

CPA분석을 이용한 기동하는 수신기에서의 표적 속도 추정기법

Target Velocity Estimation Technique Using CPA Analysis at the Moving Receiver

이 수 형*, 김 정 수**, 이 균 경***
(Su-Hyoung Lee*, Jeong-Soo Kim**, Kyun-Kyung Lee***)

*위덕대학교 에너지전기공학부, **삼성탈레스(주), ***경북대학교 전자전기컴퓨터학부
(접수일자: 2009년 2월 26일; 수정일자: 2009년 4월 14일; 채택일자: 2009년 5월 6일)

일정한 주파수의 음향신호를 발생시키는 표적이 기동할 때 한 개의 고정된 센서에서 관측된 신호의 주파수는 시간에 따라 도플러 변이가 발생한다. 이러한 도플러 변이 현상을 이용한 기존의 CPA (Closest Point of Approach) 분석으로 센서 수신기에 표적이 최단거리로 근접했을 때의 시간, 거리, 속도 그리고 실제 신호의 중심주파수를 추정할 수 있다. 본 논문에서는 고정된 단일 센서 대신에 일정한 속도로 기동하는 배열센서 수신기에서 주파수뿐만 아니라 표적의 방위각을 관측하여 이로부터 표적의 실제 기동속도를 추정하는 기법을 제안한다. 그리고 제안한 기법의 성능검증을 위해 오차 분석 및 모의 실험을 수행하였다.

핵심용어: CPA 분석, 표적 속도 파라미터, 기동하는 수신기

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

A conventional Closest Point of Approach (CPA) analysis allows a non-maneuvering moving source that is radiating a constant frequency tone to be located using doppler shifted frequency measurements obtained by a stationary receiver. The original frequency, relative speed of the target, time at the CPA, and range from the CPA to the sensor are estimated by the conventional CPA. However, this paper proposes a new CPA analysis that allows the motion parameters of a target to be estimated using the bearing and frequency measurements obtained by a moving receiver that has a constant velocity. The validity of the proposed estimation scheme is confirmed through a performance analysis and simulation study.

Keywords: CPA analysis, Target motion parameter, Moving receiver station

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5,6)

I. 서론

기동하는 표적의 위치를 추정하는 것은 매우 중요한 문제이다 [1]. 이를 해결하기 위한 한 방법으로 CPA분석을 기반으로 표적의 위치 추정 및 추적에 관한 연구가 최근 활발히 진행되어왔다. 일정한 궤적과 속력으로 기동하는 음원이 방사하는 협대역 신호를 고정된 단일 음향센서에서 관측할 경우 도플러 효과로 인해 신호의 주파수는 시간에 따라 변화한다. 이러한 시간에 따른 도플

러 변이는 신호가 가진 원래 주파수 f_0 , 표적의 상대 속도 v_r , 센서와 CPA까지의 거리 d_c , 그리고 표적이 CPA에 도달하는 시간 t_c 로 모델링 할 수 있다. 이와 같이 4개의 파라미터로 모델링 된 예측치와 관측된 데이터 사이의 제곱오차를 최소화 함으로써 4개의 파라미터를 추정할 수 있다. 이러한 연구들 가운데 Chan등은 수중환경에서 넓게 분포된 다수의 센서들을 기반으로 표적의 위치 및 속도성분을 추정하였으며 [2,3], Ferguson등은 육상에 설치된 단일 마이크로폰으로 프로펠러 항공기의 블레이드 회전수, 고도와 속력을 추정하였다 [4,5]. 그리고 Lo와 Ferguson은 여러 개의 마이크로폰을 이용하여 프로펠러 항공기의 블레이드 회전수, 고도를 포함한 진행방향,

책임저자: 이 수 형 (soohyong@uu.ac.kr)
780-713 경상북도 경주시 강동면 유금리 525
위덕대학교 에너지전기공학부
(전화: 054-760-1664; 팩스: 054-760-1669)

속도를 포함하는 기동 파라미터를 추정하였다 [6,7]. 그러나 이들이 고려한 고정된 수신기의 경우 표적에 의한 CPA 발생 여부 및 CPA분석 성능은 오직 표적의 기동 형태에 의해 좌우된다. 수중의 표적은 일반적으로 기동속도가 느리고 회피기동을 한다면 CPA관측이 어려울 수 있다. 따라서 상대적으로 빠르게 기동하는 수신기를 고려한다면 표적 신호에 대한 CPA를 자함(own ship)의 기동으로 보다 능동적이고 의도적으로 발생시킬 수 있다. 일반적으로 견인 선배열 소나시스템(TASS:Towed Array Sonar System)을 장착한 함정은 전략적으로 기동하면서 표적의 방위각과 주파수 데이터를 얻는다 [8,9]. 그러므로 CPA 분석을 기동하는 TASS에 적용한다면 주파수 뿐만 아니라 방위각 관측치를 함께 사용할 수 있는 장점을 가짐과 동시에 표적의 기동에만 의존하지 않고 자함의 기동 패턴을 변화시킴으로써 보다 능동적이고 효과적으로 표적의 기동 파라미터를 추정 할 수 있다.

