

GLI ARRAY PARAMETRICI: TRA INNOVAZIONE TECNOLOGICA E APPLICAZIONI EMERGENTI

Lucilla Di Marcoberardino (1), Paola Calicchia (1), Sara De Simone (1)

1) Istituto di Acustica e Sensoristica “O.M.Corbino”, IDASC-CNR, Roma

1. Introduzione

Negli ultimi decenni, una sempre maggiore attenzione è stata rivolta agli array parametrici acustici. Questi sfruttano l'interazione non lineare di due raggi sonori collimati di frequenza leggermente diversa, f_1 ed f_2 , detti *primari*, capace di generare nuove onde acustiche dette *secondarie* la cui frequenza è la combinazione lineare di f_1 e f_2 .

Questa interazione non lineare tra i *primari* lavora come un end-fire array di sorgenti virtuali disposte lungo l'asse di propagazione.

Precursore dello studio sulla combinazione di questi suoni fu Westervelt all'inizio degli anni '60: il suo studio teorico su sorgenti e ricevitori altamente direttivi, basati sulla propagazione non lineare di onde acustiche, ha portato alla definizione del fenomeno parametrico.

Tra le armoniche generate, la frequenza $f = |f_2 - f_1|$ *differenza* è quella di maggior interesse poiché meno attenuata e con una direttività paragonabile a quella delle *primarie*. Westervelt dimostrò che le onde acustiche *secondarie* così generate possiedono un'esistenza indipendente rispetto alle *primarie* [1].

Le onde a frequenze più elevate subiscono una maggiore attenuazione viscosa: possono quindi propagarsi lungo distanze di propagazione inferiori rispetto a segnali a bassa frequenza. Il vantaggio principale della trasmissione parametrica è dovuto principalmente alla direttività del fascio secondario, ottenuto con una sorgente le cui dimensioni non sono molto grandi rispetto alla lunghezza d'onda corrispondente (Fig.1). Altri vantaggi sono la banda larga potenzialmente raggiungibile con tali trasmettitori, e il basso livello dei possibili lobi laterali. Tuttavia, uno svantaggio significativo è la scarsa efficienza della conversione non lineare. Aumentando il livello di emissione della sorgente si ottiene un fenomeno di saturazione che riduce sia il guadagno che la direttività parametrici. Quindi, la progettazione di un trasmettitore efficiente comporta un delicato equilibrio dei parametri dell'array rispetto alle caratteristiche richieste per il campo secondario.

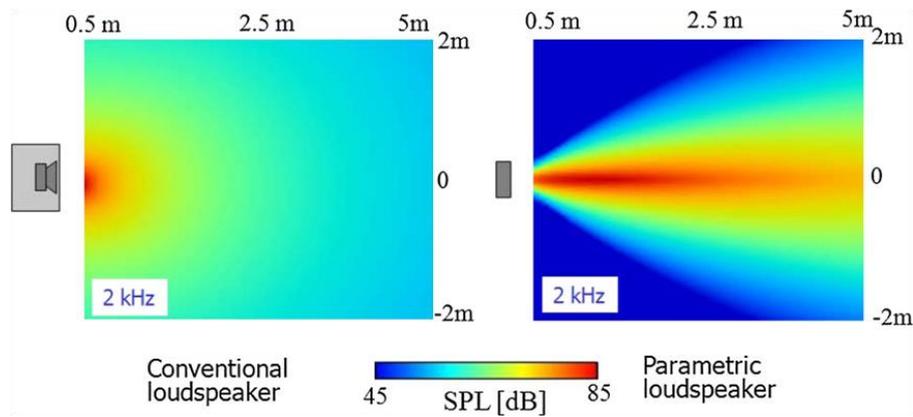


Figura 1- [2] Confronto tra il campo di pressione sonora di una sorgente parametrica (a destra) e una sorgente sonora normale (a sinistra) in aria. Entrambe le sorgenti hanno la stessa dimensione di 10 cm di raggio, ed emettono un suono di 2 kHz di frequenza.

L'emissione di un'onda parametrica a bassa frequenza generata dall'interazione di due onde ad alta frequenza, è stata a lungo studiata principalmente per la sua proprietà di elevata direttività rispetto alle sorgenti di tipo tradizionale. Trova applicazioni sia in acustica subacquea che nelle frequenze dell'udibile in aria.

