

선 배열 소나 시스템을 위한 좌 우 구분 성능 개선 기법

Left right discrimination performance improvement for the line array sonar system

이호준,¹ 안종민,¹ 서종필,¹ 안재균,² 김성일,² 정재학^{1†}

(Ho-Jun Lee,¹ Jong-Min Ahn,¹ Jong-Pill Seo,¹ Jae-Kyun Ahn,² Seong-Il Kim,² and Jae-Hak Chung^{1†})

¹인하대학교 전자공학과, ²국방과학연구소

(Received December 15, 2016; revised December 28, 2016; accepted January 25, 2017)

초 록: 본 논문에서는 활 형상 배열의 빔패턴 주파수 특성을 이용하여 허위표적을 제거함으로써 좌 우 구분 성능을 개선하는 방법을 제안한다. 방위각을 시간 축으로 변환하여 실 표적과 허위표적을 각각 고주파수와 저주파수 성분으로 간주한다. 허위표적의 후역 빔 폭을 이용하여 허위표적 제거용 고역 통과 필터를 설계한다. 전체 빔형성기 출력 파워를 설계한 고역 통과 필터에 통과시켜 허위표적을 제거하여 실 표적을 추출한다. 전산 모의실험에서 제안된 방법의 적용 전후를 비교 분석하여 제안된 방법이 평균 8 dB 이상 허위표적을 감쇄시키는 것을 보였다.

핵심용어: 좌 우 구분, 비선형 배열, 활 형상 배열, 빔패턴 주파수 분해 기법

ABSTRACT: This paper proposes a method to improve the left right discrimination performance by eliminating the imaginary target based on the frequency features of the beam pattern for bow array. The beamwidth of the imaginary target is wider than that of the real target. If an azimuth axis is considered as a time axis, the real and the imaginary targets can be assumed as high and low frequencies, respectively. To eliminate the imaginary target which has a low frequency component, we design a cut-off frequency of the High Pass Filter (HPF) using the back-lobe imaginary beamwidth. The real target is estimated by eliminating the imaginary target by applying HPF to the entire power of the beamformer output. Computer simulations show that the proposed method can increase the left right discrimination performance above 8 dB on average.

Keywords: Left right discrimination, Nonlinear array, Bow array, Beam pattern frequency division method

PACS numbers: 43.60.Fg, 43.30.Wi

1. 서 론

수중에서 목표물의 위치를 탐지하기 위한 수중 감시 시스템 중 하나인 고정형 선 배열은 등 간격 선 배열, 등 간격 원형 배열, 등 간격 사각 배열 등이 있다. 배열을 이용한 빔형성 기법들 중 하나인 DAS(Delay-And-Sum)는 배열의 기하학적 구조로 인해 신호원으로부터 발생된 신호가 센서로 입사할 때 발생하는 각 센서간의 지연시간 차이를 이용하여 신호원의 위치를 추정하는 빔형성 기법이다.^[1] 그러나 등 간격 선 배열

에서는 좌 우의 지연시간이 동일하여 빔패턴이 대칭적으로 형성되기 때문에 좌 우 구분이 어렵다.

이를 해결하기 위해 여러 가지 기법들이 연구되어 왔다.^[2-6] 그 중에 하나인 카디오이드(cardioid) 빔형성 기법은 매우 근접한 센서 쌍을 이용하여 카디오이드 빔형성을 통해 좌 우를 구분한다.^[2] 그러나 카디오이드 빔형성 기법 중 하나인 90°와 270° 카디오이드 빔형성을 하게 되면 선 배열이 배열 양 끝으로 빔형성을 할 경우 이득감쇄가 발생하게 된다. 또한 후면 빔의 이득이 존재하여 허위표적의 각도에 대한 이득값으로 인해 좌 우 구분의 모호성이 여전히 존재하게 된다.

†Corresponding author: Jae-Hak Chung (jchung@inha.ac.kr)
Department of Electronic engineering, Inha University, 100 Inharo, Nam-gu, Incheon 22212, Republic of Korea
(Tel: 82-32-860-7421, Fax: 82-32-865-0480)

좌 우 구분의 모호성을 해결하기 위한 또 다른 기법으로는 비선형 배열을 이용하는 기법이 있다. 고정형 선 배열을 활 형상으로 휘어지게 매설하여 각 센서에 들어오는 신호에 대하여 실 표적과 허위표적에 해당하는 각도에서 지연시간 차이를 발생시킨다. 그 결과로 허위표적의 이득 값이 실 표적에 비해 감소하게 되어 표적의 좌 우를 구별한다.^[3-6]

