

APPLICAZIONE DI ARRAY LINEARI DI IDROFONI A SPAZIATURA NON COSTANTE (NULA) IN SONAR ATTIVI E PASSIVI

Enrico Armelloni (1), Angelo Farina (2)

- 1) A.I.D.A. Srl – Spin-off dell’Università degli Studi di Parma, Parma
- 2) Dip. Ing. Industriale – Università degli Studi di Parma, Parma

1. Introduzione

L’incremento della direttività del sistema è sicuramente il vantaggio più importante tra quelli derivanti dall’impiego di array di trasduttori. Normalmente, infatti, gli array sono progettati con lo scopo di massimizzare l’energia trasmessa o ricevuta da un particolare angolo, minimizzando contemporaneamente quella trasmessa o ricevuta dalle altre direzioni. Questa tecnica è conosciuta come “array beamforming”.

Considerando un array di idrofoni, le sue prestazioni miglioreranno incrementando il numero di trasduttori, ma ciò, ovviamente, significa aumentare il costo del sistema.

In questo lavoro gli autori descrivono la progettazione e la costruzione di un sistema a basso costo, basato sull’impiego di un array lineare di 10 idrofoni disposti con spaziatura non costante (NULA Non-Uniform Linear Array), impiegabile in applicazioni sonar, sia attive che passive.

Lo studio è stato diviso in due parti: in primo luogo la costruzione e la caratterizzazione acustica dell’array, quindi il suo utilizzo in applicazioni sonar. L’array è stato assemblato nel laboratorio di AIDA Srl (spin-off dell’Università degli Studi di Parma), mentre le prove per le caratterizzazioni acustiche delle varie versioni e delle applicazioni sonar sono state condotte in ambienti confinati (piscine, laghi). Gli autori hanno anche condotto ulteriori test, in aggiunta a quelli già effettuati in precedenza [1], per validare l’impiego del segnale “sine sweep” in applicazioni “sonar attivo”.

Durante i test sono state impiegate differenti sorgenti sonore (projectors), nello specifico un ITC 1001 (per la caratterizzazione acustica del sistema) ed un ITC 5264 (per il sonar attivo). In entrambi i casi i segnali di test, forniti alle sorgenti, sono stati generati impiegando un PC ed un software dedicato. I segnali catturati dagli idrofoni sono stati registrati e post-processati in modo da poter calcolare, per ogni idrofono, il suo filtro inverso. Inoltre, utilizzando il software Matlab™, è stato possibile confrontare i diagrammi di direttività teorica e reale (stimata) dell’array.

La seconda parte dello studio si è concentrato sull’impiego del sistema in applicazioni nelle modalità: “sonar passivo ed attivo”. Nel primo caso l’array è stato posto in

una grande piscina, successivamente si sono prodotti rumori sbattendo piccoli oggetti in ferro. In fase di post-processing, ai segnali registrati, oltre alle tradizionali tecniche di beamforming si è applicata anche la tecnica del filtraggio inverso. Ciò ha permesso di stimare la direzione di arrivo del suono. Nel caso della modalità “sonar attivo” invece, lo scopo era quello di testare la capacità dell’intero sistema (array NULA e software real-time) nell’identificare sia il profilo del fondale che oggetti sommersi posti a diverse angolazioni al di sotto dell’array.

2. Array set-up

L’array lineare è la geometria più semplice di array. In tale configurazione tutti i trasduttori sono allineati lungo una linea retta ed, in genere, hanno una spaziatura uniforme, d , tra i vari elementi. In pratica, l’array lineare rappresenta la discretizzazione di una linea continua in locazioni periodiche nello spazio. Questa discretizzazione svolge un ruolo importante nel fenomeno dell’*aliasing spaziale*. Il fronte d’onda incidente viene campionato in posizioni specifiche ed anche in questo caso occorre considerare il teorema del campionamento di Nyquist. Esiste un’inversa proporzionalità tra la distanza tra gli elementi, d , e la massima frequenza, f_{max} , rilevabile senza che insorga il fenomeno dell’aliasing spaziale:

$$(1) \quad f_{max} \leq \frac{c}{2d \sin \vartheta} \quad [\text{Hz}]$$

dove:

c è la velocità di propagazione del suono nel mezzo [m/s];

ϑ è l’angolo di arrivo del fronte d’onda rispetto alla normale all’array [gradi].

