

논문 2012-49SP-2-16

방위각 오차에 강인한 경사법 기반 근접장 표적 거리 추정 기법

(A Gradient Method Based Near-Field Range Estimation Technique Robust to Direction-of-Arrival Error)

김 준 두*, 조 점 군**, 이 충 용***

(Joondoo Kim, Chomgun Cho, and Chungyong Lee)

요 약

본 논문에서는 등간격 선형 배열 센서에서 초점빔형성을 이용한 근접장 거리 추정 시에 방위각 오차의 영향을 극복하기 위하여, 거리 방향 탐색 시에 일정 범위 안의 방위각 오차를 보정하여 추정 성능을 향상시키는 기법을 제안하였다. 방위각 오차는 탐색 거리가 주어졌을 때 경사법을 기반으로 빔형성기 출력값이 최대가 되도록 보정하게 된다. 모의실험 결과를 통해, 제안된 기법이 주엽의 폭보다 작은 방위각 오차를 보정하여 거리 추정 오차를 방위각 오차가 없는 경우와 같은 수준으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose a near-field range estimation method for a uniform linear array that can calibrate bearing estimation error which give a bad influence on a range estimation process. When a range is fixed, the bearing error is calibrated to maximize the beamformer output by the proposed algorithm based on the gradient method. Simulation results show that the proposed algorithm can compensate the bearing error which is less than the mainlobe beamwidth so that reduce the range estimation error as similar as the case of no bearing error.

Keywords : Near-field, Focused beamforming, Range estimation, DoA estimation error, Self-calibration, Gradient method

I. 서 론

배열센서(sensor array)를 이용한 근접장(near-field)에서의 초점빔형성(focused beamforming) 기법은 초음파 화상 진단, 수중 지형 탐색, 재난 상황 시 구조 대상자의 위치 파악 또는 수중 신호원의 위치 파악 등에 이용될 수 있어 꾸준히 연구가 진행되고 있는 분야이다

[1~3]. 초점빔형성 기법은 특정 위치의 수신 혹은 송신 신호 대 잡음 비 (signal to noise ratio) 향상을 도모하는 기술이라고 할 수 있는데, 특정 위치의 수신 신호 대 잡음 비를 향상시키도록 빔을 형성하는 방식으로 빔형성이 가능한 지역을 탐색함으로써 신호원의 위치를 파악하는 것이 가능하다. 이렇게 수신되는 신호의 특성으로부터 신호원의 위치를 빠르고 정확하게 파악하는 기술은 수중의 위협 표적과 대치하는 잠수함 등에 있어서 매우 중요하다.

일반적으로 등방형의 신호원으로부터 전달되는 신호는 구면파의 형태를 갖지만, 거리가 멀어짐에 따라 이를 받아들이는 배열센서에 도달하는 신호는 평면파의 형태에 가까워지게 된다. 이 때, 빔형성 기법을 이용함으

* 학생회원, *** 정회원-교신저자, 연세대학교 (Yonsei University)

** 정회원, 국방과학연구소 (Agency of Defence Development)

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다. (계약번호: UD090015DD)
접수일자: 2011년7월12일, 수정완료일: 2011년12월7일

로써 신호의 입사각을 알 수 있다^[4]. 반면 배열센서가 신호원으로부터 충분히 떨어져 있지 않은 경우, 더 이상 신호의 파형을 평면으로 가정할 수 없으므로 평면과 가정 하에서 정립된 빔형성 기법을 적용할 경우 상당한 오차가 발생하게 된다. 이 경우, 구면과 가정 하에서 빔형성 기법을 설계하게 되는데 파면의 곡률로부터 신호의 입사각뿐만 아니라 거리에 대한 정보도 얻을 수 있다^[5]. 하지만 얻을 수 있는 정보가 늘어남에 따라 정확한 추정을 위해 필요한 계산량 또한 늘어나게 되는데, 원거리에서 방향만 추정할 때에 비해 탐색할 차원이 늘어나기 때문이다. 이는 신호원에 대한 탐색이 신속하게 이루어져야 하는 경우 심각한 문제이며, 이를 해결하기 위해 방위각에 대한 탐색과 거리에 대한 탐색을 분리하는 접근 방법을 취할 수 있다. 이 경우 2차원 탐색을 두 번의 1차원 탐색으로 줄일 수 있으나, 방위각 추정치의 정확도가 거리 추정 성능에 영향을 미치는 문제가 발생한다^[6].