Con questo articolo si vuole sia ripercorrere in breve le fasi fondamentali del loro sviluppo, sia presentare le problematiche attuali. Dalla loro prima introduzione, infatti, l'utilizzo di tali sorgenti risulta essere dei più diversificati. Si presentano quindi le tappe fondamentali della teoria di base del fenomeno parametrico (paragrafo 2). Successivamente viene riportata un'analisi degli ambiti applicativi sia in ambiente marino che in aria (paragrafo 3) e tutti gli sviluppi e problematiche che sono attualmente in fase di discussione per quanto riguarda la propagazione in aria (paragrafo 4). Si focalizza quindi l'attenzione sulla propagazione in aria con il fine di dare risalto alle nuove tecnologie ed applicazioni che sono attualmente in forte sviluppo.

2. Cenni sulla propagazione parametrica

Lo studio di fenomeni non lineari che si verificano durante la propagazione di un'onda acustica permette di comprendere i meccanismi di creazione dei suoni a bassa frequenza e di prevedere le deformazioni subite dal segnale trasmesso. Per spiegazioni più dettagliate si rimanda alla bibliografia [3,4, 5].

Prendendo in considerazione la teoria quasi-lineare [4] si suppone che le onde primarie, espresse in termini di potenziale acustico $\phi_{1,2}$, obbediscono all'equazione di propagazione lineare, e che l'onda secondaria ϕ_- è generata dalla sola interazione delle due onde primarie:

$$(1) \quad \begin{cases} \square' \phi_{1,2} = 0 \\ \square' \phi_- = S_-(\phi_1, \phi_2) \end{cases}$$

Il membro di sinistra dell'equazione (1) rappresenta l'operatore di d'Alembert in un mezzo dissipativo [5], mentre il membro di destra dell'equazione (1) è un termine sorgente quadratico definito come:

$$(2) \quad S_-(\phi) = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ (\nabla \phi)^2 + \frac{B}{2A} \frac{1}{c_0^2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)^2 \right\}$$

dove:

$\beta = 1 + B/2A$ è il coefficiente di non linearità.

Il termine sorgente S_- corrispondente all'equazione (1) corrisponde solamente all'interazione che riguarda la generazione della frequenza differenza. Da questo primo

approccio sono derivati molti dei modelli necessari alla descrizione del campo parametrico generato. Buone sintesi si possono trovare in [6]. Numerosi modelli sono stati sviluppati per lo studio di tale propagazione. Di seguito vengono dati dei cenni riguardanti i due modelli base.

Il primo, proposto da Westervelt, descrive il meccanismo di generazione della direttività parametrica in modo molto semplificato [1]. I fasci dei primari sono supposti collimati lungo l'asse di propagazione. L'interazione non lineare di questi due crea un insieme di sorgenti alla frequenza differenza ripartite secondo l'asse. Queste sorgenti costituiscono una rete lineare virtuale che emette in maniera coerente lungo la direzione di propagazione (meglio chiamato "end-fire array"). Permette quindi la valutazione di due caratteristiche importanti: l'angolo d'apertura e il livello lungo l'asse. Tale geometria produce un campo che è privo di lobi laterali. La direttività è proporzionale alla radice quadrata della lunghezza dell'array, che è commisurata alla distanza di assorbimento. Il modello di Westervelt sottolinea quindi il ruolo dell'attenuazione lineare. Risulta quindi interessante perché illustra il meccanismo con cui l'estensione longitudinale della sorgente secondaria, e la distribuzione dell'ampiezza di queste fonti lungo l'asse condiziona la generazione parametrica.

Nel 1965, H.O. Berktaý pubblicò un articolo che estendeva in modo accurato e teoricamente esaustivo il concetto dell'array parametrico [7]. Nel suo studio abbandonò il concetto dell'emissione delle due frequenze primarie per analizzare l'auto-demodulazione non lineare di un segnale portante modulato in ampiezza. Partendo dall'idea per cui la pressione di radiazione di un impulso che viaggia in fluido omogeneo segue l'andamento dell'involuppo dell'onda, Berktaý suppose che questo fenomeno potesse rendere indipendente la propagazione dell'involuppo rispetto alla portante per effetto non lineare. L'onda primaria interagisce con se stessa, e il segnale demodulato al quale siamo interessati dipende dall'involuppo della portante.

