

이중 선 배열을 이용한 빔 영역 합성 처리

Synthetic Aperture Processing in Beam-space Using Twin-line Array

양 인 식*, 김 기 만*, 윤 대 희**, 오 원 천***, 도 경 철***
(In-Sik Yang*, Ki-Man Kim*, Dae-Hee Youn**, Won-Tchon Oh***, Kyeong-Cheol Dho***)

* 한국해양대학교 전파공학과, ** 연세대학교 전기·전자공학과, *** 국방과학연구소

(접수일자: 2001년 4월 6일; 채택일자: 2001년 5월 7일)

본 논문에서는 평행한 이중 선 배열을 위한 합성 기법을 제안하고자 한다. 일반적으로 천해에서 사용되는 단일 배열은 신호의 이득을 높이고 각 분해능을 높이기 위해서 긴 어퍼처 길이를 요구하고 있다. 그러나 원거리로부터 발생한 극 저주파 신호는 수신단에서 어레이를 기준으로 좌, 우 모호성을 드러낸다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 평행한 이중 선 배열을 이용하면서 합성 기법을 적용하였다. 어레이 합성 기법은 연속적인 시간에서 얻어진 각각의 데이터들을 빔 영역에서 코히어런트한 합성을 거쳐 공간 영역에서 가상의 어레이로 확장하였다. 제안된 방법은 인접한 다중 음원 환경에서의 각도 오차를 줄이고 어레이 합성 횟수에 따라 향상된 분해능 성능을 나타내었다. 시뮬레이션 결과 어레이 합성 기법을 적용하기 전과 5회의 합성을 수행했을 경우, 평균 부엽 레벨은 약 7dB가 향상되었다.

핵심용어: 이중 선 배열, 배열 합성, 각 분해능

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

In this paper, we propose synthetic aperture technique for twin-line array. Single-line array is required long aperture size in order to achieve high SNR and angular resolution in shallow water. Ultra low frequency signal from far-field has left-right ambiguity at single-line array. To resolve these problems, we'd like to adopt the synthetic aperture technique to twin-line array. The synthetic aperture method adopts coherent processing of sub-aperture signals at successive time intervals in the beam domain. The proposed method shows low angle error and improved angular resolution. In simulation result, average sidelobe level is reduced about 7[dB] when the array performed 5-synthesis.

Keywords: Twin-line Array, Array Synthesis, Angular resolution

ASK subject classification: Underwater acoustics (5, 6)

I. 서론

견인 선 배열을 이용하여 음원으로부터 발산하는 음파를 탐지하기 위해서 그 동안 일반적으로 단일 선 배열을 이용한 방법들이 연구되었다[1]. 단일 선 배열인 경우, 배열 기준점을 중심으로 튜브 모양으로 동일한 빔 이득을 가지므로 방향 탐지에 있어 좌, 우 모호성을 갖는다.

그리고, 센서의 수는 신호 대 잡음비를 높이는데 중요한 요소로 작용하고 있으며, 이는 어퍼처 (aperture) 길이가 커짐에 따라 운용상 어레이 형상 왜곡과 같은 문제점을 드러낸다. 이러한 단일 선 배열의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 최근에 다중 배열에 대한 연구가 진행되고 있다. 음원의 위치가 상대적으로 원거리에서 있는 경우 제한된 깊이를 갖는 해양에서 수직 방향 모호성은 무시할 수 있을 것이다. 따라서 음파 경로는 수평에 가까운 형태로 도달한다고 가정할 수 있어 평행한 이중 선 배열로 수평 방향의 모호성을 개선할 수 있다[2,3]. 해양 환경에서의 분해능은 어레이의 길이와 안정성에 의해 제한된다.

