

## STUDI PRELIMINARI PER SISTEMI AUDIO METAMATERIALI

Letizia Chisari (1), Mario Di Cola (2), Paolo Martignon (2), Gianluca Memoli (1,3)

1) Metasonix Ltd, London, info@metasonix.co.uk  
2) Contralto Audio Srl, Casoli, m.dicola@contralto-audio.com  
3) Progetto "Aurora", University of Sussex, Brighton, g.memoli@sussex.ac.uk

### SOMMARIO

Progettare sistemi audio comporta tra i tanti la soluzione di due problemi: l'emissione in direzioni non volute, tipicamente risolto con una cassa massiva e la direttività a basse frequenze, spesso affrontato con guide d'onda e trombe. In questo lavoro dimostriamo come l'uso di una cassa metamateriale possa modellare la retro-emissione, con una riduzione del peso del 60% rispetto a sistemi tradizionali e come un sistema di lenti acustiche possa modificare la direttività con pochi centimetri di spessore.

### 1. Introduzione

I recenti progressi nella modellazione computazionale e nella produzione additiva hanno dato luogo ad una nuova era per la progettazione dei materiali classici, che possono essere micro-ingegnerizzati in strutture composite chiamate "metamateriali", permettendo dispositivi funzionali [1] e display ottici [2]. In acustica, i metamateriali con spessore inferiore alla lunghezza d'onda che li attraversa (detti "metasuperfici" [3]) sono stati usati con successo per ottenere dispositivi statici, come lenti e assorbitori, aventi dimensioni pratiche. In questo lavoro, una metasuperficie statica verrà usata per assorbire l'emissione all'indietro di un altoparlante. La frontiera nella ricerca dei metamateriali acustici, però, è nel disegno di sistemi dinamici, con soluzioni ibride [4] o attuate meccanicamente [5]. Una di queste verrà usata in questo lavoro per modellare la direttività in avanti.

### 2. Progettazione delle metasuperfici

Nel 2017, Memoli *et al.* [6] hanno dimostrato che, per disegnare una metasuperficie, bastano 16 forme predefinite, che questi autori chiamano "mattoncini". Nel loro lavoro, questi autori usano mattoncini caratterizzati da un percorso labirintico, ognuno dei quali codifica un ritardo sul suono che si propaga attraverso. Simili forme verranno usate in questo lavoro.

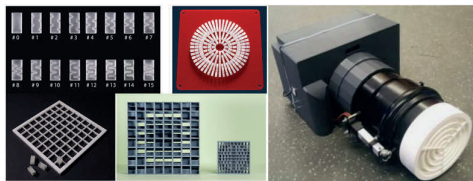


Figura 1 - A sinistra: mattoni metamateriali stampati in 3D in diversi assemblaggi. A destra: telescopio acustico con obiettivo auto-zoom.

#### 2.1 Selezione della cella da usare in una specifica posizione

Assegnare una funzione ad una metasuperficie significa decidere quale sarà la distribuzione della pressione acustica dopo averla attraversata. Li *et al.* [7] suggeriscono di affrontare questo problema direttamente intervenendo sul fronte d'onda: il campo lontano desiderato viene retro-propagato in prossimità della metasuperficie e questa viene localmente configurata, in fase ed intensità, per ottenere il fronte desiderato [4]. Quest'ultimo passaggio viene codificato da specifiche celle unitarie, fino a raggiungere la precisione desiderata (i "mattoncini" di [6], per

esempio, permettono una codifica a 4 bit). La discussione di come questo approccio possa essere usato per disegnare un assorbitore è stata affrontata da Chisari *et al.* [8], ma riportiamo qui di seguito come esempio il caso di una lente convergente.

In ottica, una lente diffrattiva è caratterizzata da due parametri: la sua lunghezza focale ( $f$ ) e la sua estensione fisica (legata alla dimensione laterale del fuoco). Una volta che la  $f$  desiderata è impostata lungo l'asse della lente ( $\hat{z}$ ), è possibile ottenere la distribuzione di fase  $\varphi(x,y)$  sulla metasuperficie, che si presume essere nel piano  $z = 0$ , imponendo che tutti i contributi dalle celle unitarie giungano in fase al punto  $(0, 0, f)$ . Per realizzare il telescopio acustico (Fig. 1) abbiamo scelto di progettare le nostre lenti usando un profilo di fase parabolico [9], riportato nell'equazione 1:

$$(1) \quad \varphi(r) = \varphi_0 - A^2(x^2 + y^2) \quad [^\circ]$$

dove  $\varphi(x,y)$  è la fase locale, assegnata ad una cella unitaria [°];  $A$  è una costante, relativa alla curvatura locale del profilo di fase e  $\varphi_0$  è una costante arbitraria.

