

코히어런트 다중 표적 방위 추적 알고리즘

Coherent Multiple Target Angle-Tracking Algorithm

황 수복*, 김진석*, 김현식*, 박명호*, 남기곤**

(Hwang, Soo-Bok*, Kim, Jin-Seok*, Kim, Hyun-Sik*, Park, Myung-Ho*, Nam, Ki-Gon**)

*국방과학연구소 제2체계개발본부 수중탐지체계부 1팀, **부산대학교 전자공학과

(접수일자: 2005년 3월 31일; 수정일자: 2005년 5월 16일; 채택일자: 2005년 5월 18일)

수중음향 시스템에서는 이동 표적에 대한 상태 추정 및 표적 식별 등의 목적을 위해서 표적 방위 추적은 필수적이다. 그러나 감시영역에 근접 또는 교차 표적 등이 존재하는 다수 표적 상황에서의 방위 추적은 매우 어려운 문제로 다양한 접근방법으로 연구되어 왔다. SWORD는 배열 센서 신호의 출력 공분산 행렬로부터 방위 변위를 추정하여 표적을 추적함으로써 별도의 정보 연관 과정이 필요 없는 단순한 구조의 다중 표적 방위 추적 알고리즘을 제안하였으며, RYU 등은 표적 조향 벡터 (target steering vector)와 배열 센서 공분산 행렬의 신호 고유 벡터 (signal eigenvector)가 선형결합 관계임을 이용하여 교차 표적 (cross target)에 대해서도 우수한 성능을 나타내는 효율적인 알고리즘을 제안하였다. 또한 HWANG 등은 잡음 고유 벡터 (noise eigenvector)와 표적 조향 벡터가 직교 관계임을 이용하여 RYU의 알고리즘과 동일한 성능을 유지하면서 연산량을 개선한 알고리즘을 제안하였다. 그러나 기존의 방법은 코히어런트 (coherent) 다중 표적인 경우에는 추적 성능이 저하되는 단점이 있다. 본 논문에서는 배열 센서의 공분산 행렬로부터 추정할 수 있는 신호 고유 벡터와 잡음 공분산 행렬 (noise covariance matrix)의 특성을 이용하여 코히어런트 다중 표적에 대해 추적 성능을 유지할 수 있는 다중 표적 방위 추적 알고리즘을 제안하였으며, 근접 및 교차 기동하는 표적에 대한 시뮬레이션을 통하여 비코히어런트 (incoherent)와 코히어런트 다중 표적에 대해 추적 성능이 우수함을 확인하였다.

핵심어: 다중 표적 방위 추적, 코히어런트, 선배열 센서

투고분야: 수중음향분야 (5.6)

The angle-tracking of maneuvering targets is required to the state estimation and classification of targets in underwater acoustic systems. The problem of angle-tracking multiple closed and crossing targets has been studied by various authors. Sword et al. proposed a multiple target angle-tracking algorithm using angular innovations of the targets during a sampling period are estimated in the least square sense using the most recent estimate of the sensor output covariance matrix. This algorithm has attractive features of simple structure and avoidance of data association problem. Ryu et al. recently proposed an effective multiple target angle-tracking algorithm which can obtain the angular innovations of the targets from a signal subspace instead of the sensor output covariance matrix. Hwang et al. improved the computational performance of a multiple target angle-tracking algorithm based on the fact that the steering vector and the noise subspace are orthogonal. These algorithms, however, are ineffective when a subset of the incident sources are coherent. In this Paper, we proposed a new multiple target angle-tracking algorithm for coherent and incoherent sources. The proposed algorithm uses the relationship between source steering vectors and the signal eigenvectors which are multiplied noise covariance matrix. The computer simulation results demonstrate the improved performance of the proposed algorithm.

