한국음향학회지 제20권 제5호 pp. 110~115 (2001)

네스티드 배열의 방위각 추정오차 보정기법

Bearing Estimate Error Correction Method for a Nested Array

이 장 식*, 이 정 훈**, 이 수 형***, 이 균 경**
(Jang-Sik Lee*, Jung-Hoon Lee**, Su-Hyoung Lee***, Kyun-Kyung Lee**)

* 두원공과대학 컴퓨터응용제어과, ** 경북대학교 대학원 전자공학과, ***위덕대학교 컴퓨터공학과
(접수일자: 2001년 5월 16일; 채택일자: 2001년 6월 1일)

본 논문에서는 다중 주파수 대역을 처리하기 위해서 주로 사용하는 네스티드 배열 (nested array)에 적합한 빔형성기를 제안한다. 네스티드 배열에서는 채널의 비등방성 (nonisotropic) 빔패턴으로 인하여 주빔의 방위각 추정오차가 발생하며, 부엽준위가 원래 설계된 것과 달라진다. 각 채널신호의 시간지연을 채널 내에서 센서간의 시간지연과 채널간의 시간지연으로 분리함으로써, 빔형성기 출력에서 채널 자체의 비등방성으로 인한 영향을 제거할 수 있다. 이를 통하여 네스티드 배열에서 나타나는 두 가지 문제점을 동시에 보정하는 기법을 제안한다.
핵심용어: 빔형성기법, 네스티드 배열, 소나시스템, 비등방성 빔패턴, 부엽준위, 수중음향
투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

In this paper, we propose a beamformer adequate for the nested array that is generally used for multiple frequency band signal processing. The nonisotropic beam pattern of channel in this array causes two problems: the bearing-estimate error of mainlobe and the difference between design and output in sidelobe level. By separating the time delay among channel signals and the time delay among sensor signals in channel, we can remove the effects of the nonisotropic beam pattern of channel in the beamformer output. Through this process, a method to correct simultaneously these problems is proposed.
Keywords: *Beamforming, Nested array, Nonisotropic beam pattern, Sidelobe level, Underwater acoustics*
ASK subject classification: *Underwater acoustics (5.6)*

I. 서 론

소나 및 레이다 등의 시스템에서 표적의 방위각을 정확히 추정하는 일은 매우 중요하다. 이를 위하여 자연합 빔형성, 적응 빔형성 등 다양한 기법들이 연구되어 왔다[1-3]. 또한 빔형성시 시스템의 운용환경에 적합하도록 빔패턴을 설계하는 기법에 관한 많은 연구가 수행되고 있다[4-6]. 이러한 대부분의 방법들은 채널이 등방성 (isotropic) 빔패턴을 가진다고 가정하고 빔을 형성하여 방위각을 추정하는 기법이다. 그러나, 실제 시스템에서는 채널이 비등방성 빔패턴을 가지는 경우가 많으며, 이로 인하여 두 가지 문제점이 생긴다. 즉, 빔형성시 부엽준위가 원래 설계된 것과 달라지는 현상과 방위각 추정오차가 발생한다. 비등방성 채널을 사용한 빔형성 기법으로써 부엽준위의 조절에 관한 연구는 많이 되고 있다[4,5]. 이러한 연구는 등방성 채널을 이용했을 때와 같은 부엽준위를 얻는 방법으로서, 채널의 빔패턴에 적합한 가중벡터를 최적화 방법을 통하여 구함으로써 가중벡터를 구하는데 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 또한 표적의 방위각을 추정하여 표적을 추적하는 소나 및 레이다 시스템에서는 조향각 (steering angle)에 따른 주

책임저자: 이 장 식 (jslee@doowon.ac.kr)
456-718 경기도 안성시 죽산면 장원리 678
두원공과대학 컴퓨터응용제어과
(전화: 031-670-7223; 팩스: 031-670-7229)

빔의 방위각 추정오차에 관한 문제가 더 중요한 문제이나, 이에 대해서는 다루고 있지 않다.