책임저자: 김기만 (kimkim@hanara.kmaritime.ac.kr)
606-791 부산광역시 영도구 등삼동 1번지
한국해양대학교 공과대학 전파공학과
(전화: 051-410-4918; 팩스: 051-404-3986)

고 분해능과 높은 신호 대 잡음비를 유지하기란 하이드로폰을 장착한 어레이가 길어진 것을 의미하는 것으로 신호를 수신하기 위한 선 배열의 물리적인 길이를 증가시키는 실질적으로 어려운 문제이다. 또한 긴 견인 선 배열은 예인선의 운용상 문제와 천해 환경에서의 지형 및 잡음 등으로 인해 문제가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 연구된 선 배열 합성 처리 기법은 실제로는 한정된 길이를 갖는 선 배열을 견인하면서 입력된 신호를 합성함으로써 매우 긴 길이를 갖는 효과를 내는 것이다[4].

본 논문에서는 이중 선 배열을 이용한 합성 처리 기법을 연구하였다. 상대적으로 짧은 배열로 평행하게 구성된 견인 선 배열의 이동 특성을 이용하여 음원에 대한 공간적 데이터 수를 증가시키고 정보를 코히어런트하게 합성 처리함으로써 배열 센서가 갖는 공간적인 분해능의 한계를 극복하게 된다. 이렇게 연속적인 시간에 따라 수신된 신호들은 주파수 변환을 통해 각각의 부 배열들을 합성하게 된다[5,6]. 본 논문에서는 이중 선 배열을 이용하여 어레이 합성의 반복 횟수에 따른 방향 탐지 오차 및 인접한 다중 음원 환경에서의 추정 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

II. 이중 선 배열 합성 기법

기본적인 이중 선 배열의 개념은 원거리로부터 발산하는 극 저주파 신호의 방위각 문제, 즉 실제 방향 (θ_s)과 반대 방향 ($-\theta_s$)을 구별함에 있다. 이러한 극 저주파 신호의 음파 경로는 배열을 기준으로 거의 수평에 가까운 형태로 수신단에 도달한다. 이 때 수면을 기준으로 평행하게 일정한 간격으로 배열된 이차원 선 배열은 각각의

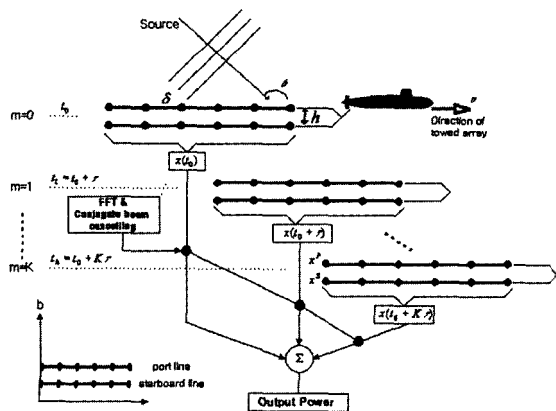


그림 1. 이중 선 배열 합성 과정
Fig. 1. Synthetic aperture processing for twin-line array.

두개의 배열로부터 수신된 신호의 반대 (conjugate) 방향의 위상 차를 최소화하여 원치 않는 방향에 이득을 줄여 실제 음원의 파워 값을 향상시킨다. 이러한 이중 선 어레이의 기본적인 특성을 가지고 수신된 신호의 이득을 높이기 위해 배열 합성 기법을 적용한다[7].

그림 1과 같이 θ 방향의 원거리로부터 신호를 수신하고 일정한 간격 δ 로 N 개 하이드로폰이 일정한 간격을 두고 평행하게 배열되어 있다고 가정하자. 방향 θ 는 합의 이동 (heading) 방향으로부터 측정된 것이다. 신호는 증가분 Δt 만큼, 즉 $t_i = i\Delta t$ 로 샘플링된다. 여기서 $i = 1, 2, \dots, k$. k 는 각 센서에서 샘플링된 데이터의 개수를 가리키며 평행한 각각의 어레이 우현 선 배열 (starboard-line)과 좌현 선 배열 (port-line)로부터 수신된 신호는 식 (1), (2)와 같이 표현된다.

$$x_n^{(s)}(t_i) = A \exp\left[2\pi f \left(t_i - \frac{a_n^{(s)} \cos \theta - b_n^{(s)} \sin \theta}{c}\right)\right] + \varepsilon_{n,i}^{(s)} \quad (1)$$

$$x_n^{(p)}(t_i) = A \exp\left[2\pi f \left(t_i - \frac{a_n^{(p)} \cos \theta - b_n^{(p)} \sin \theta}{c}\right)\right] + \varepsilon_{n,i}^{(p)} \quad (2)$$

