

능동소나 시스템을 위한 삼중 배열의 적응 빔형성

Adaptive beamforming of triplet arrays for active sonar systems

안재균,¹ 류영우,¹ 천승용,¹ 김성일,[†]

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

¹국방과학연구소

(Received November 21, 2017; revised December 18, 2017; accepted January 30, 2018)

초 록: 본 논문에서 우리는 능동소나 시스템에서 삼중 배열의 적응 빔형성 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 정합필터, 카디오이드 빔형성, 선배열 빔형성으로 구성된 3단계의 과정을 통해 빔형성을 수행한다. 먼저, 송신 펄스에 대한 정합필터를 개별 수신 센서 신호에 적용하여 필터링된 신호를 획득한다. 그리고 정합필터 출력에 푸리에 변환을 적용하고, 각 삼각 센서 별 카디오이드 빔을 형성한다. 최종적으로 삼각 센서에 대한 카디오이드 빔들을 선배열 신호의 입력으로 가정하여 선배열 적응 빔형성을 적용한다. 실험 결과를 통해 제안하는 방법의 성능이 기존 기법보다 더 우수함을 확인한다.

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

ABSTRACT: In this paper, we propose an adaptive beamforming algorithm of triplet arrays for active sonar systems. The proposed algorithm consists of three steps: matched filters, cardioid beamforming, and line array beamforming. First, we apply a matched filter of a transmitted pulse to received individual sensor signals and obtain filtered signals. Then, we perform the fast Fourier transform to the matched filter results, and make a cardioid beam for each triplet data, respectively. Finally, we apply an adaptive beamforming by assuming that the cardioid beams are input signals of a line array. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm provides better performances than conventional algorithms.

Keywords: Cardioid beamforming, Adaptive beamforming, Triplet arrays, Active sonars

PACS numbers: 43.60.Fg, 43.30.Vh

1. 서 론

삼중 배열은 3개의 음향 센서로 구성된 삼각 센서를 선형으로 나열한 배열으로 표적을 탐지하고 표적 탐지 및 좌/우 방위 구분을 위해 사용된다. 삼중 배열의 각 삼각 센서는 삼각형 형태로 배치된 3개의 센서의 신호 도달 시간 차이를 이용하여 신호 좌우 방위 구분이 가능한 카디오이드 빔을 형성하는 용도로 사용되며, 배열 예인 시 발생하는 뒤틀림에 의한 시간 지연 오차를 줄이기 위해 2개의 센서가 아니라 3개의 센서로 구성된 삼각형 형태의 삼각 센서와 회

전각을 측정하는 롤센서로 구성된다. Fig. 1은 삼중 배열의 센서 구조를 나타낸다.

삼중 배열은 기본적으로 삼각 센서를 직선으로 나열한 구조이므로, 선배열과같이 빔형성을 통해 표적의 방위를 탐지하고, 방사 소음에 대한 신호 대 잡음비를 높인다. 삼중 배열에 대한 일반적인 빔형성은

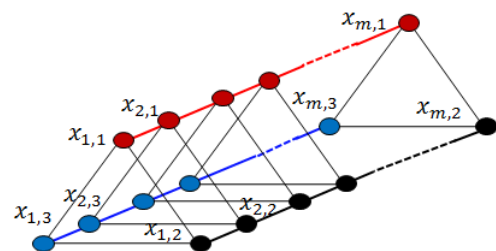


Fig. 1. Structure of a triplet array.

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

삼각 센서에 대한 카디오이드 빔형성과 선배열에 대한 기존 빔형성으로 나뉜다.^[1] 특정 지향 방위에 대해 삼각 센서 별로 회전각을 보상하여 카디오이드 빔을 지연차 방법으로 형성하고, 이에 대해 지연합 형태의 기존 선배열 빔형성을 적용하는 형태이다. 삼중 배열도 선배열과 마찬가지로 연속된 센서들을 직선으로 나열한 구조이기 때문에, 카디오이드 빔형성 부분만 제외하면 기본적인 선배열과 동일한 방식의 빔형성이 가능하다. 따라서 선배열에서 사용하는 적응 빔형성을 적용하는 것도 가능하며, 이를 이용하여 탐지 성능을 높일 수 있다.

