

환형배열에서 닫힌 형식을 이용한 코히어런트 분산 단일음원의 위치 추정 기법

Closed-form Localization of a coherently distributed single source with circular array

정태진,[†] 신기철,¹ 박규태,¹ 조성일¹

(Tae-Jin Jung,^{1†} Kee-Cheol Shin,¹ Gyu-Tae Park,¹ and Sung-Il Cho¹)

¹LIG 넥스원 해양연구소

(Received August 22, 2018; revised October 15, 2018; accepted November 22, 2018)

초 록: 본 논문에서는 환형배열을 이용하여 단일음원이 코히어런트 분산 분포를 가지는 경우 닫힌 형태로 음원의 위치를 추정하는 기법을 제안한다. 음원이 다중경로를 거쳐 센서에 도달하는 경우 분산음원으로 보이며 이때 음원의 위치는 대표 방위, 대표 고각, 대표 방위의 분포, 대표 고각의 분포 네 가지 변수로 표현될 수 있다. 이러한 경우 DSPE(Distributed Source Parameter Estimator) 기법과 같은 탐색 기법으로 네 변수를 찾기 위해서는 매우 많은 탐색 과정을 필요로 한다. 본 논문에서는 빠른 위치 추정을 위해 센서간의 상관함수와 최소자승기법을 이용하여 닫힌 형식으로 대표 방위와 고각을 추정하는 기법을 제안한다. 특히 음원이 대표적인 분포 모델인 가우시안 분포를 따를 경우 방위와 고각의 표준편차 또한 닫힌 형식으로 추정한다. 시뮬레이션에서는 DSPE 기법과 비교하여 제안 기법의 타당성을 확인하였다.

핵심용어: 분산음원, 환형배열, 음원 위치 추정, 최소자승기법

ABSTRACT: In this paper, we propose a method for estimating the position of a source in a closed form when a single source has coherently distributed property against a circular array. When a sound source reaches a sensor through multipath environments, it is seen as a distributed source and can be represented by four variables: the nominal azimuth, nominal elevation, azimuth angular spread, elevation angular spread. Therefore, it requires a lot of computation by a search method such as DSPE (Distributed Source Parameter Estimator). In this paper, we propose a method of estimating the nominal azimuth and elevation angle in a closed form using correlation function and least squares method for fast position estimation. In particular, if the source is assumed as Gaussian distribution model, the standard deviation is also estimated in a closed form. In the simulation, the validity of the proposed method is confirmed by comparing with the DSPE.

Keywords: Distributed source, Circular array, Localization, Least square method

PACS numbers: 43.60.Ac, 43.60.Uv

1. 서 론

음원 위치 추정 분야는 레이더, 소나, 통신, 지질학 등 많은 분야에서 중요하게 다루어지는 분야이다.^[1] 이중 많은 음원 위치 추정 문제들이 음원을 공간상

의 점으로 모델링할 수 있다고 가정한다. 하지만 음원 신호가 다중경로와 같은 분산 환경을 거쳐 센서에 도달할 경우 반사와 산란으로 인해 점음원보다는 분산음원으로 모델링 되는 것이 적절하며 이러한 모델링 방법에 기반한 위치 추정 기법들이 다수의 논문에서 다루어 진 바 있다.^[2] 분산음원 모델은 크게 음원의 크기와 위상만 다른 동일 신호의 합으로 보

[†]Corresponding author: Tae-Jin Jung (Taejin.Jung@lignex1.com)
Maritime R&D laboratory, LIGNex1, 333 Pangyo-ro, Bundang-gu,
Seongnam-si, Gyeonggi-do 1344, Republic of Korea
(Tel: 82-31-8026-7207, Fax: 82-31-8026-7089)

는 코히어런트 분산 모델^[2,3]과 서로 상관관계가 없는 신호의 합으로 보는 인코히어런트 분산 모델^[3,4]로 분류된다. 본 논문에서는 음원주위로 산란된 신호들이 채널의 변화주기보다 짧기 때문에 분산 신호를 크기와 위상만 다른 동일한 신호의 합으로 보는 코히어런트 분산 환경을 가정한다.