따라서 정지된 수신기로부터 관측된 도플러 변이만 이용할 때 가지는 기존 기법의 한계를 개선하고자 본 논문은 기동하는 수신기로부터 획득한 방위각과 주파수 관측치를 이용한 CPA 분석을 기반으로 수중 표적의 기동 파라미터를 추정하는 기법을 제안한다. 먼저 수신기와 표적의 상대 속도에 의해 발생하는 도플러 변이를 이용한 기존의 CPA 분석을 통해서 f_0, v_R, t_C 그리고 d_C 를 추정한다. 다음으로 추정된 표적의 상대적인 속도와 알려진 수신기의 속도를 이용한 벡터 연산을 통해 실제 표적의 속도를 추정해낸다. 이 과정에서 특히 CPA가 발생한 순간의 표적의 정확한 방위각 추정이 매우 중요하며 이를 위해 본 논문에서는 수신기와 표적의 기동에 대한 기하학적 구조를 이용한 LS (Least Squares)방법으로 CPA 방위각을 추정한다. 그리고 기동하는 표적에 대해 CPA를 유도하기 위한 자함의 기동조건과 이론적 추정오차를 유도한다. 그리고 제안한 기법의 성능분석을 위해 이론적 오차 분석과 함께 모의실험을 수행하였다.

II. 고정된 센서에서의 CPA 모델설정 및 파라미터 추정

표적의 속도 v_R , CPA에 도달하는데 걸린 시간 t_C , CPA에서의 표적과 센서간 거리 d_C , 표적이 방사하는 신호의 중심주파수 f_0 를 추정하기 위해 표적의 CPA 분석이 필요하며 이를 위해 고려되는 고정된 단일 센서와 표적간의 기하학적 모델을 그림 1에 나타내었다. 이때 표적의 상대

속력이 매질의 음파속도에 비해 매우 느릴 경우 ($v_R/c \ll 1$) 근사적으로 관측주기 ΔT 그리고 시간 인덱스 n 으로부터 주어진 이산시간 (discrete time) $n\Delta T$ 에서 수신기에 관측되는 주파수는 다음의 식으로 표현된다 [2,4,10].

$$f(n) = f_0 + \beta \cdot z(n; t_C, s) \tag{1}$$

$$\text{단, } \beta = -\frac{f_0 v_R}{c}, \quad z(n; t_C, s) = \frac{(n\Delta T - t_C)}{\sqrt{s^2 + (n\Delta T - t_C)^2}}, \quad s = d_C / v_R$$

그리고 c 는 음파의 전달 속도이다.

식 (1)이 $v_R/c \ll 1$ 인 경우에 적용되는 근사식이지만 육상 환경($c = 340[\text{m/sec}]$)을 고려한 참고문헌 [5]에서 식 (1)을 $v_R/c \approx 0.38$ 의 경우에 대해서도 적용이 가능한 것을 보였으므로 본 논문에서 고려하는 수중환경에서는 $c = 1500[\text{m/sec}]$ 인 경우 일반적으로 $v_R/c < 0.02$ 이므로 식 (1)이 표적의 기동 파라미터 추정이 충분하다는 것을 알 수 있다.

파라미터 $\{f_0, v_R, t_C, d_C\}$ 는 $\{f_0, \beta, t_C, s\}$ 로 부터 얻어지며, 식 (1)에서 주어진 예측치와 N 개의 관측치 $\{\tilde{f}(n\Delta T) : 0 \leq n \leq N-1\}$ 사이의 평균 제곱 오차를 최소화하는 최적화 과정을 통해 $\{f_0, \beta, t_C, s\}$ 를 얻는다. 이를 수식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\{\hat{f}_0, \hat{\beta}, \hat{t}_C, \hat{s}\} = \arg \min_{\{f_0, \beta, t_C, s\}} \sum_{n=0}^{N-1} [g(n\Delta T) - f_0^* - \beta^* \cdot z(n\Delta T; t_C^*, s^*)]^2 \tag{2}$$

식 (2)에 주어진 비선형 최소화문제를 해결하기 위해 Newton-Raphson방법 [11]을 사용하였고, 초기치 $\{f_0^0, \beta^0, t_C^0, s^0\}$ 설정은 참고문헌 [5]에서 사용된 방법을 적용하였다. 식 (2)로부터 \hat{f}_0, \hat{t}_C 를 얻고 추정된 $\hat{\beta}, \hat{s}$ 으로부터 $\hat{v}_R = -\hat{\beta}c / \hat{f}_0$ 와 $\hat{d}_C = \hat{s} \cdot \hat{v}_R$ 를 얻는다.