네스티드 배열은 채널이 비등방성 빔패턴을 가지는 대표적인 경우이다. 이는 다중 주파수 대역을 효과적으로 처리하기 위해서 각 주파수 대역에 적합하도록 각 부배열을 중첩시켜 여러 개의 센서를 조합 (clustering)하여 사용한다. 따라서 센서 이용의 효율성을 높이고 배열의 길이를 줄일 수 있어 대부분의 선배열 소나시스템에서 널리 사용하고 있다. 그러나 채널간 비동기 샘플링, 선배열센서의 비선형 구조로 인한 센서위치 오차 등으로 인하여 방위각 추정 오차가 발생한다[7]. 또한 센서들의 조합으로 인하여 각 채널이 비등방성 패턴을 가지므로 이에 관한 분석과 보정이 필요하다[8].

따라서 본 논문에서는 비등방성 빔패턴을 가지는 채널을 사용하여 빔을 형성하는 네스티드 배열에서 발생하는 방위각 추정오차와 부엽준위가 달라지는 두 가지 문제점을 분석하여 동시에 보정하는 기법을 제안한다. 먼저 각 채널신호의 시간지연을 분석하여 채널 내에서 센서간의 시간지연과 채널간의 시간지연을 분리한다. 이를 이용하면 빔출력 패턴은 등방성 채널을 이용한 빔형성기의 빔출력 패턴과 채널 자체의 빔패턴의 곱으로 나타난다[6]. 따라서 빔형성기 출력에서 채널자체의 빔패턴을 역으로 보상해 줌으로써, 빔출력 패턴에서 채널의 비등방성으로 인한 영향을 완전히 제거해 줄 수 있다.

2장에서는 가장 널리 이용되고 있는 지연합 빔형성 (delay-sum beamformer) 기법에 관해 설명하고, 3장에서는 방위각 추정오차를 보정하고, 원하는 형태의 부엽준위를 얻을 수 있는 네스티드 배열에 적합한 빔형성 기법을 제안한다. 4장에서는 모의실험을 통하여 제안한 기법의 타당성을 검증하고, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 지연합 빔형성 기법

N개의 채널로 구성된 등간격 선배열 센서시스템에서 빔형성기의 구조는 그림 1과 같다. i번째 채널의 출력신호가 $x_i(t)$라고 가정할 때 채널신호벡터는 식 (1)과 같다.

$$\mathbf{x} = [x_1(t), x_2(t), \cdots, x_N(t)]^T \tag{1}$$

여기서 윗첨자 T는 전치 (transpose)를 나타낸다. 선배열 센서시스템에서 빔형성기의 출력 $y(t)$는 i번째 채널의 출력에 조향함수 $a_i(\theta_0)$와 부엽준위의 형태를 결정하

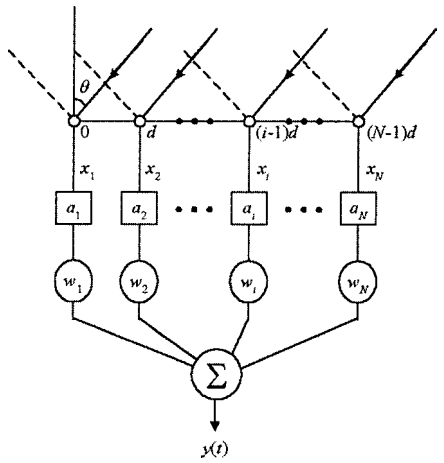


그림 1. 빔형성기 구조
Fig. 1. The structure of a beamformer.

는 창함수 w_i를 곱하여 가중효과를 준 다음 합을 취하여 식 (2)와 같이 구한다.

$$y(t) = \sum_{i=1}^{N} w_i\, a_i(\theta_0)\, x_i(t) = \mathbf{w}_a^T \mathbf{x} \tag{2}$$

여기서 θ_0는 조향각이며, 복소가중벡터 $\mathbf{w}_a$와 조향함수 $a_i(\theta_0)$는 다음과 같다.

$$\mathbf{w}_a = [w_1 a_1(\theta_0), w_2 a_2(\theta_0), \cdots, w_N a_N(\theta_0)]^T \tag{3}$$

$$a_i(\theta_0) = e^{j2\pi f(i-1)\frac{d\sin\theta_0}{c}} \tag{4}$$

여기서 f는 처리하고자 하는 주파수를 나타내며, c는 음속, d는 채널간의 간격이다. 또한 방위각 θ에 따른 빔출력 패턴은 식 (5)와 같다.