Keywords: Multiple Target Angle-tracking, Coherent Source, Linear Array Sonar

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.6)

I. 서론

최근까지 다중 표적 추적 문제는 소나, 레이더, 통신 등의 다양한 분야에서 응용되고 있으며, 특히 수동 소나 시스템에서의 이동 표적에 대한 상태 추정 및 표적 식별 등의 목적을 위해서는 표적 방위 추적이 필수적이다. 그러나 감시영역에 근접 또는 교차 표적 등이 존재하는 다수 표적 상황에서의 방위 추적은 매우 어려운 문제로 여러 가지의 접근방법으로 연구되어 왔다[1-9]. 다중 표적 추적 문제는 응용 분야에 따라 표적 상태 모델링 방법(target state model method)과 표적 방위 추적 방법(target angle tracking method)으로 구분되며, 표적 상태 모델링 방법에서는 표적 상태에 대한 동적 모델링을 하고, 각 샘플 시간에서 관측치(measurement)를 이용한 상태 벡터 추정(state vector estimation)을 통하여 추적이 수행된다. 표적 방위 추적 방법에서는 배열 센서에 수신된 표적 신호를 이용하여 방위각을 추정함으로써 표적 방위를 추적한다. 표적에 대한 방위각은 전통적인 빔형성, 배열 센서의 공분산 행렬에 근간한 신호 부공간(signal subspace) 및 잡음 부공간(noise subspace) 방법과 매개변수 모델 기법 등을 통하여 추정할 수 있다. 그러나 이러한 알고리즘을 이용하여 다중 표적을 추적하기 위해서는 데이터 연관(data association) 과정을 해결하여야 한다[1-2].

최근 SWORD 등은 배열 센서 신호의 출력 공분산 행렬로부터 방위 변위를 추정하여 표적을 추적함으로써 별도의 정보 연관 과정이 필요 없는 단순한 구조의 다중 표적 방위 추적 알고리즘을 제안하였으며[3], RYU 등은 표적 조향 벡터(target steering vector)와 배열 센서 공분산 행렬의 신호 고유 벡터(signal eigenvector)가 선형결합 관계임을 이용하여 교차 표적에 대해서도 우수한 성능을 나타내는 효율적인 알고리즘을 제안하였다[6-8]. 또한 HWANG 등은 잡음 고유 벡터와 표적 조향 벡터가 직교 관계임을 이용하여 RYU의 알고리즘과 동일한 성능을 유지하면서 연산량을 개선한 알고리즘을 제안하였다[9]. 이들의 방법은 MUSIC(MUltiple SIgnal Classification)과 같은 고유 공간(eigenspace) 해석 기법을 적용하여 초기 표적 수, 센서 잡음 신호 크기, 표적 신호 크기, 표적 방위를 추정하여 추적 초기화 과정을 수행하며, 샘플링 기간 동안의 표적 방위 변위는 배열 센서의 출력 공분산 행렬로부터 추정된 신호 또는 잡음 고유 벡터와 표적 조향 벡터의 선형결합 관계를 이용하

여 추정한다. 그러나 다중 경로 또는 기만 신호 등에 의해 생성되는 코히어런트(coherent) 다중 표적인 경우 기존의 방법들은 공분산 행렬의 계수(rank)와 표적 수가 불일치하므로 추적 성능이 저하되는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 배열 센서의 공분산 행렬로부터 추정할 수 있는 신호 고유 벡터와 잡음 공분산 행렬(array noise covariance matrix)의 특성을 이용하여 코히어런트 다중 표적에 대해 추적 성능을 유지할 수 있는 다중 표적 방위 추적 알고리즘을 제안하였으며, 이론적인 검증 및 시뮬레이션을 통하여 비코히어런트(incoherent)와 코히어런트 다중 표적에 대해 추적 성능이 우수함을 입증한다. 서론에 이어 2장에서는 배열 센서에 수신된 신호 공분산 행렬의 고유 벡터의 특성을 고찰하며, 3장에서 배열 센서의 공분산 행렬로부터 추정할 수 있는 신호 고유 벡터와 대각합(trace)이 배열 센서 수가 되도록 정규화된 잡음 공분산 행렬의 곱이 표적 조향 벡터와 선형결합 관계임을 이용하여 다중 표적의 방위를 추적할 수 있는 알고리즘을 기술한다. 그리고 4장에서는 제안된 알고리즘의 성능을 입증하기 위해 근접 및 교차 기동하는 표적에 대한 시뮬레이션 결과를 설명하고, 마지막 장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 배열 공분산 행렬의 고유 벡터 특성