적응 빔형성은 표적의 간섭신호의 영향을 최소화하여 표적의 방위를 정확하게 추정하고 불필요한 부엽을 최소화하는 기법으로 수동 선배열 소나에 적용하는 용도로 활발하게 연구되었다. Cox *et al.*^[2]은 적응 빔형성 기법으로 MVDR(Minimum Variance Distortionless Response)을 제안하였다. MVDR은 정확한 방위 추정이 가능하고, 부엽준위를 최소화하는 등의 장점이 있으나, 불일치에 민감하여 지향 방위가 실제 표적방위와 차이가 있거나, 센서 별 시간 지연에 오차가 있으면 탐지 성능이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 점을 보완하기 위해 Li *et al.*^[3]은 MVDR을 기반으로 한 RCB(Robust Capon Beamforming) 기법을 제안하였다. RCB는 MVDR에서 사용하는 제한 조건에 대해 불일치 정도를 할당하여 실제 신호와 추정된 신호의 불일치가 있더라도 그 정도가 주어진 경계에 있을 경우에는 신호가 탐지될 수 있도록 하는 기법이다. RCB 기법은 사용자가 지정하는 불일치 파라미터에 따라 성능이 달라질 수는 있으나, 실제 환경에서 발생하는 다양한 불일치 성분을 정량적인 형태로 빔형성에 반영하여 강인한 성능을 제공하는 장점이 있다. Elnashar *et al.*^[4]은 RCB 기법을 응용 및 확장하여 빔형성 시 더 정확한 성능을 낼 수 있는 방법에 대해 연구하였다.

MVDR과 RCB 기법은 협대역에서 표적을 탐지하기 위한 방법으로 FFT(Fast Fourier Transform) 후 주파수 빈 별로 처리해야 하는 특징을 갖고 있다. Krolik과 Swingler는 MVDR 방법을 광대역 탐지로 확장한 기법인 STMV(Steered Minimum Variance) 기법^[5]을 제안하였다. STMV는 입력신호에 대한 공분산 행렬 생성 시 특정 주파수에 대한 최적 가중치가 아닌 특정 대

역에 대한 최적 가중치를 산출한다. STMV가 MVDR의 광대역 처리 기법인 것처럼 RCB에 대해서도 유사한 형태의 광대역 처리 기법인 WBRCB(Wideband Robust Capon Beamforming)가 제안되었다.^[6] STMV와 마찬가지로 WBRCB도 가중치 추정 시 광대역에 대한 공분산 행렬을 사용하며, 불일치 파라미터에 대한 최적의 대각 로딩값을 찾아 가중치를 구한다.

선배열 소나와 마찬가지로 삼중 배열 소나에서도 적응 빔형성을 적용한 기법들이 제시되었다. 삼중 배열의 빔형성은 탐지된 표적의 좌우 방위를 구분해야 하는 특징이 있다. Groen *et al.*^[7]은 삼각 센서간의 공분산 행렬을 기반으로 한 적응 빔형성 기법을 제안하였다. 삼중 배열이 3개의 선배열로 구성되어 있기 때문에, Groen *et al.*의 기법은 먼저 각 배열 별로 독립적으로 기존 빔형성을 수행한다. 그리고 생성한 3개의 빔에 대해 공분산 행렬을 추정하고 MVDR과 동일한 형태의 적응 빔형성을 적용하여 삼중 배열에 대한 빔을 생성한다. 표적의 방위 추정은 기존 빔형성을 통해 수행하고 표적의 좌·우 구분에 적응 빔형성을 적용한 형태이다. 반대로 Ahn *et al.*^[8]은 각 삼각 센서에 대해 독립적으로 카디오이드 빔형성을 수행하고, 카디오이드 빔들에 대해 선배열의 적응 빔형성을 적용한 기법을 제안하였다.

