

삼중 배열 소나를 위한 강인한 적응 빔형성 기법

Robust adaptive beamforming for triplet sonar arrays

안재균,¹ 류영우,¹ 천승용,¹ 김성일[†]

(Jae-Kyun Ahn,¹ Yongwoo Ryu,¹ Seung-Yong Chun,¹ and Seongil Kim^{1†})

¹국방과학연구소

(Received January 11, 2017; accepted March 29, 2017)

초 록: 본 논문에서는 삼중 배열 소나를 위한 강인한 적응 빔형성 기법을 제안한다. 제안하는 빔형성은 삼중 배열 소나를 이용하여 불일치에 강인하고 좌우구분이 가능한 빔을 만드는 방법으로 두 단계로 이루어져 있다. 먼저 각 삼각 센서 별로 표적 신호의 좌우 방위 구분을 위한 카디오이드 빔을 생성하며, 각 삼각 센서(Triplet)에 대한 회전각을 반영하여 지연차 방법을 통해 빔을 형성한다. 다음으로 인접 표적에 의한 간섭을 최소화하기 위해 적응 빔을 생성한다. 삼각 센서 별로 얻은 카디오이드 빔을 선배열에 대한 입력 신호로 하여 선배열에 대한 적응 빔형성 기법을 카디오이드 빔에 적용한다. 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안하는 기법이 기존 기법 대비 표적에 대한 좌우 구분 및 불일치에 강인함을 확인하였다.

핵심용어: 카디오이드 빔형성, 적응 빔형성, 삼중 배열 소나, 수동소나

ABSTRACT: We propose a robust adaptive beamforming algorithm for triplet array sonar. The proposed beamforming algorithm obtains robustness to mismatches, left/right discrimination, and has two steps. The first is a cardioid beamformer, which supports left/right discrimination of target signals. It applies the conventional delay-and-subtract to each triplet's signal with its rotation angle and obtains multiple cardioid beams. The second is a robust adaptive beamforming to minimize nearby interferences. We regard cardioid beams as input signals of a line array and apply an adaptive beamforming algorithm to the cardioid beams. Simulations results show that the proposed algorithm provides significantly better performance than the conventional algorithms, while supporting left/right discrimination of target signals.

Keywords: Cardioid beamforming, Adaptive beamforming, Triplet arrays, Passive sonar

PACS numbers: 43.60.Fg, 43.30.Wi

1. 서 론

빔형성 기법은 레이더나 소나와 같이 다수의 센서로 구성된 배열을 이용하여 방위 지향성을 갖는 빔을 생성하여, 표적 신호에 대한 SNR(Signal to Noise Ratio)을 높이고 표적 방위 추정을 용이하게 할 목적으로 사용된다. 빔형성은 센서 배열을 통해 음향 신호를 수신하는 능/수동 소나에서 기본적으로 사용되며, 예인형 선배열 소나, 선체 부착형 소나 등과 같

이 다양한 배열 소나 체계에서 활용된다.

표적의 정확한 방위 추정을 위해 다양한 빔형성 기법들이 제안되었으며, 센서 배열 구조에 따라 빔형성에 대한 성능 및 활용도가 달라진다. 선배열 소나는 다수의 센서를 긴 튜브 내부에 일직선으로 배열함으로써 대구경(large aperture)을 구현하여 높은 지향이득을 얻는 방법이다. 하지만 배열의 좌측과 우측에서 신호가 동일한 위상으로 각 센서에 유입되므로, 표적의 좌우 방위를 구분할 수 없는 단점이 있으며, 이를 극복하기 위해 이중 선배열 또는 하나의 센서에 세 개의 청음기를 배치한 삼중 배열을 이용한 카디오이드 빔형성 기법들이 제안되었다.^[1,2] Fig. 1은

[†]Corresponding author: Seongil Kim (sikim@add.re.kr)
P. O. Box 18, Jinhae-gu, Changwon, Gyeongnam 51678, Republic of Korea
(Tel: 82-55-540-6540, Fax: 82-55-542-3737)

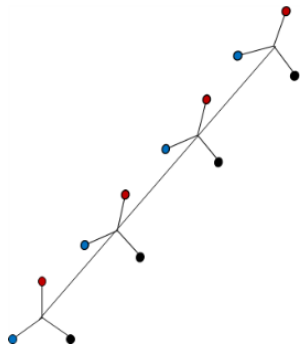


Fig. 1. Triplet arrays.

삼중 배열에 대한 형상을 나타낸다.