그러나 활 형상 배열에 대한 빔형성 결과는 실 표적과 허위표적간의 이득차이가 BTR(Bearing Time Recoding)이나 FRAZ(FREQUENCY Azimuth)와 같은 이미지로 볼 때 좌 우 구분이 명확할 만큼 차이가 나지 않으며, 허위표적에 해당하는 각도에서 이득 값이 줄어들게 되지만 방위각 축에서 이러한 이득 값이 실 표적에 비해 넓게 존재하는 현상이 발생하게 된다. 이러한 이유로 좌 우 구분의 모호성이 여전히 존재하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 활 형상 배열의 빔패턴 특징을 이용하여 좌 우 이득 차이를 증폭시킴으로써 좌 우 구분 성능을 향상시키는 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절의 시스템 모델에서 비선형 형상 배열 중 활 형상 배열에 대한 DAS 빔형성 기법을 설명 한 후 III절에서 빔패턴의 허위 표적에 해당하는 후엽의 빔 폭을 이용하여 좌 우 이득차이를 증폭시키는 기법을 제안한다. IV절의 전산 모의실험을 통해 제안된 방법의 검증 및 성능 개선 정도를 보이고 V절에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

센서간의 거리가 d 이고 N 개의 센서로 이루어진 활 형상 배열에서의 원거리 음장 DAS 빔형성 기법은 배열의 각 센서에 들어오는 신호의 지연시간을 이용하여 목표물의 위치를 탐지한다. DAS 빔형성 구조를 Fig. 1에 도식화하였다.

신호원으로부터 발생되어 배열의 입력이 되는 신호를 $s(t)$ 라 하고 다음 식으로 표현된다.

$$s(t) = A(t)e^{j2\pi ft}, \quad (1)$$

여기서 f 는 신호의 주파수이고 $A(t)$ 는 수신 세기이

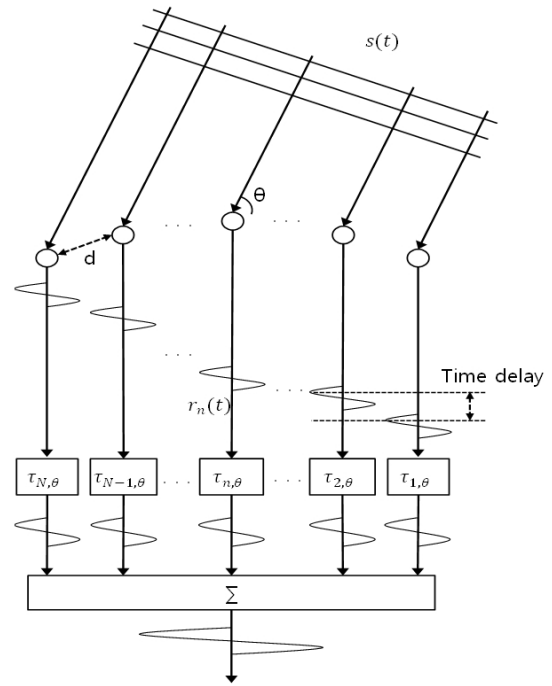


Fig. 1. DAS beamforming.

다. 신호가 들어올 때 배열의 각 센서는 개별적으로 신호를 수신하게 된다. 입력 신호 $s(t)$ 에 대해 배열의 n 번째 센서에 수신된 신호 $r_n(t)$ 는 다음과 같다.

$$r_n(t) = s(t - \tau_{n,\theta}) + n_n(t), \quad (2)$$

여기서 $n_n(t)$ 는 잡음이고 $\tau_{n,\theta}$ 는 신호가 입사각 θ 로 들어올 때 첫 번째 센서 대비 n 번째 센서의 지연시간이다. 원거리 음장 가정에서는 신호원으로부터 발생된 신호가 평면파가 되어 배열로 들어오게 되므로 n 번째 센서의 지연 시간 $\tau_{n,\theta}$ 는 활 형상 배열의 기하학적인 구조에 의해 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\tau_{n,\theta} = (x_n \cos \theta + y_n \sin \theta) / c, \quad (3)$$

여기서 c 는 음파의 속력이고 (x_n, y_n) 는 배열의 n 번째 센서 위치이며 센서의 위치 정보를 알고 있어야 적용할 수 있다. 고정형 선 배열에서는 매설된 센서의 위치를 Eq. (3)에 적용함으로써 입사각 θ 에 대한 활 형상 배열의 지연시간을 얻는다. Eq. (3)으로부터 얻은 지연 시간을 이용하여 각 센서에서 수신된 신