기존의 삼중 배열에 대한 적응 빔형성 기법들은 대부분 수동소나에 국한되어 있다. 반면 능동소나 시스템에서 삼중 배열의 적응 빔형성에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 논문에서 능동소나 시스템에서 삼중 배열의 적응 빔형성 기법에 대해 제안한다. 기본적으로 제안하는 빔형성기는 Ahn *et al.*의 기법과 기능적으로는 유사하나, 능동 소나 시스템에 맞게 알고리즘 구조를 변경 및 개선하였다. 제안하는 방법은 크게 두 가지로 정합필터를 적용하고 빔형성을 하는 기법과 정합필터를 적용하지 않고 바로 빔형성 처리를 하여 표적을 탐지하는 기법으로 나뉜다. 시뮬레이션 및 해상실험 데이터를 통해 제안하는 기법의 성능을 검증하였다.

II. 불일치에 강인한 적응 빔형성

제안하는 빔형성기는 Ahn *et al.*의 기법을 능동소

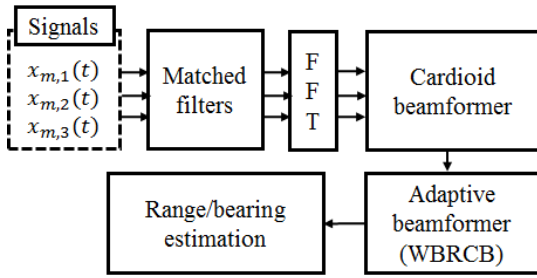


Fig. 2. Block diagram of the proposed algorithm.

나 시스템에 적합하게 변형한 방법으로 기존의 방법에 정합필터 등을 추가하여 능동 탐지가 가능하도록 처리하는 방법이다. Fig. 2는 제안하는 적응 빔형성기의 블록 다이어그램을 나타낸다.

2.1 정합필터를 포함한 빔형성

일반적으로 능동소나에서는 특정 펄스를 송신 후 표적을 맞고 반사되는 펄스를 탐지하여 표적의 방위 및 거리를 추정하며, 반사 펄스 탐지를 위해 정합필터를 사용한다. 표적의 거리를 추정하는 방법은 능동 소나의 구조 및 운용개념에 따라 다르지만 보통 빔형성 후 빔에 정합필터를 적용하여 반사파의 시간 지연값을 빔 별로 계산하여 처리하는 형태이다. 하지만 제안하는 방법에서는 일반적인 능동 신호처리와 달리 빔형성 전에 입력신호에 대해 시간 영역에서 정합필터를 적용한다. 이러한 접근 방법을 선택한 데에는 크게 두 가지 이유가 있다. 첫째, 적응 빔형성을 통해 출력된 빔 신호에는 위상정보가 없어 정합필터를 적용하기 어렵다. 일반적으로 적응 빔형성은 주파수 영역에서 출력 빔파워를 기준으로 센서 별 최적의 가중치를 찾는 방법이다. 이때, 센서 별 위상 정보의 연관성을 이용하여 최적의 값을 찾기 때문에 가중치를 적용한 빔파워에는 센서 별 위상정보가 남지 않게 되어 정합필터를 반영하기 어렵다. 둘째, 시간 영역에서의 정합필터는 선형 시불변 시스템이므로 정합필터 적용 후에도 시간 지연에 대한 위상정보가 변하지 않는다. 다시 말해 정합필터 출력 결과에도 센서 별 시간 지연이 그대로 유지되어 적응 빔형성을 적용하는 것이 가능하다. 따라서 선배열 적응 빔형성 기법을 능동 소나 시스템에 적용하기 위해서는 반드시 빔형성 전에 정합필터를 적용

해야 한다.

시간 영역에서 센서 별 입력 신호에 대해 정합필터를 적용하며, 삼중 배열의 입력신호에 대한 정합필터는 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{x}_{m,1}[n] = \sum_{k=0}^{L-1} x_{m,1}[n-k]r[k], \quad (1)$$

여기서 $r(n)$ 는 송신 펄스의 레플리카(replica)를 L 은 펄스 샘플수를 나타낸다. 그리고 $x_{m,1}$ 는 Fig. 1에서 나타내듯이 m 번째 삼각센서의 첫 번째 센서 입력을 의미한다.