먼저 카디오이드 빔형성 기법은 이중 선배열 또는 삼중 배열에서 좌우 방위 구분을 위해 사용한다. 이중 선배열은 두 선배열을 평행하게 배치한 형태로, 선배열 간의 지연을 추정하여 좌우를 구분한다. 하지만 예 인신의 기동 및 파도 등 환경에 따라 두 선배열이 수평 방향으로 평행상태를 유지하지 않고 회전할 수 있으며, 이에 따라 카디오이드 빔형성의 성능이 저하되는 문제가 있어, 배열 회전에 강인한 삼중배열 소나가 주로 활용되게 되었다. 삼중 배열에는 다수의 회전각 롤 센서가 장착되어 있어, 배열의 회전을 보상하여 수평 방향에서의 센서 간 시간 지연을 정확히 추정한다.

카디오이드 빔형성에 대한 초기 연구는 파장의 1/4 간격으로 떨어진 선배열 간의 시간 지연을 이용하는 지연차 기법에 기반을 둔다. 지연차 기법은 이중 선배열에서 두 센서로 수신된 신호에 대해 지향방향에서는 신호를 더하고 반대 방향에서는 빼는 형태로 카디오이드 빔을 형성한다. 복수의 센서 쌍을 통해 생성한 카디오이드 빔들을 선배열의 입력으로 하여 지연합방법으로 지향이득을 높여 표적 신호에 대한 SNR을 높인다.

이중 선배열과 마찬가지로 삼중 배열에서도 지연차를 이용한 카디오이드 빔형성 기법들이 적용 가능할 뿐만 아니라, 배열이 회전하더라도 이를 고려하여 수평으로 이격이 큰 두 센서를 선택하거나, 세 센서를 모두 사용하는 등 보다 안정적인 성능을 확보할 수 있는 기법들이 제안되었다.^[3] 또한 삼중 배열은 단일 튜브 내부에 삼각 센서가 배치되므로, 사다리 형태의 이중 튜브 구조를 갖는 이중 선배열 대비 운용이 용이하다는 장점이 있다.

삼중 배열은 삼각센서(triplet)가 선형으로 나열된

구조의 선배열로 볼 수 있으며, 각 카디오이드 빔을 지연합 방법을 이용하여 전방위 탐색 빔을 생성할 경우, 방위 분해능이 부족하여 인접 방위의 표적을 구분하는데 한계가 있다. 특히, 간섭 신호가 강하고 표적 신호가 약할 경우, 기존의 지연합 방법으로는 표적이 간섭 신호의 부엽(side lobe) 준위보다 낮아 탐지 되지 않는다.

이를 극복하기 위해 적응 카디오이드 빔형성 기법들이 제안되었다. Groen *et al.*^[4]은 삼중 배열의 세 센서 간의 연관 계수를 이용하는 적응 빔형성 기법을 제안하였다. 이 기법은 삼중배열을 세 개의 선배열로 보고, 각 선배열에 대해 독립적으로 지연합 빔형성 후, 세 선배열로부터 생성된 빔 간의 공분산 행렬을 추정한다. 그리고 MVDR(Minimum Variance Distortionless Response) 기법^[5]을 이용하여 3개 빔에 대한 최적의 가중치 벡터를 생성하고 빔출력을 생성한다. 하지만 이 방법도 MVDR 기법을 사용하는 방법들과 마찬가지로 불일치에 민감하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 삼중 배열 소나에 대한 불일치에 강인한 적응 카디오이드 빔형성 기법을 제안한다. 삼각 센서별 카디오이드 빔을 형성하여 좌우 방위 구분 성능을 만족시키고 카디오이드 빔에 대한 적응 빔형성을 다시 수행하여 선배열 적응 빔형성의 장점과 카디오이드 빔형성의 장점을 모두 유지하도록 하였다. 즉, 제안하는 빔형성을 통해 인접 표적에 대한 간섭 신호를 최소화하면서 표적 방위의 좌우 구분이 가능하도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안하는 기법에 대한 개요를 설명한다. III장에서는 좌우 구분을 위한 카디오이드 빔형성에 대해 설명한다. IV장에서는 불일치에 강인한 적응 빔형성에 대해 설명한다. V장에서는 실험을 통해 본 논문에서 제안하는 방법의 성능을 검증하며, 마지막으로 VI장에서는 본 논문에 대해 결론을 제시한다.