[그림 1]과 같이 P 개의 센서가 거리 d 만큼 등간격으로 선형 배열된 무지향 수동 센서에 $Q(Q < P)$ 개의 표적에서 발생되는 협대역 신호와 배경 잡음 신호가 수신되고, 표적과 센서는 동일한 평면에서 이동한다고 가정

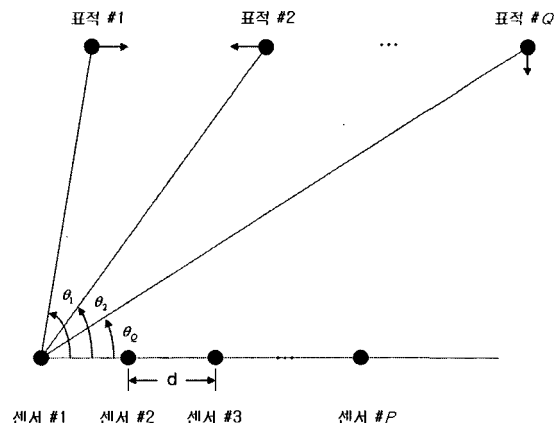


그림 1. 선배열 센서의 이동 표적 간의 기하학 구조
Fig 1. Geometry of moving target and linear array.

한다. 만약 k 시간에 표적 q 의 방위가 $\theta_q(k)$ 이면 p 번째 센서의 출력 신호는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$r_p(k) = \sum_{q=1}^Q f_q(k) e^{-j\omega(d/c)(p-1)\cos\theta_q(k)} + \eta_p(k) \quad (1)$$

여기서, $f_q(k)$ 는 표적 q 로부터 발생하여 기준점 (센서 #1)에 도달한 중심주파수가 ω 인 복소 신호이며, c 는 매질에서의 음파 전달 속력이다. 또한 $\eta_p(k)$ 는 p 번째 센서에 수신된 배경 잡음으로 평균이 0이고, 공분산이 σ^2 인 백색(white) 잡음으로 그 값은 알려져 있지 않다고 가정하며, $s(\theta_q(k))$ 는 P 차원의 표적 조향 벡터로 식 (2)와 같이 정의한다.

$$s(\theta_q(k)) = \begin{bmatrix} e^{-j\omega(d/c)\cos\theta_q(k)} \\ \vdots \\ e^{-j\omega(d/c)(P-1)\cos\theta_q(k)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

만약 센서의 잡음과 표적 신호가 무상관 (uncorrelated)이면 식 (1)의 배열 센서 출력 신호의 공분산 행렬은 식(3)과 같이 표현된다.

$$C_r(k) = E\{r(k)r^H(k)\} = S(\theta(k))C_f(k)S^H(\theta(k)) + \sigma^2 C_q(k) \quad (3)$$

여기서, $r(k) = [r_1(k) \dots r_p(k)]^T$, $S(\theta(k)) = [s(\theta_1(k)) \dots s(\theta_Q(k))]$, $\theta(k) = [\theta_1(k) \dots \theta_Q(k)]^T$ 이고, 위첨자 H 는 복소 공액 (complex conjugate) 전치 행렬을 의미한다. 그리고 잡음 신호의 공분산 행렬은 크기가 $P \times P$ 이고 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma^2 C_q(k) = E\{\eta(k)\eta^H(k)\} \quad (4)$$

여기서, $\eta(k) = [\eta_1(k) \eta_2(k) \dots \eta_p(k)]^T$ 이다. 그리고 $C_q(k)$ 은 대각합(trace)이 P 인 정규화된 잡음 공분산 행렬이며, 화이트닝 필터 처리기법 등에 의하여 $\eta(k)$ 가 공간적으로 백색 잡음이면 크기가 $P \times P$ 인 단위 행렬 I 로 표현된다. 또한 식 (3)에서 $C_f(k)$ 는 크기가 $Q \times Q$ 인 표적 신호 공분산 행렬로 식 (5)와 같다.

$$C_f(k) = E\{f(k)f^H(k)\} \quad (5)$$

여기서, $f(k) = [f_1(k) f_2(k) \dots f_Q(k)]^T$ 이다.