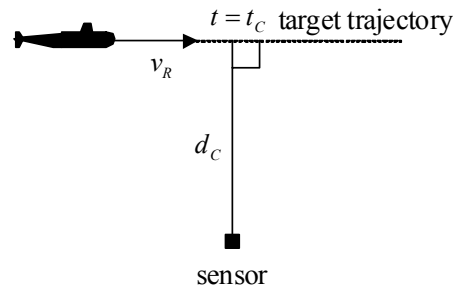


그림 1. 단일 센서에 대한 기하학적 구조
Fig. 1. Single sensor CPA geometry.

III. CPA분석을 이용한 기동하는 수신기에서의 표적 속도 추정 기법

그림 2에서 수중의 표적과 배열 센서 소나 수신기는 일정한 속도 \vec{v}_r 와 \vec{v}_s 로 기동한다. 이때 표적의 수신기에 대한 상대속도는 \vec{v}_r 로 주어진다. 좌표계에서 원점 $\vec{0} = (0,0)$ 은 기동하는 수신기의 중심으로 한다. 표적과 배열 센서 수신기 각각 \vec{v}_r 와 \vec{v}_s 의 속도로 직선 기동을 할 경우 표적은 시간 t_c 에 수신기와 최단 거리가 d_c 인 CPA에 위치하게 된다. 그리고 CPA에서의 표적의 방위각은 θ_c 이다. 수신기에서 좌우 구분이 가능하다는 가정하에 θ_c 의 범위는 $0 \leq \theta_c \leq \pi$ 로 주어진다. 기동하는 수신기로부터 이산시간 $n\Delta T$ 에 표적의 방위각 $\{\tilde{\theta}(n) | n=0, \dots, N-1\}$ 와 주파수 $\{\tilde{f}(n) | n=0, \dots, N-1\}$ 이 관측된다. N 개의 주파수 관측치 $\tilde{f}(n)$ 을 식 (2)의 CPA분석에 적용하여 \hat{f}_0 , $\hat{v}_R = |\vec{v}_R|$, \hat{t}_c , \hat{s} 을 먼저 얻는다.

추정된 표적의 상대속력 \hat{v}_R 로부터 표적의 절대 속도 \vec{v}_T 의 추정을 위해 θ_c 의 추정이 필요하며, 이를 위해 N 개의 방위각 관측치 $\tilde{\theta}(n)$ 을 이용한다. 그림 2의 기하학적 구조로부터 θ_c 가 포함된 방위각 관측치 $\tilde{\theta}(n)$ 의 코사인 값을 다음과 같이 나타낸다.

$$\cos\theta(n) = \frac{s \cos(\pm\theta_c) + (n\Delta T - t_c) \sin(\pm\theta_c)}{\sqrt{s^2 + (n\Delta T - t_c)^2}} \quad (3)$$

단 t_c 와 s 는 식 (2)의 CPA분석으로부터 추정된 값을 이용하고 부호를 고려한 θ_c 는 $\theta_s = \pm\theta_c$ 로 정의한다.

θ_s 의 범위는 $-\pi \leq \theta_s \leq \pi$ 로 정의하며, 양수는 표적이 시계 방향으로 기동하는 것을 의미하고 음수는 반시계방

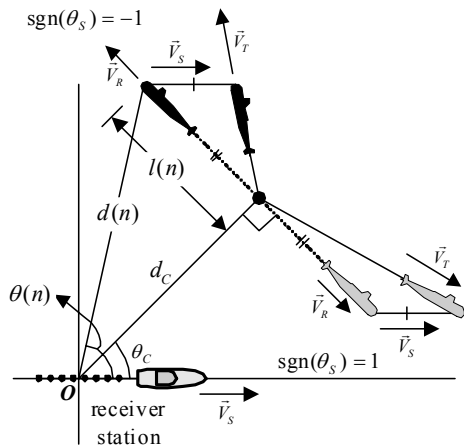


그림 2. 수신기와 표적 기동에 관한 기하학적 구조
Fig. 2. CPA geometry for moving receiver and target.

향으로 기동하는 것을 나타낸다.

그러므로 θ_s 를 추정함으로써 기동방향 뿐만 아니라 θ_c 를 추정할 수 있다. θ_s 를 추정하기 위해 먼저 다음과 같은 가격함수 (cost function)를 정의한다.

$$J(\mathbf{a}) = \sum_{n=0}^{N-1} (\cos\tilde{\theta}(n) - \cos\theta(n))^2 = (\mathbf{x} - \mathbf{H}\mathbf{a})^T (\mathbf{x} - \mathbf{H}\mathbf{a}) \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{x} = [\cos\tilde{\theta}(0), \dots, \cos\tilde{\theta}(N-1)]^T$, $\mathbf{a} = [\cos\theta_s, \sin\theta_s]^T$, $\mathbf{H} = [\mathbf{A}(0) \ \mathbf{A}(1) \ \dots \ \mathbf{A}(N-1)]^T$ 이고 $\mathbf{A}(n) = \begin{bmatrix} s \\ \frac{(n\Delta T - t_c)}{\sqrt{s^2 + (n\Delta T - t_c)^2}} \end{bmatrix}^T$ 이다.