제안하는 빔형성기에서는 센서 별로 얻은 정합필터 출력에 대해 카디오이드 빔을 형성하며, 카디오이드 빔은 각 삼각 센서 별로 독립적으로 생성한다. 삼각 센서는 회전각에 따라서 각 센서 별 시간 지연이 달라지며, 회전각이 β 일 경우 삼각 센서 중심을 기준으로한 각 센서 별 시간 지연은 각각 $r\sin\beta/c$, $r\sin(\beta-\gamma)/c$, $r\sin(\beta+\gamma)/c$ 이 된다. 여기서 r 은 삼각형 외접원의 반지름, γ 는 120도, c 는 음속이다.

카디오이드 빔형성은 지향방위의 표적을 탐지하고 반대 방위의 신호를 탐지 되지 않도록 하여 표적 방위의 좌/우를 구분하는 방법이다. 지향 방위에 해당하는 조향 벡터를 \bar{c}_1 으로 반대방향의 지향 벡터를 \bar{c}_2 로 가정하면 카디오이드 빔형성을 위한 가중치 벡터인 \bar{w} 는 다음의 조건을 통해 추정할 수 있다.

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

제안하는 방법에서는 Ahn *et al.*의 기법과 마찬가지로 Hughes^[1]의 기법을 통해 Eq. (2)를 만족하는 최적의 가중치 벡터를 추정하였다. 따라서 지향 방위가 θ 일 때 카디오이드 빔을 형성하기 위한 삼각센서 별 가중치 벡터는 다음과 같다.

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

여기서 k 는 $2\pi f/c$ 이다. 최종적으로 삼각 센서 별로

획득한 정합필터 출력을 FFT를 통해 주파수 영역으로 변환하고, Eq. (3)의 가중치 벡터를 곱하여 카디오이드 빔을 형성한다. m 번째 삼각 센서의 주파수 도메인의 정합필터 출력 신호 $\bar{X}_{m,f}$ 에 대한 지향 방위 θ 의 카디오이드 빔 $b_{m,f,\theta}$ 는 $\bar{w}_{\theta,f}^H \bar{X}_{m,f}$ 이 된다.

제안하는 기법에서는 삼각 센서를 통해 획득한 카디오이드 빔에 선배열 적응 빔형성을 적용하여, 인접 방위의 간섭신호를 최소화한다. 삼중 배열 특성상 발생하는 회전각 오차 등을 고려하여 불일치에 강한 Ahn *et al.*^[8]의 기법을 적용하였다. 하지만 Ahn *et al.*의 기법은 수동 소나에 대한 빔형성 기법이므로 능동 소나 특성에 맞게 일부 기법을 변형하였다. 우선, 능동 소나시스템에서는 수동 소나 적응 빔형성 시 적용하는 여러 개의 스냅샷을 사용할 수 없다. 왜냐하면, 능동 소나에서는 수동소나의 연속적인 방사소음이 아닌 단발성의 펄스를 통해 표적을 탐지하기 때문이다. 이러한 이유로 우리는 1개의 스냅샷으로도 적응 빔형성이 가능한 WBRCB 기법^[6]을 도입하였다. WBRCB은 특정 대역에 대해 최적의 가중치를 산출하는 방법으로 대역에 사용되는 주파수 빈 개수가 센서 개수만큼 많으면 1개의 스냅샷으로도 적용이 가능하다. 또한 제안하는 방법에서는 정합필터를 통과한 주파수 대역만 처리하기 때문에, 송신펄스에 해당되지 않는 주파수 성분에 대한 간섭이 적어 WBRCB를 적용하기가 용이하다. WBRCB를 통해 빔형성을 하기 위해서는 처리하고자 하는 대역의 최저 주파수 f_l 와 최대 주파수 f_h 를 설정해야 하며, f_l 와 f_h 사이에 있는 주파수 빈의 개수가 삼각 센서 개수보다 많아야 한다. f_l 와 f_h 에 대한 조향공분산행렬 (steered covariance matrix)^[5]는 다음과 같다.