이를 해결하기 위해서는 크게 근거리 방위각 추정 성능을 향상시키는 방향과, 방위각 오차가 존재하더라도 거리 추정 성능이 열화되지 않도록 하는 접근 방법이 있다. 전자는 주로 근거리 신호원과 원거리 신호원에서 전달되는 신호 모형의 차이에 의해 발생하는 오차를 줄이는 연구가 진행되고 있으며, 근접장에서의 조향벡터를 보정하거나^[7], 수신 신호의 공분산 행렬을 평면과 가정에서와 같이 근사화하거나^[8-9], 등간격 선형 배열의 특성을 이용하여 수신 신호로부터 거리 성분을 제거하는 방법^[10] 등이 존재한다. 반면 후자의 경우 전자에 비해 직접적인 연구가 많이 진행되지 않았다. 다만 Capon의 빔형성 (Capon's beamforming: CBF) 기법과 같이 분해능과 신호 대 잡음 비가 우수한 빔을 이용하여 특정 방향에서 신호를 수신하거나 전송할 때 실제 방향과 빔의 방향이 다름으로 인해 발생하는 자기신호감소(self cancellation) 현상을 극복하기 위한 기법에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있다^[11-14].

이는 거리 탐색을 하는 데 있어서 방위각 오차의 영향을 줄이는 연구와 높은 연관이 있으며, 본 논문에서는 이를 이용하여 방위각 오차의 영향을 덜 받는 거리 추정 알고리즘을 제안하였다. 초점빔의 특성에 맞게 방위각 오차로 인한 자기신호 감소 현상을 막으면서도 거리 방향 빔의 분해능 감소를 막기 위하여, 제안하는 기법은 방위각 오차를 보정하는 방향으로 작용하는 경사법(gradient method)을 기반으로 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 이어지는 장의 첫 번째 절에서는 근접장의 신호 모형을 설명하고 다음 절에서 방위각 오차의 영향에 대해 정리한다. 그 다음 기존 기법과 비교하여 제안하는 기법을 제시한다. III장에서는 모의실험을 통해 제안된 기법의 유효성 여부를 검증하고, IV장에서 결론을 내린다.

II. 본 론

1. 시스템 모델

그림 1은 근접장에 존재하는 하나의 등방성 신호원으로부터 $2M+1$ 개의 센서로 이루어진 등간격 선형 배열에 도달하는 신호의 파형을 도식화한 것이다. 배열을 구성하는 각 센서와 신호원의 위치는 2차원 극좌표계에서 각각 $\{(r_m, \theta_m), m = -M, \dots, 0, \dots, M\}$, (r_s, θ_s) 와 같이 표현된다. 이 때 신호원의 거리 r_s 는 Fresnel 거리로 정의되는 $2L^2/\lambda$ 보다 작은 값이며, 이 때 L 은 센서 배열의 크기, λ 는 전달되는 신호의 파장이다[3]. 본 논문에서는 협대역 신호원을 가정했으며 센서간 거리 d 는 파장의 반과 같다.

센서 배열에서 수신되는 신호 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}(r_s, \theta_s) s(t) + \mathbf{n}(t) \tag{1}$$

본 논문에서는 편의를 위해 수신 신호의 전력을 1로 가정하였다. 이 때, 잡음 벡터 $\mathbf{n}(t)$ 는 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 i.i.d. 복소 가우시안 랜덤 벡터이고, 근접장 조향 벡터(steering vector)는 다음과 같다^[3].

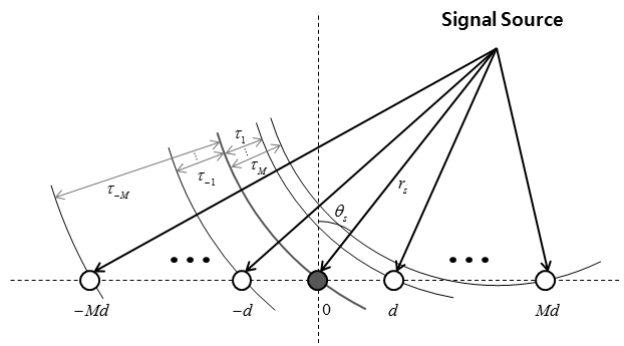


그림 1. 근접장 입사 신호 모델
Fig. 1. Near-field signal model.