식 (4)를 최소화 시키는 \mathbf{a} 의 추정치는 다음 식 (5)와 같이 주어지고 이로부터 θ_s 의 추정치는 식 (6)과 같다.

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{x} \quad (5)$$

$$\hat{\theta}_s = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \hat{\theta}_s}{\cos \hat{\theta}_s} \right) \quad (6)$$

따라서 실제 표적 속도 \vec{v}_T 의 추정치는 다음 식과 같다.

$$\hat{\vec{v}}_T = \begin{bmatrix} \hat{v}_{Tx} \\ \hat{v}_{Ty} \end{bmatrix} = \text{sgn}(\hat{\theta}_s) \cdot \hat{v}_R \begin{bmatrix} \sin |\hat{\theta}_s| \\ -\cos |\hat{\theta}_s| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 \hat{v}_R 는 상대속력 $v_R = |\vec{v}_R|$ 의 추정치 이며, v_s 는 주어진 자함의 기동속도 \vec{v}_s 의 절대치 즉 속력을 나타내고 $\text{sgn}(x)$ 는 x 의 부호이다.

식 (7)로부터 표적의 속력은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{v}_T = \sqrt{\hat{v}_R^2 + v_s^2 + 2 \text{sgn}(\hat{\theta}_s) \cdot \hat{v}_R \cdot v_s \sin |\hat{\theta}_s|} \quad (8)$$

결과적으로, 표적의 방위각 및 주파수 관측치로부터 표적의 속도 \vec{v}_T 를 추정하였으며 이를 추정하는 전체 과정을 요약하면 그림 3과 같다.

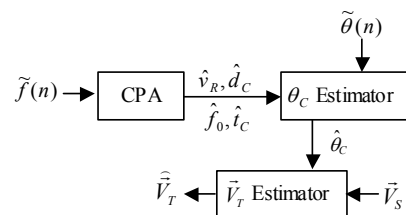


그림 3. 표적 속도 추정을 위한 제안한 알고리즘
Fig. 3. Proposed algorithm for estimating the velocity of a target.

IV. 표적 기동에 의한 CPA 유도

고정된 수신기의 경우 표적에 대한 CPA발생은 오직 표적의 기동에 의존할 수 밖에 없다. 반면 기동하는 수신기는 표적의 기동 파라미터를 추정하기 위해 능동적이고 의도적으로 CPA를 발생시킬 수 있다. 기동하는 수신기를 통해 CPA를 발생시킬 수 있는 조건과 CPA 발생시간을 유도하기 위해 표적과 수신기의 관계를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 r_0 , θ_0 , 그리고 φ 는 각각 $t=0$ 에서 선배 열 센서 중심에서 표적까지의 거리, 표적의 방위각 그리고 표적의 기동 방향을 나타낸다. 이때 θ_0 와 φ 의 범위를 $0 \leq \theta_0 \leq 2\pi$, $0 \leq \varphi < 2\pi$ 로 가정한다. CPA를 능동적으로 발생시키기 위해 자함의 기동으로 θ_0 와 $|\vec{V}_s|$ 는 의도적으로 변화시킬 수 있다. 시간 t 에서 표적과 수신기의 위치 $\vec{P}_T(t)$ 와 $\vec{P}_S(t)$ 는 각각 $\vec{P}_T(t) = [r_0 \cos \theta_0 + |\vec{V}_T| t \cos \varphi, r_0 \sin \theta_0 + |\vec{V}_T| t \sin \varphi]^T$ 와 $\vec{P}_S(t) = [|\vec{V}_s| t, 0]^T$ 로 표현된다.

$\vec{P}_T(t)$ 와 $\vec{P}_S(t)$ 를 이용하면 수신기와 표적간의 제곱 거리는 다음과 같다.

$$s(t) = (r_0 \cos \theta_0 + |\vec{V}_T| t \cos \varphi - |\vec{V}_s| t)^2 + (r_0 \sin \theta_0 + |\vec{V}_T| t \sin \varphi)^2 \quad (8)$$

거리 $\sqrt{s(t)}$ 가 최소화되는 시간 $t = t_c$ 에 CPA가 발생하며 CPA 시간 t_c 는 다음과 같다.

$$t_c = r_0 \cdot \frac{|\vec{V}_s| \cos \theta_0 - |\vec{V}_T| (\cos \theta_0 \cos \varphi + \sin \theta_0 \sin \varphi)}{(|\vec{V}_T| \sin \varphi)^2 + (|\vec{V}_T| \cos \varphi - |\vec{V}_s|)^2} \quad (9)$$

표적이 장래에 CPA에 도달하기 위해서는 t_c 는 양수가 되어야 하며 그 조건은 다음과 같다.

$$|\vec{V}_s| > |\vec{V}_T| \left(\cos \varphi + \frac{\sin \theta_0}{\cos \theta_0} \sin \varphi \right) = |\vec{V}_T| \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \theta_0}{\cos^2 \theta_0}} \sin(\varphi + \alpha) \quad (10)$$

여기서 $\alpha = \tan^{-1}(\cos \theta_0 / \sin \theta_0)$ 이다.