여기서 센서 수 $n = 1, 2, \dots, N$ 이고 A 는 신호의 세기를 나타낸다. $x_n^{(s)}(t_i)$ 는 t_i 번째 샘플링된 시간에서 우현 선 배열의 n 번째 센서에 수신된 신호를 나타내고 있으며, $x_n^{(p)}(t_i)$ 는 t_i 번째 샘플링된 시간에서 좌현 선 배열의 n 번째 센서에 수신된 신호를 나타낸다. 그리고 a_n, b_n 은 이 차원으로 배열된 n 번째 센서들의 위치를 나타내고 있다. 이렇게 수신된 신호는 이득을 높이기 위해 합의 움직임에 따라 변하는 배열의 위치 정보를 보상하여 가상의 어퍼처로 확장하게 된다. $\varepsilon_{n,i}^{(s)}$ 와 $\varepsilon_{n,i}^{(p)}$ 는 각 어레이에서 분산이 σ_ε^2 이고, 평균이 영인 가우시안 잡음 신호이다. 주파수 f 에 대한 각 어레이의 수신된 신호 $x_n^{(s)}(t_i), x_n^{(p)}(t_i)$ 의 푸리에 변환은 $X_n^{(s)}(f) = \sum_{i=1}^K x_n^{(s)}(t_i) \exp(-j2\pi f t_i), X_n^{(p)}(f) = \sum_{i=1}^K x_n^{(p)}(t_i) \exp(-j2\pi f t_i)$ 이다. 이제 시각 t_0 에서의 각각의 우현 선 배열과 좌현 선 배열의 어레이 응답은 식 (3), (4)와 같이 정리된다.

$$R^{(s)}(f, \theta_s)_{t_0} = \sum_{n=1}^N X_n^{(s)}(f) \exp\left[j2\pi f \frac{a_n^{(s)} \cos \theta - b_n^{(s)} \sin \theta}{c}\right] \quad (3)$$

$$R^{(p)}(f, \theta_s)_{t_0} = \sum_{n=1}^N X_n^{(p)}(f) \exp\left[j2\pi f \frac{a_n^{(p)} \cos \theta - b_n^{(p)} \sin \theta}{c}\right] \quad (4)$$

따라서 평행한 이중 선 어레이의 시간 t_0 에서의 전체 응답 $R_{t_0}^{(Twin)}$ 은 우현 선 배열과 좌현 선 배열의 합으로 식 (5)와 같이 정리된다.

$$R_{t_0}^{(Twin)} = R_{t_0}^{(s)} + R_{t_0}^{(p)} \quad (5)$$

만약 f_0 가 고정된 음원의 주파수, v 를 견인함의 속도라고 한다면 수신 신호의 주파수는 $f = f_0(1 \pm v \sin \theta / c)$ 와 같다. 그림 1에서와 같이 τ 초가 지난 후에 데이터를 얻을 때, $v\tau = q\delta$ 을 만족하는 어레이의 위치에서 신호의 정보를 얻게 된다. 이때 q 는 어레이가 움직인 만큼의 하이드론 수가 된다. 그리고 그 때 수신신호 $x_n^{(s)}(t_i + \tau)$ 와 $x_n^{(p)}(t_i + \tau)$ 는 식 (6), (7)과 같다.

$$x_n^{(s)}(t_i + \tau) = \exp(j2\pi f_0 \tau) \cdot A \exp[j2\pi f_0(t_i - \frac{(vt_i + (q+n-1)a_n^{(s)} \cos \theta) - b_n^{(s)} \sin \theta}{c})] + \epsilon_{n,i}^{(s)\tau} \quad (6)$$

$$x_n^{(p)}(t_i + \tau) = \exp(j2\pi f_0 \tau) \cdot A \exp[j2\pi f_0(t_i - \frac{(vt_i + (q+n-1)a_n^{(p)} \cos \theta) - b_n^{(p)} \sin \theta}{c})] + \epsilon_{n,i}^{(p)\tau} \quad (7)$$

