

논문 2016-53-6-16

# 방위각 CPA를 이용한 수중표적의 CPA 거리와 속도의 비 추정

## ( Estimating The Ratio of The CPA Distance to Velocity for Underwater Target using Bearing CPA )

김정훈\*, 윤경식\*\*, 서익수\*\*\*, 이균경\*\*\*\*

( JungHoon Kim, KyungSik Yoon, IkSu Seo, and KyunKyung Lee<sup>Ⓞ</sup> )

### 요약

본 논문에서는 등속 직선 기동하는 수중표적의 CPA 상황에서의 방위각 정보를 이용하여 표적의 CPA 거리와 속도의 비를 추정하는 기법을 제시한다. 선행 연구를 통해 근접센서를 이용한 포락선 CPA 기법으로 이 값을 추정하는 방안이 제시되었으나, 이는 표적과 수신 센서의 거리가 가깝거나 다중경로로 인한 간섭효과가 커질 경우 성능이 떨어지는 문제를 가진다. 이에 이를 극복하는 방안으로 표적 방위각 정보를 이용하는 방위각 CPA 기법을 제시한다.

### Abstract

In this paper, we present a method for estimating the ratio of CPA distance to velocity of underwater target using target bearing information in CPA situation. This ratio can be estimated by previous research which is Envelope CPA using proximity sensor but it has low performance if the target is close to receiver sensor or bigger interference caused by multi-path effects. Therefore we propose a Bearing CPA technique using a target bearing information as a way to overcome.

**Keywords :** CPA(Closest Point of Approach), multi-path environment, underwater target, bearing information

### I. 서론

현대의 수중표적 탐지에 대한 연구는 수신센서의 다양화, 수중표적의 기술발전, 국제 정세의 변화 등으로 인해 보다 다양하고 세분화되어 진행되고 있다. 그 중 배경소음이 높은 연안에서의 표적탐지는 주요 연구과제 중 하나이며, 이에 따라 연안에서의 탐지에 이점을 가

지는 수중센서망 기술에 대한 연구가 저기능 근접센서<sup>[1]</sup>에서부터 고기능 배열센서<sup>[2]</sup>까지 다양하게 수행되고 있다. 그 중 참고문헌<sup>[3]</sup>에서는 분산센서단에서 수중표적의 CPA 거리( $d$ )와 속도( $v$ ), 방위각, 깊이를 추정하는 기법이 제시되었으며 이는 지향성 센서를 센서단으로 하며 계층적 신호처리 구조를 가진다. 계층적 신호처리에서  $d$ 와  $v$ 를 추정하기 위해서는 우선적으로 포락선 CPA를 통해 CPA 거리와 속도의 비( $r = d/v$ )를 추정하게 된다. 이때 포락선 CPA는 표적 방사소음의 에너지를 이용하는 기법이기 때문에 다중경로에 의한 간섭효과가 큰 연안에서는 성능감소가 다소 있을 수 있으며, 또한 CPA 거리가 작을 경우 발생하는 표적 방사소음의 수학적 모델과 수신 신호의 에너지와의 차이에 의해서도 성능 감소가 발생할 수 있다. 이에 본 논문에서는 수중표적의 CPA 거리와 속도를 추정하기 위한 중요 매개변수인  $r$ 을 추정하는 새로운 기법인 방위각 CPA를 제시한다.

\* 학생회원, \*\*\*\* 정회원 경북대학교 전자공학부  
(Development of Electrical Engineering, Kyungpook National University)

\*\* 정회원, 김천대학교 언어치료학과  
(Development of Speech Therapy, Gimcheon University)

\*\*\* 정회원, 국방과학연구소 소나체계개발단 (SONAR Systems PEO, Agency for Defense Development)

Ⓞ Corresponding Author (E-mail : charles86@live.co.kr)

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다.

(계약번호 UD130007DD).