Ipotizzando un segnale primario armonico, l'ampiezza del segnale demodulato in un punto z dell'asse di propagazione nel campo lontano è proporzionale alla derivata seconda del quadrato dell'involuppo del segnale emesso. Concretamente, questa è composta dal segnale utile e da distorsioni. In effetti, un segnale modulato in ampiezza è composto da diverse componenti nel dominio delle frequenze. Queste, proprio per la natura stessa dell'auto-demodulazione, si combinano tra loro e generano nuove componenti in frequenza. Queste ultime corrispondono al segnale demodulato al quale si aggiungono delle distorsioni.

L'auto-demodulazione non lineare è una generalizzazione del fenomeno parametrico per cui lo spettro del primario risulta essere continuo. La larghezza dello spettro del segnale ottenuto tramite demodulazione è quella della banda del segnale di modulazione riportato quindi alle basse frequenze.

3. Panoramica generale sull'utilizzo del PPA

La descrizione della propagazione non lineare di un'onda acustica veniva spesso associata in letteratura ad applicazioni subacquee [6].

La teoria dell'interazione non lineare di due fasci sonori paralleli introdotta da Westervelt fu verificata sperimentalmente da Bellin e Beyer. Dato l'alto assorbimento in acqua delle alte frequenze, l'interazione delle primarie rimase confinata nel campo vicino come da ipotesi: questo favorì quindi sia la collimazione dei fasci che l'approssimazione ad onda piana. L'esperimento fu un successo in acqua, mentre in aria non ottenne validi risultati [8].

Dato il forte sviluppo dei nuovi sistemi subacquei quali il SONAR a scansione laterale (Side Scan Sonar) e il multi fascio (Multi Beam Echo Sounder), già negli anni '70 la tecnologia parametrica viene implementata anche per applicazioni in mare quali la lo-

calizzazione e il recupero di manufatti sepolti nei sedimenti marini. Una delle prime applicazioni fu identificata con quella di riuscire a delineare con un'alta risoluzione dei siti archeologici sommersi [9]. Il principio dell'emissione parametrica per applicazioni subacquee ha trovato un canale preferenziale nello studio dei sedimenti. I sedimenti marini sono effettivamente molto assorbenti: per avere una penetrazione efficace, il segnale emesso deve avere una frequenza inferiore a qualche kHz. Inoltre generando segnali di bassa frequenza in questo modo, la dimensione del trasduttore viene ridotta di un fattore 15-300, in funzione della frequenza in uso. Questo vantaggio permette di installare tali sistemi anche su piccole imbarcazioni [10]. Da circa un decennio inoltre si punta sulla possibilità di rilevare oggetti sepolti per mezzo di imaging ad alta risoluzione, combinando la trasmissione parametrica e le tecniche sonar ad apertura sintetica, oppure i sistemi che sfruttano la propagazione multi-frequenziale sviluppati negli ultimi anni [5]. La necessità di avere un'ampia larghezza di banda per ottenere velocità di trasmissione elevate, associata a basse frequenze e trasduttori altamente direttivi, fanno degli array parametrici uno strumento essenziale per le comunicazioni subacquee [5]. Da un punto di vista commerciale i sonar parametrici sono stati quindi applicati anche ai seguenti obiettivi: esplorazioni geologiche e geofisiche; campagne di indagine sui sedimenti per progetti di dragaggio; sondaggi per la scelta dei percorsi per la posa tubazioni e cavi; ricerca di risorse minerarie; indagini in zone limitate e con acque poco profonde, porti, dighe; ricerca di oggetti come relitti, tubazioni, cavi marini, ostacoli di navigazione, massi; indagini archeologiche per relitti, edifici storici ed insediamenti; imaging della Colonna d'acqua e monitoraggio di eventuali perdite di gas [5].