$$\mathbf{a}\{r_s, \theta_s\} = \left[\exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}(r_{-Ms} - r_s)\right\} \cdots 1 \cdots \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}(r_{Ms} - r_s)\right\} \right] \quad (2)$$

이 때, $r_{m,s} = \sqrt{r_s^2 + m^2 d^2 - 2r_s m d \sin\theta_s}$ 는 m 번 센서와 신호원의 거리로, 수식 (2)에서 $r_{m,s} - r_s$ 를 2차 Taylor 근사화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다^[3].

$$r_{m,s} - r_s \approx m d \sin\theta_s - \frac{m^2 d^2 \cos^2\theta_s}{2r_s} \quad (3)$$

가중치 벡터 $\mathbf{w} = [w_{-M} \cdots w_0 \cdots w_M]^T$ 를 고려하면 빔형성기의 출력 신호는 다음과 같다.

$$y(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) = \sum_{m=-M}^M w_m^* x_m(t) \quad (4)$$

이 때 $\mathbf{x}(t)$ 가 평균이 0이고 정상성(stationary)을 가질 때, 빔형성기 출력 신호의 평균 전력은 다음과 같다.

$$P(\mathbf{w}) = E\{y(t)y^*(t)\} = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \quad (5)$$

여기서 $E\{\bullet\}$ 는 기댓값을 나타내며, \mathbf{R} 은 각 센서간 표준화 상관도 행렬로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\} \\ &= \mathbf{a}(r_s, \theta_s)\mathbf{a}^H(r_s, \theta_s) + \frac{1}{\rho} \mathbf{I} \end{aligned} \quad (6)$$

이 때, 앞서 수신 신호의 전력을 1로 가정하였으므로, $\rho = 1/\sigma_n^2$ 는 배열에서의 신호 대 잡음 비이다.

2. 방위각 오차에 따른 거리 추정 성능

초점빔형성 기법을 이용하여 신호원의 위치를 추정하는 문제는 수식 (5)를 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$(\hat{r}_s, \hat{\theta}_s) = \operatorname{argmax} P(r, \theta) \quad (7)$$

여기서 $P(r, \theta)$ 는 수식 (5)에서 \mathbf{w} 가 사용하는 빔의 종류에 관계없이 거리 r 과 방향 θ 의 함수이기 때문에 적절한 표현이다. 일반적으로 상기 문제의 목적 함수는 거리와 방향의 전 범위에 대해 불록하지 않으므로 이를 최대화하는 추정치를 수식적으로 구하는 것은 불가능하다. 따라서 거리와 방위에 대해 특정 간격으로 일정 범위를 탐색하게 되는데, 탐색 밀도에 따라서 일종의 양자화 오차가 발생하게 되며, 이를 줄이기 위해 충분히

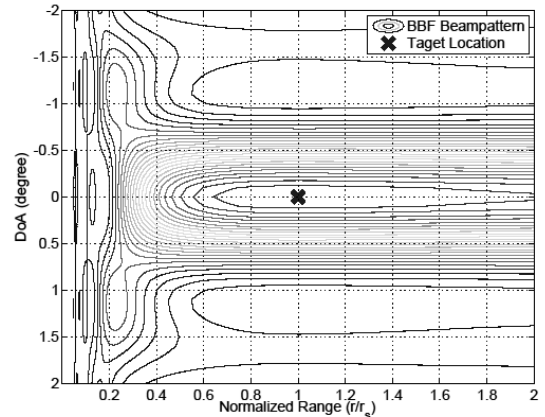


그림 2. Bartlett 빔형성 기법의 2차원 빔패턴
Fig. 2. 2-dimensional beampattern of Bartlett beamformer.

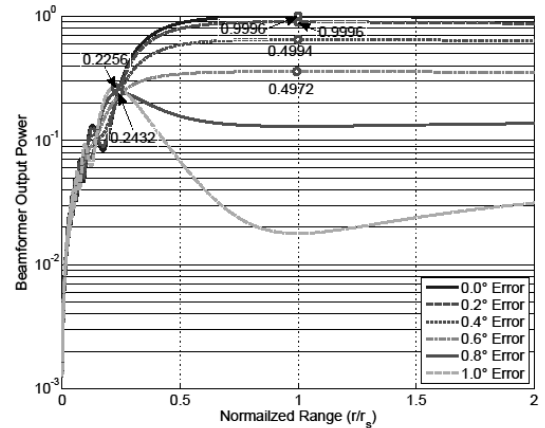


그림 3. 방위각 오차가 존재할 때, Bartlett 빔형성 기법의 거리 방향 1차원 빔패턴 변화
Fig. 3. Comparison of range beampatterns with various DoA error.