호들에 대해 지연된 시간 차이를 보정한 후 더함으로써 빔형성을 한다. 그러나 신호의 입사각을 알 수 없으므로 전 방위에 대하여 Eq. (3)으로부터 계산한 지연시간을 통해 수신 빔형성기 출력 파워를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$B(\theta, t) = \sum_{n=1}^N r_n(t + \tau_{n,\theta}). \quad (4)$$

활 형상 배열에서는 휘어진 정도가 클수록 실 표적에 해당하는 각도에 대한 지연시간과 허위표적에 해당하는 각도에 대한 지연시간 사이의 차이가 커져서 좌 우 이득차이가 커지게 된다. 그러나 휘어진 정도가 증가 될수록 배열의 길이는 줄어들어 배열 양 끝에 놓이게 되는 신호원들이 기존 보다 많아지게 되므로 탐지 범위가 줄어들게 된다. 그러므로 시스템 상에서 요구되는 탐지범위에 맞게 휘어진 정도를 조정해야하며 이는 활 형상 배열을 통해 얻을 수 있는 좌 우 이득차이가 한정적임을 의미한다.

활 형상 배열의 빔패턴은 허위표적의 배열 이득이 해당 각도에서 넓게 존재하는 현상을 갖는다. 이러한 현상은 좌 우 이득차이가 작을 때 더욱 심화되며 좌 우 구분의 모호성을 더욱 증대시킨다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 좌 우 이득차이를 증대시키는 기법을 제안한다.

III. 제안된 방법

활 형상 배열에서 빔형성 하고자 하는 각도에서의 빔 폭은 배열의 센서 개수에 반비례한다. 따라서 센서 개수가 많을수록 좁은 범위의 각도에서 이득 값이 나타나게 된다. 그러나 허위표적의 경우는 활 형상 배열이 휘어진 정도에 비례하여 빔 폭이 결정되며 실 표적에 비해 허위표적의 이득이 해당 각도에서 넓게 존재하는 특징을 갖고 있다.

Fig. 2는 활 형상 배열의 빔패턴 특징을 나타낸 예로 신호가 90°에서 들어올 때의 빔패턴이다. 실 표적의 이득 값은 89°~91° 사이인 비교적 좁은 구간에 존재하며 허위표적의 이득 값은 230°~310° 사이인 실 표적과 비교해 넓은 구간에 존재한다. 방위각을 시

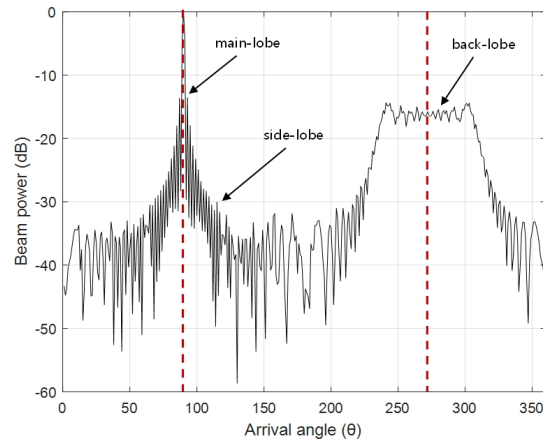


Fig. 2. Bow array beam pattern for incident degree = 90°.

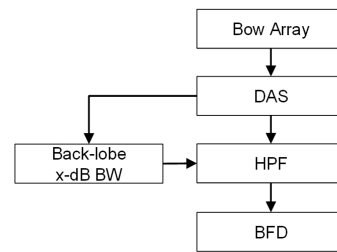


Fig. 3. Block diagram of the proposed method.

간 축으로 바꾸어 생각한다면 허위표적은 실 표적 빔패턴에 비해 완만하게 변화하므로 주파수 관점에서 보면 저주파수 성분으로 간주 될 수 있다. 따라서 빔패턴에서 저주파수 성분으로 가정한 허위표적을 고주파수 성분으로 가정한 실 표적으로부터 제거할 수 있다면 실 표적만 남아 있게 되므로 좌 우 구분의 모호성을 제거할 수 있다.

본 논문에서는 방위각을 시간 축으로 변환하여 허위표적의 주파수를 추정하여 허위표적을 제거함으로써 좌 우 구분 성능을 향상시키는 빔패턴 주파수 분해 기법(Beam pattern Frequency Division, BFD)을 제안하며 제안된 방법의 블록선도를 Fig. 3에 나타내었다.