$$R_{f_l, f_h}(\theta) = \sum_{f=f_l}^{f_h} T_{f,\theta} R_f(\theta) T_{f,\theta}^H, \quad (4)$$

여기서 $R_f(\theta)$ 는 f 에 대한 교차스펙트럼밀도행렬이고 $T_{f,\theta}$ 는 대각 행렬로 f 와 θ 에 대한 지향 벡터 성분으로 구성되어 있다. $R_f(\theta)$ 의 각 성분들은 앞 절에서 설명한 카디오이드 빔으로 구성된다. Eq. (4)의 조향공분산행렬을 통해 특정 대역에 대한 최적의 가중치

를 산출할 수 있으며, WBRCB 기법에서는 다음의 조건을 만족하는 형태로 가중치를 계산한다.

$$\begin{aligned} \max_{\hat{d}_0} \hat{d}_0^H R_{f_l, f_h}(\theta)^{-1} \hat{d}_0 \quad \text{subject to} \\ \|\hat{d}_0 - \bar{1}\| \leq \epsilon, \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 ϵ 는 불일치 파라미터이고 $\bar{1}$ 은 1로 구성된 벡터이다. Eq. (5)를 만족하는 최적 가중치 \hat{d}_0 는 아래와 같다.

$$\hat{d}_0 = \bar{1} - (I - \lambda R_{f_l, f_h}(\theta))^{-1} \bar{1}, \quad (6)$$

여기서 λ 는 대각 로딩값으로 Eq. (5)의 조건을 만족하는 값이 된다. 최종적으로 특정 방위의 카디오이드 빔에 Eq. (6)의 가중치를 곱하여 방위 별 빔을 형성한다. 방위 별 빔파워 $P(\theta)$ 는 $\|\hat{d}_0^H b_{f,\theta}\|^2$ 이 된다.

2.2 정합필터를 제외한 빔형성

제안하는 빔형성기는 Fig. 2에서 나타내듯이 시간 영역의 신호에 대해 정합필터를 통과시키고 정합필터 출력에 대해 FFT를 적용하여 빔형성을 수행한다. 능동 소나의 신호는 일반적인 수동 소나 신호와 달리 단발성의 펄스 형태이며, 정합필터 출력은 경우에 따라서 송신 펄스길이 보다 더 짧은 길이의 결과를 출력하기도 한다. 이러한 이유로 정합필터 출력에 FFT 적용 시 FFT의 샘플 개수를 정합필터 출력 길이 보다 더 길게 설정하면, 정합필터 출력 이득이 떨어질 수 있다. 반면, FFT의 샘플 개수를 작게 설정하여 정합필터 출력에 대한 이득을 취하려고 하면, 센서 별 시간 지연으로 인해 정합필터 출력이 FFT 샘플에 포함되지 않을 수도 있다. CW(Continuous Wave)는 보통 정합필터 출력이 시간 영역에서는 펄스 길이보다 더 길게 나오는 반면, FM의 정합필터 결과는 시간 영역에서 순간적으로 출력되기 때문에 정합필터 후 FFT 적용 시에 펄스의 길이, 종류, 그리고 출력 주기 등으로 고려하여 FFT의 샘플 개수를 설정해야 한다. 본 장에서는 정합필터 사용 시 발생할 수 있는 단점을 보완하기 위해 FFT로 정합필터 출력을 대체하는 기

법을 제안한다.