음원 위치 추정 문제에 있어 센서 배열의 종류를 보면 구조가 간단하고 해석이 쉬운 균일 선배열 센서가 주로 다루어졌으나 수평방향의 방위각만 추정가능하며 좌우 구분이 불가능하다. 반면 환형 배열 센서의 경우 방위와 고각을 추정할 수 있고 360° 전방위를 동일한 성능으로 탐색할 수 있는 장점이 있다. 환형 배열을 이용한 분산음원의 모델링과 위치 추정 문제는 다수의 논문에서 다루어졌다.^[3-6] 그중 Valace의 DSPE(Distributed Source Parameter Estimator) 기법은 MUSIC(Multiple Signal Classification) 기법을 확장한 대표적인 기법으로 다수의 음원에 대해 대표 방위와 분포를 동시에 추정할 수 있으나 분포 모델이 사전에 주어져야 하며 환형배열에서는 방위와 고각, 방위와 고각의 분산에 대해 4차원 탐색이 필요하여 매우 많은 연산량을 요구한다.^[3] Lee의 SOS(sequential one-dimensional searching) 기법의 경우 대표 방위와 고각을 두 번의 1차원 탐색만으로 추정하여 상대적으로 적은 연산량을 요구하나 균일한 환형 배열센서 한 쌍을 필요로 하는 제한점이 있다.^[5]

최근 균일 환형 배열 점음원 모델에서 상관함수와 최소 자승기법을 이용하여 음원의 위치를 추정하는 기법이 제안되었다.^[7,8] Liao의 기법은 음원이 한 개라는 가정하에서 탐색과정 없이 음원의 방위와 고각을 닫힌 형태(closed form)으로 추정하여 적은 연산량을 요구한다.^[7] 본 논문에서는 이를 코히어런트 분산 음원에 적용하여 탐색과정 없이 음원의 대표 방위와 대표 고각을 추정하는 기법을 제안한다. 특히 음원의 분산 모델이 가우시안 모델인 경우 비슷한 과정을 통해 방위와 고각의 분산 또한 탐색과정 없이 추정하여 매우 빠르게 표적의 모든 파라미터 추정이 가능하다.

II. 신호 모델

Fig. 1은 균일 환형 배열에서 M 개의 전 방향성(omni-

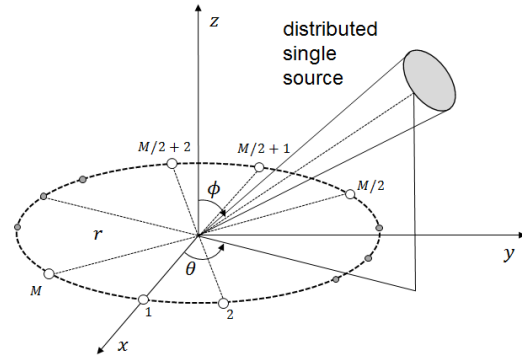


Fig. 1. Uniform circular array with a distributed source.

directional) 센서가 단일 협대역 코히어런트 분산 음원의 신호를 수신하는 것을 나타낸다. M 개의 센서는 xy 평면에 반시계 방향으로 균등하게 분포하고 있으며 센서의 중심을 기준으로 r 의 반지름을 가진다. 이때 센서배열에 수신된 신호 $\mathbf{x}(t)$ 는 다음과 같다.^[5]

$$\mathbf{x}(t) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \mathbf{a}(\vartheta, \varphi) \zeta(\vartheta, \varphi, t) d\vartheta d\varphi + \mathbf{n}(t). \quad (1)$$

