

빔 공간 초점 최소 분산 빔 형성을 이용한 근접장 음원 위치 추정

Near field acoustic source localization using beam space focused minimum variance beamforming

권택익,¹ 김기만,^{1†} 김성일,² 안재균²

(Taek-Ik Kwon,¹ Ki-Man Kim,^{1†} Seongil Kim,² and Jae-kyun Ahn²)

¹한국해양대학교 전파공학과, ²국방과학연구소

(Received December 27, 2016; revised February 1, 2017; accepted March 29, 2017)

초 록: 초점 MVDR(Minimum Variance Distortionless Response) 빔 형성은 근접장에서 표적의 위치를 추정하는데 적용될 수 있다. 하지만 배열을 구성하는 센서의 수가 많아질수록 공분산 행렬의 역행렬을 구하는데 많은 계산량을 필요로 한다. 본 논문에서는 부 배열의 원거리 빔 형성기 출력들로부터 빔 공간을 형성하고 이를 이용하여 초점 MVDR 빔 형성을 수행하는 방식을 제안하였다. 제안된 방법의 성능을 분석하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 모의실험 결과, 제안된 방법의 공간 분해능이 기존의 지연 합 빔 형성기를 이용한 경우 보다 높게 나타났다.

핵심용어: 위치 추정, 센서 어레이, 근접장 빔 형성, 초점 MVDR(Minimum Variance Distortionless Response), 빔 공간 MVDR

ABSTRACT: The focused MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) can be applied for source localization in near field. However, if the number of sensors are increased, it requires a large amount of calculation to obtain the inverse of the covariance matrix. In this paper we propose a focused MVDR method using that beam space is formed from output of far field beamformer at the subarray. The performances of the proposed method was evaluated by simulation. As a result of simulation, the proposed method has the higher spatial resolution performance then the conventional delay-and-sum beamformer.

Keywords: Source localization, Sensor array, Near-field beamforming, Focused MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) beamformer, Focused beam-space MVDR beamformer

PACS numbers: 43.30.Wi, 43.60Fg, 43.60Jn

1. 서 론

근접장에서 표적의 위치 추정은 배열 신호 처리에서 중요한 응용 분야 가운데 하나이다. 표적의 위치를 추정하는 방법에는 능동형과 수동형이 있으나 이 가운데 수동형인 경우 도달 시간차를 추정하여 파면의 곡률을 이용한 위치 추정 기법, 신호의 도달 방향

추정을 이용한 삼각측량법 및 초점 빔 형성에 기반한 기법 등 다양한 방법들이 연구되었다.^[1-4] 도달 시간차 추정에 기반한 방법은 서로 다른 위치에 있는 센서에 도달한 신호들 사이에 상호 상관도를 구하여 표적의 위치를 추정하는데 표적 이외에 다른 간섭 신호가 동시에 존재하는 경우 정확한 상호 상관도를 구하기 어려운 문제가 있다.^[5] 삼각측량법은 공간적으로 떨어진 위치에 있는 배열들을 이용하여 각각의 위치에서 도래 각을 추정하고, 이들의 교차점을 찾는 것이나 다수의 표적이 혼재해 있는 경우 이들을

†Corresponding author: Ki-Man Kim (kimkim@kmou.ac.kr)
Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea

(Tel: 82-51-410-4918, Fax: 82-51-404-3986)

“이 논문의 일부는 2016년도 한국음향학회 추계 학술대회에서 발표하였던 논문임”

구분하기 어렵고, 배열들의 위치가 가까이 있는 경우 오류가 증가하는 단점을 갖고 있다.^[6]