식 (6), (7)과 같이 τ 만큼 경과하여 수신된 신호의 푸리에 변환은 식 (8), (9)로 정리된다.

$$X_n^{(s)\tau}(f) = \sum_{i=1}^K x_n^{(s)}(t_i + \tau) \exp[-j2\pi f(t_i + \tau)] \quad (8)$$

$$X_n^{(p)\tau}(f) = \sum_{i=1}^K x_n^{(p)}(t_i + \tau) \exp[-j2\pi f(t_i + \tau)] \quad (9)$$

시간 t_i 를 기준으로 τ 만큼 경과 후 각각의 우현 선 배열과 좌현 선 배열의 배열 응답은 식 (10), (11)과 같다.

$$R^{(s)}(f, \theta_s)_{t_i+\tau} = \sum_{n=1}^N X_n^{(s)\tau}(f) \exp[j2\pi f \frac{a_n^{(s)} \cos \theta - b_n^{(s)} \sin \theta}{c}] \quad (10)$$

$$R^{(p)}(f, \theta_s)_{t_i+\tau} = \sum_{n=1}^N X_n^{(p)\tau}(f) \exp[j2\pi f \frac{a_n^{(p)} \cos \theta - b_n^{(p)} \sin \theta}{c}] \quad (11)$$

시간 τ 만큼 지난 후에 수신된 신호는 식 (12)와 같은 과정을 거쳐 $R_{t_i+\tau}^{(Twin)}$ 를 얻게 된다.

$$R_{t_i+\tau}^{(Twin)} = R_{t_i+\tau}^{(s)} + R_{t_i+\tau}^{(p)} \quad (12)$$

속도 v 를 가진 견인함의 이동에 따른 위상정보를 나타내는 $\exp(-j2\pi f_0 \tau)$ 가 위상 보정을 위한 변수로 사용되면, 시간 정보 t_i 및 $t_i + \tau$ 에서 수신된 신호는 그 때의 공간적 정보 $N+q$ 개의 센서를 포함한 선 배열로부터 얻어진 정보와 동일하게 되고, q 개의 가상의 센서들이 공간 영역으로 확장된다. 이는 견인함의 속도와 시간 샘플과 직접 관련된다.

III. 시뮬레이션 환경 및 결과 고찰

본 절에서는 앞 절에서 제안한 내용을 바탕으로 배열 합성에 따른 성능을 고찰한다. 기본적인 처리 과정과 시뮬레이션 환경은 그림 1과 같다. 음원의 주파수는 375Hz로 두었으며, 신호 대 잡음비는 -10dB로 하였다. 하이드론의 개수는 우현 선 배열 및 좌현 선 배열 각각 20개씩이며 센서 사이의 간격은 반파장으로 두었다. 그리고 우현 선 배열과 좌현 선 배열 사이의 거리는 1m이다.

시뮬레이션에 앞서 그림 2는 각 선 배열의 빔 패턴을 선형 스케일로 비교하고 있다. 실선의 우현 선 배열의 빔 패턴은 단일 어레이의 빔 패턴과 동일하게 실제 음원 방향과 그 반대 방향에서 동시에 이중 피크가 나타난다. 그러나 좌현 선 배열을 이용하여 실제 방향과 반대 방향에서 위상차를 반전시켜 점선과 같이 반대 방향에 음의 값을 가지게 한다. 이는 기하학적으로 식 (2)에서 센서의 위치에 따른 삼각함수의 조합으로 나타나게 된다. 그리하여 수신된 신호는 위의 배열 응답과정을 거쳐 반대 방향에서 이득을 최소화한다.