활 형상 배열에서 DAS 빔형성 기법을 통해 빔형성 기법을 통해 빔형성기 출력 파워 $B(\theta, t)$ 을 얻는다. 앞서 설명하였듯이 빔형성기 출력 파워 $B(\theta, t)$ 는 허위표적이 퍼지는 특징을 갖고 있으므로 저주파수 성분을 추정하여 이를 제거하여야 한다.

허위표적의 저주파수 성분은 후엽의 빔 폭으로부터

터 계산한다. Fig. 3의 블록선도에서 Back-lobe x-dB BW은 허위표적에 해당하는 각도의 이득 값으로 부터 x-dB 만큼 감소된 빔패턴의 빔 폭을 의미한다. 여기서 얻은 빔 폭을 ψ_{x-dB} 라고 하면 허위표적에 대한 주파수는 다음과 같이 추정된다.

$$f_{cut-off} = \frac{2\pi}{\psi_{x-dB}}, \quad (5)$$

Eq. (5)에서 얻은 허위표적의 주파수를 고역 통과 필터의 차단 주파수로 설정하여 필터를 설계하고 이를 $h_{HPF}(\theta)$ 라 한다.

DAS 빔형성을 통해 얻은 빔형성기 출력 파워 $B(\theta, t)$ 와 Eq. (5)을 통해 얻은 허위표적의 주파수를 이용하여 설계한 고역 통과 필터에 통과시키면 저주파수 성분으로 가정한 허위표적을 제외한 실 표적을 추정할 수 있으며 실 표적의 빔형성기 출력 파워 $B_{real}(\theta, t)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$B_{real}(\theta, t) = B(\theta, t) * h_{HPF}(\theta). \quad (6)$$

위 식으로부터 저주파수 성분을 소거함으로써 허위 표적이 제거되고 실 표적만 남게 되어 좌 우 구분의 모호성을 제거한다.

IV. 전산 모의실험

앞서 좌 우 구분의 모호성을 제거하기 위해 활형상 배열에 대하여 DAS 빔형성 기법을 수행하고 DAS 빔형성을 통해 얻은 빔형성기 출력 파워로부터 허위 표적을 제거하는 방법을 제안하였다. 본 절에서는 제안된 방법을 검증하기 위한 전산 모의실험을 수행하였으며 실험환경은 Table 1에 나타내었다.

첫 번째 실험은 다음 순서로 진행한다. 원거리 표적이 0° 에서 90° 로 이동할 때, 등 간격 선 배열과 활형상 배열에 대해 DAS 빔형성의 결과를 BTR을 통해 보인다. 활형상 배열에 대하여 90° 에서 얻어진 빔패턴을 통해 차단주파수를 구한 뒤 제안된 방법을 적용한 결과를 BTR을 통해 보인다.

두 번째 실험은 활형상 배열에서 움직이는 다중

Table 1. Simulation conditions.

	Number of sensor	Sensor distance	Sound speed
Simulation 1	60	$\lambda/2$ (150 Hz)	1,500 m/s
	Signal frequency	Number of beam	
	100Hz	300 (Cosine beam)	
Simulation 2	Number of target		
	3		
	Target1 degree	Target2 degree	Target3 degree
	30° to 80°	90° to 105°	155° to 135°

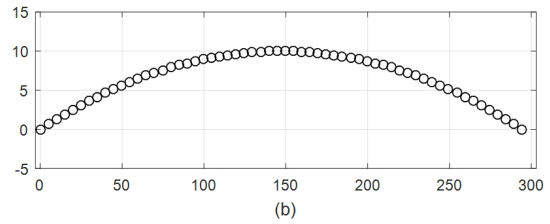
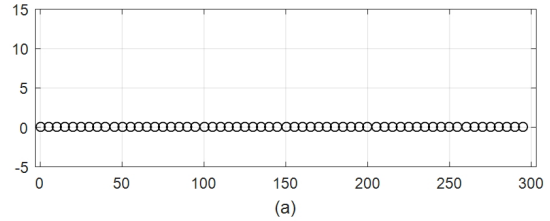


Fig. 4. (a) Uniform Line Array (ULA), $N = 60$, $d = \frac{\lambda}{2}$, frequency = 150 Hz. (b) bow array, $N = 60$, $d = \frac{\lambda}{2}$, frequency = 150 Hz, height = 10 m.

원거리 표적에 대하여 제안된 방법의 적용 전 후를 BTR을 통해 비교한다.

Fig. 4는 첫 번째 실험의 등 간격 선 배열과 활형상 배열을 나타내었다. 활형상 배열의 곡률을 기준 센서인 원점에 위치하는 센서로부터 y축 방향으로의 차이로 나타내고 10 m 차이가 나도록 구성하였다.