높은 밀도로 2차원 탐색을 수행할 경우 매우 높은 계산 복잡도를 시스템에 요구하게 된다.

그림 2는 Bartlett 빔형성(Bartlett's beamforming: BBF) 기법을 적용했을 때 거리와 방위에 대한 빔패턴을 등고선으로 나타낸 것이다. 101 개의 센서로 이루어진 등간격 선형 배열을 가정하고 $r_s = d_F/3$ 의 거리, 방위각 0° 에 존재하는 협대역 신호원으로부터 전달되는 신호에 대해 2차원 탐색을 수행한 것으로, 여기서 d_F 는 Fresnel 거리이다. 수중에서의 음속은 1,500m/s로 가정하였고, 센서간 거리는 신호의 반파장으로 가정하였다. 상술한 바와 같이 주엽 주변으로 많은 부엽이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 CBF 기법 등의 다른 빔형

성 기법을 사용하더라도 동일하게 발생한다^[6].

만약 별도로 추정된 방위각 정보가 있다면 신호원과 의 거리를 추정하는 문제는 수식 (7)로부터 다음과 같 이 나타낼 수 있다.

$$\hat{r}_s = \operatorname{argmax} P(r|\hat{\theta}_s) \quad (8)$$

그림 3은 그림 2와 동일한 환경에서 방위각 오차가 주어졌을 때 거리에 따른 빔패턴을 도시한 것이다. 방 위각 추정치에 오차가 없다면, 거리 방향 1차원 탐색에 서 얻어지는 최댓값의 위치는 2차원 탐색에서 얻어지는 최댓값의 위치와 일치하게 된다. 하지만 방위각 추정치 에 오차가 존재하는 경우, 주엽의 측면을 따라 탐색이 이루어지므로 최댓값의 위치가 달라지거나(0.4°-0.6° 오 차), 주엽보다 큰 부엽의 국소 최댓값이 선택되는 경우 가 발생한다(0.8°/1° 오차).

3. 경사법을 이용한 방위각 오차 보정 기법

상기 문제의 해결을 위하여, 거리 탐색의 각 단계마 다 일정 범위의 방위각에 대해 가장 높은 값을 선택하 는 최적화 문제를 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\operatorname{maximize} P(\theta|r) \quad (9)$$

$$\operatorname{subject\ to} \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \quad (10)$$

하지만 그림 2에서 확인할 수 있는 것처럼 상기 문제의 목적 함수는 일반적으로 볼록하지 않다. 따라서 설정된 범위의 θ 에 대해서 높은 밀도로 탐색을 수행하거나 수 식 (10)의 조건식을 없애고 경사법을 통해 국소 최대치 를 찾는 방법을 선택할 수 있다. 전자는 탐색 범위가 충 분하다면 방위각 오차의 크기에 상관없이 최댓값을 찾 을 수 있으나 일정 범위의 2차원 탐색을 시행하는 것으 로 복잡도 감소 효과가 떨어진다. 반면 후자는 적절한 변수 조정을 통해 빠른 속도로 국소 최댓값을 찾을 수 있으나 방위각 오차가 주엽의 폭보다 큰 경우 유효한 추정치를 제공하지 못한다는 단점이 있다. 그럼에도 불 구하고 2차원 탐색에 비해 복잡도 감소 효과가 탁월하 므로 본 논문에서는 후자의 접근 방식을 취한다.