λ_m 과 $e_m(m=1,2,\dots,P)$ 을 공분산 행렬 $C_f(k)$ 의 고유치 (eigenvalue)와 고유 벡터라 하면, 고유 벡터 분해에 의해 $\Sigma = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_P)$ 와 $U = [e_1 \dots e_P]$ 인 $C_f(k) = U\Sigma U^H$ 으로 표현되며 내림차순으로 정렬된 고유치는 식(6)와 같이 주어진다.

$$\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_Q > \lambda_{Q+1} = \dots = \lambda_P = \sigma^2 \quad (6)$$

이때, $m=1, \dots, Q$ 인 우세한 고유치와 관련된 고유 벡터의 쌍인 (λ_m, e_m) 을 각각 신호 고유치와 신호 고유 벡터라 하며, 반면에 $m=Q+1, \dots, P$ 에 대한 (λ_m, e_m) 은 각각 잡음 고유치와 잡음 고유 벡터라 한다. 또한, 신호 고유 벡터의 열 생성 (column spans)인 $E_S = [e_1 \dots e_Q]$ 를 신호 부공간이라 하며, 잡음 고유 벡터의 열 생성인 $E_N = [e_{Q+1} \dots e_P]$ 를 잡음 부공간이라 한다. 만약 조향 행렬 $S(\theta(k))$ 의 계수가 Q 로 완전 계수 (full rank)이면 공분산 행렬은 식 (7)(8)(9)과 같은 특성을 가진다[10].

$$e_m = S(\theta(k))c_m, 1 \leq m \leq Q \quad (7)$$

$$e_m s(\theta_q(k)) = 0, Q+1 \leq m \leq P, 1 \leq q \leq Q \quad (8)$$

$$C_q(k)e_m = S(\theta(k))c_m, 1 \leq m \leq R \quad (9)$$

여기서, c_m 은 크기가 $P \times 1$ 인 선형결합계수 벡터이며, R 은 행렬 $C_f(k)$ 의 계수이다.

식 (7)은 신호 부공간은 조향 벡터와 동일한 열 생성 (column span)으로 신호 고유 벡터와 조향 행렬은 선형결합 관계를 나타내고 식 (8)은 잡음 고유 벡터와 조향 벡터 $s(\theta_q(k))$ 는 직교 (orthogonal)함을 의미하며 식 (9)는 신호 고유 벡터와 행렬 $C_q(k)$ 의 곱이 표적 조향 벡터와 선형결합 관계임을 표현한다. RYU 등은 식 (7)을 이용한 다중 표적 방위 추적 알고리즘을 제안하였고, HWANG 등은 식(8)을 이용하여 연산량을 개선한 알고리즘을 제안하였다.

만약 행렬 $C_f(k)$ 가 비대각 행렬 (nondiagonal matrix)이며 역행렬이 존재하지 않는 코히어런트한 표적 신호의 경우에는 행렬 $C_f(k)$ 의 계수 R 이 Q 보다 작으므로 식 (7)과 식 (8)은 성립하지 않는다. 그러나 식 (9)는 표적 신호가 코히어런트하거나 행렬 $C_f(k)$ 가 대

각 행렬 (diagonal matrix)이며 역행렬이 존재하는 비코히어런트 경우에도 항상 성립함을 알 수 있다. 본 논문에서는 식(9)를 이용하여 비코히어런트 및 코히어런트 다중 표적에 대해 추적 성능을 유지할 수 있는 다중 표적 방위 추적 알고리즘을 제안하였다.