근접장에서 공간영역 상관 기법에 해당하는 초점 빔 형성에는 고전적인 지연 합 방법, MVDR(Minimum Variance Distortionless Response) 빔 형성 등이 대표적이다. 초점 빔 형성을 이용하는 경우 근접장에서 관심 영역을 설정한 뒤 관심 영역을 일정 간격으로 셀을 나누어 각각의 셀에 맞는 조향 벡터를 이용하여 빔의 출력이 최대가 되는 위치를 표적의 위치로 추정한다.^[7,8] 이 가운데 초점 MVDR 빔 형성은 정해진 위치에서 들어오는 신호의 이득을 1로 하면서 빔 출력을 최소로 하는 기법으로써 간섭 신호 제거가 용이하다.^[9,10] 이로 인해 초점 MVDR 빔 형성 방법은 고전적인 지연 합 방법에 비해 높은 빔 분해능 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다. 하지만 초점 MVDR 빔 형성 처리 과정에는 공분산 행렬의 역행렬을 구하는 과정이 있어서 고전적인 지연 합 방법에 비해 상대적으로 계산량이 많다.

초점 MVDR 빔 형성 기법의 계산량을 줄이기 위한 방법으로 본 논문에서는 전체 센서 배열을 적절한 수의 부 배열로 나눈 후, 각각의 부 배열을 이용하여 새로운 빔 공간상의 배열을 생성하는 방식을 제안한다. 이때, 생성된 빔 공간에서의 공분산 행렬을 사용하여 초점 MVDR 빔 형성을 수행한다. 이러한 빔 공간으로의 변환 방법은 원래 원거리 빔 형성을 위해 도입되었던 것으로 본 논문에서는 이를 근접장에서 초점 빔 형성을 위한 방법으로 변형하였다.^[11] 이를 통해 빔 분해능 성능은 최대한 유지하면서 계산량은 기존의 MVDR 빔 형성 보다 적은 빔 형성기를 설계하였다. 모의실험을 통하여 기존의 방법과 제안한 방법의 성능을 비교하였다.

II. 초점 MVDR 빔 형성

2 차원 평면에서 센서들이 등 간격, 선형으로 배치되어 있으며, 같은 평면상에 표적이 위치한 경우를 가정하였다. 근접장에 위치한 표적에서 방사되는 신호를 $x(t)$ 라고 할 때, M 개의 센서로 구성된 배열에서 각 센서에 수신된 신호를 $s_i(t)$ 라고 가정한다. 샘플 시간 t 에서 수신된 신호는 다음과 같다.

$$s_i(t) = x_i(t + \tau_i) + \psi_i(t) \quad (1)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, M-1.$$

이때 $\psi_i(t)$ 는 각 센서에 더해지는 잡음에 해당하고, 공간적으로 상관성이 없다고 가정한다. τ_i 는 표적의 위치에서 각 센서까지의 거리에 의해 발생하는 시간 지연이다. τ_i 는 Eq. (2)와 같이 구할 수 있다.^[1,2]

$$\tau_i = (r - r_i) / c, \quad (2)$$

$$r_i = \sqrt{(dm_i - x_i)^2 + y_i^2},$$

여기서 d 는 센서 사이의 거리이고, m_i 은 센서 인덱스에 해당한다. r 은 기준 센서와 표적 사이의 거리이며, r_i 는 각 센서와 표적 사이의 거리이다. c 는 신호의 전달 속도이다.

초점 MVDR 빔 형성은 초점 지연 합 빔 형성기와 달리 수신된 신호의 특성에 의존한다. 조향하는 위치에서 방사하는 신호의 이득을 1로 하면서 빔 형성기의 출력 전력을 최소화한다. 초점 MVDR 빔 형성기의 출력 전력은 다음과 같다.^[1,3]

$$y_{mvd}r(r_{nf}, \theta_{nf}) = \sum_{i=0}^{M-1} w_i s_i(t - T_i) \quad (3)$$

$$= W^H S(t).$$

$$T_i = (r_{nf} - r_{nf,i}) / c. \quad (4)$$

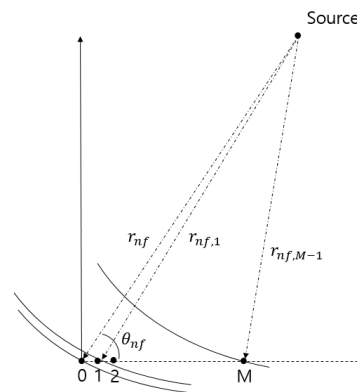


Fig. 1. Array model in near field.