L’efficienza e la direttività del sistema peggiorano a causa della comparsa di lobi secondari in particolari posizioni angolari.

Al fine di minimizzare l’insorgenza di questi problemi e per incrementare la flessibilità del sistema, si è deciso di impiegare un array lineare di trasduttori disposti con spaziatura non costante (NULA). In questa configurazione gli elementi si trovano posti a distanze diverse tra loro, così a parità di numero totale di trasduttori l’array presenterà una lunghezza maggiore a quella della configurazione ULA (Uniform Linear Array). Incrementare la lunghezza totale dell’array, L , influisce sulla larghezza del lobo primario, che diminuirà. In prima approssimazione la larghezza del lobo primario φ è legata alla lunghezza totale dell’array L , ed alla lunghezza d’onda λ dalla seguente formula:

$$(2) \quad \varphi = 50.6 \frac{\lambda}{L} \quad [\text{gradi}]$$

Pertanto a parità di elementi, la maggior lunghezza L permetterà al sistema di avere una direttività maggiore, il sistema risulterà quindi più flessibile rispetto ad un array a spaziatura costante.

Per questo lavoro è stata provata una configurazione di array costituita da 10 idrofoni omnidirezionali Aquarian Audio H2A-XLR. Questo tipo di trasduttore, progettato per fornire buone prestazioni audio ad un basso costo, può essere interfacciato direttamente con preamplificatori microfonici professionali. Esso offre una buona sensibilità (-172 dB re 1 V/ μ Pa; +/- 2 dB @ 250 Hz), un basso rumore e può essere impiegato per l’intera gamma di interesse (150 Hz ÷ 40 kHz). La sensibilità dei singoli idrofoni è stata

misurata in laboratorio impiegando una catena di misura costituita da un pistonofono B&K 4228 con adattatore idrofonico (opportunamente realizzato per i trasduttori Aquarian Audio), un microfono di riferimento B&K 4192 ed un analizzatore di spettro dual-channel B&K 2133.

Nella configurazione allestita gli idrofoni sono stati montati su un telaio di alluminio di lunghezza 2 m (Figura 1) in posizioni diverse (- 0.875 m, -0.455 m, -0.250 m, -0.105 m, -0.035 m, 0.035 m, 0.105 m, 0.250 m, 0.455 m, 0.875 m, rispetto al centro).

La flessibilità della soluzione è assicurata da un sistema di montaggio che consente di cambiare facilmente le posizioni dei trasduttori in base alle diverse strategie di progetto.



Figura 1 – Non-Uniform Linear Array (NULA) configurazione a 10 idrofoni

Il sistema di ricezione è completato da un preamplificatore microfonico APHEX 1788 con uscite ADAT e da un convertitore “ADAT to MADI” modello RME AD648, che è collegato al PC.

Anche se l’interfaccia PC consentirebbe di espandere il sistema a 64 canali, l’impiego di un solo preamplificatore limita ad otto il numero dei canali, ciò significa che solo otto dei dieci idrofoni della configurazione provata potevano essere utilizzati contemporaneamente.

3. Test signals

I segnali non-impulsivi impiegati in questa ricerca, come già indicato nei paragrafi precedenti, sono sine sweeps (chirps) sia logaritmici che lineari. Tali segnali da tempo vengono impiegati sia nell’esecuzione di misure che di caratterizzazioni nel campo dell’acustica [2] [3]. Recenti ricerche hanno permesso di affinare ulteriormente le misure basate sull’impiego dei segnali sine sweep, specialmente qualora occorra misurare contemporaneamente la risposta all’impulso e la distorsione armonica, e nel caso in cui si operi con sistemi che non sono né lineari né tempo invarianti.