III. 제안 알고리즘

표적 q 가 k 시간에서 방위 $\theta_q(k)$ 및 방위 변화율 $\dot{\theta}_q(k)$ 로 등각속도 운동을 할 때, 표적 q 의 상태 벡터를 $\mathbf{x}_q(k) = [\theta_q(k) \ \dot{\theta}_q(k)]^T$ 라 정의하면, 표적 방위의 동적 방정식 및 측정 방정식은 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_q(k+1) &= \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}_q(k) + \mathbf{v}_q(k) \\ \theta_q(k) &= \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}_q(k) + w_q(k), \quad q=1,2,\dots,Q \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 이며, Δ 는 관측주기이고, $\mathbf{H} = [1 \ 0]$ 이다. $\mathbf{v}_q(k)$ 는 표적 q 에 대한 공정 잡음 (process noise)으로 평균이 영이고, 공분산은 식(11)과 같은 정규분포 특성을 갖는 확률 변수이며, $w_q(k)$ 는 측정 잡음 (measurement noise)으로 평균이 영이고, 공분산은 식(12)와 같은 정규분포 특성을 갖는 확률 변수로 가정한다.

$$E[\mathbf{v}_q(k) \mathbf{v}_q^T(k)] = \mathbf{Q}(k) \quad (11)$$

$$E[w_q(k)w_q^T(k)] = \sigma_w^2(k) \quad (12)$$

일반적으로 k 시간에서 표적 q 의 방위 $\theta_q(k)$ 가 관측되어지면 표적의 상태 벡터 추정치 $\hat{\mathbf{x}}_q(Mk)$ 는 칼만 필터 이론에 따라 식 (13)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_q(Mk) &= \hat{\mathbf{x}}_q(Mk-1) + g_q \cdot (\theta_q(k) - \hat{\theta}_q(Mk-1)) \\ &= \hat{\mathbf{x}}_q(Mk-1) + g_q \cdot \nu_q(k) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, $\hat{\mathbf{x}}_q(Mk-1) = \mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{x}}_q(k-1|k-1)$, $\hat{\theta}_q(Mk-1) = \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{x}}_q(Mk-1)$ 로 각각 $k-1$ 시간에서의 표적 q 의 상태 벡터로부터 k 시간에서의 상태 벡터와 측정치에 대한 예측치를 나타낸다. 그리고 g_q 는 표적 q 에 대한 칼만 이득, $\nu_q(k)$ 는 이노베이션 (innovation)이다. 따라서 대상

표적에서 발생한 방위를 측정할 수 있으면 쉽게 표적의 상태 벡터를 추정 가능하다.

식 (9)와 같이 신호 고유 벡터와 행렬 $\mathbf{C}_q(k)$ 의 곱으로 형성된 새로운 벡터 공간은 표적 조향 벡터와 선형결합 관계이므로 새로운 벡터 공간 내에 조향 벡터가 존재하기 때문에 조향 벡터를 투영 (projection)하면 투영 오차는 영이 되어야 하며 식(14)와 같이 표현 가능하다.

$$\mathbf{P}_s^\perp \mathbf{C}_q(k) \mathbf{e}_m(k) = 0, \quad 1 \leq m \leq R \quad (14)$$

여기서, 0은 영 행렬이고 $\mathbf{P}_s^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{S}(\boldsymbol{\theta}(k)) \mathbf{S}^*(\boldsymbol{\theta}(k))$ 은 직교 투영 (orthogonal projection) 행렬이다. 그리고 \mathbf{I} 는 $P \times P$ 인 단위 행렬이고, 위첨자 $+$ 는 의사 역행렬 (pseudo inversion)이다.

식(14)에서 모델 오차를 δ 라 두면 자승오차의 합 (sum of error squared)은 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} \alpha(\boldsymbol{\theta}(k) + \delta) &= \\ &= \sum_{m=1}^R \|(\mathbf{I} - \mathbf{S}(\boldsymbol{\theta}(k) + \delta)) \mathbf{S}^*(\boldsymbol{\theta}(k) + \delta)) \mathbf{C}_q(k) \mathbf{e}_m(k)\|^2 \end{aligned} \quad (15)$$

