

이동하는 음원에 적합한 고분해능 광대역 LPA 빔형성기법

High Resolution Wideband Local Polynomial Approximation Beamforming for Moving Sources

박도현*, 박규태**, 이정훈**, 이수형***, 이균경****

(Do-Hyun Park*, Gyu-Tae Park**, Jung-Hoon Lee**, Su-Hyoung Lee***, Kyun-Kyung Lee****)

*삼성탈레스(주), ** 넥스원퓨처(주), *** 경일대학교, **** 경북대학교 전자전기공학부
(접수일자: 2004년 8월 5일; 수정일자: 2005년 1월 11일; 채택일자: 2005년 1월 14일)

본 논문에서는 이동하는 광대역 음원의 위치추정에 적합한 높은 분해능을 가지는 광대역LPA (local polynomial approximation) 빔형성기법을 제안한다. 제안한 기법은 여러 개의 데이터 단편으로부터 구하는 공분산행렬 대신, 하나의 데이터 단편의 여러 개 주파수 성분으로부터 얻은 조향 공분산행렬을 이용하는 STMV (steered minimum variance) 기법을 LPA 빔형성기법에 적용하였다. STMV 기법의 센서가중벡터를 이용하여 LPA 가격함수를 구성하였으며 이를 최대화 시키는 방위각과 각속도를 2차원 탐색을 통하여 추정함으로써 높은 방위각 분해능을 가지도록 하였다. 모의신호와 실제 해상 실험 데이터를 이용하여 제안한 기법의 성능을 기존의 기법과 비교, 분석 하였다.

핵심용어: 국부 다항 근사화, 빔형성기법, 방위각과 각속도 추정, 이동 음원, 짧은 관측시간

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

This paper presents a wideband LPA (local polynomial approximation) beamforming algorithm that is appropriate for wideband moving sources. The proposed wideband LPA algorithm adopts STMV (steered minimum variance) method that utilizes a steered covariance matrix obtained from multiple frequency components in one data snapshot, instead of multiple data snapshots in one frequency bin. The wideband LPA cost function is formed using STMV weight vector. The proposed algorithm searches for the instantaneous DOA and angular velocity that maximize the wideband LPA cost function, resulting in a higher resolution performance than that of a DS LPA beamforming algorithm. Several simulations using artificial data and sea trial data are used to demonstrate the performance of the proposed algorithm.

Keywords: Local polynomial approximation, Beamforming, DOA and angular velocity estimation, Moving sources, Short observation times

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.6)

I. 서론

수동 배열센서를 이용하여 이동하는 다중 음원의 위치를 추정하고 추적하는 문제는 소나, 레이더, 음성 신호 처리, 무선 이동 통신 등 많은 분야에서 널리 알려진 문제이다. 이러한 음원의 위치추정, 추적문제에서는 지연합 빔형성기법, 적응 빔형성기법, GSC (generalized

sidelobe canceller) 등의 방위각 추정기법들이 주로 사용되고 있으며, 방위각 추정기법으로부터 얻은 방위각 정보를 이용하는 추적필터를 구성하여 음원의 위치를 추적한다.

이동하는 음원의 위치추적에서 음원의 방위각 정보 외에 각속도 정보를 이용하여 추적필터를 구성하면 추적 성능을 향상시킬 수 있다. 이러한 연구의 일환으로 음원의 방위각과 각속도를 동시에 추정하기 위해 Katkovnik 등은 협대역 지연합 (delay-sum: DS) LPA 빔형성기법을 제안하였다[1,2]. 협대역 지연합LPA 빔형성기법은 시간에 따라 변하는 음원의 방위각 변화를 국부 다항 근사화

책임저자: 이 균 경 (kklee@ee.knu.ac.kr)
702-701 대구광역시 북구 산격동 1370
경북대학교 공과대학 전자전기공학부
(전화: 053-950-5546; 팩스: 053-950-5505)

(local polynomial approximation: LPA)를 이용하여 음원의 순시 방위각과 각속도로 근사화하는 것을 핵심으로 하고 있다. 협대역 지연합 LPA 빔형성 기법은 순시 방위각과 각속도를 모두 추정함으로써, 두 음원의 각속도가 다를 경우 동일한 방위각에 위치하는 두개의 음원의 위치까지도 분리 추정할 수 있다. 그러나 2차원 가격함수를 구하기 위해서 지연합 빔형성기의 센서 가중벡터를 사용하기 때문에 방위각 분해능이 지연합 빔형성기의 방위각 분해능과 같아지게 되어, 두 음원의 각속도 차이가 크지 않은 경우 인접한 음원의 분리추정 성능이 떨어지는 단점이 있다.

협대역 지연합 LPA 빔형성기법의 분해능을 향상시키기 위한 방법으로는 LPA 가격함수를 구성하는데 있어서 지연합 빔형성기의 센서 가중벡터 대신 높은 분해능을 가지는 방위각 추정기법의 센서 가중벡터를 사용하는 것을 생각할 수 있다. MUSIC (multiple signal classification), MVDR (minimum variance distortionless response), ESPRIT (estimation of signal parameters via rotational invariance techniques) 등과 같은 높은 방위각 분해능을 가지는 기법들은 기본적으로 센서 데이터로부터 추정한 공분산행렬 (covariance matrix)을 이용하는 구조를 가진다. 그러나 이러한 기법들은 정확한 공분산행렬의 추정을 위해 센서 개수 보다 많은 수의 데이터 단편을 사용하므로 음원이 빠르게 이동하는 경우, 공분산행렬의 고유치가 분산되는 효과로 인해 추정오차를 발생시키는 문제점을 가진다. 따라서 공분산행렬을 이용하여 방위각을 추정하는 일반적인 고분해능 방위각 추정기법들은 빠르게 이동하는 음원에 대해 적합하지 않다 [3-6].