II. 제안 기법의 개요

Fig 2는 제안 기법에 대한 블록 다이어그램이다. 제안 기법은 삼중 배열 소나를 이용하여 불일치에 강인하고 좌우 구분이 가능한 빔을 형성하며 두 가지 과정으로 나뉜다. 첫 번째는 좌우 구분을 위해 개별적인

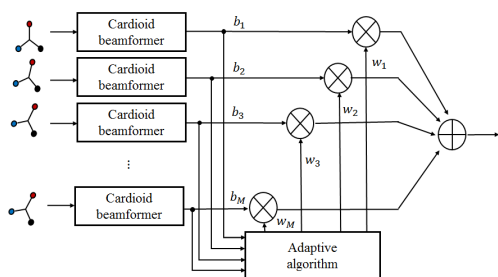


Fig. 2. Block diagram of the proposed beamformer.

삼각 센서를 이용한 카디오이드 빔형성이고, 두 번째는 선배열에 대한 불일치에 강인한 적응 빔형성이다. 각 삼각 센서 별로 수신된 신호에 대해 삼각 센서의 회전을 반영하여 빔을 형성한다. 이때 삼각 센서 내부의 시간 지연을 이용하여 좌우구분이 가능한 카디오이드 빔을 형성한다. 카디오이드 빔형성 후, 이를 선배열에 대한 입력 신호로 두고 간섭신호의 영향을 최소화 하는 최적의 가중치 벡터를 구한다. 카디오이드 빔형성을 통해 3개 센서의 신호가 1개의 빔으로 줄어들었으므로 두 번째 빔형성의 입력 수는 일반적인 선배열의 입력과 동일하며, 지연차 방법을 사용하였으므로 카디오이드 빔의 위상도 유지된다. 따라서 선배열 소나에서 사용하는 적응 빔형성 기법을 그대로 적용하는 것이 가능하다. 최종적으로 추정된 최적의 가중치 벡터를 삼각 센서에 대한 카디오이드 빔에 반영하여 빔출력을 생성한다. 카디오이드 빔이 입력이므로 출력 역시 좌우 구분이 가능한 카디오이드 빔이 된다.

카디오이드 빔형성을 위해 Hughes의 기법^[3]을 선배열에 대한 적응 빔형성을 위해 RCB(Robust Capon Beamforming) 방법^[6]을 각각 적용하였다. Hughes의 기법은 카디오이드 빔 형성 시 삼각 센서에 대한 시간 지연만 보상하므로 출력된 카디오이드 빔이 선배열의 입력으로 적용될 수 있는 장점이 있다. RCB 기법은 불일치에 강인하기 때문에 불일치 요소가 많은 삼중 배열에 적합하다. 따라서 제안하는 기법을 통해 각 단계 별 빔형성의 장점을 극대화 한다.

III. 좌우 구분을 위한 카디오이드 빔형성

제안 방법에서는 각 삼각 센서 별로 카디오이드 빔을 형성한다. 일반적인 선배열과 달리 삼중 배열

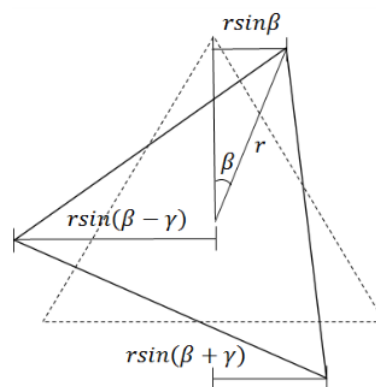


Fig. 3. Structure of a triplet.

에서는 삼각 센서 내부의 시간 지연이 존재한다. 개별 삼각 센서 내부의 시간 지연은 카디오이드 빔을 형성하는데 필요한 요소로, 삼각 센서의 회전각 β 와 외접원의 반지름 r 로 결정된다. Fig. 3는 회전각이 β 인 삼각 센서를 나타낸다. 그림에서 수평 방향에 대한 센서 별 시간 지연은 각각 $r \sin \beta / c$, $r \sin(\beta - \gamma) / c$, $r \sin(\beta + \gamma) / c$ 이 되며, 여기서 c 는 음속이다. γ 는 센서와 센서 간의 각도로 삼각 센서가 정삼각형이므로 120° 이다. 따라서 주어진 회전각 β 에 대한 삼각 센서의 조향 벡터 \bar{d} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{d} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} e^{jkr \sin \beta \sin \theta} \\ e^{jkr \sin(\beta - \gamma) \sin \theta} \\ e^{jkr \sin(\beta + \gamma) \sin \theta} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

여기서 k 는 $2\pi f / c$ 이고, θ 는 지향 방위를 나타낸다. 일반적인 지연합 빔형성과 달리 카디오이드 빔형성은 지향 방위의 빔의 SNR을 높이면서 반대 방향의 빔을 배제(mulling)하는 것을 목적으로 한다. 그러한 이유로 카디오이드 빔형성을 위한 가중치 벡터인 \bar{w} 는 다음의 조건을 만족시키는 형태로 결정된다.