그러나 식 (15)를 최소화하는 해를 직접 구하는 것은 매우 어려운 문제로 본 연구에서는 강하 기법 (descent method)의 하나인 수정된 가우스-뉴턴 방법 (modified Gauss-Newton method)에 의해 다중 표적의 방위 측정치 $\boldsymbol{\theta}(k)$ 를 추정하였다. 수정된 가우스-뉴턴 방법에 따라 방위 오차를 δ 라 두면 식 (14)에 대한 방위 오차 방정식은 식(16)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_m(\boldsymbol{\theta}(k) + \delta) &= \\ &= [\mathbf{I} - \mathbf{S}(\boldsymbol{\theta}(k) + \delta) \mathbf{S}^*(\boldsymbol{\theta}(k))] \mathbf{C}_q(k) \mathbf{e}_m(k), \quad 1 \leq m \leq R \end{aligned} \quad (16)$$

식 (15)로부터 자승 오차의 합 (sum of error squared)은 식 (17)의 비선형 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\alpha(\boldsymbol{\theta}(k) + \delta) = \sum_{m=1}^R \boldsymbol{\varepsilon}_m^H(\boldsymbol{\theta}(k) + \delta) \boldsymbol{\varepsilon}_m(\boldsymbol{\theta}(k) + \delta) \quad (17)$$

만약 δ 가 매우 작을 경우 식 (17)의 $\boldsymbol{\varepsilon}_m(\boldsymbol{\theta}(k) + \delta)$ 에 대해 테일러급수 전개에 따라 근사화하면 식 (18)과 같이 표현된다.

$$c(\theta(k) + \delta) = \sum_{m=1}^M [\epsilon_m(\theta(k)) - C_m(\theta(k)) \delta]^H [\epsilon_m(\theta(k)) - C_m(\theta(k)) \delta] \quad (18)$$

여기서, $C_m(\theta(k)) = [y_1(\theta(k)) L(\theta_1(k)) \ y_2(\theta(k)) L(\theta_2(k)) \ \dots \ y_Q(\theta(k)) L(\theta_Q(k))]$ 이고, $y_q(\theta(k))$ 는 크기가 $Q \times 1$ 인 벡터 $s^*(\theta(k)) C_q(k) e_m(k)$ 의 q 번째 항이고, $L(\theta_q(k))$ 는 다음과 같다.

$$L(\theta_q(k)) = \begin{bmatrix} 1 \\ j\omega(d/c) \sin \theta_q(k) e^{-j\omega(d/c) \cos \theta_q(k)} \\ \vdots \\ j\omega(d/c)(P-1) \sin \theta_q(k) e^{-j\omega(d/c)(P-1) \cos \theta_q(k)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

따라서

$$A(\theta(k)) = \text{Re} \left[\sum_{m=1}^M C_m^H(\theta(k)) C_m(\theta(k)) \right],$$

$$a(\theta(k)) = \text{Re} \left[\sum_{m=1}^M C_m^H(\theta(k)) \epsilon_m(\theta(k)) \right]$$

라 두면 강하 기법에 사용되는 방위 오차 δ 는 식(20)과 같이 선형 방정식에 의해 쉽게 구할 수 있다.

$$A(\theta(k)) \delta = a(\theta(k)) \quad (20)$$

식(20)에서 구한 δ 를 식(19)와 같이 반복 적용하여 최소 지승 오차 $c(\theta(k) + \delta)$ 의 값을 최소화하는 $\theta(k)$ 를 구할 수 있다.

$$\theta^{(n+1)}(k) = \theta^{(n)}(k) + \alpha \delta \quad (21)$$

여기서, α 는 스텝 크기로 $c(\theta^{(n+1)}(k)) < c(\theta^{(n)}(k))$ 조건을 만족하는 적당한 값이 되도록 선택한다.

다중 표적에 대한 방위는 식 (21)의 반복 과정에 필요한 표적 방위 초기값으로 칼만 필터에서 산출되는 예측 방위를 사용하며, 최소 지승 오차를 만족하는 다중 표적에 대한 방위값을 추정한다. 이때 추정된 다중 표적의 방위는 식 (14)에 따라 각 표적에 대한 조향 방위와 직접적으로 연관된 방위 추정치를 나타내므로 칼만 필터에 의해 별도의 연관 과정 없이 다중 표적에 대한 방위 추적이 가능하다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해서 [그림 1]에서 나타낸 센서간의 간격이 표적 신호 파장의 1/2인 15개의 음향 센서로 구성된 선배열 센서를 사용하였고, 센서의 잡음 크기 σ^2 은 1, 관측 시간 동안의 스냅샷 수 N 은 32, 관측 주기 Δ 는 8초로 가정하였다.