Nelle misure subacquee (modalità “sonar attivo”), possono essere impiegate anche altre tipologie di segnali non impulsivi come, ad esempio, il segnale random pseudo casuale MLS (Maximum Length Sequence). In letteratura esistono, infatti, diverse pubblicazioni sull’argomento [4] [5] [6] [7], talune delle quali relative al confronto tra le tecniche MLS e sine sweep [1] che dimostrano le numerose prerogative della seconda tecnica rispetto alla prima.

Il principale vantaggio della tecnica sweep sine è la sua immunità alla distorsione non lineare. Quando si utilizza un segnale MLS questa distorsione può provocare gravi artefatti, che si traducono o in un rumore di fondo “artificiale”, o, peggio, in picchi spuri che possono essere facilmente confusi con riflessi provenienti da oggetti inesistenti (falsi echi). Impiegando la tecnica sine sweep ed operando nel dominio del tempo, questi

artefatti (picchi) possono essere facilmente separati dalla risposta all'impulso reale. Ciò è possibile perché la deconvoluzione è di tipo lineare e non circolare come nel caso dei segnali MLS.

In pratica, questo si ottiene molto semplicemente effettuando una convoluzione lineare del segnale registrato con un adeguato filtro inverso. Come dimostrato in [2], e confermato indipendentemente in [3], il filtro inverso si ottiene semplicemente invertendo, sull'asse dei tempi, il segnale sine sweep ed applicando un eventuale guadagno dipendente dalla frequenza qualora si fosse in presenza di un segnale sine sweep logaritmico.

In questo lavoro il segnale sine sweep è utilizzato sia per caratterizzare acusticamente i singoli idrofoni che l'intero array. Inoltre è impiegato come segnale emesso dalla sorgente quando il sistema funziona in modalità "sonar attivo".

4. Caratterizzazione acustica

Al fine di effettuare la caratterizzazione acustica del sistema, l'array è stato posizionato ad una profondità (3 m) pari alla metà della profondità della piscina (6 m) (Figura 2 - sinistra). In questo modo si è cercato di minimizzare gli effetti delle riflessioni provenienti sia dal fondo della vasca che dall'interfaccia acqua-aria. La sorgente sonora (ITC 1001) è stata posta ad una distanza di 3 m di fronte all'array. Impiegando un segnale sine sweep lineare da 1 a 23 kHz, di durata adeguata si è misurato la risposta in frequenza per ogni ricevitore; i risultati sono illustrate nella seguente Figura 2 (destra). È possibile notare come le risposte in frequenza dei dieci idrofoni siano molto simili tra di loro tranne per un trasduttore (in rosso) che mostra un'elevata attenuazione a frequenze superiori ai 15 kHz.

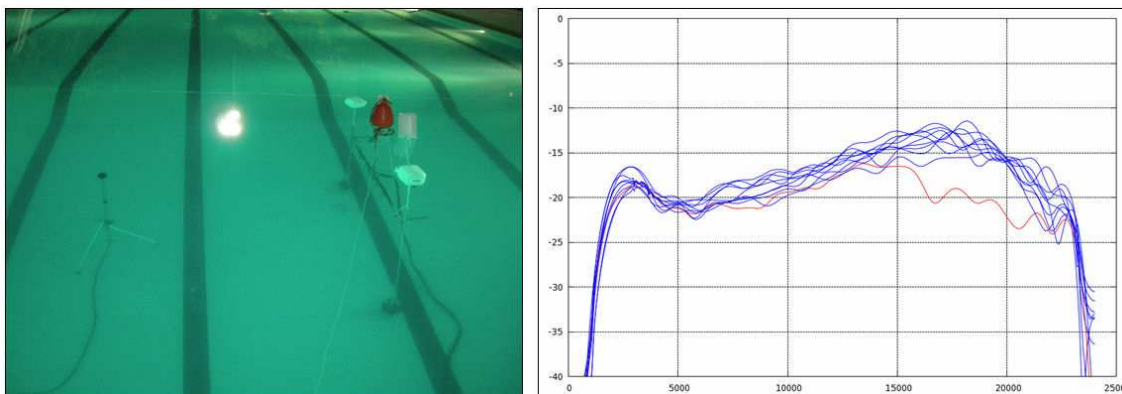


Figura 2 – Caratterizzazione acustica: set-up di misura (sinistra), risposta in frequenza di ogni idrofono (destra)

La seconda parte di questo esperimento ha riguardato la misura della reale direttività dell'array.