$$\bar{w}^H \bar{c}_1 = 1, \bar{w}^H \bar{c}_2 = 0, \quad (2)$$

여기서 \bar{c}_1 은 조향 벡터이고 \bar{c}_2 는 \bar{c}_1 의 반대방향에 대한 지향 벡터로 편의상 우현, 좌현(broadside) 방향으로 간주한다. 즉, Eq. (1)에서 θ 가 90° 일 때의 \bar{d} 가 \bar{c}_1 이고 270° 일 때의 \bar{d} 가 \bar{c}_2 이다. Eq. (2)를 만족하는 최적

의 가중치 벡터를 추정하는 방법으로 Hughes의 기법^[3]을 적용하였다. 우선 조향벡터 C 를 $[\bar{c}_1, \bar{c}_2]$ 로 \bar{b} 는 $[1, 0]^T$ 로 두면 Eq. (2)의 가중치 벡터는 유사역행렬 (pseudo-inverse)을 통해 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{w} = C(C^H C)^{-1} \bar{b}. \quad (3)$$

Eq. (3)의 C 를 \bar{c}_1, \bar{c}_2 로 대체하여 전개하면 가중치 벡터는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\bar{w} \propto (\bar{c}_1 - \alpha \bar{c}_2), \quad (4)$$

여기서 α 는 $\bar{c}_1^H \bar{c}_2$ 로 \bar{c}_1 과 \bar{c}_2 는 연관성을 의미한다. Eq. (1)을 통해 \bar{c}_1 와 \bar{c}_2 의 값을 α 에 대입하여 전개하면 α 는 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\alpha^* = \frac{1}{3} (e^{-2jkr \sin \beta} + e^{-2jkr \sin(\beta - \gamma)} + e^{-2jkr \sin(\beta + \gamma)}). \quad (5)$$

Eq. (5)의 α^* 을 테일러급수(Taylor series)를 이용하여 1차 급수로 간략화 하면 α^* 는 1이 된다. 이를 Eq. (4)에 적용하면 최적의 가중치 벡터를 구할 수 있으며 \bar{w} 는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\bar{w} \propto \begin{pmatrix} \sin \beta \\ \sin(\beta - \gamma) \\ \sin(\beta + \gamma) \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} e^{-jkr \sin \beta} \\ e^{-jkr \sin(\beta - \gamma)} \\ e^{-jkr \sin(\beta + \gamma)} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

여기서 \odot 는 벡터 요소 간의 곱을 의미한다. Eq. (6)의 가중치 벡터는 90° 방향으로 빔을 형성할 때, 지향 방위에 대한 빔을 형성함과 동시에 반대방향의 빔을 배제하는 가중치를 나타낸다. 따라서 지향 방위가 θ 일 때 카디오이드 빔형성을 위한 가중치 벡터를 다음과 같이 구하였다.

$$\bar{w}_{\theta, f} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} \sin \beta e^{-jkr \sin \beta \sin \theta} \\ \sin(\beta - \gamma) e^{-jkr \sin(\beta - \gamma) \sin \theta} \\ \sin(\beta + \gamma) e^{-jkr \sin(\beta + \gamma) \sin \theta} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Eq. (7)을 통해 지향 방위 θ 에 대해 삼각 센서 별로 카디오이드 빔을 형성하며 m 번째 삼각 센서의 수신 신호 $X_{m, f}$ 에 대한 카디오이드 빔 $b_{m, f, \theta}$ 는 $\bar{w}_{\theta, f}^H X_{m, f}$ 이 된다. Eq. (7)의 θ 수평에서의 방위각으로 지향하는 방위(0~360°)를 나타내며, 선배열의 지향 방위에 해당하는 카디오이드 빔을 생성한다.

IV. 불일치에 강인한 적응 빔형성

앞서 언급하였듯이 제안하는 기법은 각 삼각 센서에 대한 카디오이드 빔을 형성하고, 선배열에 대한 적응 빔형성 기법들을 적용하여 주어진 카디오이드 빔에 대한 최적의 가중치 벡터를 추정한다.