이때 $s_i(t)$ 및 $S(t)$ 는 각 센서에서 수신된 신호 및 벡터 표기이다. r_{nf}, θ_{nf} 는 초점 빔을 형성하는 위치의 극좌표로써 Fig. 1과 같다. T_i 는 초점 빔을 형성하는 위치와 센서 사이의 시간 지연으로 Eq. (4)와 같이 구할 수 있다. w_i 와 W 는 가중치 값과 이들로 구성된 벡터를 의미하며, $(\cdot)^H$ 는 Hermitian을 나타낸다. 초점 MVDR 빔 형성기의 출력 전력은 다음과 같다.^[1,3]

$$\begin{aligned} P_{mvd} &= E\{|y_{mvd}|^2\} \\ &= E\{W^H S(t) S(t)^H W\} \\ &= W^H R W, \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $E\{\cdot\}$ 는 기댓값이고, R 는 공분산 행렬이다. 행렬 R 는 다음과 같이 정의되지만 실제로는 센서들로 수신된 신호 벡터로부터 구성된 샘플 공분산 행렬들의 평균을 통하여 추정한다.

$$R = E\{S(t) S(t)^H\}. \quad (6)$$

원하는 위치의 신호의 이득을 1로 유지하면서 센서 배열의 출력 전력을 최소화시키기 위한 W 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\min W^H R W, \quad \text{subject to} \quad W^H e = 1, \quad (7)$$

여기서 조향 벡터 e 는 오직 1로 이루어진 $M \times 1$ 벡터이다. Eq. (7)에 Lagrangian multiplier 방법을 적용하면 W 는 다음과 같이 유도된다.^[1]

$$W = \frac{R^{-1} e}{e^H R^{-1} e}. \quad (8)$$

III. 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성

일반적인 빔 형성기는 다중 센서들의 출력을 결합하여 출력을 얻는다. 하지만 논문에서 제안하는 빔 공간 빔 형성기의 경우 먼저 다수의 부 배열을 구성하고, 이들 다중 빔 형성기의 출력을 결합하여 출력을 얻는다. 먼저, M 개의 센서를 N 의 부 배열로 나눈다.

이때 각 부 배열내의 센서 개수는 K 개이다. N 개의 부 배열을 이용한 원거리 빔 형성기의 출력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} B_{f,i} &= \sum_{j=0}^{K-1} w_{ij}(t) s_{iK+j}(t - T_{f,ij}). \\ i &= 0, 1, 2, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} T_{f,ij} &= (d \times m_{iK+j} \times \cos(\theta_{f,i})) / c \\ i &= 0, 1, 2, \dots, N-1 \\ j &= 0, 1, 2, \dots, K-1, \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $T_{f,ij}$ 는 부 배열에서 원거리 빔 형성기의 시간 지연이고 $\theta_{f,i}$ 는 각 부 배열의 조향 방향이다. 다음으로 Eq. (9)로 생성된 빔 공간을 이용하여 초점 MVDR 빔 형성을 수행하게 된다. 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성기의 출력을 $B_{BS,mvd}$ 이라고 할 때, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} B_{BS,mvd} &= \sum_{i=0}^{N-1} w_{BS,mvd,j}(t) B_{f,i}(t - T_{N,i}) \\ &= W_{BS,mvd}(t)^H B_f(t - T_N). \end{aligned} \quad (11)$$

$$T_{N,i} = (r - r_{N,i}) / c. \quad (12)$$

시간 지연 $T_{N,i}$ 는 Eq. (12)와 같이 구할 수 있다. 이때, 빔 공간에 의해 만들어지는 N 개의 가상 배열이 생성된다. $r_{N,j}$ 는 가상의 배열과 초점을 형성하는 위치와의 거리이다. 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성기의 출력 전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{BS,mvd} &= E\{|B_{BS,mvd}|^2\} = E\{|B_f(t) B_f(t)^H|^2\} \\ &= E\{|W_{BS,mvd}(t)^H B_f(t) B_f(t)^H W_{BS,mvd}(t)|\} \\ &= W_{BS,mvd}(t)^H R_{BS,mvd}(t) W_{BS,mvd}(t), \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $R_{BS,mvd}$ 은 Eq. (6)과 같이 B_f 의 기댓값으로 구할 수 있다. 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성기의 $W_{BS,mvd}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