제안하는 기법은 경사법을 기반으로 국소 최대치를 탐색함으로써 이루어지며, 빔형성 기법이 결정되면 주 어진 위치에서의 경사도를 계산함으로써 최댓값을 찾는 다. 특정 거리 r 과 방위각 θ 에서 BBF와 CBF, MUSIC (multi-signal classification) 빔형성기 출력은 다음과

같이 편미분된다.

$$\partial P_{BBF}(r,\theta) = \frac{\partial \mathbf{a}^H \mathbf{R} \mathbf{a} + \mathbf{a}^H \mathbf{R} \partial \mathbf{a}}{M^2} \quad (11)$$

$$\partial P_{CBF}(r,\theta) = \frac{\partial \mathbf{a}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a} + \mathbf{a}^H \mathbf{R}^{-1} \partial \mathbf{a}}{(\mathbf{a}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a})^2} \quad (12)$$

$$\partial P_{MUSIC}(r,\theta) = - \frac{\partial \mathbf{a}^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{a} + \mathbf{a}^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \partial \mathbf{a}}{(\mathbf{a}^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{a})^2} \quad (13)$$

수식 (13)의 \mathbf{U}_n 은 신호 부공간을 나타내는 기저벡터로 이루어진 행렬이고, 조향벡터의 편미분 $\partial \mathbf{a}$ 의 m 번째 요소의 실수 성분과 복소수 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \partial \operatorname{Re}\{a_m\} &= \partial \cos(\tau_m) \\ &= -\partial \tau_m \sin(\tau_m) \\ &= -\partial \tau_m \operatorname{Im}\{a_m\} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \partial \operatorname{Im}\{a_m\} &= \partial \sin(\tau_m) \\ &= \partial \tau_m \cos(\tau_m) \\ &= \partial \tau_m \operatorname{Re}\{a_m\} \end{aligned} \quad (15)$$

이 때, m 번째 센서 입력신호의 지연시간 τ_m 의 방위각 에 대한 편미분은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \tau_m}{\partial \theta} = - \frac{2\pi r m d \cos \theta}{\lambda \sqrt{r^2 + m^2 d^2} - 2r m d \sin \theta} \quad (16)$$

상기 수식 (11)-(16)를 바탕으로 구성된 제안하는 알고리즘은 다음과 같다.

Step 1) 다음과 같이 방위각 추정치를 초기값으로 놓고 해당 빔형성기 출력값을 저장한다.

$$\begin{aligned} \theta(0) &= \hat{\theta}_s \\ P_{tmp}(0) &= P(r, \theta(0)) \\ \mu_\theta(0) &= 0.1^\circ \end{aligned}$$

Step 2) 각 n 번째 반복 과정에서, 수식 (9)-(15)를 통해 얻은 경사값을 이용해 방위각을 갱신한다.

$$\begin{aligned} \theta(n) &= \theta(n-1) + \mu_\theta(n-1) \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial P_{tmp}(n-1)}{\partial \theta}\right) \\ P_{tmp}(n) &= P(r, \theta(n)) \end{aligned}$$

Step 3) 각 n 번째 반복 과정에서, 경사도 변화에 따

라 반영 정도를 조정한다.

$$\text{sgn}\left(\frac{\partial P_{tmp}(n)}{\partial \theta}\right) = \text{sgn}\left(\frac{\partial P_{tmp}(n-1)}{\partial \theta}\right) \text{인 경우,}$$

$$\mu_{\theta}(n) = 1.2\mu_{\theta}(n-1)$$

$$\text{sgn}\left(\frac{\partial P_{tmp}(n)}{\partial \theta}\right) \neq \text{sgn}\left(\frac{\partial P_{tmp}(n-1)}{\partial \theta}\right) \text{인 경우,}$$

$$\mu_{\theta}(n) = 0.5\mu_{\theta}(n-1)$$

Step 4) 다음 조건을 만족할 때까지 2)와 3)을 반복한다.