적응 빔형성을 적용하는 데 있어서 불일치에 강인해야 할 두 가지 이유가 있다. 첫 번째로 삼중 배열은 선배열에 비해 불일치 요소가 많다. 삼각 센서는 선배열과 달리 회전각과 같이 좌우 구분 성능에 직접적으로 영향을 주는 변수들이 존재한다. 예를 들어 실제 삼각 센서의 회전각이 롤 센서로 획득하여 추정된 회전각과 달라 불일치가 발생할 수 있다. 또한, 긴 길이의 삼중 배열을 예인함에 따라 발생하는 비선형으로 인해, 실제 삼각 센서의 위치와 추정된 위치의 차이인 위치 오차가 발생하며, 삼중 배열은 센서 수가 일반 선배열에 비해 세 배이므로 이와 같은 불일치에 더 민감하다. 두 번째로, 제안하는 방법에서 적용한 카디오이드 빔형성기는 정밀한 빔출력을 제공하지 않는다. III장에서 설명하였듯이 카디오이드 빔을 형성하는 데 있어서 계산 편의를 위해 일부 항을 간략화하여 처리한다. 따라서 제안하는 방법을 통해 생성한 카디오이드 빔과 정밀하게 계산된 빔과 차이가 있을 수 있다. 이러한 이유로 인해 카디오이드 빔들에 대한 적응 빔형성 기법은 불일치에 강인한 방법이어야 한다. 우리는 불일치에 강인한 RCB 방법^[6]을 적용하였다.

제안 방법에서는 적응 빔형성의 입력으로 카디오이드 빔을 이용하므로, 좌우 지향 방위에 따라 입력 신호가 달라진다. Eq. (7)의 가중치 벡터를 통해 생성된 카디오이드 빔은 좌우 지향 방위 θ 에 따라 값이 달라 지므로 적응 빔형성의 교차 스펙트럼 밀도 행렬(cross spectral density matrix)도 지향 방위 별 주파수 빈 별 독립적으로 생성되어야 하며 다음과 같이 표현된다.

$$R_f(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{b}_{\theta,f} \bar{b}_{\theta,f}^H, \quad (8)$$

여기서 N 은 스냅샷 개수이고 $\bar{b}_{\theta,f}$ 는 카디오이드 빔에 대한 벡터이다. N 이 센서 개수보다 작으면 작은 상수 값으로 대각 로딩 (diagonal loading) 을 $R_f(\theta)$ 에 적용하여 가중치 벡터를 구는데 있어서 문제가 발생하지 않도록, $R_f(\theta)$ 이 양의 정부호 행렬 (positive definite matrix) 이 되도록 한다.

RCB 방법은 기존의 MVDR 방법을 개선한 방법으로 실제 조향 벡터와 추정 조향 벡터 간의 불일치에 강인한 방법이다. RCB 방법은 MVDR 방법을 통해 유도된 빔출력을 최대화하는 최적의 가중치 벡터 \hat{d}_0 를 추정하며, 가중치 벡터는 추정 조향 벡터를 중심으로 하는 불확실성 집합(uncertainty set) 내부에 있다고 가정한다. RCB 방법에 대한 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \max_{\hat{d}_0} \min_{\bar{w}} \bar{w}^H R_f(\theta) \bar{w} \quad \text{subject to} \\ \bar{w}^H \hat{d}_0 = 1, (\hat{d}_0 - \bar{d}_0)^H U^{-1} (\hat{d}_0 - \bar{d}_0) \leq 1, \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 U 는 불확실성 집합, \bar{d}_0 는 조향 벡터이다. Eq. (9)에서 U 를 불일치 변수를 이용하여 형태를 간략화하고 MVDR 방법에서 유도된 빔출력을 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \max_{\hat{d}_0} \hat{d}_0^H R_f(\theta)^{-1} \hat{d}_0 \quad \text{subject to} \\ \|\hat{d}_0 - \bar{d}_0\| \leq \epsilon. \end{aligned} \quad (10)$$

Eq. (10)을 만족하는 최적의 \hat{d}_0 를 찾기 위해 라그랑주 승수법 (Lagrange multiplier method) 를 사용하며, \hat{d}_0 는 다음과 같다.

$$\hat{d}_0 = \bar{d}_0 - (I - \lambda R_f(\theta))^{-1} \bar{d}_0, \quad (11)$$

여기서 λ 는 라그랑주 계수이며, 반드시 $\lambda \geq 0$ 를 만족한다. Eq. (11)의 가중 벡터가 Eq. (10)에 있는 제한 조건을 만족시켜야 하므로, 이를 이용하여 라그랑주 계수 λ 를 계산한다. $R_f(\theta)$ 의 고유벡터와 고유값을

이용하여 Eq. (10)의 제한조건을 λ 에 대한 단조감소 함수로 표현하며, 최종적으로 뉴턴의 방법을 통해 Eq. (11)의 λ 와 그에 대한 가중치 벡터를 얻는다.

