risultati a prima vista totalmente sconcertanti. In realtà l'analisi di emissione ha avuto un risultato del tutto inaspettato: infatti in quella condizione di prova la maggior fonte di emissione era rappresentata dal Tubo di Pitot installato di fronte al pantografo ed utilizzato per misurare la velocità dell'aria, identificato nella banda di frequenze tra 1000 e 2000 Hz (Figura 12): la stima teorica della frequenza di vibrazione legata al distacco dei vortici per il tubo in esame investito dalla vena fluida è di circa 1480 Hz. Eliminando dal sito di misura tale strumento la sorgente di rumore corrispondente alla sua posizione sparisce (Figura 13).

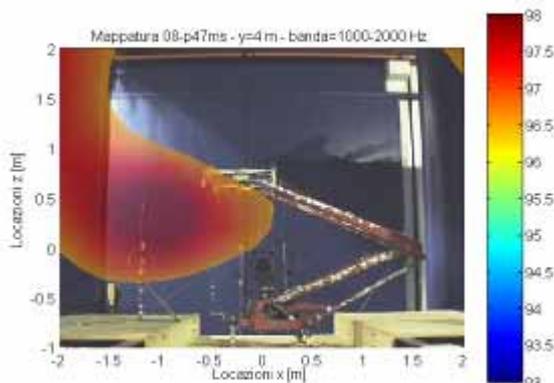


Figura 12: prova con tubo di Pitot - banda 1000-2000 Hz

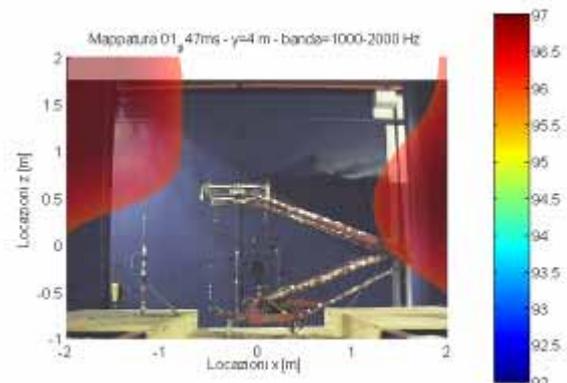


Figura 13: prova senza tubo di Pitot - analisi banda 1000-2000 Hz

Di seguito si riportano esempi di analisi di emissione relativi ad intervalli di frequenza 3000-4000 Hz e 5000-6000 Hz, con identificazione di sorgenti di emissione dovute al pantografo, archetti e base.

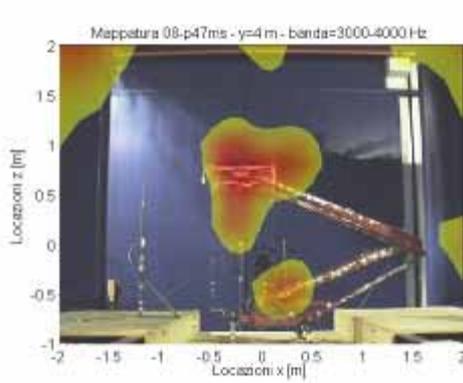


Figura 14: analisi banda 3000-4000 Hz

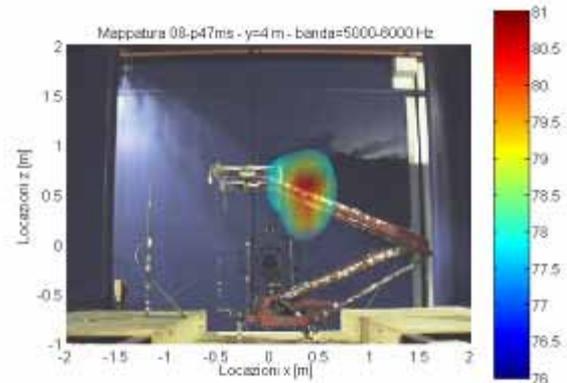


Figura 15: analisi banda 5000-6000 Hz

### Olografia acustica (P-NAH)

La tecnica del beamforming ha permesso di sviluppare una certa esperienza nell'affrontare il problema dell'identificazione delle sorgenti sonore. Avendo analizzato in dettaglio la tecnica, sia a livello teorico sia applicativo, ed avendone evidenziato sia i pregi sia i limiti, si è deciso di iniziare lo studio di altre metodologie fondamentalmente differenti. Sotto questa spinta nell'ultimo anno è stata svolta un'attività di ricerca finalizzata allo sviluppo di un sistema di localizzazione basato sulla tecnica dell'olografia acustica, partendo dalla scrittura degli algoritmi di ricostruzione fino all'applicazione in prove sperimentali appositamente realizzate.