예를 들어, 일반적으로 전략 기동에서 수신기가 표적보다 빨리 움직인다는 가정하에 $|\vec{V}_s| = 2|\vec{V}_T|$ 로 하고 $t=0$ 에서 $\theta_0 = 45^\circ$ 로 한다면 t_c 는 다음과 같이 결정된다.

$$t_c = \frac{r_0}{\sqrt{2} |\vec{V}_T|} \cdot \frac{2 - (\sin \varphi + \cos \varphi)}{5 - 4 \cos \varphi} \quad (11)$$

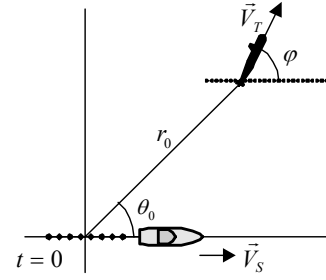


그림 4. CPA 유도를 위한 기동하는 수신기와 표적에 관한 기하학적 구조

Fig. 4. CPA induction geometry for moving receiver and target.

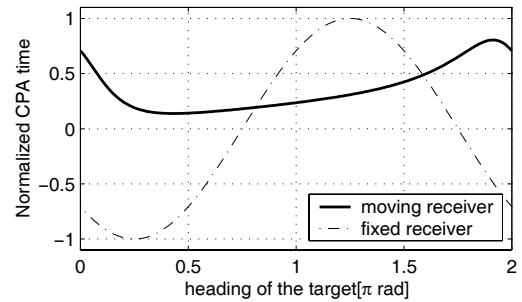


그림 5. 수신기의 기동방향에 대한 표적의 CPA 시간

Fig. 5. Target's CPA times versus the heading of a receiver.

그림 5는 $0 \leq \varphi < 2\pi$ 의 범위에 대해 기동하는 수신기와 정지된 수신기에 대한 표적의 CPA 시간을 $r_0 / |\vec{V}_T|$ 로 정규화하여 보여준다. 그림 5에서 정지된 수신기에 대해 나타나는 음수의 정규화된 시간은 주어진 φ 의 방향으로 표적이 기동할 경우 CPA가 발생하지 않는 것을 의미한다. 반면 기동하는 수신기에 대해서는 표적의 기동방향 φ 에 관계없이 음수의 정규화된 시간이 존재하지 않는다. 즉, 수신기가 기동함으로써, 표적에 대한 CPA는 의도적으로 발생시킬 수 있으며 필요에 따라 좀 더 빨리 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

V. 추정 성능 분석

그림 2에서 관측되는 $\theta(n)$ 는 다음 식 (12)와 같이 평균과 분산이 각각 0과 σ_θ^2 인 백색잡음 $w(n)$ 이 포함되어 관측된다.

$$\tilde{\theta}(n) = \theta(n) + w(n) \quad (12)$$

θ_c 에 대한 FIM (Fisher Information Matrix)는 $\mathbf{F}(\theta_c) = 1/\sigma_\theta^2 (\partial \theta / \partial \theta_c)^T (\partial \theta / \partial \theta_c)$ 이며, $\partial \theta / \partial \theta_c = [\partial \theta(0) / \partial \theta_c, \dots, \partial \theta$

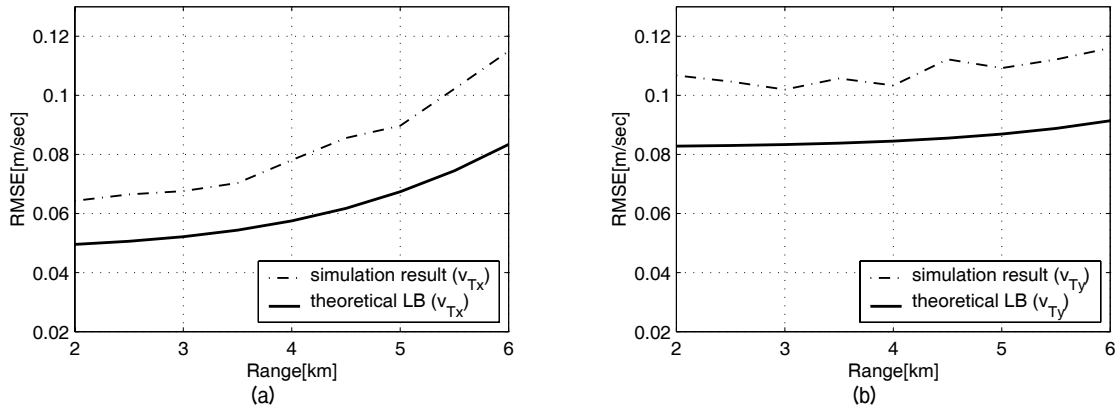


그림 6. $\theta_c = 60^\circ$ 에서 CPA거리에 대한 표적 속도에 대한 RMSE (a) v_{Tx} 에 대한 RMSE (b) v_{Ty} 에 대한 RMSE
 Fig. 6. RMSE for target velocity versus CPA range when $\theta_c = 60^\circ$ (a) RMSE for v_{Tx} (b) RMSE for v_{Ty} .