Parallelamente a questo, non ci fu un elevato interesse nelle sorgenti parametriche in aria finché Bennett e Blackstock non dimostrarono per primi la loro fattibilità pratica [11]. Le applicazioni in aria della sorgente parametrica sono apparse quindi alcuni decenni dopo quelle del suo analogo in acqua, principalmente a causa del basso livello del segnale generato. Di fatto l'efficienza di tali sorgenti è limitata dalla moderata proprietà di non linearità dell'aria. Per questa ragione assieme ad una iniziale limitazione tecnologica dei trasduttori ultrasonori, la comprensione delle potenziali applicazioni da parte dei ricercatori fu parziale. Solo durante gli ultimi venti anni furono fatti i maggiori progressi grazie agli avanzamenti della tecnologia costruttiva dei trasduttori ultrasonori: Yoneyama introdusse per primo l'altoparlante chiamato "audio spotlight", capace di creare un fascio audio direzionale in aria da un segnale ultrasonico portante ad alta intensità modulato in ampiezza con un segnale acustico [12]. La ricerca in questo settore fu inizialmente orientata a produrre una sorgente parametrica con un livello di pressione sonora sufficientemente elevato, e la cui efficienza potesse essere paragonabile con quella delle sorgenti in acqua. Successivamente si è focalizzata l'attenzione al perfezionamento di tali sorgenti a partire dalla geometria dell'array [12, 13]. Quasi parallelamente all'avanzamento tecnologico, negli ultimi 20 anni, gli studi maggiori si sono concentrati sulle tecniche di pre-processamento al fine di ridurre l'effetto di distorsione durante la riproduzione del suono. In [2, 14] è riportata un'accurata discussione.

4. Sviluppi tecnologici e applicativi

Attualmente, una forte innovazione tecnologica/applicativa vede come protagonista l'utilizzo degli array parametrici in aria [2, 5]. Per questo motivo i seguenti paragrafi si focalizzano solo su questo argomento.

4.1 Il trasduttore

Parte fondamentale e di grande interesse riguarda lo sviluppo di tali sorgenti. Attualmente sono ancora poche le sorgenti parametriche che si trovano in commercio, mentre numerosi sono i gruppi di ricerca che implementano autonomamente il proprio

dispositivo: la maggior parte degli sforzi fatti fin qui è stata intrapresa in Giappone e negli Stati Uniti.

Un aspetto che merita particolare attenzione nella realizzazione di queste sorgenti è legato alla disposizione dei singoli elementi all'interno di un array uniforme. Una tra le configurazioni tipiche è quella che sistema i trasduttori in un array esagonale, in quanto consente anche una buona reiezione dei lobi secondari. A tal riguardo, Pompei e Wooh simularono diverse configurazioni e distribuzioni di elementi per ottenere l'abbattimento dei grating lobes [13]. Negli anni successivi, Shi e Gan dimostrarono che nell'array parametrico l'eliminazione dei grating lobes della frequenza differenza può avvenire con condizioni più rilassate rispetto alle frequenze primarie, tali da estendere lo spaziamento tra i trasduttori ultrasonici anche a multipli della semi lunghezza d'onda della frequenza primaria più bassa. Inoltre, la precisione nel prevedere i grating lobes può essere migliorata con l'utilizzo del beamsteering, capace di fornire una migliore eliminazione degli stessi [15].

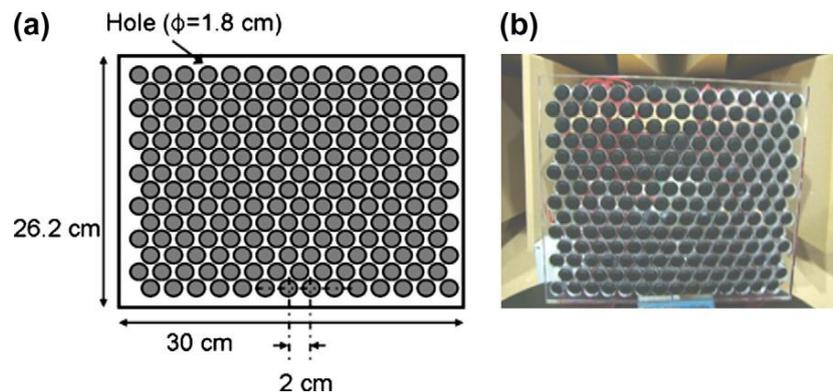


Figura 2- [16] Prototipo di array parametrico: (a) dimensioni dei componenti; (b) foto del prototipo. I trasduttori sono immersi in una struttura rettangolare di acrilico.