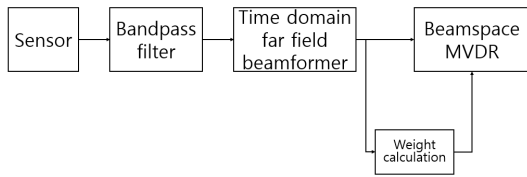


Fig. 2. Block diagram of a beamspace focused MVDR beamformer.

Table 1. Computational complexity.

Method	Complexity
Delay-and-sum	$O(M)$
MVDR	$O(M^3)$
Beamspace MVDR	$O(N^3)$

$$\begin{aligned} \min & W_{BS.mvdr}^H R_{BS.mvdr} W_{BS.mvdr}, \\ \text{subject to} & W_{BS.mvdr}^H e = 1. \end{aligned} \quad (14)$$

$$W_{BS.mvdr} = \frac{R_{BS.mvdr}^{-1} e}{e^H R_{BS.mvdr}^{-1} e}. \quad (15)$$

Fig. 2은 시간 영역에서 빔 공간 MVDR의 블록 다이어그램을 나타낸다. 센서에 입력되는 신호를 센서 배열의 구조에 맞는 주파수로 대역통과 필터를 통과한다. 필터된 신호를 Eq. (9)을 이용하여 빔 공간상의 신호를 만든다. 이후 Eqs. (11)과 (13), (15)를 이용하여 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성을 수행한다. Fig. 2은 하나의 셀에 초점 빔을 형성하는 과정으로 이러한 과정을 관심 영역의 모든 셀에 대하여 수행한다. 모든 셀의 출력 전력을 비교하여 가장 높은 값을 갖는 셀에 표적이 위치하고 있다고 추정한다.

Table 1은 일반적인 초점 지연 합 빔 형성기법, 초점 MVDR과 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성 방법의 계산 복잡도를 표현하였다.^[12] 초점 지연 합 빔 형성기법은 M 차 행렬의 곱으로 표현되어 $O(M)$ 의 계산량을 가진다. 초점 MVDR은 M 차 행렬의 역행렬과 곱이 필요하므로 $O(M^3) + O(M)$ 의 계산량을 갖는다. 이에 비해 빔 공간 초점 MVDR은 k 차 행렬의 N 개만 큰 원거리 빔 형성기의 계산량과 N 차 행렬의 역행렬과 곱이 필요하므로, $O(N^3) + O(N) + NO(k)$ 의 계산량을 가진다. 초점 MVDR과 빔 공간 초점 MVDR

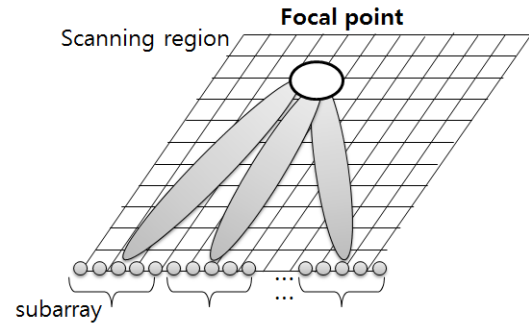


Fig. 3. Focused array beamforming to the focal point.