Fig. 5는 Fig. 4(a)에 나타난 등 간격 선 배열에 대하여 DAS 빔형성을 수행하여 얻은 BTR을 나타낸 것이다. 실 표적에 해당하는 각도에서 35.6 dB의 이득 값을 갖고 허위표적에 해당하는 각도에서 동일한 이득인 35.6 dB를 갖는다. 실 표적과 허위표적이 대칭적으로 존재하고 좌 우 이득차이가 존재하지 않으므로 좌 우 구분이 어려움을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 4(b)에 나타난 활형상 배열에 대한

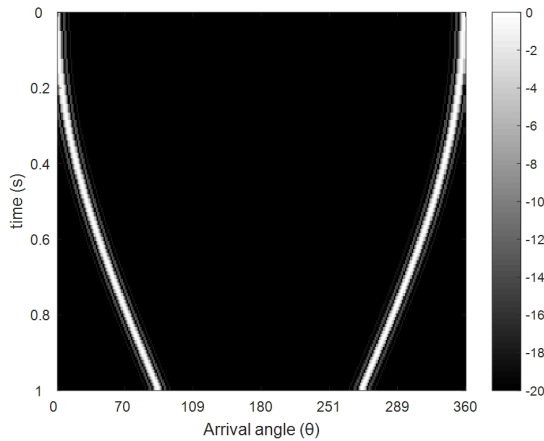


Fig. 5. ULA, DAS BTR.

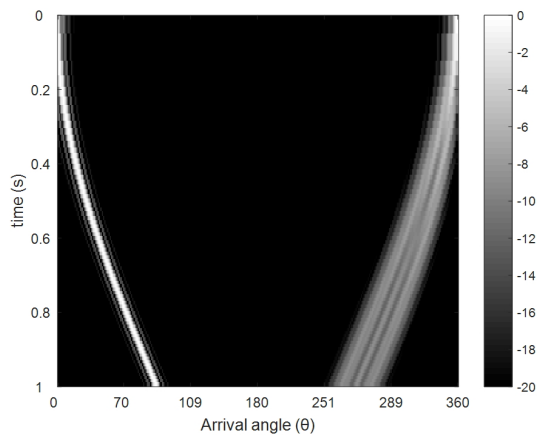


Fig. 6. Bow array, DAS BTR.

BTR이다. 등 간격 선 배열의 BTR인 Fig. 5와 비교하였을 때 허위표적에 해당하는 각도에서 이득차이가 존재함을 알 수 있다. 실 표적에 해당하는 각도에서는 등 간격 선 배열과 동일하게 35.6 dB의 이득을 갖고 허위표적에서는 최소 26.7 dB, 최대 35.6 dB 그리고 평균 29.6 dB의 이득을 갖는다. 배열 양 끝 부분을 제외한 각도에서 좌 우 이득차이가 존재하며 최소 0 dB, 최대 8.9 dB 그리고 평균 6 dB 만큼 등 간격 선 배열에 비해 좌 우 구분 성능이 향상되었음을 볼 수 있다. 그러나 활 형상 배열의 빔형성기 출력 파워는 Fig. 6에서 보는바와 같이 허위표적의 빔 이득이 넓은 각도에 존재하여 좌 우 구분의 모호성이 존재한다. 표적의 위치가 90°에 있을 경우 허위표적인 260~280°에서도 신호가 검출되어 270°에 근거리 표적이 존재한다고 판단할 수 있음을 알 수 있다.

Table 2. Back-lobe x-dB beamwidth (Unit: rad).

Height	ψ_{3dB}	ψ_{6dB}	ψ_{9dB}
10 m	0.4995	0.5684	0.6383

본 논문에서 제안한 방법의 성능평가를 위해 전산 모의실험을 수행한다. Table 2는 Fig. 4(b)에 나타난 높이 10 m 활 형상 배열에 대하여 원거리 표적이 90°에 있는 경우에 대한 빔패턴의 허위표적인 3 dB, 6 dB, 9 dB 후엽 빔 폭을 나타낸 것이다. 고역 통과 필터의 차단주파수를 설정하기 위하여 이 값들을 Eq. (5)에 대입한다. 본 논문에서는 계산된 차단주파수와 감쇠비 -20 dB를 갖는 Chebyshev 필터를 사용하였다. 설계된 고역 통과 필터를 사용하여 Eq. (6)을 통해 허위표적을 제거하고 실 표적을 추정한다.