Received : November 20, 2015 Revised : May 12, 2016

Accepted : May 27, 2016

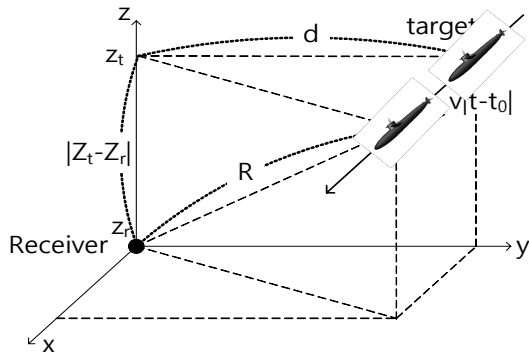


그림 1. 수신기와 표적 간 기하학적 구조  
Fig. 1. Geometry between receiver and target.

## II. 본 론

### 1. 포락선 CPA의 $r$ 추정 성능 감소

수신 센서에 수신되는 표적 방사소음의 에너지는 거리의 제곱에 반비례하게 된다. 포락선 CPA는 이와 같은 간단한 물리적 현상을 이용하여 표적의  $r$ 과 CPA 시간( $t_0$ )을 추정하는 기법이다<sup>[1]</sup>. 다음 식 (1)은 단일 표적의 방사소음 에너지 모델이 거리의 제곱에 반비례하는 것을 나타내고 있으며  $\Pi$ 는 방사소음 에너지,  $\rho$ 는 유체의 임피던스,  $c$ 는 음파의 속도,  $S_0$ 는 음파의 초기 방사 에너지,  $R$ 은 거리를 의미한다.

$$\Pi = \frac{\rho c S_0}{4\pi R^2} \propto \frac{1}{R^2} \quad (1)$$

표적이 등속, 직선운동을 하며  $x$ 축을 따라 이동하는 상황에 대한 기하학적 구조를 그림 1에 나타내었으며 이 때  $Z_r$ 은 수신기의 수심을 의미하고  $Z_t$ 는 표적의 수심을 의미한다. 등속운동을 가정하므로 CPA 시점( $t_0$ )에서 임의의 시점( $t$ )까지의 표적의 이동거리는  $v|t - t_0|$ 로 나타낼 수 있으며 표적과 수신기의 거리( $R$ )는 피타고라스 정리에 의해 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$R(t) = \sqrt{v^2(t - t_0)^2 + d^2 + (Z_r - Z_t)^2} \quad (2)$$

식 (2)의  $(Z_r - Z_t)$ 는 식 (3)의 조건이 충족될 경우 생략 가능하며 이에 표적의 방사소음 에너지는 식 (4)를 따른다.

$$d \gg |Z_r - Z_t| \quad (3)$$

$$\Pi \propto \frac{1}{(t - t_0)^2 + \left(\frac{d}{v}\right)^2} \quad (4)$$

표적의 방사 소음의 초기 에너지 준위를 알 수 없기 때문에 수신 신호의 에너지 모델 수식은 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며 이 때  $a$ 는 표적의 초기 에너지 준위를 나타낸다.

$$E^*(t) = \frac{a}{(t - t_0)^2 + (r)^2} \quad (5)$$

식 (5)를 통해 수신 신호의 에너지 모델은  $r(=d/v)$ 과  $t_0$  그리고  $a$ 를 변수로 하는  $t$ 에 관한 함수로 나타난다. 실제 수신된 신호를 통해 구하는 에너지의 경우 다음 식 (6)을 통해 구해지며 이 때  $N$ 은 샘플수이다.

$$\tilde{E}(t) = \sum_{n=(t-1)N+1}^{tN} \{f(n)\}^2 \quad (6)$$

식 (6)을 통해 획득한 에너지 값이 있기 때문에 식 (5)의 에너지 모델의 변수를 변화시켜 비교함으로써 각 변수를 쉽게 추정할 수 있다. 추정 오차를 줄이기 위해 관측된 구간의 모든 정보를 이용하여 수신 신호의 에너지와 에너지 모델 간의 차이가 최소가 되는  $r$ 과  $t_0$ ,  $a$ 의 값을 추정하게 되며 이는 식 (7)과 같은 3차원 탐색 알고리즘이 사용된다.

$$[\hat{r}, \hat{t}_0, \hat{a}] = \underset{r, t_0, a}{\operatorname{argmin}} \int_{t=0}^T [\tilde{E}(t) - E^*(t; r, t_0, a)] \quad (7)$$