Il lavoro di Olszenski e Linhard riporta test sperimentali eseguiti con array di trasduttori piezomorfici low-cost, cercando di compensare eventuali limitazioni intrinseche. Gli autori dunque ottimizzano il trasduttore in termini di bilanciamento di fase attraverso un aggiustamento della posizione dei singoli trasduttori rispetto alla superficie dell'array. Inoltre propongono diverse configurazioni dell'array (matrice esagonale; circolare alta densità, anulare) e verificano l'emissione sonora sia in termini di *SPL* sia di direttività [17].

Tra i modelli maggiormente diffusi in commercio ricordiamo: Audio SpotLight (Holosonics - www.holosonics.com); AudioBeam (Sennheiser - www.sennheiser.ca); HyperSonic Sound (American Technology Corporation); MSP-50 E (Mitsubishi Electric Engineering Corporation - www.mee.co.jp). La ricerca sviluppata dai loro inventori ha portato a realizzare dei trasduttori ultrasonori per il PAA che nei principi di base si distanzia dagli array tradizionali. Tali sforzi sono volti a superare le limitazioni degli array tradizionali relativamente alla disuniformità della risposta dei singoli trasduttori ultrasonori in termini di fase e frequenza. Pompei brevetta il suo AudioBeam realizzato con una struttura multistrato che presenta una pluralità di postazioni emittenti stimulate meccanicamente e da un singolo film vibrante. Diversi strati di materiale isolante si alternano, presentando un numero di aperture, tra cui si trova una pellicola vibrante collegato a dei back-plate, nelle aperture, e un sistema di molle che trasmettono l'eccitazione meccanicamente al film sottile [18].

Norris et al. brevettano il trasduttore che diventerà l'HyperSonic Sound, costituito da una cavità vuota a cui è solidale un emettitore piatto rigido con un numero di aperture, sormontato poi da un unico film sottile piezoelettrico. La cassa è sigillata e tenuta in

una condizione di quasi-vuoto al fine di attrarre livemente il film piezoelettrico verso il piatto con le aperture, ed evita anche le possibili distorsioni dovute ad onde regressive all'interno della cassa. Infine questa è polarizzata rispetto al film piezoelettrico, e le aperture nell'emettitore rigido rappresentano praticamente delle postazioni emittenti onde di pressione, a cui il film sottile rispondo con una notevole uniformità di risposta [19].

4.2 Tecniche di pre-processamento [2, 20]

Uno degli aspetti più problematici riguardanti le sorgenti parametriche, oltre la bassa efficienza dovuta alla conversione non lineare, è la distorsione del segnale in funzione al tipo di modulazione applicato. Attualmente esistono vari tipi di tecniche di pre-processamento del segnale in grado di ridurre tale problema. Deve essere dimostrato che il livello di pressione sonora e la distorsione del segnale demodulato sono proporzionali all'indice di modulazione: un alto indice di modulazione è necessario per produrre un segnale demodulato con livello di pressione sonora sufficientemente elevato. Questo però risulta in una sempre maggiore distorsione. Bisogna quindi rispettare il compromesso tra livello di pressione sonora del segnale demodulato e bassa distorsione.

- Modulazione di ampiezza a Doppia Banda (DSB): questo è il metodo convenzionale, ed il primo ad esser stato usato, ma causa una elevata distorsione armonica (THD). Per questo è raramente utilizzato come tecnica di modulazione per gli altoparlanti parametrici, ad eccezione del caso in cui è impiegato valutare le prestazioni acustiche del PAA.
- Modulazione di ampiezza a Radice quadrata (SRAM): partendo dalla soluzione di Berktag, con questa modulazione si ottiene una bassa distorsione. Tuttavia, è necessaria una grande larghezza di banda per generare le infinite armoniche introdotte dall'operazione di radice quadrata.
- Modulazione di ampiezza a Singola Banda (SSB): Il principale vantaggio di questo metodo è che produce un inviluppo simile a quello nel metodo SRAM, con solo la metà della larghezza di banda. Tuttavia, nel caso in cui si tratti di un segnale a banda larga (come la parola) si ottengono degli errori dell'inviluppo. E' stato proposta una tecnica di modulazione SSB-AM ricorsiva (RSSBAM). Il metodo RSSB-AM consiste nella modulazione SSB e demodulazione non lineare (NLD): quest'ultimo calcola il quadrato dell'inviluppo che modella la propagazione acustica non lineare in aria. La distorsione diminuisce progressivamente applicando ricorsivamente questo modulo.