Le prove sono state condotte simulando due sorgenti sonore emettenti tramite l'ausilio di due altoparlanti ed acquisendo il campo di pressione con un array lineare composto da 19 microfoni, spostato successivamente in differenti posizioni verticali, più un microfono esterno fisso utilizzato come riferimento per rifasare tutti i segnali.

Le figure seguenti mostrano il sito di prova e la ricostruzione olografica del campo di pressione.



Figura 16: sito di misura

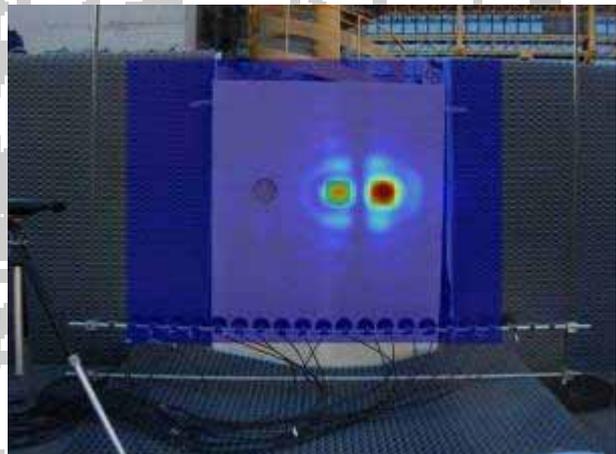


Figura 17: ricostruzione olografica

In questo ambito l'attività di ricerca è ancora aperta verso l'applicazione di algoritmi più sofisticati con lo scopo di ottenere una buona quantificazione dei livelli di emissione delle sorgenti e di previsione del campo sonoro generato.

### **Pubblicazioni scientifiche in ambito acustico**

- [1] M. Boccione, D. Rocchi, M. Vanali, **“Microphone array measurements for the identification of mobile noise sources”** 5° Congresso nazionale di Misure Meccaniche e Termiche, settembre 2002, Abano Terme
- [2] M. Vanali, **“Studio analitico sperimentale dell’impatto vibro-acustico generato dal transito di convogli in ambito urbano”** Tesi di Dottorato di Ricerca in Meccanica Applicata XV Ciclo, discussa il 27/02/2003
- [3] M. Vanali, D. Rocchi, F. Ripamonti, **“Vibration and acoustic insight on high speed trains running on a ballast superstructure”** Railway Engineering 2003 30th April 1st May 2003 Commonwealth conference center London
- [4] M. Boccione, A. Cigada, S. Manzoni, M. Vanali, E. Zappa, **“Controllo del rumore emesso da veicoli a rotaia per mezzo della riduzione delle vibrazioni dovute all’interazione ruota-armamento”** IV Giornata di Studio sull’Acustica Ambientale, Firenze 2006
- [5] R. Corradi, A. Facchinetti, S. Manzoni, M. Vanali, **“Effects of track parameters and environmental conditions on tramcar induced squeal noise”**, ISMA 2006, 18-20 settembre 2006, Lovagno, Belgio
- [6] S. Manzoni, M. Vanali, C. Carbone, **“Rubber isolating elements to prevent vibro-acoustic propagation”**, ISMA 2006, 18-20 settembre 2006, Lovagno, Belgio
- [7] A. Cigada, S. Manzoni, M. Vanali, **“On the vibro-acoustic behaviour of high-speed train wheels”**, ISMA 2006, 18-20 settembre 2006, Lovagno, Belgio
- [8] P. Boffi, A. Cigada, M. Vanali, E. Zappa, **“Dalle prove non distruttive alle “misure non distruttive””**, Tutto Misure anno viii numero 03 2006
- [9] M. Lurati, F. Ripamonti, D. Rocchi, M. Vanali, **“Utilizzo di array microfonici per la localizzazione di sorgenti sonore: confronto tra diverse configurazioni dei microfoni e validazione sperimentale”**, Rivista Italiana di Acustica, Volume 30 N. 3-4 Luglio-Dicembre 2006
- [10] A. Cigada, F. Ripamonti and M. Vanali, **“The delay & sum algorithm applied to microphone array measurements: Numerical analysis and experimental validation”**, Mechanical Systems and Signal Processing, In Press, Accepted Manuscript, Available online 28 January 2007, (<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WN1-4MXJ3T0-1/2/ec6219f7bd33a55cfacaa8a4b60347f8> )