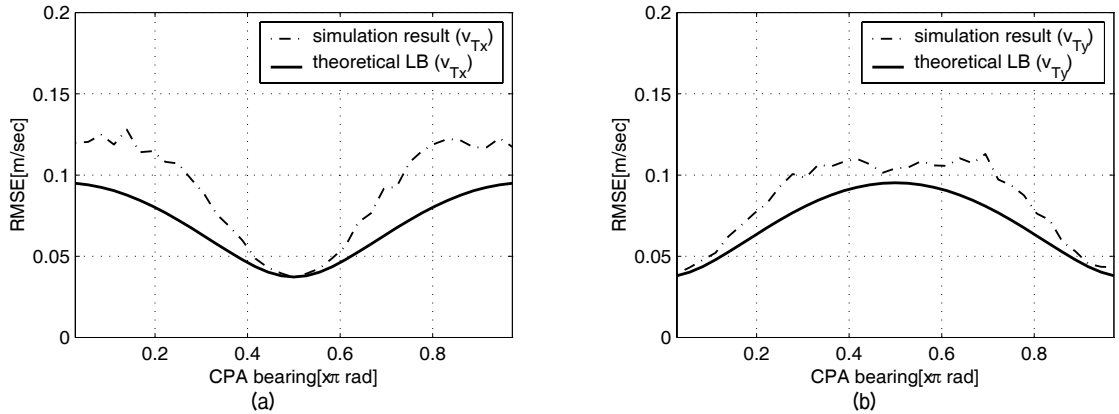


그림 7. $d_c = 4$ [km]에서 CPA 방위각에 대한 표적 속도에 대한 RMSE (a) v_{Tx} 에 대한 RMSE (b) v_{Ty} 에 대한 RMSE
 Fig. 7. RMSE for target velocity versus CPA bearing when $d_c = 4$ [km] (a) RMSE for v_{Tx} (b) RMSE for v_{Ty} .

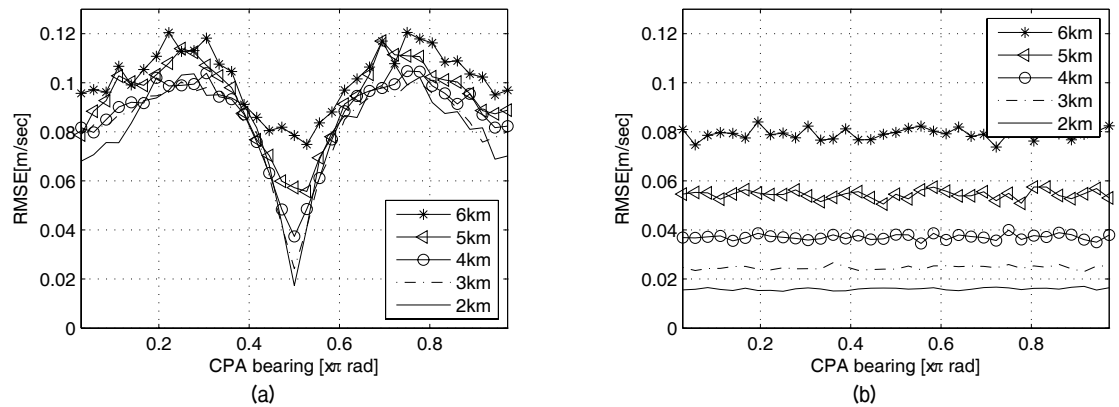


그림 8. 서로 다른 CPA 거리에서 CPA 방위각에 대한 표적 속력의 RMSE (a) $\vec{v}_s = [8, 0]^T$ [m/sec] (b) $\vec{v}_s = [0, 0]^T$ [m/sec]
 Fig. 8 RMSE for target speed versus CPA bearing with different CPA ranges (a) $\vec{v}_s = [8, 0]^T$ [m/sec] (b) $\vec{v}_s = [0, 0]^T$ [m/sec].

$(N-1)/\partial\theta_c]^T$ 이다.

식 (3)의 θ_c 에 대한 미분은 $\partial\theta(n)/\partial\theta_c = 1$ 이다.