식 (7)과 같이 수신 신호의 에너지 변화를 이용하여 파라미터를 추정하는 기법을 포락선 CPA라 하며 위의 가정들이 지켜지는 상황에서 뛰어난 신뢰성을 가진다. 하지만 실제 해상환경에서 식 (3)의 조건을 만족하지 못하는 경우가 발생할 수 있으며 이러한 경우 실제 수신 신호로부터 획득한 에너지와 에너지 모델간의 차이가 커지게 되어 추정성능이 저하된다. 또한 식 (1)은 직접경로를 통해 수신되는 표적소음만을 고려한 모델이며 이로 인해 포락선 CPA는 다중경로에 의한 간섭효과에 취약한 성능을 가지게 된다.

## 2. 방위각 CPA

지향성 센서를 사용하는 경우 표적의 방위각 정보를 쉽게 획득할 수 있는 장점을 가진다. 본 논문에서 가정하는 지향성 센서는 DIFAR 센서이며 이는 내부적으로 표적의 방사소음을 수신하는 음향센서와 센서축의 자북 기준 위치를 측정하는 자기센서로 이루어진다. 음향센서의 경우 하나의 무지향성 센서와 두 개의 지향성 센서로 구성되며 지향성 센서는 동-서 방향(x축)과 남-북 방향(y축)으로 지향된 센서로 구성된다. x축과 y축 지향성 센서의 수신 신호는 각각 식 (8)과 (9)와 같으며  $H_d \sin(2\pi f_1 t + \psi)$ 는 하이드로폰을 거치며  $\psi$ 만큼 위상 변이한  $f_1$ 의 주파수를 가지는 입사 신호,  $\theta$ 는 탐지 축에 대한 신호의 방위각을 나타낸다. 두 식 모두 탐지 축은 y축을 의미하며 방위각의 경우 수평 방위각을 의미한다. 각 지향성 센서가 수평면과 평행한 평면상에 설치되기 때문에 수직 방위각에 대해서는 동일한 감쇄를 가지므로 이는 고려하지 않는다.

$$s_x = H_d \sin(2\pi f_1 t + \psi) \sin(\theta) \quad (8)$$

$$s_y = H_d \sin(2\pi f_1 t + \psi) \cos(\theta) \quad (9)$$

식 (8)과 (9)를 통해  $s_x/s_y$ 는  $\tan(\theta)$ 가 되는 것을 확인할 수 있으며 이는 탐지 축에 대한 신호의 방위각을 다음 식 (10)을 통해 구할 수 있음을 나타낸다. 이 때  $S_x(f_1)$ 과  $S_y(f_1)$ 는 각각 식 (8)과 (9)의 주파수  $f_1$ 에 해당하는 푸리에 변환(Fourier Transform) 값이다.

$$\tilde{\theta} = \tan^{-1} \frac{|S_x(f_1)|}{|S_y(f_1)|} \quad (10)$$

식 (10)을 이용해 구한 값은  $[0, 90]$ 의 범위를 가지기 때문에 무지향성 센서와 지향성 센서들 간의 위상차를 이용해 입사각의 사분면을 결정하면 탐지 축 기준 표적의 방위각을 구할 수 있다. 이 후 자기 센서의 값을 이용해 자북 기준 표적의 방위각을 최종적으로 구할 수 있다<sup>[4-5]</sup>.

전술한 바와 같이 표적의 수직 방위각에 따른 각 지향성 센서의 감쇄는 동일하기 때문에 방위각 정보는 표적의 고각에 따른 추정 성능에 차이가 없다. 즉 식 (3)과 같은 조건을 만족하지 않아도 된다. 또한 다중경로에 의한 간섭효과가 있는 경우라도 x축 지향 센서와 y

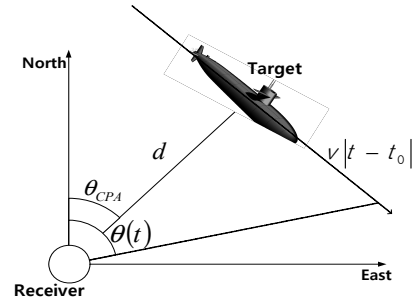


그림 2. 방위각 관점의 수신기와 표적 간 기하학적 구조  
Fig. 2. Geometry between receiver and target in azimuth perspective.