$$b(\theta) = |\mathbf{w}_a^T \mathbf{x}| \tag{5}$$

이는 신호 대 잡음비를 향상시켜 표적에 대한 방위각 추정성능을 증대시키는 역할을 한다. 채널이 등방성 빔패턴을 가지는 경우, 각각의 채널에 입사하는 신호는 입사하는 방위각에 관계없이 같은 크기를 가지며, 다만 입사하는 방위각에 따라 채널의 간격에 비례하는 시간지연만을 가진다. 따라서 식 (5)를 이용하여 신호의 방향을 정확하게 추정할 수 있다. 그러나 채널이 비등방성 빔패턴을 가지는 경우, 각각의 채널에 입사하는 신호는 입사하는 방위각에 따라 채널의 간격에 비례하는 시간지연뿐만 아니라, 채널의 비등방성으로 인하여 채널신호의 크기와 위상이 달라진다. 따라서 일반적인 지연합 빔형성기법을

이용하면 조향하는 방위각에 따라 원하는 빔출력 패턴을 얻을 수 없다.

III. 네스티드 배열에 적합한 빔형성기법

소나 등에서 표적의 방위를 추정하기 위해 일반적으로 많이 사용하는 등간격 선배열 (uniform linear array)의 경우 그레이팅 로브 (grating lobe)를 피하기 위하여 신호처리 주파수 대역의 최고 주파수의 반 파장 간격으로 센서를 배치한다. 따라서 다중 주파수 대역을 처리하기 위해서는 주파수 대역별로 센서 간격이 서로 다른 여러 개의 부배열을 사용해야 한다. 이 때 센서 이용의 효율성을 높이고 전체 배열의 길이를 줄이기 위해서 부배열의 센서를 각 대역에서 중복해서 사용하는 네스티드 배열을 주로 사용한다. 그림 2는 대역당 채널이 8개이고, 3개의 주파수 대역을 처리할 수 있는 네스티드 배열의 예를 나타낸 것이다. 각 주파수 대역에서 같은 수의 채널을 추출하기 위해 각 대역의 최고 주파수와 채널의 간격은 옥타브 (octave) 관계를 가진다. 센서에 유기되는 유체소음 등을 감소시키기 위해 배열 내부에서는 가장 높은 주파수 대역의 반 파장 간격으로 센서를 배열하고, 각각의 신호처리 대역에서는 이를 여러 개씩 조합하여 1개의 채널로 사용한다. 그림 2의 경우를 예로 들면 HF (high frequency), MF (middle frequency), LF (low frequency) 대역들은 서로 옥타브 관계를 가지며, HF, MF, LF대역은 각각 1개, 2개, 4개의 센서신호를 평균하여 각 채널신호를 만든다. 이를 빔형성기의 입력으로 사용하여 표적의 방위각을 추정한다. 실제 사용하는 선배열의 경우에는 가장 높은 주파수 대역의 1/4 파장 간격으로 센서를 배열하며, 이때에는 그림 2와 같은 경우 HF, MF, LF대역은 각각 2개, 4개, 8개의 센서신호를 조합함으로써 각 채널신호를 만든다.

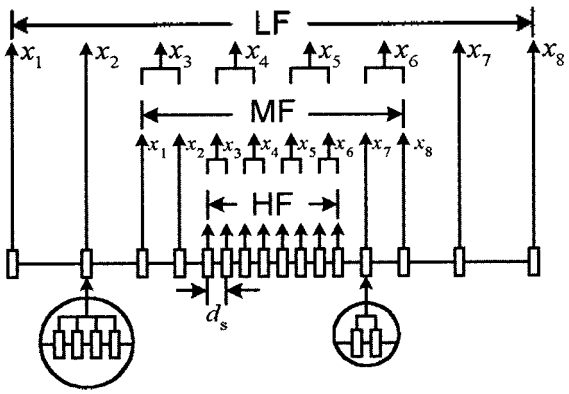


그림 2. 네스티드 배열의 구조
Fig. 2. The structure of a nested array.