$$\mu_{\theta}(n) \leq 0.001^{\circ}$$

상기 알고리즘은 초점빔형성을 통해 거리를 추정하기 위한 탐색 과정에서 특정 거리에 대한 빔형성기 출력을 최대화 하는 역할을 수행한다. 두 번째 단계에서 제안한 알고리즘은 주어진 방위각에서의 경사도의 부호에 따라 방위각의 증감 여부를 결정한다. 방위각의 보정 방향이 결정되면 세 번째 단계에서 보정 폭을 결정하게 되는데, 이를 너무 크거나 작은 값으로 고정시킬 경우 알고리즘이 수렴하지 않거나 매우 느리게 수렴할 수 있다. 따라서 각 반복 과정에서 보정 폭 또한 갱신하게 되는데, 본 논문에서는 연속해서 같은 방향으로 갱신이 일어날 경우 보정값이 침두에 도달하지 않은 것이므로 보정 폭을 늘리고 이전 단계와 보정 방향이 다른 경우 보정값이 침두를 지나친 것으로 판단해 보정 폭을 감소하는 방향으로 설정하였다. 또한 한 번의 보정으로 주엽을 이탈하는 경우를 막기 위해 초기 조정 폭 $\mu_{\theta}(0)$ 는 주엽의 빔폭보다 충분히 작게 설정하였다. 네 번째 단계에서 보정 폭이 기준값보다 작으면 수렴한 것으로 보고 알고리즘에서 빠져나온다. 첫 번째 단계의 $\mu_{\theta}(0)$ 와 세 번째 단계의 조정 계수 1.2/0.5, 네 번째 단계의 수렴 기준값은 실험적으로 정해진 값으로 모든 상황에 최적화된 값은 아니며 시스템이 요구하는 수렴 속도와 정확도에 따라 적절히 조정함으로써 수렴 속도와 정확도를 제어할 수 있다.

III. 실험

본 장에서는 모의실험을 통해 제안하는 기법이 입사각 추정 오차의 영향을 얼마나 효과적으로 제어하는지 살펴보았다. $r_s = d_F/3$ 의 거리, 입사각 0° 에 협대역 음원이 존재한다고 가정하고, 101 개의 센서로 이루어진

등간격 선형 배열로 신호의 거리 추정을 시행하였다. 수중에서의 음속은 1,500m/s로 가정하였고, 센서간 거리는 신호의 반파장으로 가정하였다. 500개의 샘플을 이용하여 입사 신호의 공분산 행렬을 계산하였으며 샘플링 주파수는 신호원 주파수의 10배로 가정하였고, 입력 신호의 신호 대 잡음 비는 10dB이다. 이는 입사각 오차에 따른 영향만을 확인하기 위한 것이다.

그림 4와 그림 5는 1° 의 입사각 추정 오차가 존재할 때, BBF 기반 제안하는 기법의 거리탐색 경로와 그에 따른 1차원 빔패턴을 나타낸 것이다. 1° 의 입사각 추정 오차가 존재할 때 1차원 거리 탐색을 수행하면 그림 4에서 점선으로 나타난 경로를 따라 탐색이 이루어지고, 탐색 경로가 주엽의 중심부를 통과하지 못함에 따라 그림 5의 점선과 같이 표준화 거리가 약 0.2인 지점에 침두가 발생하게 된다. 반면 제안하는 입사각 보정 기법을 적용할 경우, 가까운 거리에서는 자잘하게 발생하는 부엽들의 침두로 보정이 이루어지지만 약 0.2 이후, -1.2° 에서 1.2° 사이에 발생하는 주엽의 중심을 통과하는 경로로 방위각이 보정되는 것을 확인할 수 있다. 이에 따른 거리방향 빔패턴은 그림 5의 실선에 나타난 것처럼 궤선으로 표현되는 방위각 오차가 없는 경우와 거의 동일한 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 약 0.24 이하에서는 대체로 오차가 있을 때와 없을 때 각각 발생하는 부엽 중 높은 값을 따라가는 경향을 보이지만, 경우에 따라서는 두 빔패턴 사이를 건너뛰는 현상도 나타난다. 이는 주어진 방위각 오차와 기반이 되는 빔형성 기법의 종류, 신호원의 거리 및 방위각에 따

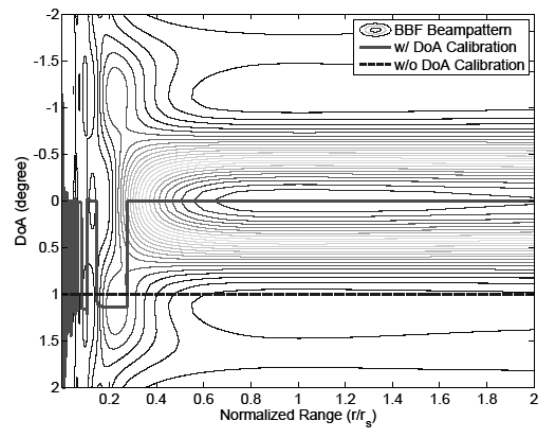


그림 4. 1° 의 방위각 오차가 존재할 때, BBF 기반 방위각 보정 기법에 의한 거리 탐색 경로 변화
Fig. 4. Comparison of searching paths for range estimation methods with 1° DoA error.