이동하는 음원의 방위각 추정 문제에서는 긴 관측 데이터를 이용할 수 없으므로 짧은 관측 데이터로부터 공분산행렬과 같은 역할을 하는 새로운 형태의 공분산행렬을 구해야 한다. 짧은 관측 데이터로부터 음원의 방위각을 추정하는 대표적인 방법으로 초점 (focused) 빔형성 기법, STMV (steered minimum variance) 기법 등이 있다. 이 기법들은 공분산행렬을 추정하기 위해 각 주파수마다 다수의 데이터 단편을 이용하는 대신, 하나의 단편 내에서 다수의 주파수 정보를 이용하여 새로운 공분산행렬을 추정함으로써 짧은 관측 데이터로부터 안정된 공분산행렬을 얻는다. 초점 빔형성기법은 초점 행렬 (focusing matrix)을 이용하여 신호 대역 내의 주파수 정보들을 하나의 초점 주파수 대역으로 정렬한 다음, 정

렬된 주파수 정보들을 이용하여 초점 공분산행렬을 구성한다 [7,8]. 그러나 이 기법은 초점행렬을 구성하기 위하여 미리 신호의 방위각 정보를 알고 있어야 한다는 단점이 있고, 미리 알고 있는 방위각 정보가 실제 방위각과 다른 경우 방위각 추정치의 오차가 발생하게 된다. STMV 기법은 센서 데이터를 각 주파수별로 미리 가정된 조향각으로 선 조향 (pre-steering) 한 다음, 선 조향된 주파수 정보들로부터 조향 공분산행렬 (steered covariance matrix: STCM)을 구성하고 이를 이용하여 센서 가중벡터를 추정한다. STMV 기법은 초점 빔형성 기법에 비해 안정된 조향 공분산행렬을 추정할 수 있으므로 짧은 관측데이터 만으로도 안정적인 추정치를 가진다고 알려져 있다 [4,6].

본 논문에서는 짧은 관측 데이터 만으로도 안정된 방위각 추정치를 가지는 STMV 기법과 LPA 빔형성기법을 결합함으로써, 광대역 음원의 방위각과 각속도 추정에 적합한 광대역 STMV LPA 빔형성기법을 제안하였다. 제안한 기법에서는 다수의 주파수 반을 이용하여 조향 공분산행렬을 구성하여 STMV 가중벡터를 추정하고, 이를 이용하여 각 관측시간 단편에서의 광대역 순시 빔출력을 추정하였다. 각 관측시간 단편에서 구한 광대역 순시 빔출력을 전체 관측시간 동안 기중합 하여 순시 방위각과 각속도의 함수로 이루어진 2차원 광대역 LPA 가격함수를 구하였으며, 2차원 탐색을 통하여 광대역 LPA 가격함수를 최대화시키는 방위각과 각속도를 추정하였다.

제안한 광대역 STMV LPA 빔형성기법은 지연합 LPA 빔형성기법이 가지는 방위각 분해능의 문제점을 해결하기 위해, 다수의 데이터 단편을 이용하여 공분산행렬을 추정하는 방법 대신 하나의 데이터 단편 만으로도 센서 가중벡터를 구할 수 있는 STMV 기법을 적용함으로써, 적은 데이터 단편만으로 추정치를 구해야 하는 빠르게 이동하는 음원의 위치추정 문제에서 효과적으로 음원의 방위각과 각속도를 추정할 수 있다.

II. 지연합 LPA 빔형성기법

M 개의 광대역 센서로 이루어진 선배열 (uniform linear array : ULA)에 그림 1과 같이 P 개의 광대역 음원으로부터 신호가 입사한다고 가정한다. M 개의 센서로부터 얻은 T 초 길이의 센서데이터를 ΔT 초 길이를

가지는 N 개의 중첩되지 않는 데이터 단편들 (snapshots) 로 분할한다. 그리고 각 데이터 단편으로부터 FFT를 통하여 주파수영역 센서벡터를 얻는다. 이때 센서데이터의 n 번째 데이터 단편의 시간은 $t_n = n\Delta T$, ($n=1, \dots, N$) 으로 나타내었다.

광대역 음원의 주파수 범위가 $f_l \leq f_k \leq f_h$ 사이라고 가정하면 광대역 음원의 주파수 대역 내에 존재하는 주파수 bin의 개수는 $K = h - l + 1$ 이다. 여기서 f_k 는 FFT된 센서데이터의 k 번째 주파수이다. 이때, k 번째 주파수 bin에 해당하는 시간 t_n 에서의 푸리에 센서 출력 벡터 $\mathbf{r}_k(t_n)$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{r}_k(t_n) = \mathbf{A}_k(t_n)\mathbf{s}_k(t_n) + \mathbf{n}_k(t_n), \quad k = l, \dots, h \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{A}_k(t_n) = [\mathbf{a}_k(\theta_1(t_n)), \dots, \mathbf{a}_k(\theta_P(t_n))]$ 는 $M \times P$ 크기의 시변 방향행렬 (time-varying direction matrix)이고, $\mathbf{s}_k(t_n)$ 과 $\mathbf{n}_k(t_n)$ 는 각각 P 개의 음원에 해당하는 $P \times 1$ 신호 푸리에 벡터와 M 개 센서에 대한 $M \times 1$ 가우시안 잡음벡터를 나타낸다. 식 (1)의 방향행렬 $\mathbf{A}_k(t_n)$ 에 포함된 $\theta_i(t_n)$ 방향의 센서 방향벡터 (direction vector)는 각각 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{a}_k(\theta_i(t_n)) = [1, e^{j\phi_i}, e^{j2\phi_i}, \dots, e^{j(M-1)\phi_i}]^T \quad (2)$$

여기서 $\phi_i = 2\pi f_k d \sin \theta_i(t_n)/c$ 는 i 번째 음원에 의한 k 번째 주파수 bin에서의 인접한 센서 사이의 위상차이를 나타내며 d 는 센서 사이의 거리, c 는 신호의 전달속도, 그리고 위첨자 T 는 전치를 나타낸다.

시간에 따라 변화하는 음원의 방위각 $\theta(t_n)$ 을 관측시간 $[t_0 - T/2, t_0 + T/2]$ 에서 테일러 급수를 이용하여 근사화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta(t_n) &= \theta(t_0) + \theta'(t_0)(t_n - t_0) + \frac{\theta''(t_0)}{2}(t_n - t_0)^2 + H.O.T. \\ &= b_0 + b_1(t_n - t_0) + b_2(t_n - t_0)^2 + H.O.T. \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 T 는 관측시간의 길이를 나타내고, t_0 와 t_n 은 각각 윈도우내의 근사화 중심 (approximation

center)과 n 번째 데이터 단편에 해당하는 시간을 나타낸다. 이때 윈도우의 크기, 즉, 관측시간 T 가 충분히 작다고 가정하면, 식 (3)에서 2차항 이상의 고차항은 무시할 수 있다. 따라서 시간에 따라 변하는 음원의 방위각은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\theta(t_n) \approx b_0 + b_1(t_n - t_0) \quad (4)$$

여기서 $b_0 = \theta(t_0)$ 와 $b_1 = \theta'(t_0)$ 은 각각 시간 t_0 에서의 음원의 방위각과 각속도를 각각 나타낸다.