CW (continuous wave) 신호 $s(t)$가 N개의 채널로 구성된 네스티드 배열에 입사할 때 M개의 센서로 구성된 i번째 채널신호는 다음과 같이 표현된다.

$$x_i(t) = \frac{1}{M} s(t) \sum_{j=1}^{M} e^{j2\pi f \tau_{(i-1)M+j}(\theta)} \tag{6}$$

여기서 f는 신호의 주파수, θ는 센서신호가 입사하는 방위각이고, $\tau_{(i-1)M+j}(\theta)$는 i번째 채널의 j번째 센서에서의 시간지연을 나타내며, 다음과 같다.

$$\tau_k(\theta) = (k-1)\frac{d_s \sin\theta}{c}, \quad k = 1, 2, \ldots, N \times M \tag{7}$$

여기서 $k = (i-1)M + j$, d_s는 센서간의 간격이다.

각 채널신호는 각 방향에 대하여 시간지연이 다른 센서신호가 더해지는 형태이므로 신호 대 잡음비는 증가하지만, 그림 3과 같이 조합하는 센서개수가 많아질수록 방향성을 크게 가진다. 이로 인하여 2장에서 보여준 일반적인 빔형성기법을 이용하면 원하는 빔출력을 얻을 수 없으며, 이는 모의실험의 그림 4와 그림 5에서 보여줄 것이다. 따라서 채널의 방향성을 고려한 빔형성기를 설계하기 위하여 먼저 채널 신호들간의 시간지연을 분석한다.

식 (7)을 정리하면 식 (8)과 같이 채널간의 시간지연을 나타내는 항 $\phi_i(\theta)$와 채널 내에서 센서간의 시간지연을 나타내는 항 $\psi_j(\theta)$로 나눌 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_k(\theta) &= \left[(i-1)M + \left(j - \frac{M+1}{2}\right)\right]\frac{d_s \sin\theta}{c} \\ &= (i-1)\frac{d \sin\theta}{c} + \left(j - \frac{M+1}{2}\right)\frac{d_s \sin\theta}{c} \\ &= \phi_i(\theta) + \psi_j(\theta) \end{aligned} \tag{8}$$

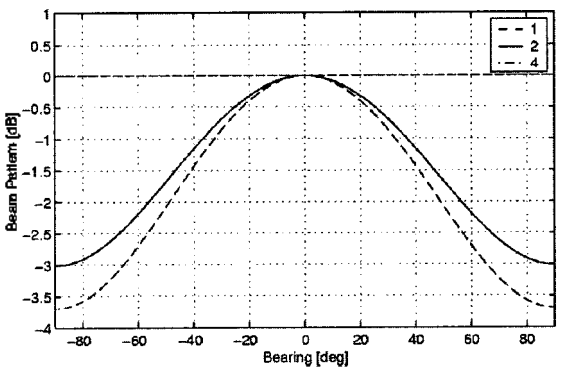
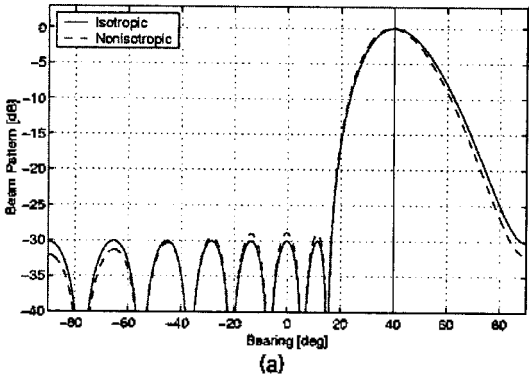
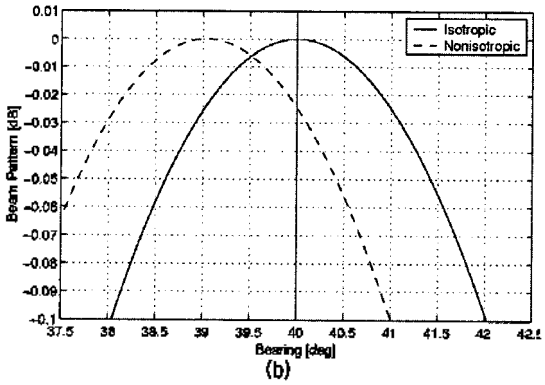


그림 3. 채널의 빔패턴
Fig. 3. Beampattern of a channel.