Fig. 7은 제안된 방법의 기준인 원거리 표적이 90°에 위치하였을 때의 빔패턴을 설계된 고역 통과 필터에 통과시켜 실 표적을 추정한 결과이다. 실선은 기존의 DAS 결과를 나타낸 것이고 대시는 3 dB 후엽 빔 폭을 이용하여 실 표적을 추정한 것이다. 제안된 방법을 적용하기 전의 좌 우 이득차이인 8.9 dB에서 19 dB로 이득차이가 증가하여 10.1 dB 만큼 이득이 발생하여 좌 우 구분 성능이 개선된다.

Fig. 8은 6 dB 후엽 빔 폭으로 제안한 방법을 수행하여 얻은 결과이다. 실선은 기존의 DAS 결과를 나타낸 것이고 대시는 6 dB 후엽 빔 폭을 이용하여 실 표적을 추정한 것이다. 제안된 방법의 적용으로 9.7 dB 만큼 좌 우 이득차이가 증가한다. 그러나 78°~80° 그리고 101°~103°에 해당하는 부엽 레벨이 증가하여 성능이 떨어진다. Figs. 7과 8을 비교하면 3 dB 후엽 빔 폭을 이용한 결과는 6 dB 후엽 빔 폭을 이용한 결과에 비해 부엽 성능에 영향을 덜 미치는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 원거리 표적이 0°~90°에 존재할 때 제안된 방법을 적용하여 좌 우 구분 성능이 개선된 정도를 나타낸 것이다. 고역 통과 필터는 원거리 표적이 90°에 존재할 때 빔패턴의 3 dB, 6 dB, 9 dB 후엽 빔 폭을 이용하여 설계한 것을 사용한다. 활 형상 배열의 기하학적 구조로 인해 0°~90°와 90°~180°의 빔패턴은 서로 대칭이다. 원거리 음장에서 지연시간은 Eq. (3)에 의해 결정되는데 0°~180°와 180°~360°의

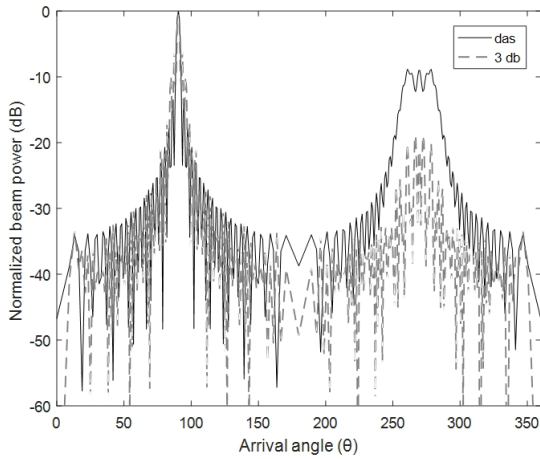


Fig. 7. Result of the proposed method using ψ_{3-dB} for bow array, incident degree = 90° .

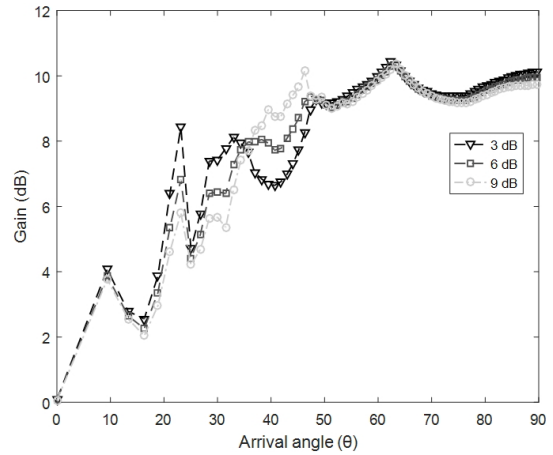


Fig. 9. Gain of the proposed method for bow array, incident degree = $0^\circ \sim 90^\circ$.

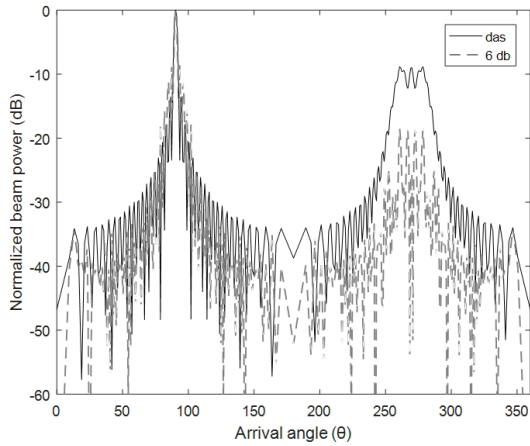


Fig. 8. Result of the proposed method using ψ_{6-dB} for bow array, incident degree = 90° .