협대역 지연합 LPA범형성 기법은 주어진 관측시간을 여러 개의 구간으로 나누어, 식 (4)와 같이 선형 가정한 각 구간의 순시 방위각 (instantaneous DOA)과 시간에 따라 변하는 실제 음원의 방위각의 차이를 최소화하는 방위각과 각속도를 추정하는 기법이다. 협대역 지연합 LPA 범형성기법에서 사용하는 LPA 가격함수는 다음과 같다[1,2].

$$F_{DSNB}(\mathbf{b}, t_0, k) = \sum_{t_n=t_0-T/2}^{t_0+T/2} w(t_n - t_0) \left| \mathbf{a}_k^H(\mathbf{b}, t_n - t_0) \mathbf{r}_k(t_n) \right|^2 \quad (5)$$

여기서 $w(\cdot)$ 는 비음수 창함수 (nonnegative window function), $\mathbf{b} = [b_0, b_1]^T$, $\mathbf{a}_k(\mathbf{b}, t_n - t_0)$ 는 관측시간 내의 각 구간에서 가정한 순시 방위각을 이용하여 구성한 센서 가중벡터이며 순시 방위각은 벡터 \mathbf{b} 와 근사화 중심과 각 구간의 시간차이 $t_n - t_0$ 에 의해 결정된다.

식 (5)는 협대역 음원에 대한 LPA 가격함수이므로, 광

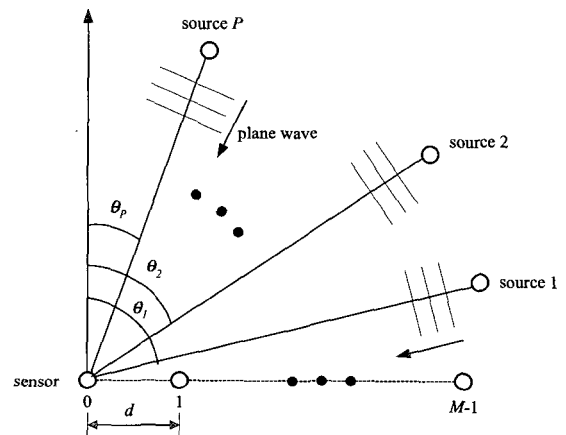


그림 1. 선배열센서와 음원의 기하학적 구조
Fig. 1. Geometry of signal source and linear array.

대역 음원의 경우에는 식 (5)의 협대역 LPA 가격함수를 광대역 음원의 주파수 대역에 대해 더함으로써 다음과 같이 확장 할 수 있다.

$$F_{DS}(\mathbf{b}, t_0) = \sum_{k=1}^K \sum_{t_n=t_0-T/2}^{t_0+T/2} w(t_n - t_0) \left| \mathbf{a}_k^H(\mathbf{b}, t_n - t_0) \mathbf{r}_k(t_n) \right|^2 \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 방위각과 각속도, 즉 b_0 과 b_1 에 대한 2차원 탐색을 함으로써 광대역 음원의 방위각과 각속도를 추정한다. 식 (5)와 (6)에서 LPA 가격함수를 구하기 위해 사용된 센서 가중벡터는 지연합 빔형성기의 가중벡터와 동일하므로, 지연합 LPA 빔형성기는 지연합 빔형성기의 방위각 분해능과 비슷한 방위각 분해능을 가진다. 따라서 음원이 서로 인접하여 존재하는 경우 추정 성능이 떨어지는 단점을 가진다.

III. 제안한 광대역 LPA 빔형성 기법

지연합 LPA 빔형성기의 방위각 분해능을 개선하기 위해서는 LPA 빔형성기의 가격함수를 구성할 때 높은 방위각 분해능을 가지는 방위각 추정기법의 센서가중벡터를 사용해야한다. 또한 이동하는 음원의 방위각과 각속도를 추정하기 위해서는 짧은 관측시간동안의 관측데이터로부터 방위각을 추정할 수 있어야 한다. 위의 두 가지 조건을 만족하는 방위각 추정기법으로는 초점 빔형성 기법과 STMV 기법이 있다. 초점 빔형성기법은 초점행렬을 구성하기 위해 사전에 음원의 방위각 정보를 알고 있어야 하기 때문에 실제환경에서 적용하기에 적합하지 않다. 따라서 제안한 기법에서는 적은 수의 데이터 단편

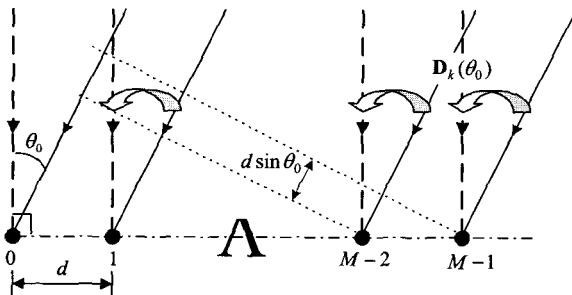


그림 2. 조향행렬 $D_k(\theta_0)$ 에 의한 선 조향
Fig. 2. Presteering process by $D_k(\theta_0)$

으로 안정된 방위각 추정성능을 가진다고 알려진 STMV 기법을 이용하여 LPA 가격함수를 구성한다.