정합필터는 레플리카와 일치하는 신호를 통과시키는 필터로 경우에 따라서는 밴드 패스 필터와 유사하다. 따라서 송신 펄스의 종류가 CW인 경우에는 정합필터 없이 FFT를 바로 적용할 수 있다. FFT가 주파수 별로 정합필터링을 하는 것과 유사한 개념이기 때문이다. 단, 이 경우 FFT의 샘플 개수를 펄스의 길이와 동일하게 처리하여, FFT만 처리한 결과와 정합필터를 통해 출력한 결과의 이득이 유사하도록 한다. LFM(Linear Frequency Modulation)의 경우 정합필터의 출력이 펄스 길이 대비 순간적으로 응답이 나오기 때문에, 정합필터를 쓰지 않고 FFT를 바로 적용하는 것이 탐지 측면에서는 더 효과적일 수도 있다. Eq. (4)에서 주파수의 범위를 LFM 주파수 범위에 맞게 설정하게 되면, 정합필터 없이도 유사한 탐지 결과를 얻게 된다. 이 경우 FFT 후 주파수 성분을 묶어서 처리하기 때문에 up-chirp와 down-chirp에 무관하게 동일하게 처리되는 단점이 있지만, 실용적인 관점에서는 큰 차이가 없는 경우가 많다.

정합필터를 적용하지 않고, 바로 FFT 처리 후 펄스에 해당하는 주파수를 선택하여 처리하는 방법은 상대적으로 계산량이 적고, 정합필터 출력 시간이 짧을 때 효과적이다. 하지만, CW나 LFM이 아닌 펄스에 대한 처리가 어렵고, 반사된 펄스의 도플러를 파악하기 어려운 단점이 있다.

III. 실험 결과

본 장에서는 제안하는 빔형성기의 성능에 대해 제시한다. 시뮬레이션을 위한 실험환경으로 16개의 삼각 센서로 구성된 삼중 배열을 가정하며, 삼각 센서 간의 간격은 반파장 간격이고 삼각 센서 내부는 1/4 파장 간격으로 설정하였다. 그리고 삼각 센서의 회전각이 1번 삼각 센서부터 16번 삼각 센서까지 단조 증가하는 형태로 시뮬레이션을 설정하였다. 제안하는 빔형성기의 성능 확인을 위해 기존 방법과 비교를 하였다. 여기서 기존 방법은 제안하는 기법에서 WBRCB 대신 Hughes^[1]의 기법을 적용한 결과를 의미하며, 선배열 빔형성 부분만 제외하고 나머지는 모두 동일하게 처리한 결과이다. 그리고 불일치에

대한 민감도를 확인하기 위해 회전각과 실제 센서의 위치에 랜덤으로 오차를 주었다.

Fig. 3(a)와 (b)는 SNR이 20 dB이고 1 s 길이의 CW에 대한 빔출력 결과를 각각 나타낸다. 펄스의 반사파가 60° 위치에 있는 것으로 설정하였으며, Fig. 3(a)는 정합필터 적용 후 빔형성을 처리한 결과이고, Fig. 3(b)는 정합필터를 적용하지 않고 바로 FFT 처리하여 도출한 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 제안하는 기법의 성능이 기존 기법에 비해 우수하며, 인접 방위의 간섭신호를 효과적으로 배제하는 것을 확인할 수 있다. FFT 기법의 경우 노이즈 관점에서 보면, 정합필터 출력 시에 제거되는 노이즈가 제거되지 않아 정합필터 적용 기법 대비 성능이 떨어져 보인다. 이는 Eq. (4)에서 조향공분산행렬을 추정할 때, 불필요한 노이즈 성분이 섞여 가중치 결과가 정합필터 적용 기법 대비 덜 최적화되기 때문이다. 하지만 Fig. 3(a)와 (b)에서 확인할 수 있듯이 실질적으로는 큰 차이가 없다.