의 행렬 곱은 역행렬 계산보다 매우 작아 무시하였다. 결론적으로 빔 공간 초점 MVDR의 경우 초점 MVDR에 비해 줄어드는 차수의 제곱에 비례하여 계산량이 줄어들게 된다. 이는 전체 배열의 센서 수가 많을 때, 빔 공간 초점 MVDR을 통해 효과적으로 계산량을 줄일 수 있음을 나타낸다. 하지만 부 배열 센서 수를 높여 부 배열 개수를 줄이면 계산량은 낮아지지만, 입력되는 신호의 수가 적어 빔 공간 초점 MVDR이 동작하지 않는다. 이와 반대로 부 배열을 늘리면 계산량은 많아지지만 초점 MVDR으로 수렴 하여 성능이 좋아진다. 따라서 계산량에 따른 성능과 빔 형성기의 성능은 반비례 관계로 적합한 타협점을 찾는 것이 중요하다.

근접장에서 초점 빔 형성 기반의 표적 위치 추정 과정은 우선 Fig. 3과 같이 관심 영역을 설정한다. 설정된 관심 영역을 적절한 간격으로 셀을 나누고, 각 셀마다 초점 빔을 형성한다. 같은 시간 동안 모든 셀에 대하여 초점 빔 형성기의 출력 전력을 구하여 정해진 문턱값 이상의 값을 갖는 셀에 표적이 있다고 추정한다. 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성의 경우 부 배열을 이용하여 Eq. (13)과 원거리 빔 형성을 하게 된다. 이때 근접장에서는 각 부 배열 원거리 빔 형성기는 다른 방향으로 조향이 된다. 원거리 빔 공간 MVDR과 달리 영역을 구분하는 셀 구조를 가지고 있으므로 이에 적합한 조향이 필요하다.

초점 빔을 형성하는 셀의 중심 좌표를 x_s, y_s 라고 할 때, 각 부 배열의 원거리 빔 형성기의 조향 방향 $\theta_{f,i}$ 을 Eq. (16)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_{f,i} = \arctan\left(\frac{y_s}{x_s - x_i}\right)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (16)$$

여기서 x_i 는 부 배열이 형성하는 가상배열의 x 축 상의 좌표이다. Eqs. (9)와 (10), (16)을 이용하여 센서에 입력된 신호를 빔 공간으로 변환할 수 있다. 만약 초점 빔을 형성하는 셀에 표적이 존재하게 된다면, 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성뿐만 아니라 빔 공간 출력 신호의 전력도 최대가 된다.

Eq. (16)을 이용하여 빔 공간을 형성할 때 각 센서 부 배열은 다른 조향 방향을 가지므로 서로 다른 빔 패턴을 가진다. 부 배열은 원래 전체 배열의 길이보다 짧기 때문에 종단(end-fire) 근접 영역의 크기는 커진다. 따라서 초점을 형성하는 셀의 위치에 따라 부 배열의 원거리 빔 형성기의 빔이 종단 영역에 근접할 수 있다. 이는 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성에 관심 영역의 크기를 정할 때 중요하게 고려되어야 된다.

IV. 모의실험 및 결과

제안된 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성 기반의 표적 위치 추정 성능을 분석하기 위해 기존의 초점 지연 합 빔 형성기와 초점 MVDR 빔 형성기를 적용한 결과와 비교하는 모의실험을 수행하였다. 1개의 표적만이 있는 경우와 2개의 표적이 근접해 위치한 경우를 가정하였으며, 부 배열의 수에 따라 근접한 표적의 구분 성능을 비교하였다.

먼저 근접장에 위치한 표적이 1개만 존재할 때 제

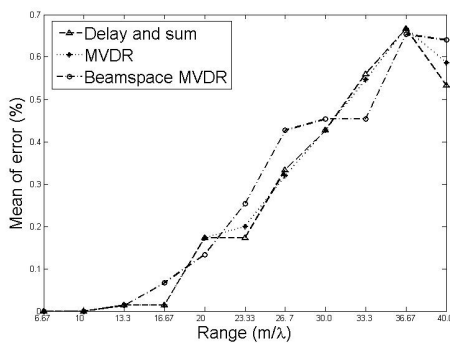


Fig. 4. Average positioning error according to the target range.