4.3 Applicazioni emergenti

Considerando il recente sviluppo degli array parametrici, le applicazioni di tali sorgenti sono ancora in una fase esplorativa. Il PAA è stato comunemente utilizzato nei chioschi espositivi museali o per l'intrattenimento, nella comunicazione e nei sistemi di messaggistica personali per la sua caratteristica direttività [21]. Ma sono alcune recenti applicazioni della PAA ne mostrano il potenziale promettente nello sfruttarne le caratteristiche uniche. Di seguito alcuni esempi:

- Strumento d'indagine. La sorgente parametrica è usata come uno strumento di base per la caratterizzazione delle proprietà acustiche di materiali e strutture. Il lavoro di Saeid et al. [22] rappresenta il primo lavoro sulla demodulazione parametrica in aria con l'obiettivo di eseguire misure molto precise in materiali poroelastici. Kuang ha studiato la possibilità di utilizzare un altoparlante parametrico per misurare i coefficienti di assorbimento dei materiali. I risultati sperimentali sono stati confrontati con quelli ottenuti da dal metodo standard del tubo, ed è stato mostrato che il metodo proposto è in grado di eseguire rapidamente misure di assorbimento in situ [23].

- Diagnostica acustica. La proprietà di diffondere il suono selettivamente consente l'uso di metodologie acustiche per analizzare materiali e strutture con maggiore dettaglio rispetto alle sorgenti convenzionali non direttive. Una sorgente parametrica in aria commerciale integrata in un dispositivo per la diagnostica acustica è stata utilizzata da Calicchia et al. per indagini non distruttive su dipinti, misurando il coefficiente di assorbimento come indicatore dei distacchi del film pittorico dal proprio supporto [24].
- Tecniche di beamsteering. La direttività dell'onda della frequenza differenza può essere controllata regolando la direttività delle onde primarie. In una delle applicazioni, Tanaka et al. [25] hanno implementato un sistema di controllo attivo del rumore con un array parametrico orientabile per tracciare un bersaglio in movimento.
- Riproduzione tridimensionale del suono. Recenti studi hanno determinato che gli altoparlanti parametrici possono trasmettere informazioni binaurali corrette per l'ascoltatore. Una coppia di altoparlanti parametrici orientati opportunamente è in grado di riprodurre un suono ad alta fedeltà registrato con la tecnica binaurale [26,27, 28], aprendo nuove ed interessanti prospettive nel settore della realtà virtuale immersiva.

5. Conclusioni

Questo articolo è una breve introduzione sugli array parametrici. Sin dalla loro ideazione negli anni '60 ci fu un grande interesse per tale fenomeno e le sue possibili applicazioni. Da allora ricerca e tecnologia hanno offerto prospettive nuove per queste sorgenti: l'obiettivo di questo lavoro è quello di far emergere questa realtà anche in Italia, dando spunto a coloro che sono interessati ad approfondire ed estendere questa tecnologia, e portarla anche in altri settori di utilizzo.

6. Bibliografia

- [1] Westervelt P.J. (1963), Parametric Acoustic Array, *J. Acoust. Soc. Am.*, 35(4), 535-537.
- [2] Gan W-S, Yang J., Kamakura T. (2012), A review of parametric acoustic array in air, *Applied Acoustics*, 73, 1211–1219.
- [3] Beyer R.T.(1974), *Nonlinear Acoustics*, 1st Edition Published by the Naval Sea Systems Command.
- [4] Hamilton M.F. and Blackstock D.T. (1998), *Nonlinear Acoustics*, Editors. Academic Press.
- [5] L. Di Marcoberardino, P. Calicchia, S. De Simone, Gli array parametrici: dalla loro scoperta ai giorni nostri, *RIA*, 37 (3-4), 7-17, Luglio –Dicembre 2013.
- [6] Novikov B., Rudenko O. and Timoshenko V. (1987), *Nonlinear Underwater Acoustics*. New York: the American Institute of Physics, Inc.
- [7] Berktaay H. O. (1965), Possible exploitation of non-linear acoustics in underwater transmitting applications, *J. Sound and Vibration*, 2, 435.
- [8] Bellin J.S. and Beyer R.T. (1962), Experimental Investigation of an End-Fire Array, *J. Acoust. Soc. Am.*, 34, 1051-1054.
- [9] Muir T. G. and Adair R. S. (1972), Potential Use of Parametric Sonar in Marine Archeology, *J. Acoust. Soc. Am.*, 52, 122.
- [10] Marchal J, Cervenka P. (2004), Feasibility of B-scan imaging in sediment by means of parametric transmission technique, *Acta Acust Acust* 90,62–69.
- [11] Bennett M.B. and Blackstock D.T. (1974), Parametric array in air, *J Acoust Soc Am.*, 57,562–8.