Fig. 4(a)와 (b)는 길이가 1 s이고 대역폭이 200 Hz인 LFM 펄스에 대한 빔형성 결과이며, Fig. 3와 마찬가지로

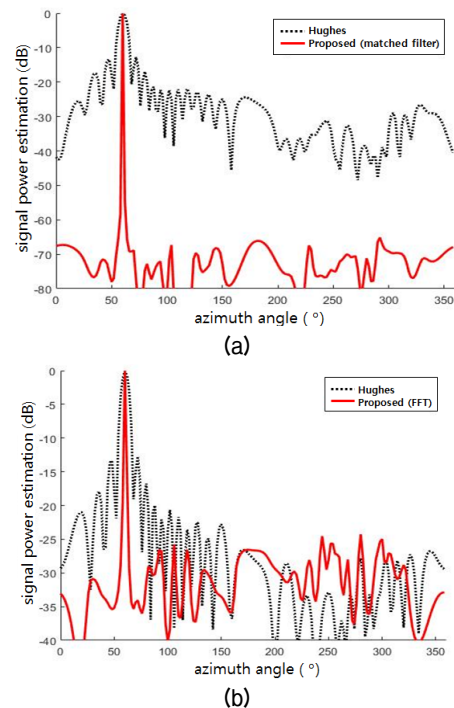


Fig. 3. Beamforming results of CW pulses: (a) matched filter and (b) FFT methods.

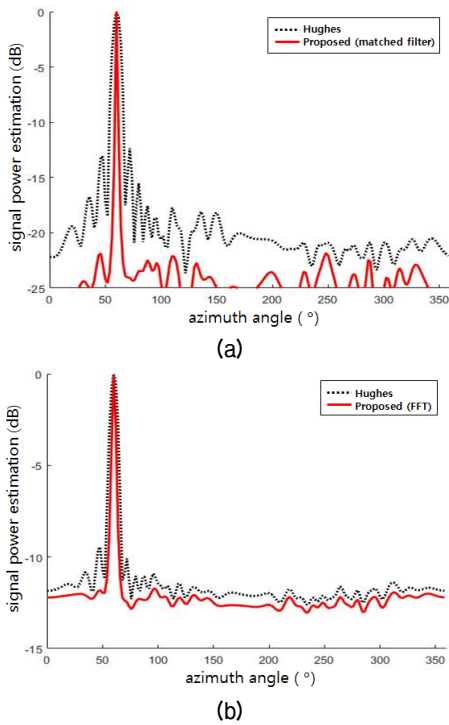


Fig. 4. Beamforming results of LFM pulses: (a) matched filter and (b) FFT methods.

지로 각각 정합필터 적용 기법과 FFT 기법 결과를 나타내었다. 결과를 통해 확인할 수 있듯이 제안하는 기법이 성능적인 측면에서 기존 기법보다 우수하며, 정합필터 적용 기법이 FFT 기법보다 더 명확한 결과를 제시한다. 하지만 FM의 경우 정합필터 적용 시에 정합필터 출력이 임펄스 응답과 같은 형태로 나오는 경우가 많아 실제적으로는 적응 빔형성 적용 시 FFT 샘플 개수를 적절하게 설정해야 하는 어려움이 있다.

Figs. 5와 6은 실제 해상에서 획득한 실험데이터에 제안한 기법을 적용한 결과를 나타낸다. Fig. 5는 길이가 0.1s인 CW 펄스에 대한 거리/방위 추정이며, (a)는 기존 방법의 결과이고 (b)는 제안하는 방법 중 정합필터를 적용한 기법의 결과이다. 각각 그림에서 붉은색으로 마킹한 영역이 탐지된 표적을 의미한다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이 제안하는 기법의 결과가 더 우수한 성능을 보인다. Fig. 6은 길이가 0.3s이고 대역폭이 400 Hz인 LFM 펄스에 대한 거리/방위 결과를 나타낸다. CW와 마찬가지로 실제 해상 데이터에 대해서도 의미 있는 결과를 도출함을 확인할 수 있다.