안한 방법과 기존의 방법의 성능을 비교하였다. 표적의 위치는 센서 배열 축을 기준으로 수직면에 해당하는 90° , 거리는 $6.66 m/\lambda$ 부터 $3.33 m/\lambda$ 간격으로 $40 m/\lambda$ 까지 몬테카를로 모의실험을 100번 수행하였다. 여기서 m/λ 는 거리를 파장으로 정규화한 길이를 나타내는 무차원수를 표현하는 기호로 사용되었다. 이때, 각 신호 대 잡음비는 0 dB 로 하였다. 센서 수는 64개로 각 센서 사이의 거리는 0.75 m 로 하여 전체 48 m 의 배열 길이를 가정하였다. 제안한 방법을 구성하기 위해 적용된 부 배열은 8개로 하였다. 전체 센서 수가 64개이므로 각 부 배열내의 센서 수는 8개로 하였다. Fig. 4는 표적이 위치한 거리에 따른 평균 오차를 나타낸 것이다. 기존의 방법들과 제안한 방법 모두 평균 거리 오차가 거리가 멀어질수록 증

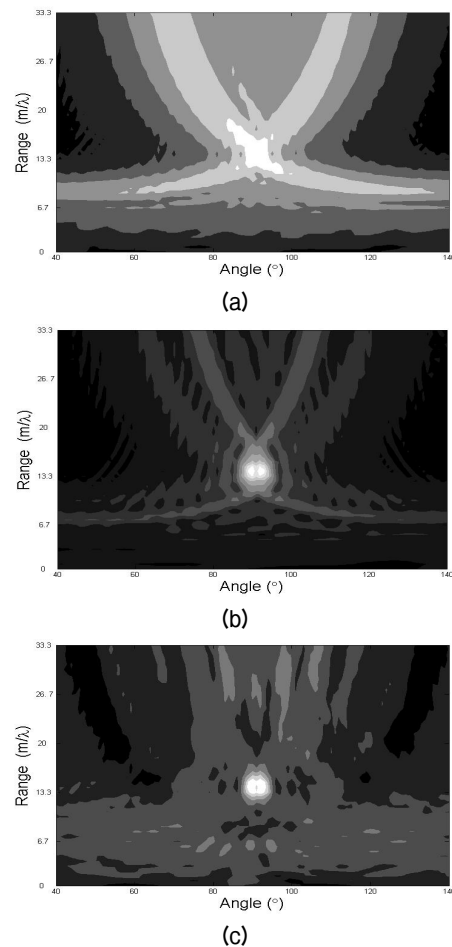


Fig. 5. Spatial spectra by (a) conventional delay and sum, (b) focused MVDR, and (c) beamspace focused MVDR beamforming.

Table 2. Spatial resolution performance.

Method	Resolution
Delay-and-sum	3.2°
MVDR	1.0°
Beamspace MVDR	2.2°

Table 3. Resolution performance of the proposed method according to the number of subarray.

Number of subarray	Resolution
8	2.2°
16	1.7°
32	1.4°

가하는 형태로 나타난다. 이는 거리가 멀어질수록 배열에 도달하는 파면이 구면파가 아닌 평면파로 수렴하기 때문이다. 또한 각 방법에 따른 성능의 차이는 크게 나타나지 않았다. 이때 모든 경우에 방위 오차는 없었다. 위치 추정에서 거리 오차가 방위 오차보다 크게 나타나는 것은 잘 알려져 있다.