M 개의 센서로부터 관측시간 T 초 동안 측정된 관측 데이터가 있는 경우, n 번째 데이터 단편의 k 번째 주파수빈 f_k 에서 $\theta(t_n)$ 방향으로 조향한 선 조향 센서 푸리에 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_k(\theta(t_n)) = \mathbf{D}_k(\theta(t_n)) \mathbf{r}_k(t_n) \quad (7)$$

여기서 $D_k(\theta(t_n))$ 은 $\theta(t_n)$ 방향으로 선 조향 하기 위한 선조향 행렬 (pre-steering matrix)이며 다음과 같다.

$$\mathbf{D}_k(\theta(t_n)) = \begin{bmatrix} D_0 & 0 & \Lambda & 0 \\ 0 & D_1 & & M \\ M & & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda & 0 & D_{M-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 $D_m = \exp(-j2\pi f_k m d \sin \theta(t_n) / c)$, $m = 0, \dots, M-1$ 는 m 번째 센서의 $\theta(t_n)$ 방향에 대한 위상지연이다. 식 (7)의 선 조향된 센서 푸리에 벡터를 행렬의 열로 배치하여 $M \times K$ 크기를 가지는 데이터 행렬 $\mathbf{Y}(\theta(t_n))$ 을 다음과 같이 구성한다.

$$\mathbf{Y}(\theta(t_n)) = [\mathbf{y}_1(\theta(t_n)), \mathbf{y}_{1+i}(\theta(t_n)), \Lambda, \mathbf{y}_k(\theta(t_n)), \Lambda, \mathbf{y}_K(\theta(t_n))] \quad (9)$$

데이터 행렬 $\mathbf{Y}(\theta(t_n))$ 을 이용하여 조향 공분산행렬을 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{\mathbf{R}}(\theta(t_n)) \approx \mathbf{Y}(\theta(t_n)) \mathbf{Y}(\theta(t_n))^H \quad (10)$$

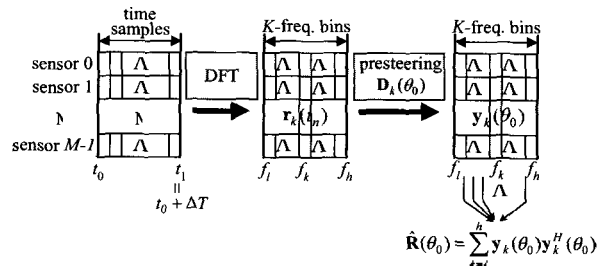


그림 3. 조향 공분산행렬 추정
Fig. 3. Steered covariance matrix estimation.

여기서 위첨자 H 는 공액전치를 나타낸다. 이때 조향 공분산행렬의 추정에 사용하는 주파수 빈의 개수 K 는 각 주파수 빈이 서로 상호 독립적인 (independent) 특성을 가지는 경우 센서개수 M 보다 크면 된다. 그러나 실제 데이터에는 주파수 성분사이에 작은 상관관계가 존재하므로, 안정된 조향 공분산행렬의 추정을 위해 센서 개수보다 2~3배 더 많은 수의 주파수 빈을 이용하여 조향 공분산행렬을 추정하는 것이 일반적이다[9]. 이러한 공분산행렬의 추정과정을 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

식 (10)로부터 구한 조향 공분산행렬을 이용하여 STMV 적응 가중벡터를 구하면 다음과 같다[3,4].

$$\hat{\mathbf{w}}(\theta(t_n)) = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1}(\theta(t_n))\mathbf{1}_M}{\mathbf{1}_M^H \hat{\mathbf{R}}^{-1}(\theta(t_n))\mathbf{1}_M} \quad (11)$$

여기서 벡터 $\mathbf{1}_M$ 은 $M \times 1$ 의 일(one) 벡터를 나타낸다. 식 (11)의 STMV 가중벡터를 이용한 $\theta(t_n)$ 방향의 광대역 빔 출력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z(\theta(t_n)) &= \sum_{k=1}^K \left| \hat{\mathbf{w}}^H(\theta(t_n)) \mathbf{y}_k(\theta(t_n)) \right|^2 \\ &= \hat{\mathbf{w}}^H(\theta(t_n)) \hat{\mathbf{R}}(\theta(t_n)) \hat{\mathbf{w}}(\theta(t_n)) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)의 시변 방위각 $\theta(t_n)$ 을 식 (4)의 순간 방위각과 각속도로 근사화하면, 시간 t_n 에서의 $\theta(t_n)$ 방향의 광대역 빔 출력은 다음과 같이 벡터 \mathbf{b} 와 시간차 $t_n - t_0$ 의 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} Z(\theta(t_n)) &= Z(\mathbf{b}, t_n - t_0) \\ &= \hat{\mathbf{w}}^H(\mathbf{b}, t_n - t_0) \hat{\mathbf{R}}(\mathbf{b}, t_n - t_0) \hat{\mathbf{w}}(\mathbf{b}, t_n - t_0) \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)의 빔출력은 시간차 $t_n - t_0$ 에 의존하게 되는데, 빔출력의 시간차에 대한 의존성은 지연합 LPA 기법에서와 동일한 방법으로, 관측시간 $[t_0 - T/2, t_0 + T/2]$ 동안 가중합을 취하여 제거할 수 있다. 따라서 제안한 STMV LPA 빔형성기의 가격함수는 다음과 같다.

$$F_{ST}(\mathbf{b}, t_0) = \sum_{t_n=t_0-T/2}^{t_0+T/2} w(t_n - t_0) Z(\mathbf{b}, t_n - t_0) \quad (14)$$

최종적으로 식 (14)를 이용하여 방위각과 각속도에 대한 2차원 탐색을 통해 다음과 같이 방위각과 각속도를 추정한다.

$$\hat{\mathbf{b}} = \arg \max_{\mathbf{b}} F_{ST}(\mathbf{b}, t_0) \quad (15)$$

IV. 모의 실험

4.1. 모의신호를 이용한 모의실험

제안한 광대역 STMV LPA 빔형성기의 성능을 평가하기 위해 모의신호를 이용하여 제안한 기법과 지연합 LPA 빔형성기법의 성능을 비교하였다.

모의 실험에서는 두 개의 상관관계가 없는(uncorrelated) 음원을 가정하였다. 이때, 두 음원의 주파수 대역과 신호대 잡음비 (signal to noise ratio)는 각각 190Hz ~ 200Hz, 1Hz대역폭 기준 10dB로 동일하게 설정하였다.