Mantenendo sempre la stessa distanza tra la sorgente ed array (3 m), la fonte è stata posta in sette posizioni ben definite (M4 ... M10) davanti, sulla sinistra e sulla destra del centro del sistema. I segnali registrati sono stati elaborati applicando sia tecniche di filtraggio inverso che di beamforming. Utilizzando il software Matlab™ è stato possibile confrontare i diagrammi di direttività teorica e reale (stimata) dell'array a diversi angoli di beamforming.

La Figura 3 (sinistra), mostra il risultato del confronto con la sorgente posta in posizione M6 (0,5 metri a destra del centro dell'array) ad una frequenza di 9 kHz. Nella Figura 3 (destra) è, invece, rappresentata la direttività in funzione della frequenza.

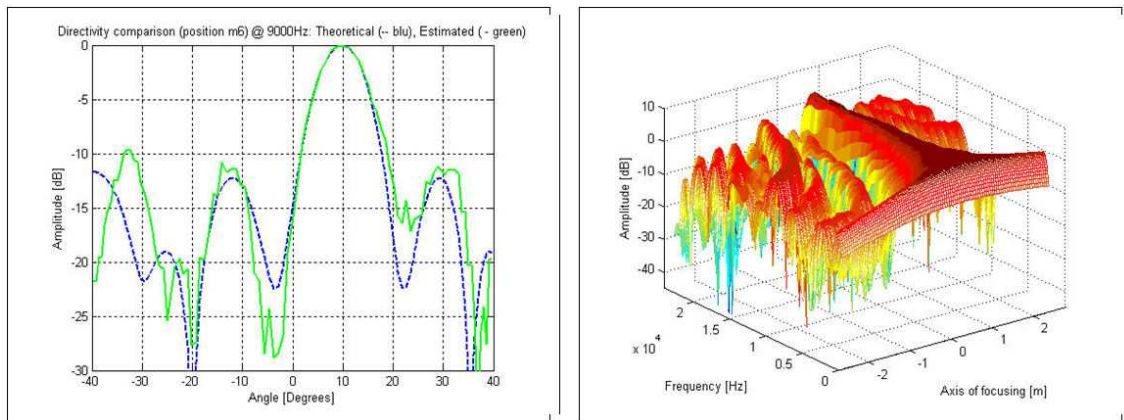


Figura 3 – Direttività dell'array (sorgente posizione m6): confronto tra teorica e stimata @ freq. 9 kHz (sinistra), direttività Vs frequenza (destra)

5. Modalità “sonar passivo”

Usando la stessa configurazione per l'array, si sono stati effettuati alcuni test orientati a definire la capacità del sistema di riconoscere la direzione di arrivo del suono. Tale suono è stato prodotto sbattendo piccoli oggetti in ferro in varie posizioni sul bordo della vasca. Le otto tracce (una per ogni idrofono) sono state registrate ed elaborate applicando sia la tecnica del beamforming tradizionale che un filtraggio inverso per ogni trasduttore.