축 지향 센서에 서로 다른 경로를 거친 신호가 수신되는 것이 아니기 때문에 방위각 정보를 추정하는데 있어서 영향을 받지 않는다. 이는 방위각 정보를 이용하여  $r$ 을 추정할 경우 포락선 CPA가 가지는 단점을 극복할 수 있음을 나타낸다. 표적의 방위각과  $r$ 의 관계는 다음 그림 2의 기하학적 구조를 통해 알 수 있다.

그림 2를 통해 표적의 방위각과  $r$ 의 관계는 CPA 시점을 기준으로 삼각함수로 표현할 수 있음을 알 수 있다.  $t$ 시점의 표적의 방위각  $\theta(t)$ 와 CPA 시점의 표적의 방위각  $\theta_{CPA}$ 의 차이  $\theta(t) - \theta_{CPA}$ 의 탄젠트 값은 CPA 거리  $d$ 와  $(t - t_0)$ 시간동안 표적의 이동거리  $v(t - t_0)$ 의 비인  $v(t - t_0)/d$ 로 나타낼 수 있으며 이는 다음 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta^*(t) = \tan^{-1} \left( \frac{t - t_0}{r} \right) + \theta_{CPA} \quad (11)$$

수신된 신호로부터 획득한 방위각 정보와 식 (11)에 나타낸 방위각 모델의 차를 최소화하는  $r$ 과  $t_0$ 와  $\theta_{CPA}$  값은 관측된 구간에 대해 식 (12)와 같이 3차원 탐색 알고리즘을 통해 쉽게 구할 수 있다.

$$[\hat{r}, \hat{t}_0, \hat{\theta}_{CPA}] = \underset{r^*, t_0^*, \theta_{CPA}^*}{\operatorname{argmin}} \int_{t=0}^T [\tilde{\theta}(t) - \theta^*(t; r^*, t_0^*, \theta_{CPA}^*)] \quad (12)$$

## III. 실험

### 1. 모의실험

#### 가. 신호합성

제안하는 기법의 성능을 검증하기 수신신호를 합성한다. 백색 가우시안 잡음(White Gaussian Noise)을 표적의 주파수 모델을 나타내는 필터<sup>[6]</sup>와 주변소음을 나

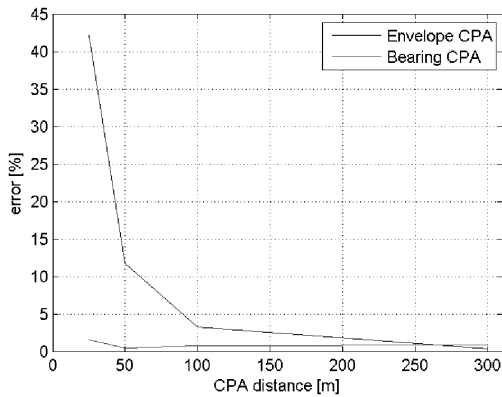


그림 3. CPA 거리에 따른 추정 오차  
Fig. 3. Estimation error of CPA distance.

타내는 필터<sup>[7]</sup>를 통과 시켜 표적신호와 주변 소음을 합성한다. 합성된 표적신호는 추가적으로 원하는 토널 성분을 첨가하여 거리에 따른 주파수 감쇠를 고려하여 채널 필터를 통과시킨 뒤 도플러와 다중경로를 고려하여 신호를 리샘플링하고 시간 지연 시켜준다. 이후 최종적으로 획득한 표적신호와 주변소음을 더하여 합성신호를 생성한다. 수신 센서는 DIFAR로 가정하며 표적은 등속, 직선 운동하는 단일 표적을 가정한다. 수심 50m인 환경에 수신 센서는 바닥에 설치되며 표적은 수심 25m의 위치에서 5knot의 속도로 직선 기동한다. CPA 거리에 따른 포락선 CPA와 방위각 CPA 각각의  $r$ 추정 성능을 비교하며 또한 단일경로와 다중경로 각각의 경우에 따른  $r$ 추정 성능을 비교한다.