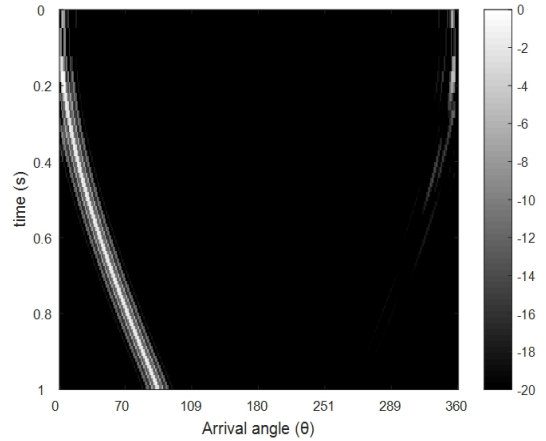


Fig. 10. Result of the proposed method using the ψ_{3-dB} for bow array.

경우에는 서로 180° 만큼 차이 나므로 해당 각도에서는 부호가 반대이고 동일한 지연시간이 계산된다. 그 결과 위상이 180° 차이 나고 동일한 이득을 얻으므로 해당각도에서는 대칭적인 빔패턴이 얻어진다. 따라서 원거리 표적이 $0^\circ \sim 90^\circ$ 인 경우에 대하여 좌우 구분 성능을 분석한다. 역삼각형 마커는 3 dB, 사각형 마커는 6 dB 그리고 원형 마커는 9 dB 후엽 빔 폭을 이용한 결과이다. 3 dB, 6 dB, 9 dB 후엽 빔 폭을 이용한 결과 중 $35^\circ \sim 49^\circ$ 를 제외한 구간에서 3 dB 후엽 빔 폭을 이용하여 제안된 방법을 수행하였을 때의 좌우 구분 성능이 제시된 것 중 가장 우수하며 평균 이득 값은 각각 8.1 dB, 7.9 dB, 7.8 dB이다.

Fig. 10은 Fig. 6에 나타난 활형상 배열의 BTR을 3 dB

후엽 빔 폭을 이용한 제안된 방법을 수행한 결과를 BTR로 나타낸 것이다. 배열 양 끝 부분 외의 각도에서 허위표적이 제거되어 좌우 구분 모호성이 Fig. 6에 비해 개선되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 두 번째 실험인 활형상 배열에서 움직이는 다중 원거리 표적에 대한 DAS 빔형성 결과의 BTR이다. 첫 번째 표적은 30° 에서 80° , 두 번째 표적은 90° 에서 105° 그리고 마지막 표적은 155° 에서 135° 로 이동한다. 첫 번째 표적에 대한 허위표적이 330° 에서 280° 로 실 표적에 비해 넓은 각도에서 존재하여 발생하고 두 번째, 세 번째 표적에 대한 허위표적도 실 표적과 대칭인 각도에서 실 표적에 비해 넓은 각도에서 이득이 존재한다. 따라서 첫 번째와 세 번째

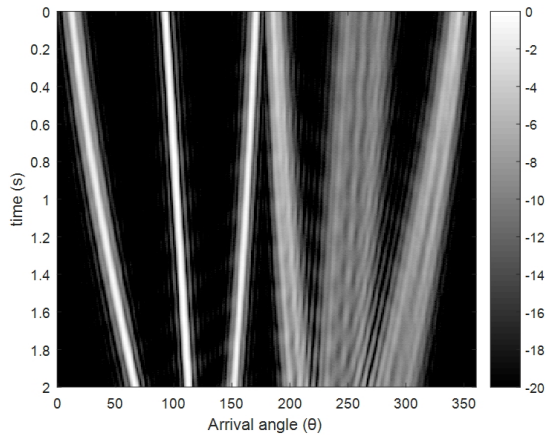


Fig. 11. Multi target DAS BTR for bow array.

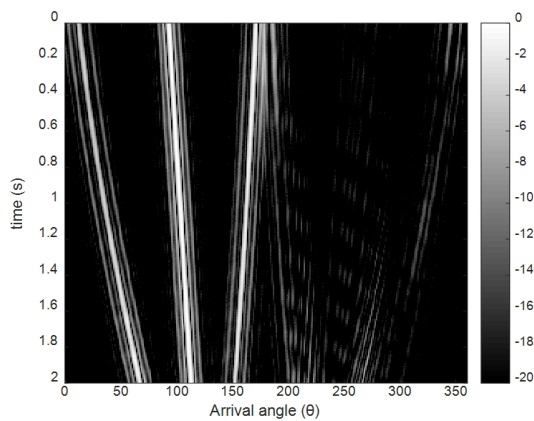


Fig. 12. Result of the proposed method using the ψ_{3-dB} for bow array.