제안하는 카디오이드 빔의 적응 빔형성 기법은 협대역 빔형성뿐만 아니라 광대역 빔형성에도 적용이 가능하다. 앞서 설명하였듯이 카디오이드 빔이 불일치에 민감한 단점이 있으므로, 광대역 빔형성에서도 불일치에 강인한 기법을 적용해야 한다. 이러한 이유로 우리는 WBRCB(Wide Band Robust Capon Beamforming) 기법^[7]을 카디오이드 적응 빔형성에 도입하였다. 관심 대역의 최저 주파수가 f_l 이고 최대 주파수가 f_h 인 대역에서 카디오이드 빔에 대한 조향공분산행렬 (steered covariance matrix)^[8]는 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$R_{f_l, f_h}(\theta) = \sum_{f=f_l}^{f_h} T_{f,\theta} R_f(\theta) T_{f,\theta}^H, \quad (12)$$

여기서 $R_f(\theta)$ 는 주파수 f 에 대한 교차스펙트럼 밀도 행렬이고 $T_{f,\theta}$ 는 조향 벡터에 대한 대각 행렬이다. WBRCB 기법에서 조향 공분산행렬에 대한 최적의 가중 벡터는 RCB 기법과 동일한 방법으로 산출된다. 조향 공분산행렬이 조향 벡터를 모두 포함하므로, Eq. (10)의 조건에도 조향 벡터가 삽입된다. 불일치 변수 ϵ 이 주파수 별로 동일하다고 가정하면, WBRCB 기법에 대한 정의는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \max_{\hat{d}_0} \hat{d}_0^H R_{f_l, f_h}(\theta)^{-1} \hat{d}_0 \quad \text{subject to} \\ \|\hat{d}_0 - \bar{1}\| \leq \epsilon, \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $\bar{1}$ 은 1로 구성된 벡터이다. Eq. (13)을 만족하는 최적의 \hat{d}_0 도 Eq. (11) 형태로 추정한다. 이러한 방식을 통해 광대역에 대해서도 카디오이드 적응 빔형성을 수행하는 것이 가능하다.

V. 실험 결과

본 장에서는 제안하는 빔형성기의 성능을 평가한다. 실험 환경으로 10개의 삼각 센서로 구성되어 있

고 삼각 센서 간의 간격이 반파장인 가상의 삼각 배열을 사용하였다. 실제 운용 환경을 모의하기 위해 삼각 센서의 회전각이 1번 삼각 센서부터 10번 삼각 센서까지 단조 증가한다고 가정하였다. 아래에 제시된 모든 실험에 대해 이와 같은 가정을 적용하여 빔형성기의 성능을 비교한다.

제안하는 빔형성기의 불일치에 대한 강인함을 확인하기 위해 위치 오차와 회전각 오차를 적용하였다. 위치 오차는 실제와 추정된 삼각 센서 위치의 차이를 의미하며 실제 환경에서 배열이 비선형성을 갖기 때문에 발생한다. 만약 삼각 배열에서 비선형성이 없으면 삼각 센서의 중심 좌표들은 모두 2차원 좌표계에의 y 축 위에만 존재한다.

다시 말해 이상적인 환경에서 삼각 센서들의 중심 x 축 좌표는 모두 0이다. 하지만 실제 해양 환경에서는 여러 가지 이유로 삼각 센서의 x 좌표에 변동이 있으며, 이 경우에 실제 수신 신호와 추정된 신호간의 불일치가 발생한다. 우리는 이러한 위치 오차를 반영하기 위해 실제 삼각 센서 중심의 x 좌표를 평균이 0이고 표준편차가 0.03 파장인 가우시안 분포로 두었고, 반면에 추정 조향 벡터의 x 좌표는 0으로 두었다.

삼중 배열의 또 다른 불일치는 회전각 오차로 배열에 있는 회전각 센서와 연관된다. 대부분의 삼중 배열 소나는 복수의 회전각 센서를 통해 배열의 회전각을 획득하고 이를 이용하여 개별 삼각 센서에 대한 회전각을 추정한다. 따라서 빔형성 시에 사용하는 삼각 센서의 회전각에서 오차가 발생할 수 있다. 또한, 회전각 센서의 정확도와 바이어스에 따라 실제 회전각과 측정된 회전각에서 차이가 생긴다. 본 실험에서는 우리는 회전각 센서가 균일한 회전각 오차를 제공한다고 가정하였고 회전각 오차를 카디오이드 빔형성에 반영하였다. 예를 들어, m 번째 삼각 센서의 실제 회전각이 β_m 이면 빔형성에 반영되는 회전각은 오차 Δ 를 포함한 $\beta_m + \Delta$ 이 된다.