#### 나. CPA 거리에 따른 성능 비교

CPA 거리에 따른 성능을 비교하기 위해 CPA 거리를 25m, 50m, 100m, 300m로 두고  $r$ 의 추정성능을 비교한다. 각각의 CPA 거리에 대해 50회의 몬테카를로 실험을 수행하였으며 신호는 단일경로만을 고려하여 합성되었다. 다음 그림 3은 CPA 거리에 따른 각 기법의  $r$ 추정 오차로써 이때 오차는 평균 제곱근 편차의 퍼센트로써 다음 식 (13)을 따르며  $N$ 은 몬테카를로 실험의 수행 횟수를 나타낸다.

$$error = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r - \hat{r}_i)^2}}{r} \times 100 \quad (13)$$

그림 3을 통해 CPA 거리가 가까운 경우 포락선 CPA 기법의  $r$ 추정 성능이 나빠짐을 확인할 수 있다. 이는 식 (3)의 조건이 만족되지 못하는 상황에서 식 (4)

표 1. 다중경로의 유/무에 따른 추정 오차  
Table 1. Estimation error due to the presence / absence of multipath.

	단일경로	다중경로
포락선 CPA	0.35 %	12.1 %
방위각 CPA	0.6 %	1 %

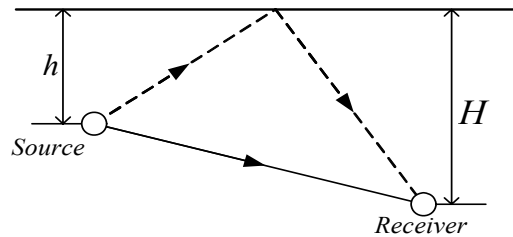


그림 4. 표적 신호의 경로  
Fig. 4. path of target signal.

을 이용하여  $r$ 을 추정하기 때문에 발생한 오차이며 방위각 CPA의 경우 이에 대한 영향이 없기 때문에 CPA 거리가  $r$ 추정 성능에 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 약 270m의 CPA거리를 전후로 하여 포락선 CPA의 성능이 방위각 CPA와 유사해 지는 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 CPA 거리가 표적과 수신기의 수심 차보다 약 열배가량 클 경우에 모델에 의한 오차의 영향이 사라짐을 알 수 있다.

#### 다. 다중경로 유/무에 따른 성능 비교

다중경로의 유/무에 따른 성능을 비교하기 위해 단일 경로만을 고려하여 합성된 신호와 1차 해수면 반사파까지 고려하여 합성된 신호에 대해 포락선 CPA 기법과 방위각 CPA기법을 각각 수행한다. 다음 그림 4는 수신 센서에 도달하는 표적 신호의 경로를 나타낸 것이며 실선은 단일경로인 직접파를, 점선은 해수면 반사파를 의미하며  $h$ 는 표적의 수심을,  $H$ 는 수신기의 수심을 의미한다. 다중경로를 가정한 신호의 경우 직접파와 해수면 반사파를 함께 포함하며 해수면 반사파의 경우 전반사를 가정한다.

CPA 거리에 대한 영향을 배제하기 위해 300m의 CPA 거리에 대한 신호를 이용하며, 다중경로로 인한 간섭효과를 크게 하기 위해 표적의 수심을 45m로 둔다. 총 50회의 몬테카를로 실험을 수행하며 수행 결과에 대해 식 (8)의 오차를 다음 표 1에 나타내었다.

표 1을 통해 단일 경로일 경우 두 가지 기법이 모두  $r$ 을 잘 추정하는 것을 볼 수 있다. 하지만 다중경로로 인한 강한 간섭효과가 있을 때 방위각 CPA는 단일 경

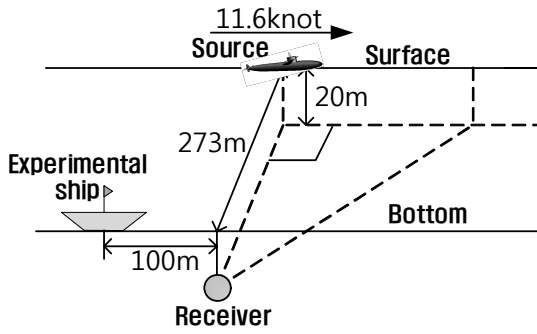


그림 5. 해상실험 시나리오  
Fig. 5. scenario of sea experimental.