2개의 표적이 가까이 존재할 때, 제안한 방법에서 부 배열의 수에 따른 표적 구별 성능을 다른 방법들과 비교하여 분석하였다. 모의실험을 위한 배열 구조는 앞선 경우와 같다. 2개의 표적 가운데 하나의 위치는 90°, 13.3 m/λ 에 고정시켜 놓고, 나머지 표적은 같은 거리에서 방위를 바꾸어 가며 두 표적이 구분 가능한 최소의 방위 차를 구하였다. Fig. 5는 표적이 90°, 13.3 m/λ 와 92.2°, 13.3 m/λ 에 위치해 있을 때, 각 기법들의 공간 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림에서 가로축은 배열 축을 기준으로 하는 각도를, 세로축은 거리를 의미한다. 그림에서 초점 지연 합 빔 형성을 이용한 경우 2개의 표적을 거의 구분할 수 없으며, 초점 MVDR 빔 형성을 이용한 경우 명확하게 2개의 표적을 구분할 수 있음을 보여준다. 또한 제안된 방법 역시 2개의 표적이 구분 가능함을 나타내나 상대적으로 부엽이 높게 나타나는 것으로 보인다.

Table 2는 각 초점 빔 형성 기법에서 2개의 표적을 구분할 수 있는 최소 방위각의 차이를 나타낸 것이다. 초점 MVDR 빔 형성을 이용한 경우가 가장 적은 방위각 차이를 구분할 수 있어 분해능이 가장 좋게 나타났다. 제안된 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성을 이용한 경우는 초점 지연 합 빔 형성 기법보다 적은 방

Table 4. Location errors at some focal points.

Source angle (°)	Delay-and-sum		MVDR		Beamspace MVDR	
	Range error (m/λ)	Angle error (°)	Range error (m/λ)	Angle error (°)	Range error (m/λ)	Angle error (°)
90	3.07	0.14	2	0.1	2.67	0.12
					3	0.18
					4.8	0.18
60	4	0.15	3.47	0.15	3.47	0.2
					3.8	0.15
					5.4	0.26

위 차를 구분할 수 있었지만, 초점 MVDR 빔 형성보다는 큰 분해능을 갖고 있다.

제안한 방법에서 각 부 배열의 수에 따라 표적을 구분할 수 있는 성능을 비교하였다. 전체 64개의 센서를 갖는 배열인 경우 2, 4, 8, 16 그리고 32개의 부 배열을 형성할 수 있다. 나머지 모의실험 조건은 모두 같다. 2개와 4개의 부 배열을 구성하였을 때는 빔 공간의 차원이 작아 초점 MVDR 빔 형성기가 빔을 형성하지 못하여 정상적으로 동작하지 않았다. 이를 제외한 나머지 경우의 수에 대한 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3은 부 배열의 수에 따른 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성을 이용하여 2개의 표적을 구분할 수 있는 최소 방위각 차이이다. 부 배열의 수가 많아질수록 구분할 수 있는 최소 방위각 차이가 작아진다. Table 4는 각 빔 형성기 및 부 배열 수에 따른 표적 위치 추정 오차를 나타내었다. 이때 신호원의 거리는 66.7 m/λ, 각도는 90°와 60°이다. 부 배열의 크기는 32, 16, 8개 순서대로 표기하였으며, 신호 대 잡음 비는 -5 dB로 하였다. 앞선 결과와 마찬가지로 빔 공간 초점 MVDR의 성능은 초점 지연 합 빔 형성기법보다 좋지만 초점 MVDR보다 큰 오차가 발생하였다. 또한 빔 공간 초점 MVDR에 있어서 부 배열이 많아질수록 표적의 위치 추정 오차가 감소하였다. 이는 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성이 초점 MVDR 빔 형성기로 수렴하기 때문이지만 앞서 언급되었듯이 부 배열의 수가 많아질수록 계산량은 증가하게 된다. 따라서 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성은 계산량과 분해능의 성능은 반비례 관계로 나타나 적당한 성능의 타협점을 찾는 것이 필요하다.