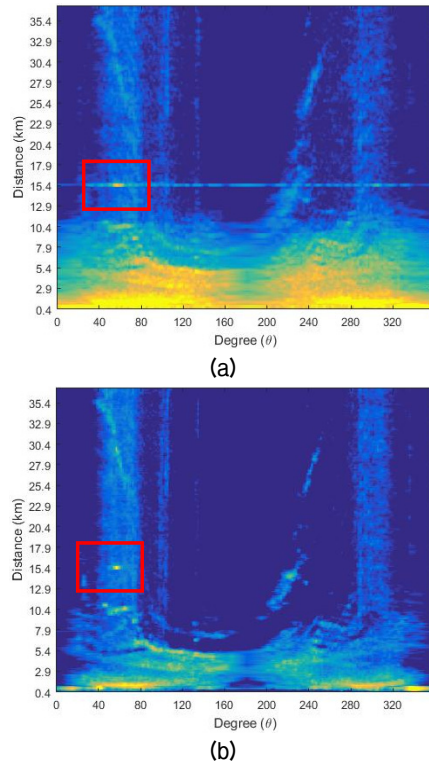


Fig. 5. Range-bearing plots of CW pulses: (a) Hughes's method and (b) proposed method.

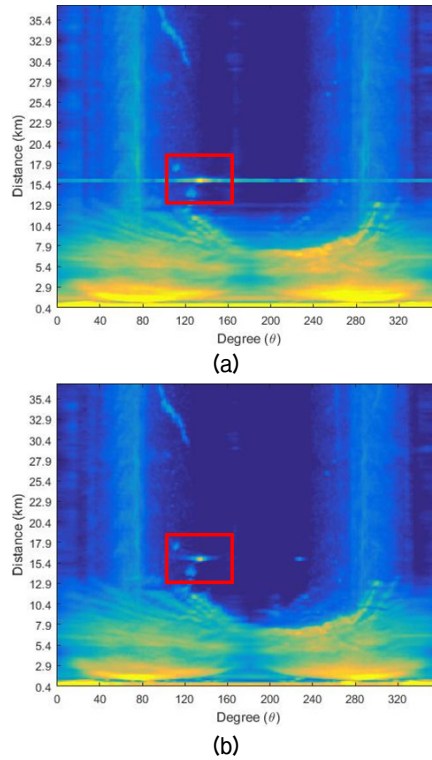


Fig. 6. Range-bearing plots of LFM pulses: (a) Hughes's method and (b) proposed method.

IV. 결 론

본 논문에서는 능동 소나 시스템에서의 삼중 배열 적응 빔형성기를 제안하였다. 제안하는 방법은 센서 출력에 대해 정합필터와 카르디오이드 빔형성, 선배열 빔형성을 순차적으로 적용하는 방법으로, 인접 방위의 간섭 신호를 최소화하는 결과를 도출한다. 시뮬레이션 결과와 실제 해상 실험 데이터를 통해 제안하는 빔형성기가 기존 기법 대비 더 나은 성능을 보임을 확인하였다.

References

1. D.T. Hughes, "Aspects of cardioid processing," Saclantcen Rep., 4-10, 2000.
2. H. Cox, R. M. Zeskind, and M. M. Owen, "Robust adaptive beamforming," IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. ASSP-35, 1365-1376 (1987).
3. J. Li, P. Stoica, and Z. Wang, "On robust capon beamforming and diagonal loading," IEEE Trans. Signal Process. **51**, 1702-1715 (2003).
4. A. Elnashar, S. M. Elnoubi, and H. A. El-Mikati, "Further study on robust adaptive beamforming with optimum diagonal loading multiple broad-band source location using steered covariance matrices," IEEE Trans. Antennas and propag. **54**, 3647-3658 (2006).
5. J. Krolik and D. Swingler, "Multiple broad-band source location using steered covariance matrices," IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. **37**, 1481-1494 (1989).
6. S. D. Somasundaram, "Wideband robust capon beamforming for passive sonar," IEEE J. Ocean. Eng. **38**, 308-322 (2013).
7. 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).
8. J. -K. Ahn, Y. Ryu, S. -Y. Chun, and S. Kim, "Robust adaptive beamforming for triplet sonar arrays" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **36**, 115-122 (2017).

저자 약력

▶ 안 재 균 (Jae-Kyun Ahn)



2007년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학과 학사
2009년 2월: 고려대학교 전자전기공학과 석사
2014년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학과 박사
2014년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원

▶ 류 영 우 (Yongwoo Ryu)



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

▶ 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 책임연구원

▶ 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