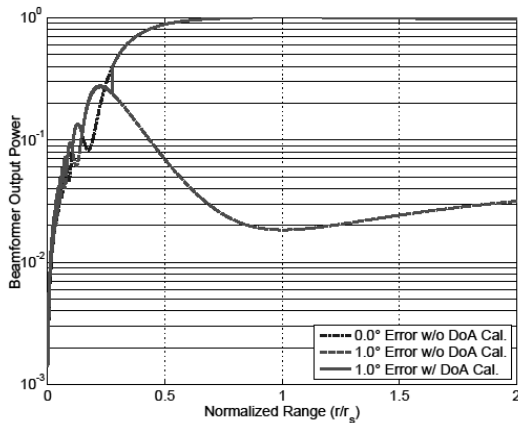


그림 5. 1°의 방위각 오차가 존재할 때, BBF 기반 방위각 보정 기법에 의한 거리 방향 1차원 빔패턴 변화

Fig. 5. Comparison of range beampatterns with 1° DoA error.

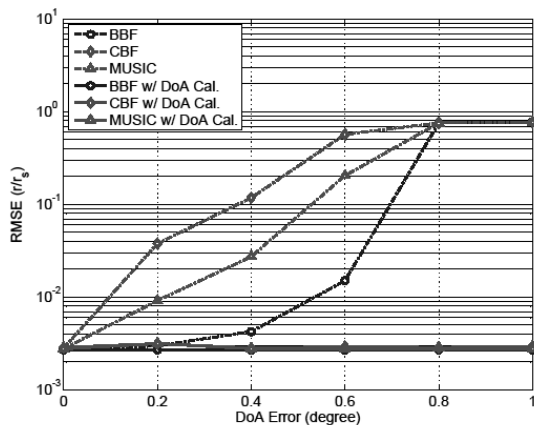


그림 6. 방위각 오차에 따른 방위각 보정 기법의 RMSE 비교

Fig. 6. Comparison of RMSE performance with increasing DoA error.

라 달라질 수 있다. 근거리 부분에서 부엽의 첨두를 찾는 문제는 부엽의 크기가 주엽의 크기에 비해 작기 때문에 큰 의미를 갖지 않는다.

그림 6은 100번의 반복 실험을 통해 제안하는 방위각 보정 기법을 적용했을 때와 적용하지 않았을 때 거리 추정치의 RMSE를 도시한 것이다. 제안된 기법을 적용하지 않은 경우, 꺾선으로 표현된 바와 같이 방위각 오차가 증가함에 따라 거리 오차 또한 증가하여 0.8° 이상에서 목표 거리 대비 약 0.8의 오차가 평균적으로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 원으로 표현된 BBF에 비해 마름모로 표현된 CBF나 세모로 표현된 MUSIC 기법은 매우 뾰족한 형태의 빔을 발생시키는데, 분해능과 빔형

성 이득이 우수한 반면 방위각 오차에 민감한 것을 확인할 수 있다. 반면, 제안된 방위각 보정 기법을 사용한 경우, 그림 4와 5에서 확인한 바와 같이 오차가 1°까지 증가하더라도 거리 추정 경로를 주엽의 중심부로 통과시키는 것이 가능하므로, 오차가 없을 때와 거의 동일한 에러 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

제안하는 기법은 경사도를 기반으로 하였기 때문에, 일정 범위의 방위각에 대해 탐색을 수행하는 것보다 낮은 복잡도로 방위각 오차의 영향을 효과적으로 제거할 수 있지만, 방위각 오차가 일정 이상으로 증가할 경우, 주엽을 통과하는 탐색 경로를 만들어내지 못하고 이에 따라 거리 추정 또한 정확하게 이루어지지 않는 단점이 있다. 하지만 상기 결과를 통해 검증한 바와 같이 상당히 넓은 범위의 방위각 오차를 효과적으로 보정할 수 있으므로, 실제로 이 기법을 적용함에 있어서 방위각 추정 기법에 요구되는 정확도는 그리 높지 않다고 할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 초점빔형성 기법을 이용하여 근거리 신호원의 위치를 추정하는 과정에서 시스템 복잡도 감소를 위해 방위각 추정과 거리 추정을 분리했을 때 발생하는 문제와 그 해결방안을 제시하였다. 방위각 오차가 발생하는 경우, 거리방향 빔의 출력이 낮아지고 첨두의 위치에 오차가 발생하는 문제가 발생하였다. 이는 빔형성 기법에 관계없이 발생하였으며, 특히 CBF나 MUSIC과 같이 고분해능을 갖는 기법들에서 두드러졌다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 거리 탐색 과정에서 경사도를 기반으로 방위각 오차를 보정하는 기법을 제안하였다. 모의 실험을 통해 본 기법이 방위각 오차가 주엽의 폭을 넘어가지 않는 경우, 거리 탐색 경로를 주엽의 중심으로 보정할 수 있음을 보였고, 그에 따라 방위각 오차에 따른 거리 추정 성능 열화를 보상할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