(a)

(a) -90° ~ 90°의 빔패턴
(a) Beam power pattern for -90° ~ 90°.



(b)

(b) 조향각 근처를 확대한 빔패턴
(b) Beam power pattern near the steering angle.

그림 4. 네스티드 배열의 빔출력 패턴 (MF 대역)
Fig. 4. Beam power pattern for a nested array (MF band).

여기서 d는 채널간의 간격이다. 이를 이용하여 i번째 채널신호를 나타내는 식 (6)을 채널간의 시간지연에 의한 위상천이항과 채널 내의 센서신호들의 평균에 의한 항으로 분리시켜 나타내면 다음과 같다.

$$x_i(\theta) = s(t)e^{j2\pi f\phi_i(\theta)}f(\theta) \tag{9}$$

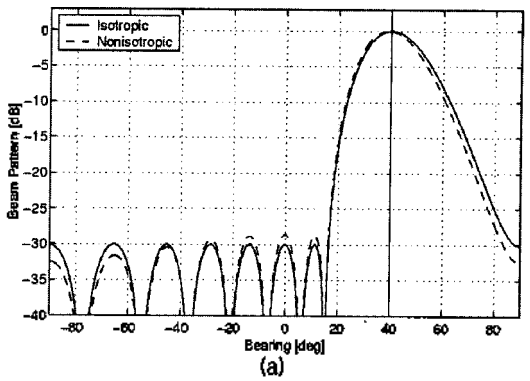
여기서

$$f(\theta) = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} e^{j2\pi f\phi_j(\theta)} \tag{10}$$

이고, $|f(\theta)|$는 방향성을 가지는 채널이 가지는 빔패턴을 나타낸다. 따라서 식 (9)로부터 채널신호는 채널이 가지는 빔패턴의 영향을 받음을 알 수 있다. 식 (9)를 이용하면 식 (1)의 채널 신호벡터는 다음과 같이 간략화된다.

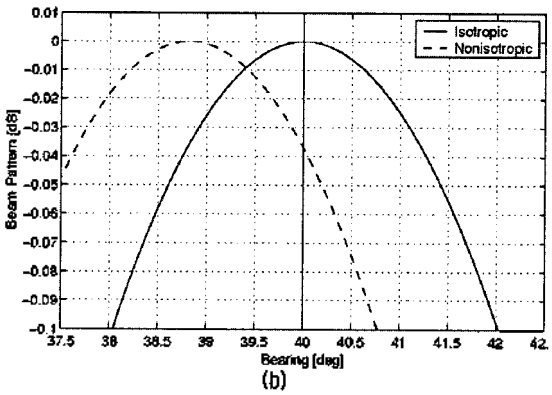
$$\mathbf{x} = s(t)f(\theta)\mathbf{u} \tag{11}$$

여기서



(a)

(a) -90° ~ 90°의 빔패턴
(a) Beam power pattern for -90° ~ 90°.



(b)

(b) 조향각 근처를 확대한 빔패턴
(b) Beam power pattern near the steering angle.

그림 5. 비등방성 채널의 빔출력 패턴 (LF 대역)
Fig. 5. Beam power pattern for a nested array (LF band).

$$\mathbf{u} = [1, e^{j2\pi f\phi_1(\theta)}, \cdots, e^{j2\pi f\phi_M(\theta)}]^T \tag{12}$$

이며, 채널간의 시간지연에 의한 방향모드벡터(direction mode vector)이다.

식 (11)의 채널신호벡터를 이용하는 네스티드 배열에서 지연합 빔형성기의 빔출력은 식 (13)과 같으며, 이때 빔출력 패턴은 식 (14)와 같다.

$$y(t) = s(t)f(\theta)\,\mathbf{w}_a^T\mathbf{u} \tag{13}$$

$$b(\theta) = |f(\theta)||\mathbf{w}_a^T\mathbf{u}| \tag{14}$$

따라서 네스티드 배열의 빔출력 패턴은 등방성 채널을 이용한 빔형성기의 빔출력 패턴과 채널 자체의 빔패턴의 곱으로 나타난다. 채널자체의 빔패턴인 $|f(\theta)|$는 그림 3과 같이 조합하는 센서 개수에 따라 비등방성 빔패턴의 형태가 달라진다. 조합하는 센서의 개수가 많아질수록 채널의 방향성이 커지며, 배열방향으로 갈수록 채널의 배열이득이 감소한다. 이는 빔 형성시 배열방향으로 갈