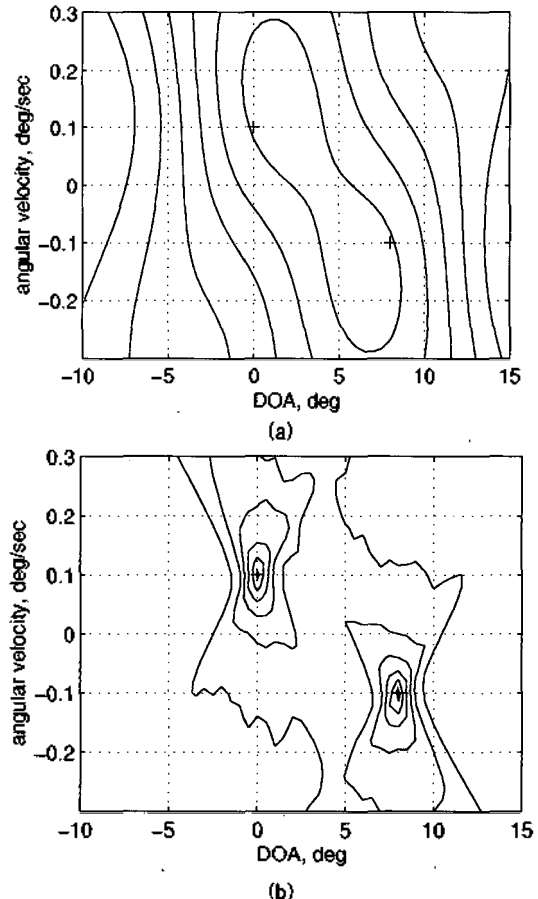


그림 4. 2차원 LPA 가격함수 (a) 지연합 LPA 빔형성기법 (b) 제안한 기법
Fig. 4. 2-D LPA cost function (a) The DS LPA beamforming (b) The proposed algorithm.

수신 센서로는 최대 신호 주파수(200Hz)의 반 파장 간격으로 등간격 배치된 14개의 선배열 센서를 사용하였다. 표본화 주파수는 512Hz로 설정하였으며, 2048 point FFT를 수행하여 4초마다 하나의 데이터 단편이 생성되도록 하였으며, 음원 주파수 대역내에 41개의 주파수 빈이 존재하도록 하였다. $T = 60$ 초의 직사각형 관측 윈도우 내의 15개 데이터 단편을 이용하여 방위각과 각속도를 추정하였다.

방위각 분해능을 알아보기 위해 제안한 기법과 지연합 LPA 빔형성기법의 LPA 가격함수를 비교하였다. 두 음원의 방위각과 각속도는 각각 (0, 8)deg와 (0.1, -0.1) deg/sec로 설정하여 두 음원의 방위각 차이가 지연합 빔형성기의 3dB 빔폭(≈ 8 deg)정도가 되도록 설정하였다. 그림 4는 제안한 기법과 지연합 LPA 빔형성 기법의 LPA 가격함수를 2차원으로 나타낸 것이다. 그림 4에서 LPA 가격함수의 첨두치에 해당하는 방위각과 각속도가 각 기법의 추정치이며 실제 음원의 방위각과 각속도는 'x' 로 나타내었다. 그림에서 지연합 LPA 기법은 두 음원을 정확히 분리하지 못하나 제안한 기법은 두 음원을 정확하게 분리하는 것을 볼 수 있다.

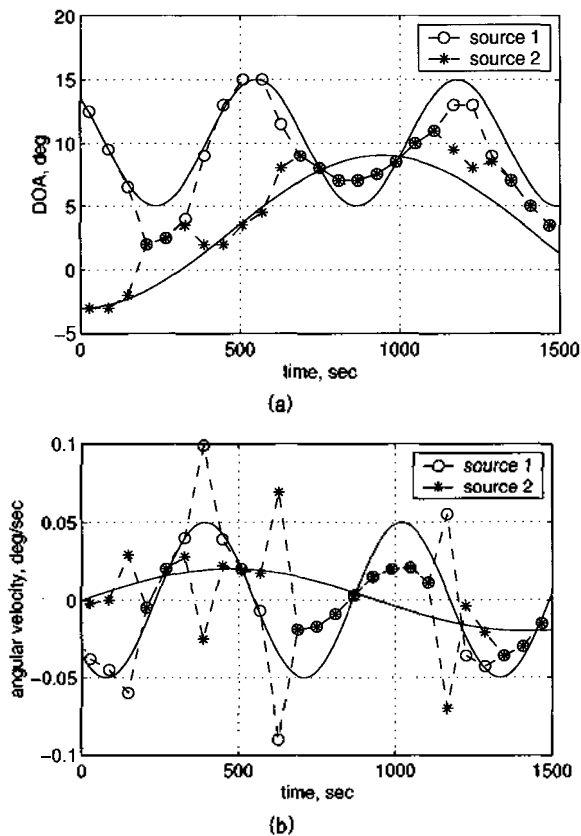


그림 5. 지연합 LPA 빔형성기법의 궤적 추정 결과 (a) DOA 추정치 (b) 각속도 추정치
 Fig. 5. Trajectory estimates of the DS LPA beamforming (a) DOA estimate (b) Angular velocity estimate.

동일한 상황에서 이동하는 음원에 대한 추정 성능을 비교하기 위해 두 음원의 궤적을 각각 $\theta_1(t) = 10^\circ + 5 \cos(t/100 + \pi/4)$, $\theta_2(t) = 3^\circ - 6 \cos(t/300)$ 로 설정하고 그 추정 결과를 비교하였다. 이때 음원의 최대 각속도 0.05deg/sec는 센서로부터 4km 떨어진 음원이 약 7knots의 속도로 이동하는 경우에 해당한다. 그림 5와 그림 6은 각각 이동하는 두 음원에 대한 방위각 추정 결과와 각속도 추정 결과를 나타낸 것이다. 여기서 실선은 실제 음원의 이동궤적을 나타내며, '-*-'와 '-o-'는 두 음원에 대한 방위각과 각속도의 추정치를 나타낸다. 그림 5에서 두 음원이 10° 이상 떨어져 있는 경우 (0sec~200sec)에는 지연합 LPA 빔형성기법은 방위각과 각속도를 잘 추정하는 것을 볼 수 있으나 두 음원이 가까이 존재하는 경우 (200sec~400sec)에는 두 음원의 분리 추정에 실패하는 것을 볼 수 있다. 반면, 그림 6의 결과로부터 제안한 기법은 기존의 지연합 LPA 빔형성기법에 비해 두 음원을 정확하게 분리하는 것을 알 수 있다. 제안한 기법은 지연합 LPA 빔형성기법에 비해 우수한 방위각 분해능을 가지나 두 음원이 매우 근접하여 존재하거나 교차하는 경우 (750sec~1100sec)에는 다소 큰