$$\mathbf{a}(\vartheta, \varphi) = \begin{bmatrix} e^{j\eta \sin \varphi \cos(\vartheta - \gamma_1)} \\ e^{j\eta \sin \varphi \cos(\vartheta - \gamma_2)} \\ \vdots \\ e^{j\eta \sin \varphi \cos(\vartheta - \gamma_M)} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$\mathbf{a}(\vartheta, \varphi)$ 는 조향 벡터, $\zeta(\vartheta, \varphi, t)$ 는 음원의 각밀도함수(angular spread density function), $\mathbf{n}(t)$ 는 백색 가우시안 잡음을 의미한다. 여기서 $\eta = 2\pi r/\lambda$, λ 는 파장이며 $\gamma_m = 2\pi(m-1)/M$, $m = 1, 2, \dots, M$ 이다. $\zeta(\vartheta, \varphi, t)$ 는 아래 수식으로 표현된다.

$$\zeta(\vartheta, \varphi, t) = s(t) \rho(\vartheta, \varphi; \mu), \quad (3)$$

여기서 $s(t)$ 는 음원 신호, $\rho(\vartheta, \varphi; \mu)$ 는 결정(deterministic) 각밀도함수이다. $\mu = (\theta, \sigma_\theta, \phi, \sigma_\phi)$ 는 대표 방위, 대표 방위의 분포, 대표 고각, 대표 고각의 분포를 의미한다. 조향 방위에 대해 수신 신호를 표현할 경우 코히어런트 분산 음원은 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{x}(t) = s(t) \mathbf{b}(\mu) + \mathbf{n}(t). \quad (4)$$

$$\mathbf{b}(\mu) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \mathbf{a}(\vartheta, \varphi; \mu) d\vartheta d\varphi. \quad (5)$$

Reference [5]에 따르면 방위분포(σ_θ)와 고각분포(σ_ϕ)의 분포가 충분히 작은 값을 가질 경우 $\mathbf{b}(\mu)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{b}(\mu) = \mathbf{a}(\theta, \phi) \otimes \mathbf{g}(\mu), \quad (6)$$

여기서 \otimes 는 Hadamard product이다. $\mathbf{g}(\mu)$ 는 결정 각분포함수로 가장 많이 이용되는 가우시안(Gaussian) 분포일 경우 아래와 같다.

$$g_m(\mu) = e^{-\sigma_\theta^2/2(\eta\cos\phi\cos(\theta-\gamma_m))^2} \cdot e^{-\sigma_\phi^2/2(\eta\sin\phi\sin(\theta-\gamma_m))^2}. \quad (7)$$

III. 제안 기법

환형배열에서 임의의 센서 p, q 에 대해 다음과 같은 상관함수를 정의 한다.

$$R_{p,q} = E[x_p x_q^*] = \sigma_s^2 e^{j\eta(\sin\phi\cos(\theta-\gamma_p) - \sin\phi\cos(\theta-\gamma_q))} \cdot g_p(\mu) \cdot g_q(\mu) + \sigma_n^2, \quad (8)$$

여기서 $(\cdot)^*$ 는 켈레 복소수, σ_s^2 과 σ_n^2 은 음원과 배경 잡음의 파워이며 배경 잡음은 백색잡음을 가정한다. 위 수식에서 상관함수의 위상은 대표방위와 대표고각의 함수로 나타나며 크기 성분은 신호의 파워와 결정 각밀도 함수로 나타낸다.

3.1 대표방위, 대표 고각 추정 기법

수신된 신호에서 잡음성분을 배제하고 신호 성분만 고려하면 $R_{p,q}$ 의 위상은 아래와 같다.

$$u_{p,q} = \arg(R_{p,q}) = \eta(\sin\phi\cos(\theta-\gamma_p) - \sin\phi\cos(\theta-\gamma_q)) \quad (9)$$

Eq. (9)는 다음과 같이 벡터의 곱으로 정리된다.

$$u_{p,q} = \eta \begin{bmatrix} \cos\gamma_p - \cos\gamma_q \\ \sin\gamma_p - \sin\gamma_q \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \cos\theta\sin\phi \\ \sin\theta\sin\phi \end{bmatrix}. \quad (10)$$