그림 3은 이중 선 배열의 빔 패턴을 바탕으로 신호의

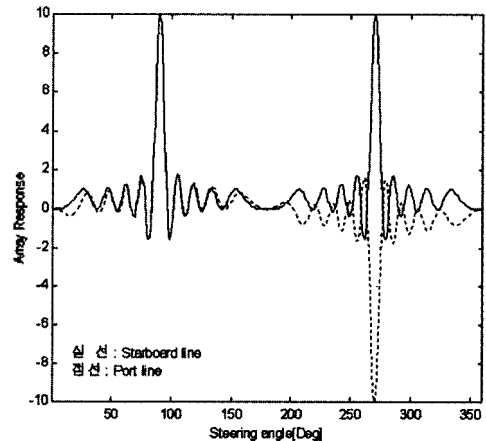
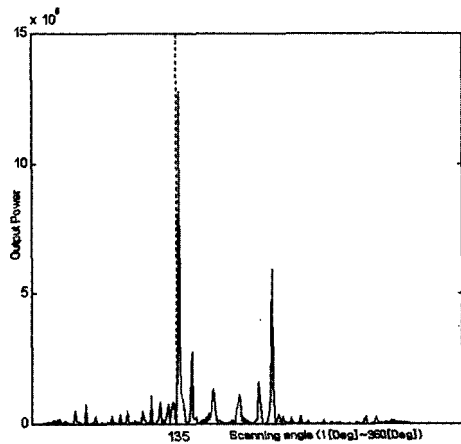
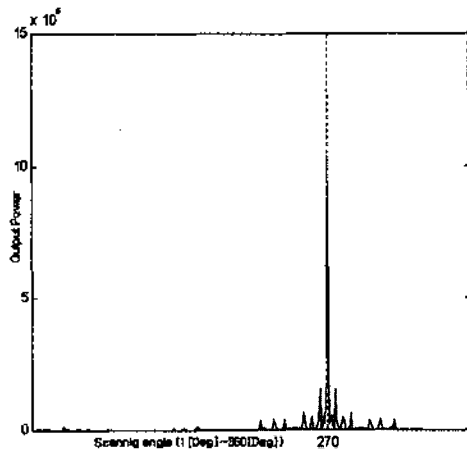


그림 2. 각각의 배열 응답 (실선: 우현 선 배열, 점선: 좌현 선 배열)
Fig. 2. Array responses of starboard-line & port-line (solid line: starboard-line, dotted line: port-line).



(a) 135°



(b) 270°

그림 3. 음원의 방향에 따른 위치 추정
Fig. 3. Target bearing estimation for Twin-line array according to the incident angle.

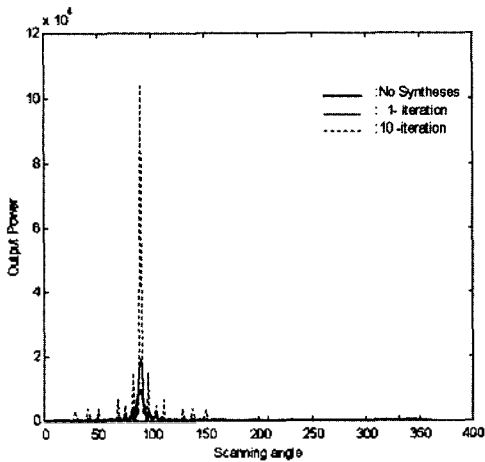
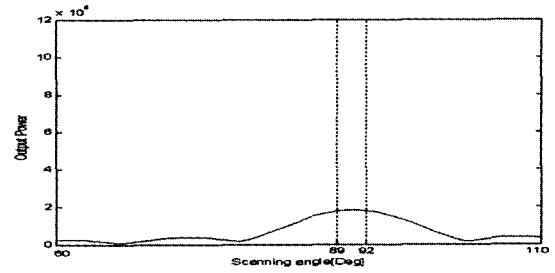
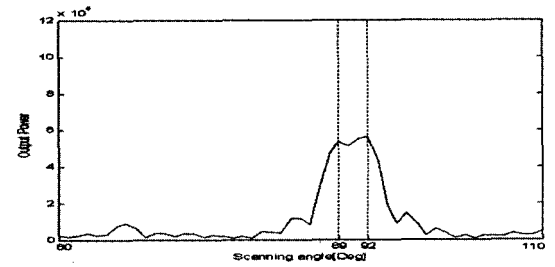