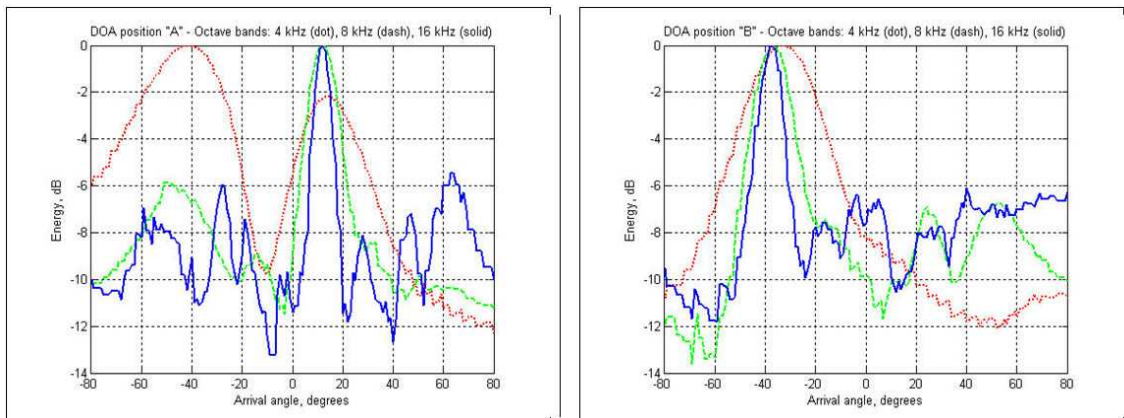


Figura 4 – Stima della direzione di arrivo del suono (DOA): posizione “A” (sinistra), posizione “B” (destra)

Nella precedente Figura 4 è mostrata la DOA (Direction Of Arrival) per due diverse posizioni della sorgente, rispettivamente la posizione “A” (13° a destra) e la posizione “B” (-35° a sinistra). L'analisi è stata effettuata per cinque differenti bande di ottava 1, 2, 4, 8 e 16 kHz, ma i risultati più significativi si sono ottenuti nelle ultime tre.

Ovviamente, il lavorare in un ambiente confinato, come una piscina implica il problema delle riflessioni sulle pareti. Questi effetti sono evidenti nella figura relativa alla

posizione “A”, dove, a bassa frequenza (banda 1 kHz), è presente un lobo secondario a circa -40° , causato dalla riflessione del suono sulla parete laterale. Questa “falsa immagine” scompare all’aumentare della frequenza in quanto la direttività dell’array aumenta.

6. Modalità “sonar attivo”

Varie serie di test sono state effettuate anche nell’ottica sia di verificare le prestazioni dell’uso del segnale sine sweep come segnale emesso dalla sorgente, che di studiare il comportamento dell’array NULA allorché impiegato come parte ricevente di un sonar attivo.

La prima campagna di misura si è concentrata sulla validazione dell’uso del segnale sine sweep nel sonar attivo. Gli autori hanno condotto diversi test, lavorando prima in una piscina e poi in un lago. I due ambienti presentavano profondità e tipologia di fondale diversi (2.2 m e cemento la piscina, 6.0 m e fango il lago). Come trasmettitore e ricevitore si sono impiegati due idrofoni ITC 5264 dotati di riflettori parabolici. Lo scopo dell’esperimento era quello di identificare un oggetto sommerso, un cestello di acciaio di altezza 0.35, usando un segnale sine sweep lineare di durata 1 s, e frequenza compresa nel range $2 \div 42,0$ kHz. La seguente Figura 5 mostra l’immagine dell’oggetto posto sul fondale (piscina sulla sinistra e lago sulla destra), ottenuta post-processando i dati.