$p - q = l$ 로 두고 다수의 센서 쌍에 적용하여 다시 정리하면 다음과 같이 행렬 연산으로 표현가능하다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{d}. \quad (11)$$

$$\mathbf{u} = [u_{1,1+l} \ u_{2,2+l} \ \dots \ u_{M-l,M}]^T. \quad (12)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_1 - \cos\gamma_{1+l} & \sin\gamma_1 - \sin\gamma_{1+l} \\ \cos\gamma_2 - \cos\gamma_{2+l} & \sin\gamma_2 - \sin\gamma_{2+l} \\ \vdots & \vdots \\ \cos\gamma_{M-l} - \cos\gamma_M & \sin\gamma_{M-l} - \sin\gamma_M \end{bmatrix}. \quad (13)$$

$$\mathbf{d} = 2\eta \begin{bmatrix} \cos\theta\sin\phi \\ \sin\theta\sin\phi \end{bmatrix}. \quad (14)$$

θ 와 ϕ 를 추정하기 위해 \mathbf{u} 를 추정치 $\hat{\mathbf{u}} = \arg(\hat{R}_{p,q})$ 로 대체하면 $\hat{\mathbf{d}}$ 는 다음의 최소자승법으로 표현된다.

$$\hat{\mathbf{d}} = \begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \hat{\mathbf{u}}. \quad (15)$$

따라서 다음과 같이 음원의 방위와 고각을 구한다.

$$\hat{\theta} = \arg(\hat{d}_1 + j\hat{d}_2). \quad (16)$$

$$\hat{\phi} = \sin^{-1} \left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\hat{d}_1^2 + \hat{d}_2^2} \right). \quad (17)$$

Eqs. (16)과 (17)을 통해 대표방위와 대표 고각을 추정할 수 있으며 분산음원의 분포 종류와 상관없이 사용 가능하다.

3.2 방위 분포와 고각 분포 추정

분산 음원의 분포함수가 주어진 경우 다음 식과 같이 MUSIC 기법을 일반화한 DSPE 기법을 통해 음원의 분포값을 추정할 수 있다.

$$\{\hat{\theta}, \hat{\sigma}_\theta, \hat{\phi}, \hat{\sigma}_\phi\} = \operatorname{argmax} \frac{1}{\|\mathbf{a}(\theta, \sigma_\theta, \phi, \sigma_\phi) \mathbf{V}\|^2}, \quad (18)$$

여기서 \mathbf{V} 는 잡음 공간을 의미한다. Eq. (18)에서 모든 파라미터를 한번에 추정하기 위해서는 4차원 탐색 과정이 요구되며 3.1절에서와 같이 대표방위와 고각이 주어진 경우에는 방위 분포와 고각 분포에 대해 2차원 탐색이 요구된다. 그 중 결정 각함수가 Eq. (7)의 가우시안 분포를 따를 경우 다음 과정을 통해 닫힌 형태로 구할 수 있다. Eq. (8)에 절대값과 자연로그를 적용하고 신호성분만 고려 할 경우 다음과 같다.

$$\ln |R_{p,q}| = 2\ln |\sigma_s| + \ln |g_p(\mu)| + \ln |g_q(\mu)|. \quad (19)$$

$$\ln |R_{p,q}| = \begin{bmatrix} f_1(\theta, \phi, \gamma_p, \gamma_q) \\ f_2(\theta, \phi, \gamma_p, \gamma_q) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \ln |\sigma_s| \\ \sigma_\phi^2 \\ \sigma_\theta^2 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

여기서 $f_1(\theta, \phi, \gamma_p, \gamma_q)$ 와 $f_2(\theta, \phi, \gamma_p, \gamma_q)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_1(\theta, \phi, \gamma_p, \gamma_q) \\ = \frac{-1}{2(\eta \cos \phi \cos(\theta - \gamma_p))^2} + \frac{-1}{2(\eta \cos \phi \cos(\theta - \gamma_q))^2}. \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} f_2(\theta, \phi, \gamma_p, \gamma_q) \\ = \frac{-1}{2(\eta \sin \phi \sin(\theta - \gamma_p))^2} + \frac{-1}{2(\eta \sin \phi \sin(\theta - \gamma_q))^2}. \end{aligned} \quad (22)$$