제안하는 기법은 삼중 배열 소나 대한 적응 빔형성으로 카디오이드 빔형성과 적응 빔형성 기법에 기반을 두고 있다. 따라서 제안하는 빔형성기의 성능을 삼중 배열에 대한 빔형성기인 Hughes^[3]의 기법과 Groen *et al.*^[4]의 기법과 비교하였다. 환경에 대한 빠른 적응을 위해 제안 기법과 Groen *et al.*의 기법에서

스냅샷 수를 3으로 설정하였다.

Fig. 4의 (a)는 SNR이 30dB인 정현파 신호가 90° 방향에서 불일치 없이 획득되었을 때 제안하는 방법과

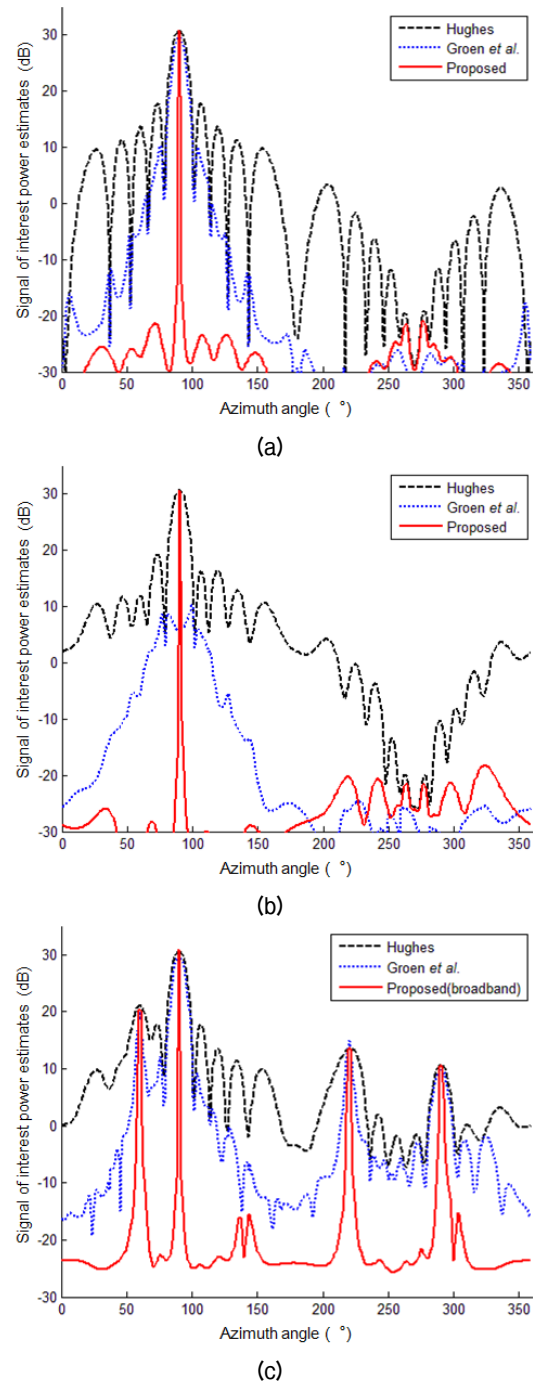


Fig. 4. Power estimates versus the steering direction (azimuth angle): (a) no mismatch, (b) position and rotation error mismatches, and (c) no mismatch (wideband).

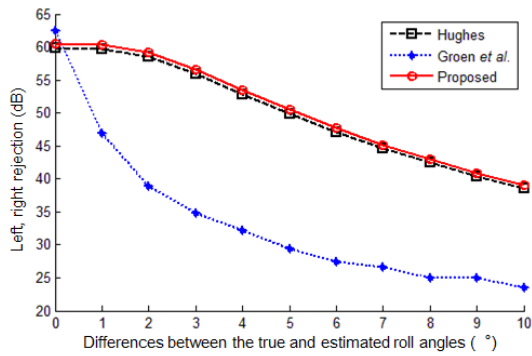


Fig. 5. Left/right discrimination versus rotation errors.