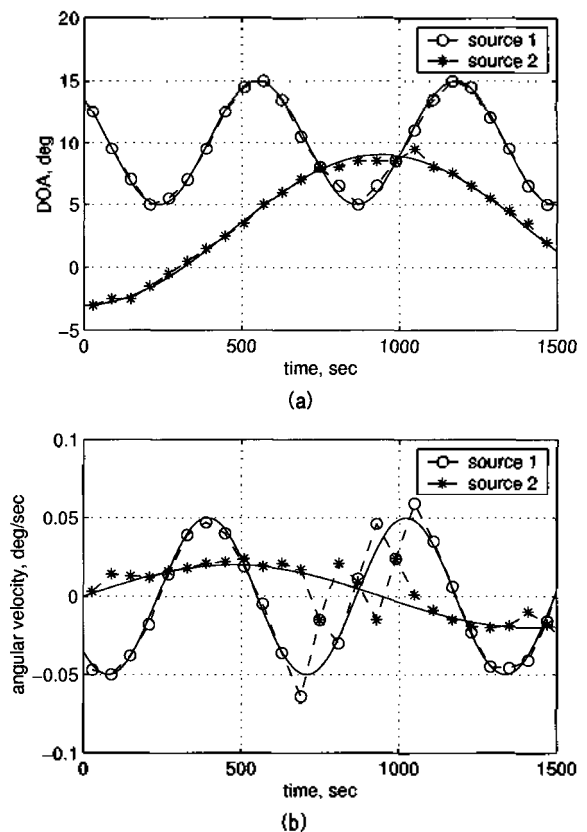


그림 6. 제안한 기법의 궤적 추정 결과 (a) DOA 추정치 (b) 각속도 추정치
 Fig. 6. Trajectory estimates of the proposed beamforming (a) DOA estimate (b) Angular velocity estimate.

추정오차를 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 두 음원의 방위각 차이가 추정 성능에 영향을 준다는 것을 나타낸다.

두 음원의 방위각 차이에 따른 제안한 기법의 추정 성능을 분석하기 위해 두 음원의 방위각 차이에 따른 제안한 기법의 추정오차를 100번의 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하여 분석하였다. 이를 위해 두 음원의 방위각을 (10, 18), (10, 17), (10, 16), (10, 15)deg의 네 가지 경우로 각각 설정하고, 네 가지 경우에 대해 각속도는 (0.1, -0.1)deg/sec로 동일하게 설정하였다. 그림 7과 그림 8에서 제안한 기법의 방위각 추정오차와 각속도의 추정오차를 신호대 잡음비와 두 음원의 방위각 차이에 따라 각각 나타내었다. 그림에서 제안한 기법의 오차는 신호대 잡음비와 음원의 방위각 차이가 커질수록 작아지는 것을 확인 할 수 있으며, 신호대 잡음비가 6dB이고 두 음원의 방위각 차이가 5°인 경우에 0.2° 정도의 방위각 추정오차와 0.03deg/sec의 각속도 추정오차를 가지는 것을 알 수 있다.

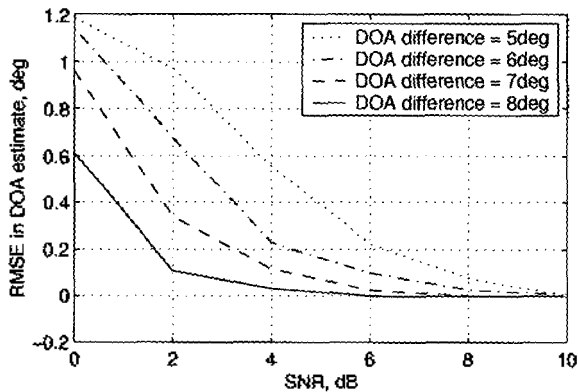


그림 7. 음원의 방위각 차이와 신호대 잡음비에 따른 제안한 기법의 방위각 추정오차

Fig. 7. RMSE in DOA estimate of the proposed algorithm for two closely spaced sources with respect to the SNR.

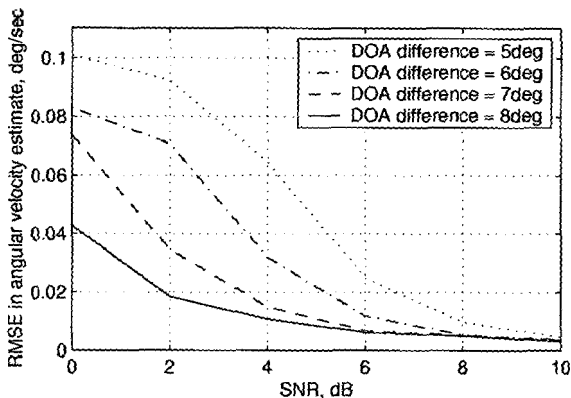


그림 8. 음원의 방위각 차이와 신호대 잡음비에 따른 제안한 기법의 각속도 추정오차

Fig. 8. RMSE in angular velocity estimate of the proposed algorithm for two closely spaced sources with respect to the SNR.

4.2. 해상실험 데이터를 이용한 성능비교

실제 해상실험 데이터를 이용하여 제안한 기법의 성능을 분석하였다. 사용한 데이터는 LF (low frequency) 대역의 최고 주파수 (=200Hz)를 기준으로 반 파장 간격으로 32개의 센서가 등간격으로 배치된 선배열 센서에서 관측한 것이다. 표본화 주파수는 최고 주파수의 2.56배가 되도록 설정하였고, 2048 point FFT를 통하여 2초마다 하나의 데이터 단편을 생성하였다. 이때 하나의 데이터 단편에는 800개의 주파수 빈이 포함되어 있다. 광대역 LPA 가격함수를 구성하기위해 800개의 주파수 빈 중에서 175Hz~200Hz의 주파수 대역에 해당하는 100개의 주파수 빈을 사용하였다. 이는 센서 개수 32의 3배 정도에 해당한다.