그래서 식 (3)에서 파라미터 s 와 t_c 가 정확히 주어진다
 면 θ_c 의 CRLB (Cramer-Rao Lower Bound)는 다음과 같
 이 얻어진다.

$$\text{var}(\hat{\theta}_c) \geq \left(\frac{1}{\sigma_\theta^2} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\frac{\partial\theta[n; \theta_c]}{\partial\theta_c} \right)^2 \right)^{-1} = \frac{\sigma_\theta^2}{N} \quad (13)$$

$w = g(x)$ 로 표현되는 w 의 CRLB는 $\text{var}(\hat{w}) \geq (\partial g / \partial x)^2 \text{CRLB}(\hat{x})$ 로 주어진다 [11]. 여기서 CRLB(\hat{x})는 추정치 \hat{x} 의 CRLB

이다. 그러므로 $\cos \theta_c$ 와 $\sin \theta_c$ 의 CRLB는 식 (13)을 이용하여 다음 식과 같이 표현된다.

$$\text{var}(\cos \hat{\theta}_c) \geq \left(\frac{\partial \cos \theta_c}{\partial \theta_c} \right)^2 \frac{\sigma_\theta^2}{N} = \frac{\sigma_\theta^2}{N} \sin^2 \theta_c \quad (14a)$$

$$\text{var}(\sin \hat{\theta}_c) \geq \frac{\sigma_\theta^2}{N} \cos^2 \theta_c \quad (14b)$$

v_r , $\cos \theta_c$, $\sin \theta_c$ 이 각각 평균이 0인 독립 확률변수로 표현되는 오차를 가진다고 가정하면 식 (7)의 표적의 속도 성분들에 대한 최저 추정오차는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{var}(\hat{v}_{Tx}) &= E[(v_r + e_r)(\sin \theta_c + e_c) - v_r \sin \theta_c]^2 \\ &= v_r^2 \cdot E[e_c^2] + \sin^2 \theta_c \cdot E[e_r^2] + E[e_r^2] \cdot E[e_c^2] \\ &\geq (v_r^2 + \text{CRLB}(\hat{v}_r)) \cdot \text{CRLB}(\sin \hat{\theta}_c) + \sin^2 \theta_c \cdot \text{CRLB}(\hat{v}_r), \end{aligned} \quad (15a)$$

$$\begin{aligned} \text{var}(\hat{v}_{Ty}) &= E[(v_r + e_r)(\cos \theta_c + e_s) - v_r \cos \theta_c]^2 \\ &\geq (v_r^2 + \text{CRLB}(\hat{v}_r)) \cdot \text{CRLB}(\cos \hat{\theta}_c) + \cos^2 \theta_c \cdot \text{CRLB}(\hat{v}_r). \end{aligned} \quad (15b)$$

여기서 $\text{CRLB}(\hat{v}_r)$ 는 참고문헌 [3]에서 구할 수 있다. 한편 식 (8)에 주어진 속력 v_r 의 θ_c 에 대한 민감도는 다음과 같다.

$$\left| \frac{\partial v_r}{\partial \theta_c} \right| = \frac{v_r v_s |\cos \theta_c|}{\sqrt{v_r^2 + v_s^2 + 2 \text{sgn}(\theta_s) v_r v_s \sin \theta_c}} \quad (16)$$

식 (16)로 부터 속력 추정치 \hat{v}_r 는 $\theta_c = \pi/2$ 근처의 θ_c 에서 오차에 덜 민감하며 또한 $v_s = 0$ 즉 고정된 수신기에 대해서는 민감도가 최소임을 알 수 있다.

VI. 모의 실험

제안한 기법의 성능을 평가하기 위해 자함인 $\vec{v}_s = [8, 0]^T$ [m/sec]의 속도로 기동하고, 표적은 중심주파수 $f_0 = 100$ [Hz]인 신호를 방사하면서 각도 θ_c 와 거리 d_c 에 따라 다른 기동 상황을 갖는 표적을 가정하였다. 그리고 사용된 자함의 수신기는 10개의 센서가 선배열로 배치되어있으며 센서간의 간격은 최고 주파수 신호의 반파장으로 하였다. 관측주기 $\Delta T = 10$ [sec]로 20분 동안 관측한 표적 신호의

중심주파수 $\{\tilde{f}(n); n=0, \dots, 119\}$ 와 방위각 관측치 $\{\tilde{\theta}(n); n=0, \dots, 119\}$ 를 이용하여 실제 표적의 기동 속도를 추정하였다. 그리고 CPA에 도달하는 시간 $t_c = 600$ [sec]는 관측 시간의 절반으로 하였다. 이때 중심주파수의 관측치에 대한 잡음 분산은 $\sigma_f = 0.01$ [Hz]으로 하였다. 이는 10 [sec] 데이터에 대한 FFT의 분해능의 10%에 해당한다. 그리고 방위각 관측치에 대한 잡음 분산은 $\sigma_\theta = \pi/30$ [rad]로 하였으며, 이는 10개의 센서로 구성된 수신기의 빔폭의 절반에 해당된다.

본 논문의 모의 실험환경에서 주어진 $v_r/c \approx 0.0053$ 이다. 주어진 수신기 속도 $\vec{v}_s = [8, 0]^T$ [m/sec]에 대한 실제 표적의 속도 추정에 대한 성능을 평가하기 위해, 다양한 표적의 기동궤적에 대해 500회의 몬테 카를로 모의 실험을 수행하여 그 결과를 그림 6과 그림 7에 나타내었다.