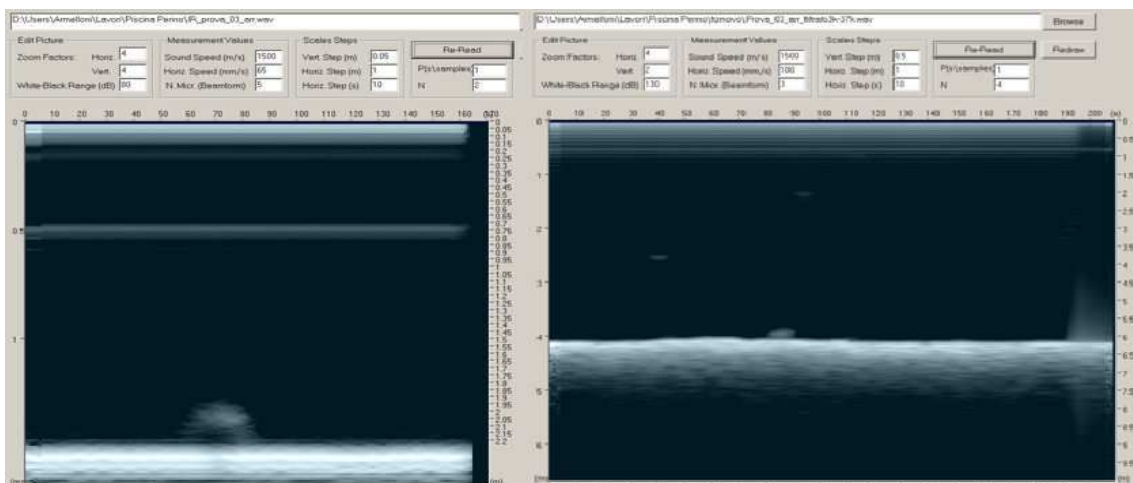


Figura 5 – Sagoma dell’oggetto posizionato sul fondo della piscina (sinistra) e del lago (destra)

Risulta importante notare come l’immagine dell’oggetto ripresa nel lago sia ben definita, anche in presenza di elevato rumore di fondo (il rumore del motore della barca in funzione). Ciò conferma come la tecnica basata sull’impiego del sine sweep permetta di ottenere un elevato rapporto segnale-rumore (SNR).

Così come già illustrato dagli autori in un precedente articolo [1], l’elevata immunità ai disturbi esterni, unitamente al veloce e semplice processamento (deconvoluzione) necessario per il calcolo delle risposte all’impulso, rendere il segnale sine sweep decisamente attraente per applicazioni e misurazioni di acustica subacquea.

Lo scopo della seconda campagna di test, condotta solo in piscina, è stato quello di testare sia il sistema di array che il funzionamento del software “real-time” appositamente sviluppato per questa applicazione. L’elemento trasmettente (ITC 5264) ed il si-

stema ricevente, costituito in questo caso dall'array NULA di idrofoni Aquarian Audio H2a-XLR, sono stati posti su una “zattera” appositamente allestita visibile in Figura 6.



Figura 6 – Sonar attivo: sorgente e array di ricevitori (sinistra), set-up di misura nella piscina (destra)

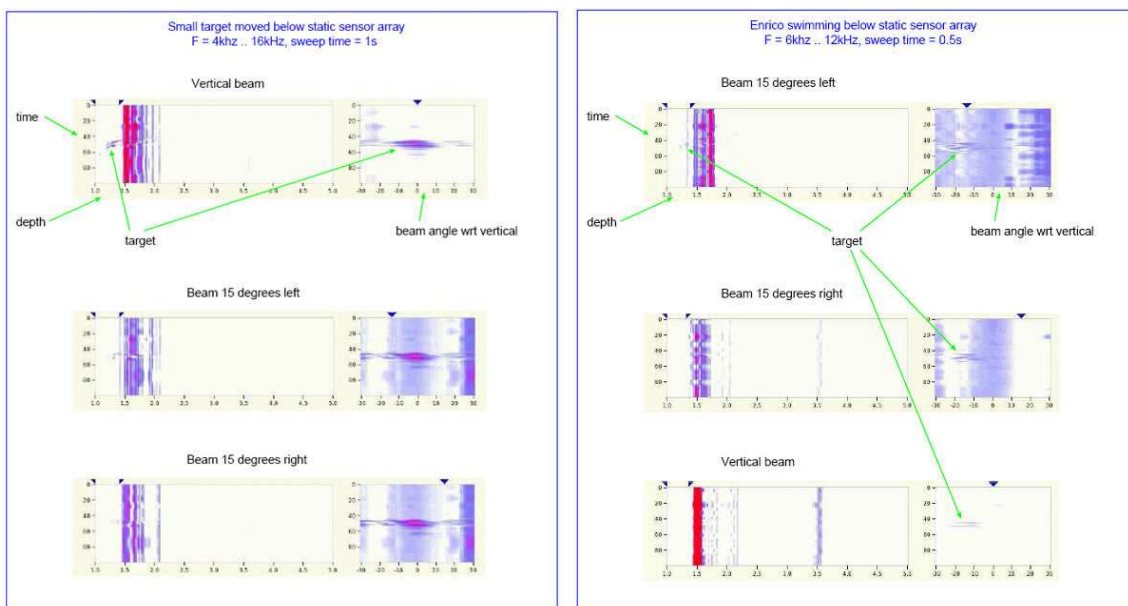


Figura 7 – Output del software real-time: cestello di acciaio (sinistra) e subacqueo in apnea (destra)