수록 가중을 적게 주는 효과를 가져오며, 이로 인하여 등방성 채널을 가정한 알고리즘은 오차를 발생시킨다. 이로 인한 문제점을 해결하기 위해서 식 (15)와 같이 조향하는 각 방향에 대하여 채널의 빔패턴을 역으로 나누어 주어 빔출력 패턴에서 채널의 영향을 완전히 제거한다.

$$p(\theta) = \frac{b(\theta)}{|f(\theta)|} = |\mathbf{w}_a^T \mathbf{u}| \qquad (15)$$

따라서 네스티드 배열을 사용하였을 때에도 등방성 채널을 이용한 선배열 센서와 같은 빔출력 패턴을 얻을 수 있다.

IV. 모의 실험

채널의 비등방성 빔패턴에 의해 발생하는 현상을 확인하고, 이를 해결하기 위해 제안한 알고리즘을 이용하여 모의실험을 하였다. 실험에서 사용한 네스티드 배열은 그림 2에서 예를 든 8개의 채널을 가지며, 채널 간격은 처리하고자 하는 주파수대역의 최고주파수의 반 파장 간격으로 배열하였다. 빔형성기에서 사용하는 창함수는 부엽준위를 일정하게 낮추기 위해 일반적으로 이용되는 돌프체비세프 (Dolph-Chebyshev) 창함수를 사용하였다.

먼저 방향성을 가지고 있는 채널을 이용한 시스템에서 일반적인 지연합 빔형성 기법을 이용하여 방위각을 추정하였을 때의 추정오차를 살펴보았다. 조향각이 40° 일 때 MF, LF 대역에서의 빔출력 패턴은 그림 4와 그림 5에서 보여준다. MF, LF 대역은 각각 2, 4개의 센서를 조합하여 채널신호를 추출하였다. 부엽준위가 0° 주위에서는 올라가고 ±90° 방향으로 갈수록 낮아지며, 주빔의 방위각 추정오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 더 많은 센서를 조합하는 LF대역에서 방위각 추정오차가 더 크게 나타났다. 그림 6은 채널의 개수와 조향하는 방위각에 따른 방위각 추정오차를 보여준다. ±90° 방향으로 갈수록 채널자체의 배열이득이 급격히 낮아지고 주빔의 폭이 넓어지므로 방위각 추정오차가 커진다. 채널의 개수가 증가할수록 주빔의 해상도가 좋아지므로 방위각 추정오차가 감소한다.

제안한 네스티드 배열에 적합한 빔형성 기법을 이용하여 모의실험 결과를 그림 7에서 보여주고 있다. 등방성 빔패턴을 가지는 채널을 사용한 결과와 제안한 기법을 이용하여 보정해 준 결과는 동일한 결과를 보인다. 따라서 제안한 기법을 이용하면 네스티드 배열에서 센서의 비등방성 빔패턴으로 인해 발생하는 문제점을 해결할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 다중주파수 대역을 처리하기 위하여 사용하는 네스티드 배열에서의 빔패턴을 분석하고 보정하

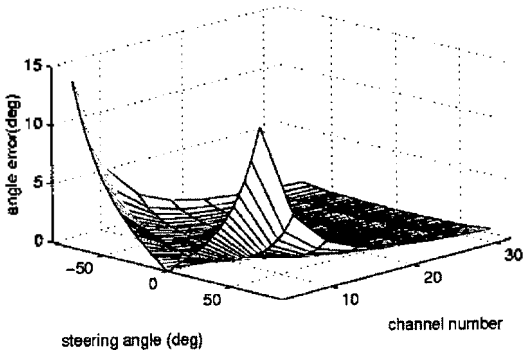
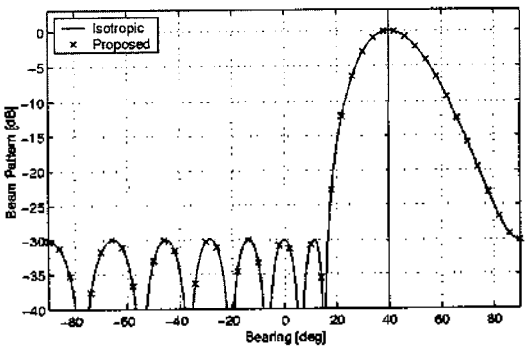
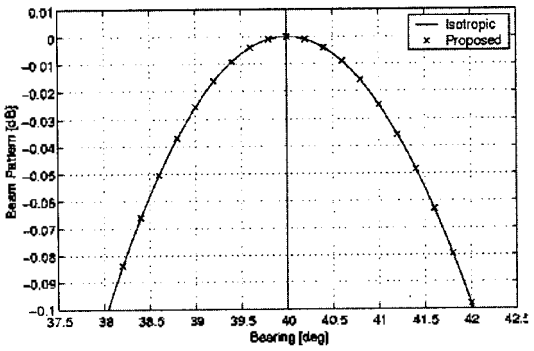