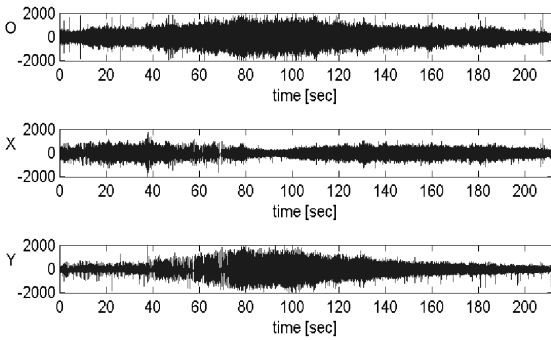


그림 6. DIFAR 센서에 수신된 신호  
Fig. 6. Received signal from DIFAR sensor.

로일 때의 추정 오차와 차이가 거의 없지만 포락선 CPA의 경우 오차가 커짐을 확인할 수 있다. 이는 연안에서 실제로 발생할 수 있는 다중경로로 인한 강한 간섭효과에 포락선 CPA가 취약함을 보이며 방위각 CPA로 이를 극복할 수 있음을 나타낸다.

2. 해상 실험

제안하는 기법의 신뢰성 확보를 위해 해상실험 데이터를 이용하여 성능검증을 수행한다. 해상실험은 2012년 6월 15일 통영에서 진행되었으며 수심은 약 20m였고 바닥에 DIFAR 센서를 설치하여 지나가는 여객선의 방사 신호를 획득하였다. 다음 그림 5는 실험 시나리오를 나타낸다.

실험선의 통신장비와 GPS 시스템을 이용해 추정된 여객선의 CPA 거리와 속도는 각각 273[m]와 11.6[knot] (5.967[m/s])로 이를 통해  $r$ 은 정의에 의해 273/5.967로 45.75[s]의 값을 가지게 된다. 다음 그림 6-8은 각각 DIFAR 센서에 수신된 신호와 포락선 CPA 결과와 방위각 CPA 결과이다. 이 중 그림 6과 그림 7은 같은 해상실험 데이터를 이용하기 때문에 참고문헌<sup>[3]</sup>의 해상실험 결과와 동일하다.

표 2. 해상실험 데이터를 이용한 추정 오차  
Table 2. Estimation error using sea experiment data.

	$\hat{r}$ [sec]	오차
포락선 CPA	43.65	약 4.6 %
방위각 CPA	44.89	약 1.9 %

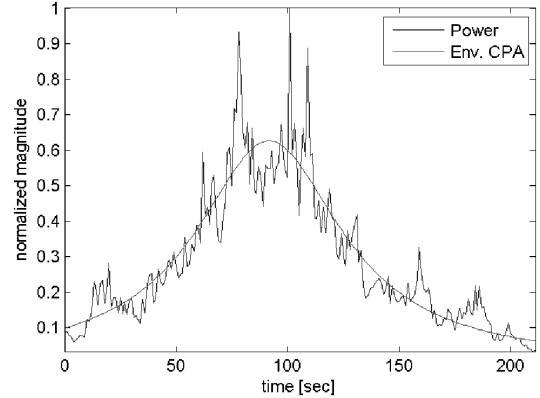


그림 7. 포락선 CPA 결과  
Fig. 7. Result of Envelope CPA.

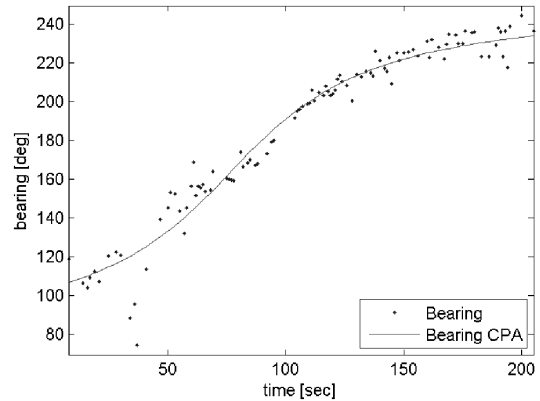


그림 8. 방위각 CPA 결과  
Fig. 8. Result of Bearing CPA.