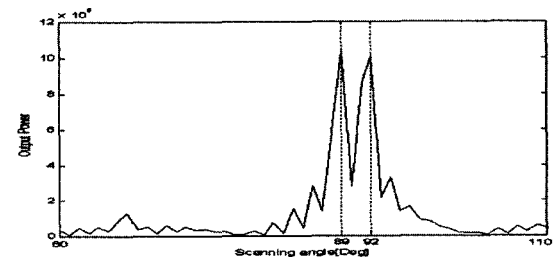
그림 4. 단일 음원에서의 배열 합성 기법 성능
(굵은선: 0회, 실선: 1회, 점선: 10회)
Fig. 4. Performance evaluation for synthetic aperture method in case of single target environment (thick line: no syntheses, solid line: 1-synthesis, dotted line: 10-iteration).



(a) 0회
(a) no syntheses



(b) 6회
(b) 6-synthesis



(c) 10회
(c) 10-synthesis

그림 5. 다중 음원 환경에서의 배열 합성 기법 성능
Fig. 5. Performance evaluation for synthetic aperture method in case of multi-target environments.

이득을 높이기 위해 배열 합성 기법을 방향에 따라 비교하고 있다. 음원의 방향은 135°와 반대 방향에 해당하는 270°에 두었으며, 견인함의 속도는 2.56knots, 측정 시간 간격은 12.5sec로 하여 데이터를 수집한 것으로 가정하여 어레이를 합성하였다. 그리고 견인함의 이동에 따라 10회에 걸친 데이터 수집을 통해 가상의 어레이로 확장하여 처리하였다. 견인함의 진행 방향을 기준으로 0°에서 360° 전 방향으로 스캐닝하면서, 각 방향의 빔 출력 파워를 선형 스케일로 나타내었다. 두 그림으로부터 모두 정확한 음원의 방향을 추정하고, 아울러 반대 방향에서의 이중 피크가 발생하지 않은 것을 볼 수 있다. 그림 3에서 음원이 135°에 위치한 경우 약 225°에서 spurious 피크가 나타나는데 이는 그 방향에서 부엽 레벨이 높기 때문이며, 이는 이중 선 배열 간격을 조절하여 낮출 수 있다[8]. 그림

4는 90° 방향의 단일 음원인 경우 배열 합성 기법을 적용한 경우, 합성 횟수에 따른 성능을 합성하지 않았을 때와 비교하고 있다. 합성 횟수는 1회와 10회로 두어 합성하지 않았을 때와 비교하였다. 그림으로부터 합성 횟수가 증가할수록 점점 분해능이 향상되는 것을 볼 수 있다.

그림 5는 합성 횟수에 따른 분해 성능을 분석하기 위해 근접한 방향에 두 음원을 두었다. 음원의 방향은 89°와 92°에 두었으며, 배열 합성 처리는 6회와 10회를 하여 합성 기법을 적용하지 않았을 때와 비교하고 있다. 그림은 60°에서 110°까지 영역을 확대한 것이다. (a)는 배열 합성 기법을 적용하지 않았을 경우를 나타내고 있다. 빔 폭이 넓어서 분해능이 떨어져 두 음원을 마치 하나의 음원으로 탐지하여 정확한 음원의 위치 추정이 되지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나 배열 합성 처리를 여러 번 반복함에 따라 점차 분해능이 향상되고 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 평행한 이중 선 배열에 합성 기법을 적용하고 그 성능을 비교, 분석하였다. 연구된 방법은 기존의 단일 배열에서 나타났던 좌, 우 모호성을 해결하고, 고 분해능과 신호 대 잡음비를 높이는 효과를 가져왔다. 빔 영역에서 어레이 합성 기법을 적용한 처리 과정은 견인함의 이동에 따라 일정한 시간 영역에서 추출된 데이터들을 지연 시간만큼의 위상을 보정함으로써 점차 합성 횟수를 반복하여 가상의 센서로 확장하게 된다. 이러한 처리 과정은 견인함의 이동에 강인한 특성을 가진다. 이는 예인선 운용상의 여러 가지 문제점을 줄여, 상대적으로 작은 선 배열 어퍼처 길이를 가지므로 큰 어퍼처를 갖는 선 배열에 비해 센서들의 위치 추정이 수월하고, 덜 왜곡된 어레이의 형상을 가지게 된다. 앞으로는 실제 해양 환경에 더욱 적합한 왜곡된 형상을 갖는 어레이 및 수중 환경 모델을 이용하여 실제 환경에서의 적용성 여부를 검토해야 할 것이다. 그리고, 견인함의 속도와 그 밖의 해양 환경에서 나타나는 코히어런스의 부정확함에 따른 성능 분석 및 보상에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 수중음향 특화연구센터의 연구비 지원으로 이루어졌습니다 (UA-22).