[1] F. Vignon, and M. R. Burcher, "Capon beamforming in medical ultrasound imaging with focused beams," IEEE Trans. on Ultrasound, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 55, no.

- 3, pp. 619-628, Mar. 2008.
- [2] V. Murino, and A. Trucco, "A confidence-based approach to enhancing underwater acoustic image formation," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 8, no. 2, pp. 270-285, Feb. -1999.
- [3] W. Zhi, and M. Y. Chia, "Near-field localization via symmetric subarrays," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 14, no. 6, Jun. 2007.
- [4] L. C. Godara, "Application of antenna arrays to mobile communications, part II: Beam-forming and direction-of-arrival consideration," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 8, pp. 1195-1245, Aug. 1997.
- [5] Richard O. Nielson, *Sonar signal processing*, Artech house, 1991.
- [6] 김준두, 노훈동, 조점군, 오원천, 이충용, "등간격 선형 배열을 이용한 근거리 거리 추정에서 입사각 추정 오차의 영향," ADD40주년종합학술대회, 대전, 2010년 8월.
- [7] D. Yang, J. Shi, and B. Liu, "DoA Estimation for the Near-field Correlated Sources with Interpolated Array Technique," *IEEE ICIEA*, 2009.
- [8] J. Lee, Y. Chen, and C. Yeh, "A Covariance Approximation Method for Near-Field Direction-Finding Using a Uniform Linear Array," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 43, May 1995.
- [9] J. Lee, and C. Tung, "Estimating the Bearings of Near-Field Cyclostationary Signals," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 50, Jan. 2002.
- [10] H. He, and Y. Wang, "Near-Field Source Localization by Using Focusing Technique," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008.
- [11] J. Li, P. Stoica, and Z. Wang, "On Robust Capon Beamforming and Diagonal Loading," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 51, no. 7, pp. 1702-1715, Jul. 2003.
- [12] W. Ser, H. Chen, and Z. L. Yu, "Self-Calibration-Based Robust Near-Field Adaptive Beamforming for Microphone Arrays," *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol. 54, no. 3, pp. 267-271, Mar. 2007.
- [13] Y. R. Zheng, R. A. Goubran, and M. El-Tanany, "Robust near-field adaptive beamforming with distance discrimination," *IEEE Trans. on Speech and Audio Processing*, vol. 12, no. 5, pp. 478-488, Sep. 2004.
- [14] 최양호, "조향벡터 에러에 강인한 효과적인 Capon 빔 형성기법," 대한전자공학회 전자공학회논문지-SP, 제 48권 SP편 제 5호, pp 115-122, Sep. 2011.

 저 자 소 개



김 준 두(학생회원)
 2005년 연세대학교 전기전자
 공학과 학사 졸업.
 2008년 연세대학교 전기전자
 공학과 석사 졸업.
 2008년~현재 연세대학교 전기
 전자공학과 박사 과정.

<주관심분야 : 신호처리, 이동통신, MIMO>



이 충 용(정회원)-교신저자
 1987년 연세대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1989년 연세대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1995년 Georgia Tech.
 전자공학과 박사 졸업.

1996년~1997년 삼성전자 선임연구원
 1997년~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수
 <주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO, 협력통신
 시스템>



조 점 군(정회원)
 1999년 연세대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 2001년 연세대학교 전기전자
 공학과 석사 졸업.
 2001년~현재 국방과학연구소
 소나체계개발단 선임연구원

<주관심분야 : 적응신호처리, 실시간구현, 소나체
 계>