RYU 알고리즘과 본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능은 신호 크기가 0dB이며 근접 기동하는 2개의 표적시나리오와 교차 기동하는 3개의 표적 시나리오에 대해 몬테 칼로(Monte Carlo) 시뮬레이션 100회를 수행하여 확인하였다. 근접 기동하는 시나리오에서는 각 표적이 4m/s로 등속운동을 하며 최근접시 표적간의 이격방위는 10도가 되도록 구성하였다. 그리고 교차 기동하는 시나리오에서는 표적이 각각 3m/s, 4m/s, 5m/s로 등속운동을 하도록 구성하였다.

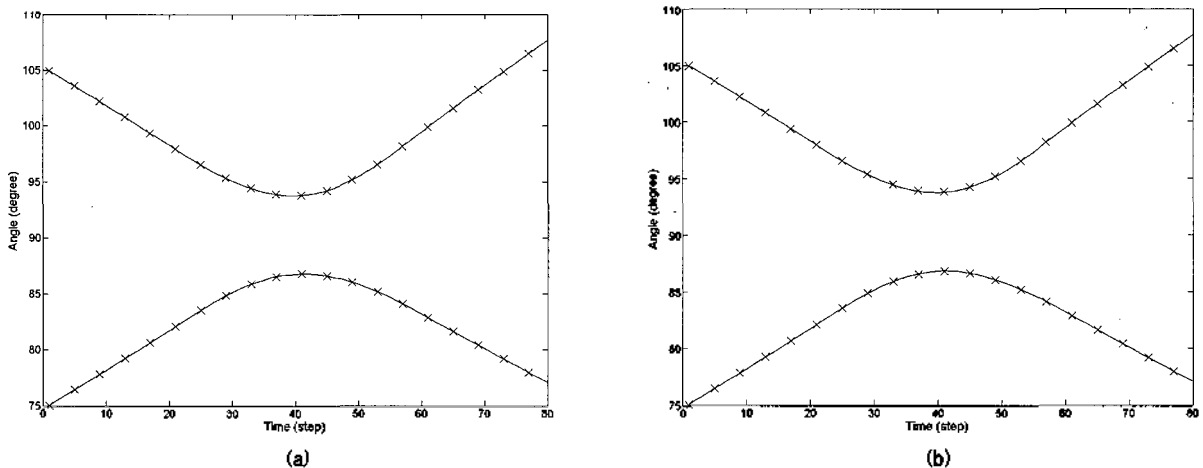
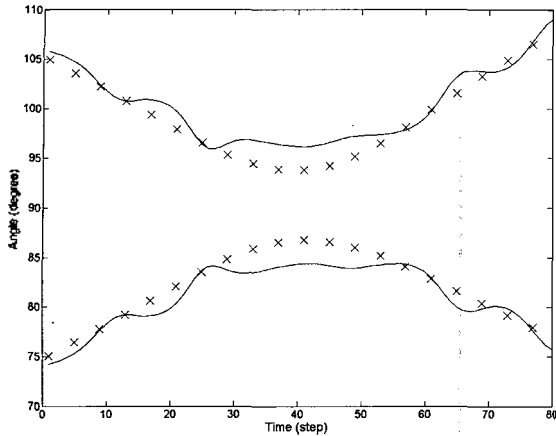
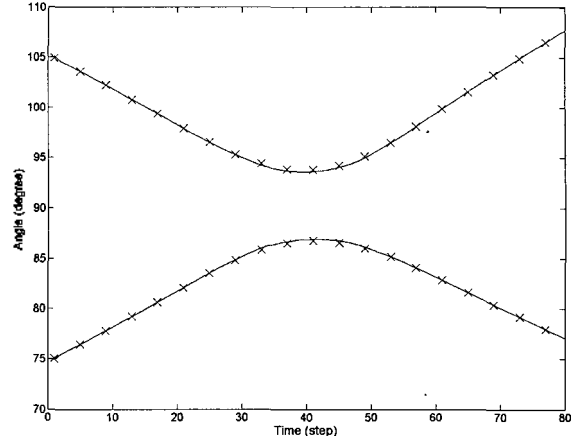