참고 문헌

1. Nielsen, R. O., *Sonar Signal Processing*, Boston, MA: Artech House, pp. 51-94, 1991.
2. Schurman, Iman W., "Reverberation Rejection with a Dual-Line Array" *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 21, no. 2, pp. 193-204, April 1996.
3. Richard, A. Atsavapreanee, P., Hsu, T., and Wei, T., "Hydrodynamic Studies of Multiline Towed Array Lifting Devices," Final Report for Contract N666064-97-M-6234, Naval Underwater Warfare Center, Viewport, RI, March 1998.
4. 김준환, 김기만, 이원철, 오원천, 도경철, "Conformal 어레이를 위한 Synthetic Aperture 소나", *14th. Underwater Acoustics Symposium Proceedings*, pp. 9-12, Oct. 1999.
5. 최주평, 이원철, "Conformal 어레이를 이용한 FFTSA 기법 성능 분석", *한국음향학회지*, vol. 18, no. 2, pp. 305-310, Nov. 1999.
6. 김승일, 도경철, 오원천, 윤대희, 이충용, "비선형 견인어레이를 위한 빔 형성 기법", *14th. Underwater Acoustics Symposium Proceedings*, pp. 13-16, Oct. 1999.
7. Stergios, S. and Heinz, U., "A New Passive Synthetic Aperture Technique for Towed Arrays", *IEEE J. of Oceanic Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 16-25, Jan. 1992.
8. 양인식, 김준환, 김기만, 이원철, 이충용, 윤대희, 도경철, "배열 형태에 따른 Twin-Line Array의 성능 고찰", *15th. Underwater Acoustics Symposium Proceedings*, pp. 25-28, Sept. 2000.

저자 약력

● 양 인 식 (In-Sik Yang)

2000년 2월: 한국해양대학교 전자공학과 (학사)
2000년 3월~현재: 한국해양대학교 대학원 전자공학과 석사과정
* 주관심분야: 소나신호처리

● 김 기 만 (Ki-Man Kim)

1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (학사)
1990년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1995년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월~1996년 8월: 연세대학교 의과대학 의공학교실 (Fellow)
1996년 9월~현재: 한국해양대학교 전자공학과 조교수
* 주관심분야: 소나신호처리, 3차원 음향제어, 스마트 안테나, DSP 및 CPLD 구현

● 윤 대 희 (Dae-Hee Youn)

1985년 9월~현재: 연세대학교 기계전자공학부 교수
* 주관심분야: 음성신호처리, 음향신호처리, 적응신호처리, 레이더 및 소나신호처리 (1999년 10월 한국음향학회지, 제18권, 제7호 참조)

● 오 원 천 (Won-Tchon Oh)

1980년 2월: 고려대학교 전자공학과 (학사)
1982년 2월: 고려대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
1992년 5월: The Univ. of Texas at Austin (Ph.D)
Dept. Electrical and Computer Eng.
1982년 1월~현재: 국방과학연구소 책임연구원 (팀장)
* 주관심분야: 소나신호처리, 음향표적 탐지 및 추적 기법, 고차 물계적 신호처리, 배열신호처리 및 적응 빔 형성기법

● 도 경 철 (Kyeong-Cheol Dho)

1984년 2월: 부산대학교 전기기계공학과 (학사)
1986년 2월: 부산대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
1999년 8월: 부산대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
1986년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원 (팀장)
* 주관심분야: 수중음향신호처리, 수중추적신호처리, 음향탐지신호처리, 음향 측정 및 분석기법