그림 6. 주빔의 방위각 추정 오차
Fig. 6. Bearing estimate error of mainlobe.



(a) -90°~90°의 빔패턴
(a) Beam power pattern for -90°~90°.



(b) 조향각 근처를 확대한 빔패턴
(b) Beam power pattern near the steering angle.

그림 7. 네스티드 배열에서 제안한 기법을 사용한 빔패턴
Fig. 7. Beam power pattern using the proposed algorithm for a nested array.

는 기법을 제안하였다. 채널이 가지는 비등방성 빔패턴으로 인하여 발생하는 방위각 추정오차를 채널의 개수와 조향하는 방위각에 따라 분석하였다. 각 채널 내에서 센서간의 시간지연과 채널간의 시간지연을 분리하여, 빔출력 패턴을 등방성 채널을 이용한 빔형성기의 빔출력 패턴과 채널 자체의 빔패턴의 곱으로 나타내었다. 이를 이용하여 채널자체의 빔패턴을 역으로 보상함으로써 방위각 추정오차와 부엽준위의 변화를 동시에 보정하는 네스티드 배열에 적합한 빔형성 기법을 제안하였다. 이를 이용하면 등방성 채널을 이용한 빔형성기법을 그대로 사용하면서 채널의 비등방성으로 인해 발생하는 문제점들을 해결할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 수중음향특화센터와 2001년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참 고 문 헌

1. R. O. Nielsen, *Sonar Signal Processing*, Artech House, 1991.
2. S. U. Pillai, *Array Signal Processing*, Springer-Verlag New York Inc., 1989.
3. S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, third-edition, Prentice Hall, 1996.
4. C. A. Olen and R. T. Compton "A Numerical Pattern Synthesis Algorithm for Arrays," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 38, no. 10, pp. 1666-1676, Oct. 1990.
5. L. Wu and A. Zielinski, "Equivalent Linear Array Approach to Array Pattern Synthesis," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 18, no.1, pp. 6-14, Jan. 1993.
6. Bernard D. Steinberg, Principles of Aperture and Array System Design, including random and adaptive arrays, John Wiley & Sons, 1976.
7. 권중휴, 이종환, 이장식, 이균경, "빔형성기의 방위각 추정오차 분석," 한국음향학회 학술발표대회 논문집 제 16권 1(s)호, pp 493-496, 1997.
8. R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, third-edition, McGraw-Hill Book Company, 1983.

저자 약력

● 이 장 식 (Jang-Sik Lee)

1984년 2월: 경북대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
1996년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (박사과정 수료)
1986년~1997년: 국방과학연구소 선임연구원
1997년~현재: 두원공과대학 컴퓨터응용제어과 교수
※ 주관심분야: 수중음향신호처리, 표적위치추정, 표적 탐지 및 추적

● 이 정 훈 (Jung-Hoon Lee)

1997년 2월: 경북대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
2001년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (박사과정 수료)
※ 주관심분야: 수중음향신호처리, 표적위치추정, 표적 탐지 및 추적

● 이 수 형 (Su-Hyoung Lee)
현재: 위덕대학교 컴퓨터공학과 교수
한국음향학회지 제19권 제7호 참조

● 이 균 경 (Kyun-Kyung Lee)
현재: 경북대학교 전자전기공학부 교수
한국음향학회지 제17권 제4호 참조