La scelta dei mattoncini adeguati dipende dalla qualità della manifattura e dal materiale usato, che determinano e.g. il peso delle perdite termo-viscose. Un altro fattore determinante è lo spazio disponibile, visto che tipicamente la dimensione dei mattoncini dipende dalla frequenza. In questo lavoro, abbiamo usato dei cuboidi rettangolari [5], ma rispettivamente di dimensioni  $25 \times 25 \times 25$  mm per l'assorbitore e  $10 \times 10 \times 20$  mm per le lenti. Le lenti sono state disegnate per avere la massima trasmissione ( $\sim 97\%$  del suono in ingresso) a  $f_0 \pm \Delta f_{2dB} = 5.6 \pm 0.4$  kHz.

### 3. Cassa metamateriale

Per queste misure abbiamo utilizzato due diverse scatole, chiuse su cinque lati, di dimensioni:  $25 \times 25 \times 25$  cm e realizzate in PLA con una stampante commerciale (F170 Stratasys).

La prima ("Cassa A"), liscia sia all'interno che all'esterno, comporta una riduzione di 6 dB tra 500 Hz e 6000 Hz (misurati con uno speaker a 100 mm dalla parete interna). Il retro di questa cassa è stato poi rinforzato con una lastra di legno (spessore 3 cm, densità  $800 \text{ kg/m}^3$ ), per un peso complessivo di 1,6 kg e un abbattimento di 20 dB nella banda di frequenze di interesse. La "Cassa C" (anche detta "Cassa Aurora" e progettata all'Università del Sussex) si presenta liscia all'esterno, ma all'interno riporta un sistema di mattoncini che determinano la cancellazione

passiva del suono. In pratica, l'onda riflessa risulta essere in controfase rispetto a quella incidente, garantendone l'annullamento e determinando un elevato isolamento acustico, descritto in [8]. Le misure per la cassa C hanno mostrato una riduzione di 20 dB tra 500 Hz e 6000 Hz per un peso di 600 g e uno spessore del materiale di 1 mm.

In questo lavoro, abbiamo realizzato un prototipo di sistema audio metamateriale utilizzando tre diverse configurazioni: accoppiando una sorgente nella cassa A, in A con tavola di legno e in C. La sorgente sonora è stata montata su un pannello di legno (spesso 3 cm) ed assemblata alle casse con un morsetto a molla. Le misure sono state eseguite (con CLIO) utilizzando uno sweep sinusoidale logaritmico e posizionando il sistema su una base rotante, al fine di osservarne la polare orizzontale nelle diverse configurazioni. Due microfoni (Earthworks M30) sono stati posizionati rispettivamente ad 1 m e 2 m dal sistema.

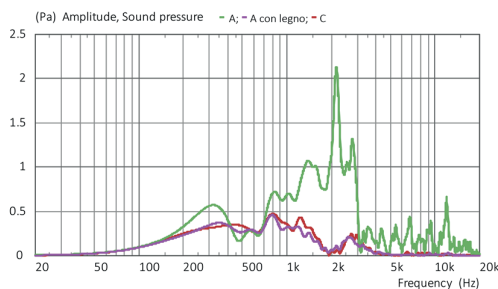


Figura 2 - Risposta in frequenza del retro del sistema (-180°), misurata ad 1 m.

La figura 2 riporta la risposta in frequenza del retro dei sistemi analizzati, misurata a 1 m dalla sorgente. Si osserva come la cassa C produca le stesse prestazioni della cassa A rinforzata, utilizzando però meno massa. L'efficacia della cassa C è confermata dalla risposta in funzione dell'angolo sul piano orizzontale (Fig. 3). Si osserva che, a parità di emissione frontale, nel caso C sono presenti meno retro-emissioni a bassa frequenza.

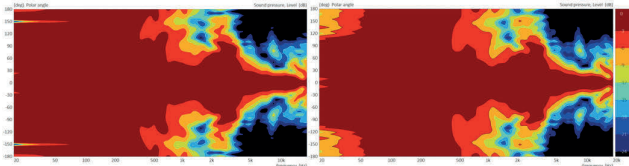


Figura 3 - Grafico di direttività della cassa metamateriale realizzata con scatola di tipo A con legno a sinistra e di tipo C a destra (VACS Viewer).

#### 4. Telescopio acustico con obiettivo auto-zoom

Il nostro (Fig. 1) è un telescopio kepleriano per il suono [5], il cui obiettivo è costituito da due lenti convergenti, posizionate ad una distanza variabile  $d$ , in grado di mettere a fuoco su un ascoltatore bersaglio in movimento [10].

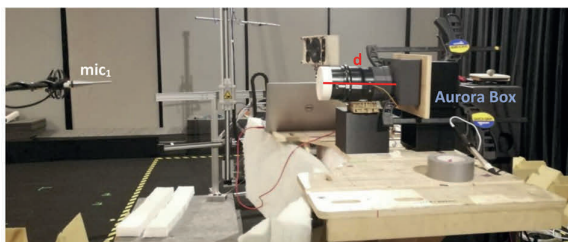


Figura 4 - Set-up sperimentale. Telescopio acustico con cassa Aurora (C).