다수의 센서 쌍에 대해 다시 정리하면 다음과 같이 행렬 연산으로 표현된다.

$$\mathbf{v} = [v_{1,1+l} \quad v_{2,2+l} \quad \cdots \quad v_{M-l,M}]. \quad (23)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 2 f_1(\theta, \phi, \gamma_1, \gamma_{1+l}) & f_2(\theta, \phi, \gamma_1, \gamma_{1+l}) \\ 2 f_1(\theta, \phi, \gamma_2, \gamma_{2+l}) & f_2(\theta, \phi, \gamma_2, \gamma_{2+l}) \\ \vdots & \vdots \\ 2 f_1(\theta, \phi, \gamma_M, \gamma_{M-l}) & f_2(\theta, \phi, \gamma_M, \gamma_{M-l}) \end{bmatrix}. \quad (24)$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} \ln |\sigma_s| \\ \sigma_\phi^2 \\ \sigma_\theta^2 \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Eq. (24) 행렬 \mathbf{C} 의 변수 중 θ, ϕ 는 3.1절에서 추정 한 $\theta = \hat{\theta}, \phi = \hat{\phi}$ 로 대체하고 $\hat{\mathbf{f}}$ 를 구하기 위해 다음의 최소자승기법을 적용한다.

$$\hat{\mathbf{f}} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \hat{\mathbf{v}}. \quad (26)$$

따라서 방위의 표준편차 $\hat{\sigma}_\theta$ 와 고각의 표준편차 $\hat{\sigma}_\phi$ 는 다음식과 같이 f_2 와 f_3 의 제곱근이다.

$$\sigma_\theta = \sqrt{f_2}. \quad (27)$$

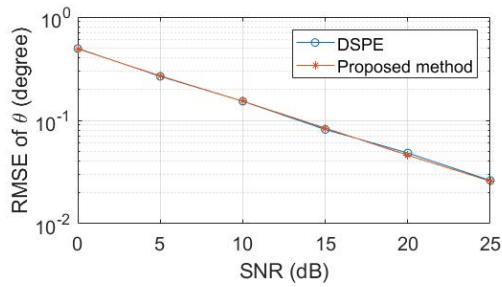
$$\sigma_\phi = \sqrt{f_3}. \quad (28)$$

연산량의 경우 제안기법은 Reference [8]과 동일하며 DSPE기법의 경우 MUSIC 기법과 같은 연산량을 요구한다.

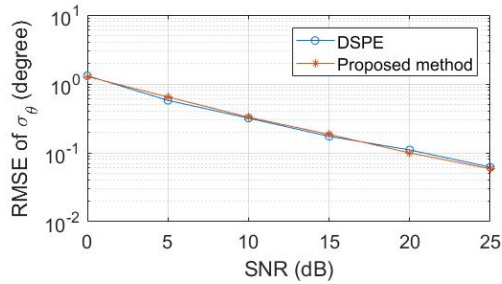
IV. 모의 실험

제안 기법의 타당성을 비교검증하기 위해 가장 대표적인 기법인 DSPE기법과 함께 모의 실험을 수행하였다. 음원의 파라미터는 $(\theta, \phi, \sigma_\theta, \sigma_\phi) = [30^\circ, 50^\circ, 2^\circ, 3^\circ]$ 이다. 배열의 센서 수 $M=10$ 이며 배열의 반경 $r = \lambda/4$ 이다. 그리고 제안 기법은 $l=5$ 를 이용하였다.