먼저 그림 6은 $\theta_c = 60^\circ$ 로 하고 CPA 순간의 표적과 수신기 사이의 거리 d_c 를 2 [km]에서 6 [km]까지 변화시키면서 \hat{v}_{Tx} 와 \hat{v}_{Ty} 의 RMSE (Root Mean Square Error)를 그림 6 (a)와 그림 6 (b)에 나타내었다.

그림 7은 $d_c = 4$ [km]로 고정하고 다양한 방위각 5° 에서 175° 범위에서 변화하는 θ_c 에 대한 \hat{v}_{Tx} 와 \hat{v}_{Ty} 의 RMSE를 나타낸다. 그림 6과 그림 7에서 실선은 식 (15a)–(15b)에서 주어진 \hat{v}_{Tx} 와 \hat{v}_{Ty} 의 이론적인 오차 최저치이며 점선은 모의실험 결과 주어진 결과이다. 그림 6에서 속도 성분에 대한 RMSE는 d_c 가 증가함에 따라 증가한다. 그리고 그림 7은 식 (15a)–(15b)의 이론적 최저치에서 첫 번째 항에 의해 주도되어 그 형태가 나타난다.

그림 8은 다양한 CPA 방위각과 거리에 따른 표적 속도에 대한 RMSE를 나타낸다. 그림 8 (a)에서 보는 바와 같이 수신기가 $\vec{v}_s = [8, 0]^T$ [m/sec]의 속도로 기동할 때 표적속력에 대한 RMSE는 $\theta_c = \pi/2$ 에서 최소가 된다. 반면 그림 8 (b)에서와 같이 수신기가 정지 상태 일 때 모든 CPA방위에 대해서 최소의 값을 가진다. 이는 식 (16)에서 예측된 것과 같은 결과를 보여준다.

VII. 결론

본 논문에서는 도플러 변이 주파수를 이용해 표적이 CPA에 위치했을 때의 시간, 중심주파수, 거리 그리고 속력을 추정하는 기존의 CPA분석 기법을 기반으로 방위각과 주파수 관측치를 제공하는 기동하는 배열 수신로 확장하여 실제 표적의 속도를 추정하는 기법을 제안하였다.

그리고 자함의 기동으로 표적의 CPA를 발생시키기 위한 조건과 추정치의 이론적 오차 최저치를 유도하였고, 모의 실험을 통해 얻어진 RMSE와 이론적 오차 최저치를 비교함으로써 제안한 기법의 타당성을 보였다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다 (계약번호 UD070054AD).

참고 문헌

1. 장덕홍, 박홍배, 김성일, 류준하, 김광태, "정합-표적모델 역산을 이용한 기동 표적의 위치 추정," *한국음향학회지*, 22권, 7호, 562-572쪽, 2003.
2. Y. T. Chan and F. L. Jardine, "Target Localization and Tracking From Doppler-Shift Measurements," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 15, no. 3, pp. 251-257, July 1990.
3. Y. T. Chan and J. J. Towers, "Sequential Localization of a Radiating Source by Doppler-Shifted Frequency Measurements," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 1084-1090, Oct. 1992.
4. B. G. Ferguson, "A ground-based Narrow-band Passive Acoustic Technique for Estimating the Altitude and Speed of a Propeller-driven Aircraft," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 92, no. 3, pp. 1403-1407, Sept. 1992.
5. J. A. Fawcett and B. H. Mardanda, "Application of the short-time Fourier Transform and the Wigner-Ville Distribution to the Acoustic Localization of Aircraft," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 96, no. 2, pp. 821-827, Aug. 1994.
6. B. G. Ferguson and K. W. Lo, "Turboprop and rotary-wing aircraft flight parameter estimation using both narrow-band and broadband passive acoustic signal-processing methods," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 108, no. 4, pp. 1763-1771, Oct. 2000.
7. K. W. Lo and B. G. Ferguson, "Flight Path Estimation Using Frequency Measurements from a Wide Aperture Acoustic Array," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 37, no. 2, pp. 685-694, Apr. 2001.
8. J. A. Fawcett and B. H. Mardanda, "Localization by Maximizing Long-Time Integrated Spectral Power," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 40, no. 2, pp. 460-464, Feb. 1992.
9. R. O. Nielsen, *Sonar Signal Processing*, Artech House, 1991.
10. H. G. Urban, *Handbook of Underwater Acoustic Engineering*, STN ATLAS Elektronik GmbH, 2002.
11. S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, Prentice Hall International, Inc. 1993.

저자 약력

•이 수 형 (Su-Hyoung Lee)

한국음향학회지 제28권 2호 참조

•김 정 수 (Jeong-Soo Kim)



2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
2002년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
2009년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
2008년 12월~현재: 삼성탈레스(주)
※주관심분야: 수중음향신호처리, 표적위치추정, 표적 탐지 및 추적

•이 균 경 (Kyun-Kyung Lee)

한국음향학회지 제26권 2호 참조