다음 표 2는 포락선 CPA와 방위각 CPA를 수행하여  $r$ 을 추정된 결과이다. 실험선의 장비를 기준으로 구해진 오차이기 때문에 실제 오차와 차이가 있을 수 있으나 방위각 CPA가 포락선 CPA가 보다 작은 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다.

해상실험의 경우 CPA 거리가 273m로 식 (3)을 만족시키는 경우이기 때문에 CPA 거리에 따른 성능감소가 없을 것이라 예상된다. 또한 표적이 수상함이기 때문에 1차 해수면 반사파가 존재하지 않는다. 하지만 해상실험을 수행하는 동안 수신 센서 인근에 실험선이 존재하였고 이의 반사파로 인해 간섭효과가 발생한 것으로 보인다. 즉 다중경로에 의해 포락선 CPA와 방위각 CPA의 성능 차가 발생한 것으로 판단되며 이는 실제 해상

환경에서도 포락선 CPA가 가지는 취약점을 방위각 CPA가 개선시킬 수 있음을 보여준다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 표적의 방위각 정보를 이용하여  $r$ 을 추정하는 방위각 CPA 기법을 제안하고 이를 포락선 CPA와 비교 하였다. 모의실험과 해상실험을 통해 제안한 기법이 CPA 거리가 가까운 경우에 포락선 CPA가 수반하는 오차를 극복할 수 있음을 확인하였고 연안에서 발생할 수 있는 강한 다중경로로 인한 간섭효과에 보다 강한 성능을 가지는 것을 확인하였다. 이는 연안에서의 표적 탐지에 이점을 가지는 분산센서단에서 수행되기에 적절한 기법으로 판단된다.

#### REFERENCES

- [1] D. J. Pistacchio, E. Giannopoulos, A. Bruno, and J. Gouveia, "Automatic Detection and Localization with a Single Site Combined Acoustic and Magnetic Proximity Sensor", in Proc. of UDT Europe 2007, Naples, Italy, June 5-7, 10C3, 2007.
- [2] Joseph A. Rice, Robert K. Creber, Christopher L. Fletcher, Paul A. Baxley, Kenneth E. Rogers, and Donald C. Davison, "Seaweb Underwater acoustic nets," Bieennial Review 2001, SSC San Diego Tech, Document TD 3117, pp. 234-250, Aug. 2001.
- [3] JungHoon Kim, KyungSik Yoon, IkSu Seo, and KyunKyung Lee, "Underwater Target Information Estimation using Proximity Sensor", *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 52, No. 5, pp. 174-180, 2015.
- [4] Keecheol Shin, Jeasoo Kim, "Adaptive Beamforming Applied to Bearing Estimation of DIFAR Signal with Highly Directional Noise", *The journal of the acoustical society of Korea*, Vol. 30, No. 8, pp. 474-481, 2011.
- [5] D. H. Chang, H. B. Park, Y. N. Na, and J. H. Ryu, "Bearing Estimation of Narrow Band Acoustic Signals Using Cardioid Beamforming Algorithm in Shallow Water," *J. Acoust. Soc. Kor.*, vol. 21(2E), pp. 71-78, 2002.
- [6] Jian Luo, Yi Yang, "Simulation model of ship-radiated broadband noise", Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2011 IEEE International Conference

on, pp. 1-5, Sept. 2011.

- [7] Albert F. Harris III, Michele Zorzi, "Modeling the underwater acoustic channel in ns2", ValueTools '07 Proceedings of the 2nd international conference on Performance evaluation methodologies and tools, No. 18, 2007.

#### 저 자 소 개

김 정 훈(학생회원)  
대한전자공학회 논문지  
제 52권 제 5호 참조

윤 경 식(정회원)  
대한전자공학회 논문지  
제 51권 제 10호 참조

서 익 수(정회원)  
대한전자공학회 논문지  
제 51권 제 2호 참조

이 균 경(정회원)-교신저자  
대한전자공학회 논문지  
제 32권 B편 제 14호 참조