그림 9는 측정된 센서 데이터에 STMV 기법을 적용하여 추출한 광대역 빔 출력을 방위각과 시간에 따라 나타낸 BTR (bearing time recording)이다. 그림에서 총 네 개의 궤적이 존재하는 것을 알 수 있으며 이를 궤적 A, B, C, D로 나타내었다.

그림 9에 나타난 이동하는 음원의 방위각과 각속도를 제안한 기법과 지연합 LPA 빔형성기법을 이용하여 추정하였다. 각 기법에서 광대역 LPA 가격함수를 구하기 위해, $T = 30$ 초의 직사각형 관측 원도우를 사용하였으며, 관측 원도우내에는 15개의 데이터 단편이 존재하도록 설정하였다. 이와 같은 상황에서 두 기법에 대해 각각 광대역 LPA 가격함수를 구한 후, 이를 최대화 하는 방위각과 각속도를 2차원 탐색을 통하여 추정하였다. 그림 10은 지연합 LPA 빔형성기법과 제안한 기법의 방위각 추정결과를 나타낸 것이고 그림 11은 각속도 추정결과를 나타낸 것이다. 그림 10의 500초와 800초 사이의 결과

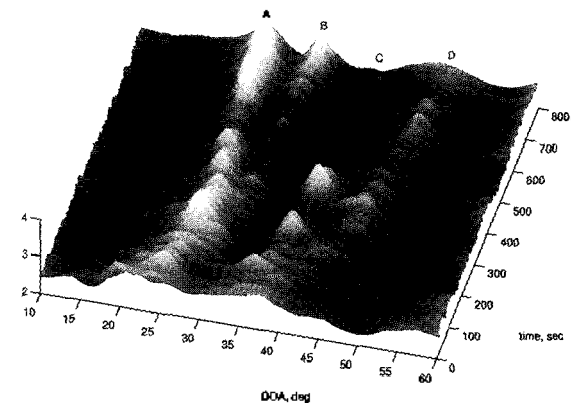


그림 9. STMV 기법을 이용한 해상실험 데이터의 BTR 결과 (175Hz ~ 200Hz)

Fig. 9. Bearing time recording of the STMV beamforming output (175Hz ~ 200Hz).

에서 지연합 LPA 빔형성기법은 인접하여 존재하는 궤적 A와 궤적 B를 분리하는데 실패하는 경우가 다수 존재하는 것을 볼 수 있다. 이에 반해, 제안한 기법은 궤적 A와 궤적 B를 잘 분리하는 것을 볼 수 있다. 이로부터 제안한 기법의 분해능이 기존의 기법에 비해 우수하다는 것을 알 수 있다.

궤적 C는 그림 9에서 보듯이 40초까지는 큰 에너지를 가지다가 40초 이후부터는 다른 궤적들에 비해 궤적의 에너지가 줄어들어 미약한 크기를 가지는 것을 볼 수 있다. 이러한 궤적 C에 대한 추정결과를 살펴보면 지연합 LPA 빔형성기법은 음원의 방위각 추정에 실패하는 경우가 많이 나타나는데 비해 제안한 기법에서는 안정적인 방위각 추정결과를 나타냄을 알 수 있다. 이는 제안한 기법이 미약한 신호에 대한 추정성능 또한 우수

함을 보여주는 것이다.

실제 해상 실험 데이터로부터 실제 음원의 정확한 각속도를 알 수 없기 때문에 각속도 추정오차를 직접적으로 분석할 수 없다. 따라서 네 개의 궤적 중 전체 시간(800sec)동안 안정적으로 궤적을 유지하는 궤적 A에 대하여 지연합 LPA 빔형성기법과 제안한 기법의 각속도 추정치를 분석하였다. 궤적 A를 세 개의 영역으로 나누어, 큰 양(positive)의 각속도를 가지는 영역(0sec~120sec)을 영역 I, 작은 양의 각속도 영역(120sec~370sec)을 영역 II, 그리고 방위각의 변화가 거의 없는 각속도 영역(470sec~800sec)을 영역 III으로 나누었다. 각 영역에서 각속도 추정치의 평균과 분산을 표 1에 나타내었다. 표 1의 결과에서 제안한 기법의 추정치는 기존의 기법과 비슷한 평균과 분산을 가지는 것을 확인 할

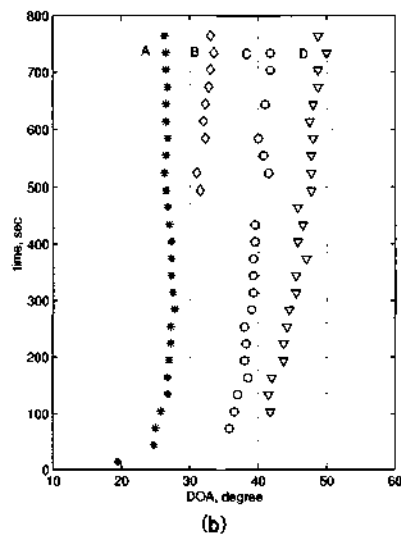
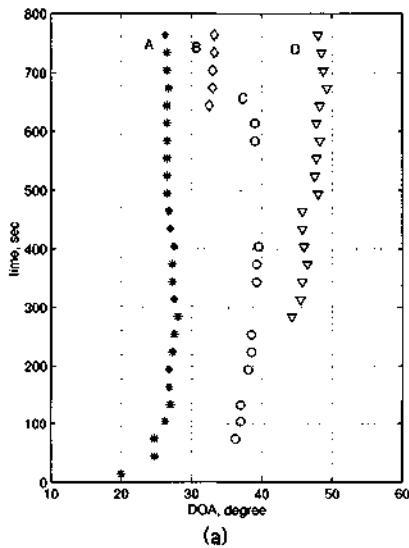


그림 10. 해상실험 데이터를 이용한 방위각 추정결과 (a) 지연합 LPA 빔형성기법 (b) 제안한 기법
Fig. 10. DOA estimation results for sea trial data (a) The DS LPA beamformer (b) The proposed algorithm.