- [12] Yoneyama M., Fugimoto J., Kawamo Y., Sasabe S. (1983), The audio spotlight: an application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design. *J Acoust Soc Am*, 73, 1532–6.
- [13] Pompei F.J. and Wooh S-C (2002), Phased array element shapes for suppressing grating lobes, *J. Acoust. Soc. Am.*, 111(5), Pt. 1, May 2002, 2040-2048.
- [14] Pompei F.J. (2006), Preprocessing method for nonlinear acoustic system, US Patent 7,062,050.
- [15] Shi C., Gan W-S (2011), Grating Lobe Elimination in Steerable Parametric Loudspeaker, *IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control*, 58(2).
- [16] Hyeong Sick Ju, Yang-Hann Kim (2011), Near-field characteristics of the parametric loudspeaker using ultrasonic transducers, *Applied Acoustics*, 71, 793-800.
- [17] Olszeski D., Linhard K., Optimum Array Configuration for Parametric Ultrasound Loudspeakers Using Standard Emitters, *Atti del IEEE Ultrasonics Symposium 2006*.
- [18] Pompei F. J. (2004), Ultrasonic Transducer for Parametric Array, *Brevetto USA* 6,771,785 B2
- [19] Norris J. O. et al. (2008), Piezoelectric Film Sonic Emitter, *Brevetto USA* 7,376,236 B1.
- [20] Croft J.J., Norris, J.O., (2003), Theory, History, and the Advancement of Parametric Loudspeakers A Technology Overview, White Paper HSS Hypersonic Sound, American Technology Corporation.
- [21] Gan W.S., Tan EL, Kuo SM., (2011), Audio projection: directional sound and its application in immersive communication. *IEEE Signal Process Mag.*, 28(1), 43–57.
- [22] Castagnède B, Moussatov A, Lafarge D., Saeid M. (2008), Low frequency in-situ metrology of absorption and dispersion of sound absorbing porous materials based on high power ultrasonic non linearly demodulated waves, *Applied Acoustics*, 69, 634-648.
- [23] Kuang Z., Ye C., Wu M., Yang J.(2010), A Method for Measuring the Absorption Coefficient of Materials In Situ Using a Parametric Loudspeaker, *ICSV 17*, Cairo 18-22 July.
- [24] Calicchia P., De Simone S., Di Marcoberardino L., Marchal J. (2012), Near- to far-field characterization of a parametric loudspeaker and its application in non-destructive detection of detachments in panel paintings, *Applied Acoustics* 73, 1296–1302.
- [25] Tanaka N. and Tanaka M., “Active noise control using a steerable parametric array loudspeaker,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 127, no. 6, pp. 3526-3537, 2010.
- [26] Aoki S., Toba M., Tsujita N., Sound localization of stereo reproduction with parametric loudspeakers, *Applied Acoustics* 73 (2012) 1289–1295
- [27] Shi C. and Gan W-S (2013), Steerable parametric loudspeaker with preprocessing methods, *ICA 2013 Montreal*, June 2-7.
- [28] Sugibayashi Yutaro, Kurimoto Sota, Ikefuji Daisuke, Morise Masanori, Nishiura Takanobu. Three-dimensional acoustic sound field reproduction based on hybrid combination of multiple parametric loudspeakers and electrodynamic subwoofer. *Appl Acoust* 2012;73(12):1282–8.