Come oggetti “target” da identificare sono stati scelti un cestello di acciaio ed un subacqueo. Mantenendo ferma la zattera, si è provveduto a trainare con velocità costante ed a diverse angolazioni il cestello al di sotto del sonar attivo. Allo stesso modo il subacqueo ha effettuato alcuni passaggi in apnea.

Date le dimensioni degli oggetti si è deciso di impiegare un segnale sine sweep con range frequenziale compreso tra 4÷16 kHz e di durata 0.5 e 1.0 secondi

La precedente Figura 7 mostra l’output del software real-time nel caso dei due differenti target (cestello e subacqueo); in ciascuna figura sono rappresentate sia la forma dell’oggetto (a sinistra) che l’energia riflessa (a destra), a tre diversi angoli di beamforming, 0° (perpendicolarmente sotto l’array), 15° sulla sinistra e 15° sulla a destra.

7. Conclusioni

In questo lavoro gli autori hanno descritto la progettazione e la costruzione di un sistema a basso costo, basato sull'impiego di un array lineare di idrofoni disposti con spaziatura non costante (NULA). I vari test condotti per caratterizzare la direttività dell'array hanno evidenziato una buona corrispondenza tra i valori stimati teoricamente e quelli effettivamente misurati. Inoltre, è stata accertata la capacità del sistema di rilevare il reale angolo di arrivo di un suono (DOA), in particolare alle frequenze medio-alte, dove la direzionalità dell'array risulta maggiore. Anche in questo caso vi è accordo perfetto tra l'angolo di arrivo reale e quello stimato in fase di post-processing delle tracce audio. L'impiego della tecnica del filtraggio inverso ha permesso di migliorare i risultati ottenibili con l'utilizzo della sola tecnica di beamforming tradizionale. Per quanto riguarda l'applicazione "sonar attivo", i test, basati sull'impiego di segnali "sine sweep", hanno dimostrato come l'uso di un tale sistema a basso costo permetta la corretta identificazione di oggetti sommersi, anche se posizionati in un ampio angolo sotto l'array.

8. Ringraziamenti

Gli autori ringraziano la società WASS (Gruppo Finmeccanica) (<http://www.wass.it>) sia per il supporto tecnico a questa ricerca (fornitura sorgenti sonore ed alcune apparecchiature elettroniche) che scientifico (consigli sulla corretta scelta degli idrofoni da impiegare).

9. Bibliografia

- [1] E. Armelloni, A. Farina, L. Burgalassi, *Not-Impulsive Technique for Sonar Imaging*, Underwater Acoustic Measurements: Technologies&Results, Crete, Greece, Proceedings of the International Conference UAM 2005.
- [2] A. Farina, *Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique*, 110th AES Convention, Paris, February 2000
- [3] S. Müller, P. Massarani, *Transfer-function measurements with sweeps*, JAES, vol. 49 (6), pp. 443, 2001
- [4] H. Alrutz, M.R. Schroeder, *A fast Hadamard transform method for the evaluation of measurements using pseudorandom test signals*, Proc. of 11th International Congress on Acoustics, pp. 235-238, Paris, June 1983
- [5] Y. Ando, *Concert Hall Acoustics*, Springer-Verlag, Berlin 1985, appendix
- [6] W.T. Chu, *Impulse response and reverberation decay measurements made by using a periodic pseudorandom sequence*, Applied Acoustics, vol. 29, pp. 193-205, 1990
- [7] A. Farina, *MLS impulse response measurements for underwater bottom profiling*, 4th European Conference on Underwater Acoustics, Rome, 21-25 September 1998