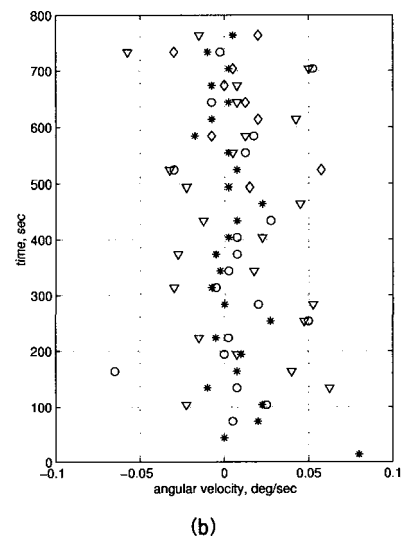
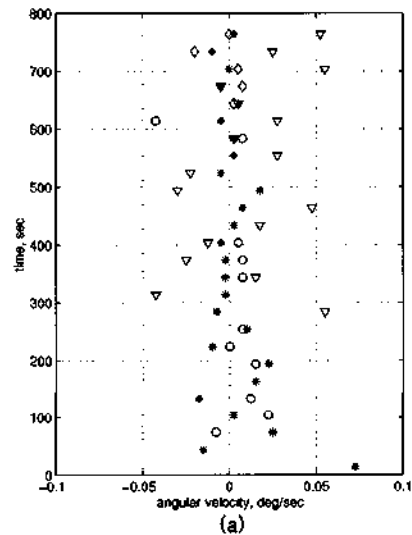


그림 11. 해상실험 데이터를 이용한 각속도 추정결과 (a) 지연합 LPA 빔형성기법 (b) 제안한 기법
Fig. 11. Angular velocity estimation results for sea trial data (a) The DS LPA beamformer (b) The proposed algorithm.

표 1 지연합 LPA 빔형성기법과 제안한 기법의 각속도 추정치의 평균과 분산 (deg/sec)

Table 1. Mean and variance of the estimates for the DS LPA beamformer and proposed algorithm (deg/sec).

영역	빔형성기법	지연합 LPA 빔형성기법		제안한 기법	
		Mean	Variance	Mean	Variance
영역 I (0~120sec)		0.0213	0.0014	0.0306	0.0012
영역 II (120~470sec)		0.0019	0.00018	0.0025	0.00015
영역 III (570~800sec)		0.0013	0.00005	0.00083	0.0001

수 있다. 또한 표 1의 결과는 그림 10의 방위각의 시간에 따른 변화 추이와 일치하는 결과임을 알 수 있다.

이상의 결과들로 부터 제안한 기법은 지연합 LPA 빔형성기법과 비슷한 추정오차를 가지면서도 우수한 분해능을 가짐을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 이동하는 광대역 음원의 방위각과 각속도를 추정하는 광대역 LPA 빔형성기법을 제안하였다. 제안한 광대역 LPA 빔형성기법은 다수의 데이터 단편을 사용하는 기존의 기법 대신에 하나의 데이터 단편만으로도 적응 가중벡터를 구할 수 있는 STMV기법을 적용함으로써, 적은 데이터 단편만으로 추정치를 구해야 하는 빠르게 이동하는 음원의 위치추정 문제에서 효과적으로 음원의 방위각과 각속도를 추정 할 수 있다. 이를 검증하기위해 모의실험을 통하여 기존의 기법과 방위각 분해능 및 추정오차를 비교한 결과, 제안한 기법이 기존의 기법에 비해 우수한 방위각 분해능과 작은 추정오차를 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 실제 해상실험 데이터를 이용하여 추정성능을 비교한 결과에서도 마찬가지로 기존의 기법에 비해 우수한 방위각 분해능을 가짐을 확인 할 수 있었다. 따라서 제안한 광대역 LPA 빔형성기법은 이동하는 광대역 음원의 위치추정 문제에 효과적으로 이용될수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 수중음향특화센터와 2004년도 두뇌 한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

1. K. Katkovnik, A.B. Gershman, "A Local Polynomial Approximation Based Beamforming for Source Localization and Tracking in Nonstationary Environments," IEEE Signal Processing Letters, 7 (1), 3-5, 2000.
2. K. Katkovnik, A.B. Gershman, "Performance Study of the Local Polynomial Approximation Based Beamforming in the Presence of Moving Sources," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 50 (8), 1151-1157, 2002.
3. J. Krolik, D. Swingler, "Multiple Broad-Band Source Location Using Steered Covariance Matrices," IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal processing, 37 (10), 1481-1494, 1989.
4. D.N. Swingler, "A Low-Complexity MVDR Beamformer for Use with Short Observation Times," IEEE Trans. on Signal Processing, 47 (4), 1154-1160, 1999.
5. 박규태, 박도현, 이정훈, 이균경, "빠른 속도로 이동하는 표적환경에 적합한 조향각 오차 보정기법," 한국음향학회지, 23 (3), 206-213, 2004.
6. 이정식, 박도현, 김정수, 이균경, "부대역을 이용한 MVDR 빔형성기의 주파수 분해능 향상 기법," 한국음향학회지, 21 (1), 62-68, 2002.
7. H. Hung and M. Kaveh, "Focussing matrices for coherent signal-subspace processing," IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 36 (8), 1272-1281, 1988.
8. S. Sivanand, J. Yang, and M. Kaveh, "Focussing filters for wideband direction finding," IEEE Trans. on Signal Processing, 39 (2), 437-445, 1991.
9. T. R. Messerschmitt, "Evaluation of the dominant mode rejection beamformer," Technical Report, University of Texas at Austin, Jan, 1996.

저자 약력

• **박도현 (Do-Hyun Park)**

1996년 2월: 경북대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
 1999년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 2004년 8월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 2004년 8월 ~ 현재: 삼성 텔레콤 선임연구원
 *주관심분야: 수중음향신호처리, 표적위치추정, 표적탐지 및 추적

• **박규태 (Gyu-Tae Park)**

현재: 넥스원퓨처(주) 선임연구원
 한국음향학회지 제23권 제3호 참조

• **이정훈 (Jung-Hoon Lee)**

현재: 넥스원퓨저(주) 선임연구원
한국음향학회지 제23권 제3호 참조

• **이수형 (Su-Hyoung Lee)**

현재: 경일대학교 제어계측공학과 초빙교수
한국음향학회지 제19권 제7호 참조

• **이균경 (Kyun-Kyung Lee)**

현재: 경북대학교 전자전기공학부 교수
한국음향학회지 제17권 제4호 참조