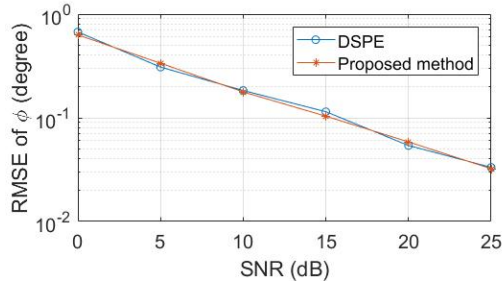
Fig. 2는 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)에 따른 추정성능을 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)로 나타내었다. 시험은 100회의 Monte Carlo 시험을 수행하였으며 이때 사용한 스냅 샷의 개수는 $N=100$ 이다. 제안 기법은 적은 연산량에도 불구하고 모든 SNR에서 DSPE기법과 성능의 차이가 없다. 모의 실험에서 두 기법 모두 대표방위/고각 추정 성능에 비해 방위/고각 표준편차의 추정 성능이 떨어짐을 보였는데 이를 DSPE 탐색을 통해 Fig. 3에서 분석하였다. Fig. 3(a)는 대표 방위/고각에



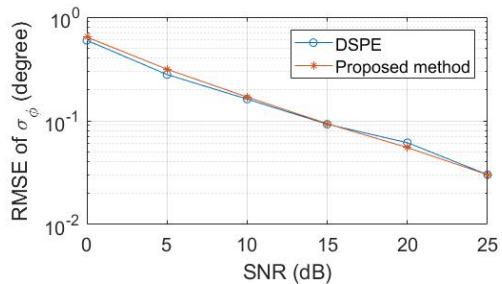
(a) nominal azimuth vs SNR



(b) azimuth angular spread vs SNR



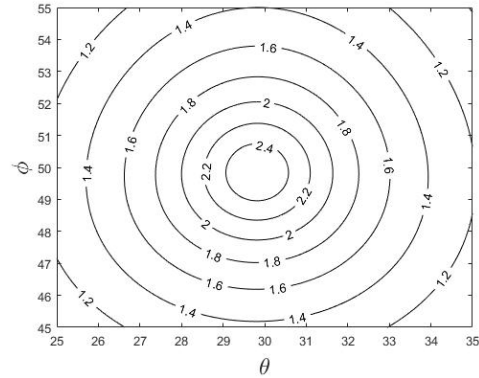
(c) nominal elevation vs SNR



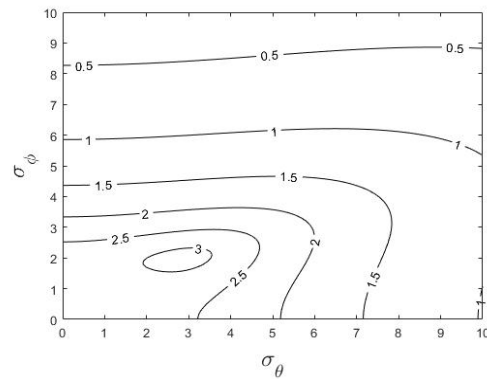
(d) elevation angular spread vs SNR

Fig. 2. RMSE versus SNR.

대한 2차원 탐색 결과를 RMSE 등고선으로 표현 하였으며 Fig. 3(b)는 방위/고각 표준편차에 대한 결과를 RMSE 등고선으로 표현하였다. 이때 $SNR = 10$ dB 이며 그 외 변수는 정확한 값을 대입하였다. 그림에서 대표 방위/고각 추정의 등고선보다 표준편차 추정의 등고선이 완만하게 분포해 있으며, 이로 인해 표준편차 추정 값이 잡음에 더 민감함을 확인하였다.



(a) nominal azimuth vs nominal elevation estimation



(b) azimuth angular spread vs elevation angular spread

Fig. 3. Comparison between nominal angle estimation and angular spread using DSPE ($SNR = 10$ dB).

Table 1. Elapsed CPU times required for calculation.