표적의 허위표적은 활 형상 배열로부터 원거리에서부터 근접해오는 신호로 판단할 수 있으며 두 번째 표적의 허위표적은 근접해 있는 신호로 판단 할 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 11에 나타낸 활 형상 배열의 BTR을 3 dB 후엽 빔 폭을 이용한 제안된 방법을 수행한 결과를 BTR로 나타낸 것이다. Fig. 10에서 허위표적의 이득을 줄임으로써 좌 우 구분의 모호성이 Fig. 10에 비해 개선되었음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

활 형상 배열의 DAS 빔형성 결과는 실 표적에 해당하는 각도에서의 이득과 허위표적에 해당하는 각도에서의 이득간의 차이가 크지 않으며 허위표적에 해당하는 이득 값이 실 표적에 비해 여러 각도에서

퍼져 보이기 때문에 좌 우 구분의 모호성이 존재한다. 그러나 방위각을 시간 축으로 바꾸면 넓은 각도에서 퍼져 보이는 허위표적은 저주파수 성분으로 가정될 수 있고 좁은 각도에서 이득 값을 갖는 실 표적은 고주파수 성분으로 가정될 수 있다. 따라서 후엽 빔 폭으로부터 추정된 허위표적의 저주파수 성분을 DAS 결과로 얻은 빔패턴으로부터 제거함으로써 실 표적을 추정한다. 제안된 방법의 결과로 좌 우 이득 차이가 기존보다 증가되어 좌 우 구분 성능이 개선된다. 이를 보이기 위해 전산 모의실험을 통해 허위 표적을 제거하는 실험을 수행하였다. 원거리 표적이 0° ~ 90°에 존재할 때 기존의 좌 우 이득차이는 최대 8.9 dB, 평균 6 dB이다. 제안된 방법을 적용한 결과 좌 우 이득차이를 최대 10.1 dB, 평균 8.1 dB 만큼 증가시켜 좌 우 구분 성능이 개선됨을 검증하였다.

감사의 글

본 논문은 2016년도 국방부의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: UD160003DD).

References

1. L. C. Godara, *Smart Antennas* (CRC Press, Boca Raton, 2004) pp.8-25.
2. Y. J. Son, S. Y. Chun and K. M. Kim, "Signal processing for improvement of resolution and direction ambiguity of source in line array" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **22**, 482-488 (2003).
3. S. I. Kim, K. C. Dho, W. T. Oh, D. H. Youn and C. Y. Lee, "A beamforming method for a perturbed linear towed array" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **21**, 478-484 (2002).
4. R. A. Wagstaff and P. Zanasca, "Spatial-gain improvement resulting from left/right discriminating elements of an underwater towed array," *SACLANT ASW Res. Cen.* **15**, 50 (1981).
5. W. S. Hodgkiss, "The effects of array shape perturbation on beamforming and passive ranging," *IEEE J. Oceanic Eng.* **8**, 120-130 (2003).
6. D. M. Caveny, D. R. Del Balzo, J. H. Leclere, and G. E. Loup, "Performance of sinusoidally deformed hydrophone line arrays," *J. Acoust. Soc. Am.* **104**, 2203-2209 (1998).

저자 약력

▶ 이 호 준 (Ho-Jun Lee)



2016년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사
2016년 3월 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야>수중통신, MIMO, 5G 이동통신

▶ 안 종 민 (Jong-Min Ahn)



2015년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사
2015년 3월 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야>수중통신, OFDM시스템, 5G 이동통신

▶ 서 종 필 (Jong-Pill Seo)



2009년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사
2011년 2월: 인하대학교 전자공학과 석사
2011년 3월 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 박사과정
<관심분야>OFDM, MIMO, LTE-Advanced

▶ 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
<관심분야>수중음향

▶ 김 성 일 (Seong-Il Kim)



1986년 2월: 서울대학교 해양학과 학사
1988년 2월: 서울대학교 해양학과 석사
2002년 University of California, San Diego Scripps Institution of Oceanography 박사
1990년 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원
<관심분야>수중음향

▶ 정 재 학 (Jae-Hak Chung)



1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 학사
1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 석사
2000년: University of Texas at Austin 전기 전산학과 박사
2000년 ~ 2001년: Post doctoral fellow, University of Texas at Austin
2001년 ~ 2005년: 삼성종합기술원 수석연구원
2005년 ~ 현재: 인하대학교 정교수
<관심분야>Cognitive radio, 차세대 무선 이동 통신, MIMO-OFDM, UWB