기존 방법의 빔출력 추정을 나타낸다. 배경 소음은 시간적 공간적으로 평균이 0인 가우시안 분포로 모델링하였고 제안하는 방법의 불일치 변수 ϵ 는 0.2로 설정하였다. Fig. 4의 (b)는 (a)와 동일한 환경에서 신호 수신 중 위치와 회전각 오차가 발생했을 때의 빔형성 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 제안하는 빔형성기가 기존 빔형성기보다 지속적으로 우수한 성능을 보이고 충분한 좌우 구분을 지원함을 확인할 수 있다. Fig. 4(c)에서 제안하는 빔형성기가 광대역 출력 추정 또한 효과적으로 지원할 수 있는지 보여준다. 60°, 90°, 220°, 290° 방향에 대해 SNR이 20, 30, 15, 10 dB이고 주파수가 다른 4개의 정현파 신호를 모의하였다. 빔형성 수행시 대역폭을 200 Hz로 두고 처리하였다. Fig. 4(c)를 통해 제안 방법의 광대역 빔형성 기법도 다른 방법들에 비해 우수한 해상도와 간섭 배제능력을 보임을 확인할 수 있다.

마지막으로 다양한 회전각 오차에 대해 제안 방법의 좌우 구분 성능을 확인한다. 좌우 구분 성능은 좌우 방향에서의 출력비로 측정되며, Fig. 5는 시뮬레이션을 1,000번 수행하여 평균을 계산한 결과이다. 제안하는 기법에서 카디오이드 빔형성은 Hughes^[3]의 기법을 적용하였기 때문에 회전각 오차에 대한 카디오이드 빔 좌우 구분 성능은 Hughes의 기법과 거의 동일하다. 반면 Groen *et al.*^[4]의 기법은 카디오이드 빔형성 시 삼각 센서에 대한 연관성을 이용하므로 회전각 오차와 같이 연관성에 영향을 주는 요소가 생길 경우 좌우 구분 성능이 저하되는 단점이 있다. 결과를 통해 제안하는 빔형성기가 다른 방법들에 비해 회전각 오차에 강인함을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서 우리는 삼중 배열 소나에 대한 적응 빔형성 기법을 제안하였다. 제안하는 방법은 개별 삼각 센서에 대한 카디오이드 빔형성과 카디오이드 빔에 대한 선배열 적응 빔형성으로 구성되며, 각 단계 별 성능을 높이기 위해 각각 최적화된 기법을 적용 및 개선하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 빔형성기가 기존 기법 대비 인접 표적 신호에 대한 간섭을 최소화하고 좌우 구분 성능도 보임을 확인하였다.

References

1. W. S. Allensworth, C. W. Kennedy, B. K. Newhall, and I. W. Schurman, "Twin-line array development and performance in a shallow-water littoral environment," J. Hopkins APL Tech. Dig. **16**, 222-232 (1995).
2. J. P. Feuillet, W. S. Allensworth, and B. K. Newhall, "Nonambiguous beamforming for a high resolution twin-line array," J. Acoust. Soc. Am. **97**, 3292 (1995).
3. D. T. Hughes, "Aspects of cardioid processing," Sac-lantcen, 2000.
4. J. Groen, S. P. Beerens, R. Been, Y. Doisy, and E. Noutary, "Adaptive port-starboard beamforming of triplet sonar arrays," IEEE J. Ocean. Eng. **30**, 348-359 (2005).
5. H. Cox, R. M. Zeskind, and M. M. Owen, "Robust adaptive beamforming," IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. **ASSP-35**, 1365-1376 (1987).
6. J. Li, P. Stoica, and Z. Wang, "On robust capon beamforming and diagonal loading," IEEE Trans. Signal Process. **51**, 1702-1715 (2003).
7. S. D. Somasundaram, "Wideband robust capon beamforming for passive sonar," IEEE J. Ocean. Eng. **38**, 308-322 (2013).
8. J. Krolik and D. Swingler, "Multiple broad-band source location using steered covariance matrices," IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. **37**, 1481-1494 (1989).

저자 약력

▶ 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 선임
연구원

▶ 류 영 우 (Yongwoo Ryu)



2004년 2월: POSTECH 전자공학과 학사
2006년 2월: POSTECH 전자공학과 석사
2006년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임
연구원

▶ 천 승 용 (Seung-Yong Chun)



1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 학사
1990년 2월: 경북대학교 전자공학과 석사
2009년 2월: 해양대학교 전파공학과 박사
1990년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임
연구원

▶ 김 성 일 (Seongil Kim)



1986년: 서울대학교 해양학과 학사
1988년: 서울대학교 대학원 해양학과 석사
2002년: Univ. of California, San Diego
해양학과 박사
1990년 ~ 현재: 국방과학연구소 수석연구원
<관심분야> 수중음향 신호처리