V. 결 론

근접장에서 표적의 위치 추정 기법에서 초점 MVDR 빔 형성은 높은 공간 분해능을 가지고 있지만 빔 형성 수행 과정에서 역행렬 계산이 필요하고, 이는 전체 센서 수에 따라서는 많은 양의 계산이 필요하다. 따라서 이러한 계산량을 줄이기 위해서 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성을 제안하고 근접장에서의 위치 추정에 적용하였다. 모의실험을 통해 초점 지연 합 빔 형성 기법, 초점 MVDR 빔 형성, 제안된 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성의 성능을 비교하였다. 그 결과 제안한 방법의 성능이 초점 지연 합 빔 형성 기법보다 나은 성능을 가지면서 초점 MVDR 빔 형성에 가까운 성능을 나타내었다. 향후 실제 환경에서 획득한 데이터를 이용하여 성능을 분석할 필요성이 있다. 또한 적절한 부 배열의 수를 설정하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 이러한 최적 부 배열 값은 설계 파라미터 및 허용 오차와 같은 목표에 따라 달라지는데 적절한 비용 함수를 설정하고 이에 따른 최적 값을 설정하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원(과제번호: UD160003DD)으로 이루어졌음.

References

1. H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing* (John Wiley & Sons, New York, 2004), pp. 452-482.
2. A. D. Waite, *Sonar for Practising Engineers* (John Wiley & Sons, New York, 2004), pp. 13-41.
3. J. Shi, B. Liu, H. Song, L. Zhao, and M. Li, "Radiated noise sources location based on MVDR near-field focused beamforming," in Proc. 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 849-852 (2008).
4. K. M. Kim, I. S. Yang, S. Y. Chun, and W. T. Oh, "Passive-range estimation using dual focused beamformers" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **20**, 52-57 (2001).
5. G. C. Carter, "Time delay estimation for passive sonar signal processing," *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*, **29**, 463-470 (1981).

6. M. J. Hinich, "Passive range estimation using subarray parallax," *J. Acoust. Soc. Am.* **65**, 1229-1230 (1979).
7. Y. D. Huang and B. Mourad, "Near-field multiple source localization by passive sensor array," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, **39**, 968-975 (1991).
8. W. A. Kuperman, M. D. Collins, and J. S. Perkins, "Optimal time-domain beamforming with simulated annealing including application of a priori information," *J. Acoust. Soc. Am.* **88**, 1802-1810 (1990).
9. H. W. Chen and J. W. Zhao, "Wideband MVDR beamforming for acoustic vector sensor linear array," *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*, **151**, 158-162 (2004).
10. K. Diamantis, "A comparison between temporal and subband minimum variance adaptive beamforming," *SPIE Medical Imaging. International Society for Optics and Photonics*, (2014).
11. C. IC. Nilsen and H. Ines, "Beam-space adaptive beamforming for ultrasound imaging," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control* **56**, 2187-2197 (2009).
12. F. G. Yan, M. Jin, S. Liu, and X. L. Qiao, "Real-valued MUSIC for efficient direction estimation with arbitrary array geometries," *IEEE Trans. Signal Proc.* **62**, 1548-1560 (2014).

저자 약력

▶ 권 태 익 (Taek-Ik Kwon)



2016년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2016년 3월 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
<관심분야> 소나 신호처리, 어레이 신호처리, 수중통신, 음향 신호처리 등

▶ 김 기 만 (Ki-Man Kim)



1988년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 8월 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1995년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월 ~ 1996년 8월: 연세대학교 의과대학 의용공학교실(Fellow)
1996년 9월 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학과 교수
<관심분야> 어레이 신호처리, 수중음향통신, 소나 신호처리 등

▶ 김 성 일 (Seongil Kim)



1986년: 서울대학교 해양학과 (이학사)
1988년: 서울대학교 해양학과 (공학석사)
2002년: University of California, San Diego
(이학 박사)
1990년~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원,
한국음향학회 이사, 편집위원
<관심분야> 수중 음향학

▶ 안 재 균 (Jae-Kyun Ahn)



2007년 2월: 고려대학교 전기전자전파
공학과 학사
2009년 2월: 고려대학교 전자전기공학과
석사
2014년 2월: 고려대학교 전기전자전파
공학과 박사
2014년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소
선임연구원
<관심분야> 소나 신호처리, 어레이 신호
처리 등