Per questo studio, abbiamo usato due lenti convesse per il suono caratterizzate dalla stessa lunghezza focale ( $f = 53$  mm) che abbiamo montato davanti al sistema sorgente + cassa C. Misurando in asse ad 1 m e 2 m di distanza dalla seconda lente (Fig. 4) abbiamo messo a fuoco il suono sul primo microfono e poi sul secondo. La figura 5 riporta la risposta del sistema, misurata come sopra. La direttività risulta aumentata (confronto con Fig. 3), in maniera consistente a partire da 1.5 kHz. Nella risposta si osservano numerosi picchi e valli, probabilmente dovuti alla presenza fisica dell'obiettivo acustico e ad alcune frequenze il decadimento è maggiore di quello atteso al raddoppiare della distanza.

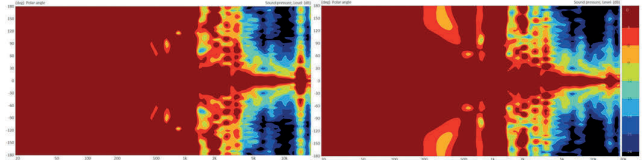


Figura 5 - Grafico di direttività del telescopio acustico. Fuoco ad 1 m e 2 m.

#### 5. Limitazioni, sviluppi futuri e conclusioni

In questo studio, abbiamo usato delle metasuperfici per controllare la direttività di un sistema audio. Abbiamo mostrato come le limitazioni chiave dei metamateriali acustici (i.e. la loro larghezza di banda, la loro dimensione) siano un parametro di disegno delle celle che possono essere progettati, sia a livello di singolo mattone che di dispositivo.

Il nostro studio si colloca in un contesto internazionale, ove lenti acustiche e sistemi metamateriali [11,12,13] iniziano ad essere utilizzati nell'audio professionale. L'ottimizzazione dei dispositivi prototipali sopra descritti potrebbe portare a una forma di comunicazione audio personalizzata, ma sarà molto importante fare esperimenti in banda telefonica per poter dimostrare che l'intelligibilità è garantita.

#### 6. Bibliografia

- [1] A. Ion, L. Wall, R. Kovacs, P. Baudisch, *Digital Mechanical Metamaterials*, In Proceedings of ACM CHI'17, New York, USA, (2017), pp. 977-988
- [2] Y. Ochiai, K. Otao, Y. Itoh, S. Imai, K. Takazawa, H. Osone, A. Mori, I. Suzuki, *Make Your Own Retinal Projector: Retinal Near-eye Displays via Metamaterials*, In ACM SIGGRAPH Posters, Article 48, (2018)
- [3] B. Assouar, B. Liang, Y. Wu, Y. Li, J. Cheng, Y. Jing, *Acoustic Metasurfaces*, Nature Reviews Materials, (2018)
- [4] M.A. Norasikin, D. Martinez Plasencia, S. Polychronopoulos, G. Memoli, Y. Tokuda, S. Subramanian, *SoundBender: Dynamic Acoustic Control Behind Obstacles*, In Proceedings of the ACM UIST, (2018), pp. 247-259
- [5] G. Memoli, L. Chisari, J.P. Eccles, M. Caleap, B.W. Drinkwater, S. Subramanian, *VARI-SOUND: A Varifocal Lens for Sound*, In Proceedings of ACM CHI '19, New York USA, Article 483, (2019)
- [6] G. Memoli, M. Caleap, M. Asakawa, D.R. Sahoo, B.W. Drinkwater, S. Subramanian, *Metamaterial bricks and quantization of meta-surfaces*, Nature Communications 8, (2017)
- [7] Y. Li, B. Liang, Z. Gu, X. Zou, J. Cheng, *Reflected wavefront manipulation based on ultrathin planar acoustic metasurfaces*, Scientific Rep. 3, (2013)
- [8] L. Chisari, L. Bonoldi, G. Memoli, *Metamaterial Solutions for noise management in hospital settings*, ASA Journal, vol. 148, (2020), pp. 2754
- [9] G. Pesce, G. Volpe, O.M. Maragó, P.H. Jones, S. Gigan, A. Sasso, *Step-by-step guide to the realization of advanced optical tweezers*, J. Opt. Soc. Am. B 32, 5 (2015), B84-B98
- [10] G. Memoli, T.J. Graham, J.T. Kybett, A. Pouryazdan, *From light to sound: prisms and auto-zoom lenses*, In ACM SIGGRAPH Talks, (2019), pp. 1,2
- [11] V. Berstis, *3D Printed Acoustic Lens for Dispersing Sound*, AES Journal, vol. 66, no. 12, (2018)
- [12] L. Chisari, M. Di Cola, P. Martignon, *Acoustic Metamaterials in Loudspeaker Systems Design*, 147th Audio Eng. Soc. Convention, (2019)
- [13] S. Degraeve, J. Oclec-Brown, *Metamaterial Absorber for Loudspeaker Enclosures*, 148th Audio Eng. Soc. Convention, (2020)