	Proposed method	DSPE	DSPE/Proposed method
Time (s)	9.9578e-05	83.1497	8.3502e+05

마지막으로 시뮬레이션을 이용하여 연산량 수치를 비교하였다. DSPE 기법의 경우 탐색 범위에 따라 연산량이 달라지므로 4가지 변수에 대해 모두 51번의 탐색과정을 고려했다. 모의실험은 i5 3.4 GHz PC에서 50번 시험을 평균하였으며 Matlab의 ‘tic’, ‘toc’ 명령어로 측정되었다. Table 1에서 제안기법은 DSPE 기법과 비교하였을 때 매우 큰 연산시간의 차이를 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 환형배열에서 단일 분산음원의 위치를 추정하는 기법을 제안하였다. 제안기법은 단일

음원을 가정함으로써 방위, 고각을 탐색과정 없이 추정하며, 분산음원이 가우시안 분포를 따를 경우 방위와 고각의 분포 또한 탐색과정 없이 추정한다. 이는 DSPE 기법의 4차원 탐색과정과 비교하여 매우 적은 연산량을 요구하며 성능면에서도 DSPE 기법과 비교하여 차이가 없음을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다.

References

1. R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," IEEE Trans. Antennas Propag. **AP-34**, 271-280 (1986).
2. R. Raich, J. Goldberg, and H. Messor, "Bearing estimation for a distributed source: modeling, inherent accuracy limitations and algorithm," IEEE Trans. on Signal Processing. **48**, 429-441 (2000).
3. S. Valaee, B. Champagne, and P. Kabal, "Parametric localization of distributed sources," IEEE Trans. on Signal Processing, **43**, 560-565 (2012).
4. Y. U. Lee, J. Choi, I. Song and S. R. Lee, "Distributed source modeling and direction-of-arrival estimation techniques," IEEE Trans. on Signal Processing. **45**, 960-969 (1997).
5. S. Lee, I. Song, H. Kwon, and S. R. Lee, "Low-Complexity estimation of 2D DOA for coherently distributed sources," Signal Processing, **83**, 1789-1802 (2003).
6. J. G. Nam, S. H. Lee, and K. K. Lee "2-D nominal angle estimation of multiple coherently distributed sources in a uniform circular array," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett, **13**, 415-418 (2014).
7. B. Liao, Y. Wu, and S. Chan, "A generalized algorithm for fast two dimensional angle estimation of a single source with uniform circular array," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. **11**, 984-986 (2012).
8. T. J. Jung and K. K. Lee, "Simple closed-form solution for a single source estimation in mixed far-field and near-field conditions" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **35**, 35-41 (2016).

저자 약력

▶ 정 태 진 (Tae-Jin Jung)



2007년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터 학부, 학사
2009년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터 학부, 석사
2015년 2월: 경북대학교 IT대학 전자공학부, 박사
2015년 1월 ~ 현재: LIG넥스원, 해양연구소 선임연구원
<관심 분야> 배열신호처리, 수중음향신호처리

▶ 신 기 철 (Kee-Cheol Shin)



1996년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 (공학사)
1998년 2월: 한국해양대학교 해양공학과 (공학석사)
2003년 8월: 한국해양대학교 해양개발공학과 (공학박사)
2003년~2004년: 한국과학재단 신진연구원, BB21 박사 후 과정
2005년 ~ 현재: LIG넥스원(주) 해양1연구소 수석연구원, 팀장
<관심 분야> 소나시스템, 소나신호처리, TRMMFP

▶ 박규태 (Gyu-Tae Park)



1996년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
1999년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학석사)
2004년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학박사)
2004년~현재: LIG넥스원(주) 해양1연구소 수석연구원
<관심 분야> 소나시스템, 소나신호처리

▶ 조 성 일 (Sung-Il Cho)



1990년 2월: 경희대학교 전자공학과 (공학사)
1994년 2월: 경희대학교 초음파공학 (공학석사)
2005년 9월: STX엔진(주) 선임연구원
2005년 ~ 현재: LIG넥스원(주) 해양1연구소 수석연구원, 연구소장
<관심 분야> 소나시스템, 소나신호처리