그림 2. 근접 기동하는 비코히어런트 표적에 대한 방위 추적 결과(x: 실제 방위, 실선: 추정 방위) (a) RYU 알고리즘 (b) 제안 알고리즘
 Fig 2. Angle-tracking simulation result for the closed targets in incoherent case(x: exact bearing, solid: estimated bearing) (a) RYU's algorithm, (b) proposed algorithm.



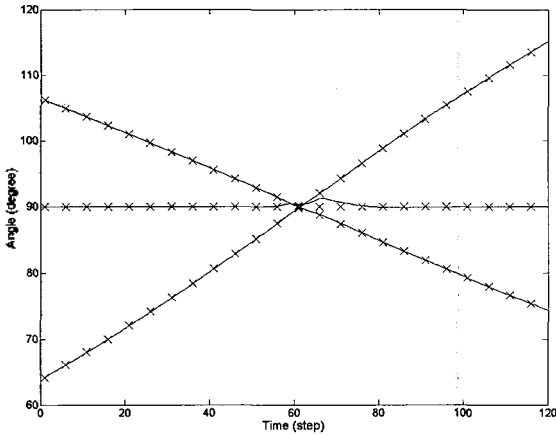
(a)



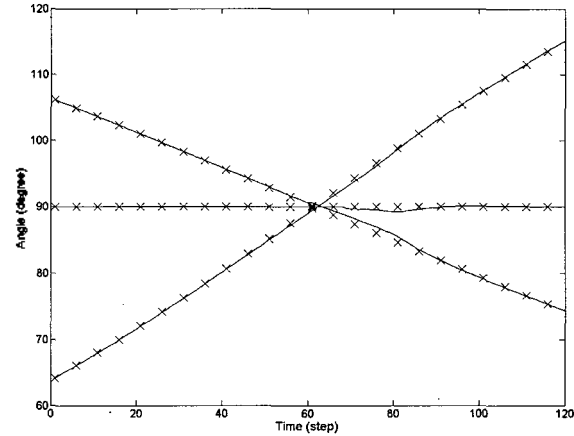
(b)

그림 3. 근접 기동하는 코히어런트 표적에 대한 방위 추적 결과(x: 실제 방위, 실선: 추정 방위) (a) RYU 알고리즘 (b) 제안 알고리즘

Fig 3. Angle-tracking simulation result for the closed targets in coherent case(x: exact bearing, solid: estimated bearing) (a) Ryu's algorithm, (b) proposed algorithm.



(a)



(b)

그림 4. 교차 기동하는 비코히어런트 표적에 대한 방위 추적 결과(x: 실제 방위, 실선: 추정 방위) (a) RYU 알고리즘 (b) 제안 알고리즘

Fig 4. Angle-tracking simulation result for the crossing targets in incoherent case(x: exact bearing, solid: estimated bearing) (a) Ryu's algorithm, (b) proposed algorithm.

[그림 2]은 비코히어런트 표적에 대해 RYU 알고리즘과 제안한 알고리즘의 전형적인 방위 추적 결과를 나타낸 것으로 RYU 알고리즘과 제안한 알고리즘 모두 성공적으로 추적을 수행함을 알 수 있다. 반면 [그림 3]은 코히어런트 표적에 대해 두 알고리즘의 방위 추적 결과를 나타낸 것으로 [그림 3](a)에서 RYU 알고리즘이 코히어런트 표적에 대한 방위 추적 성능이 저하되는 것을 나타내고 있고, [그림 3](b)는 제안한 알고리즘이 코히어런트 표적에 대해서도 방위 추적 성능이 유지됨을 보여준다. [표 1]은 근접 기동 시나리오에 대해 두 알고리즘의 성능을 비교한 것으로 비코히어런트한 다중 표적인 경우 추적오차 성능 및 추적 성공률이 RYU 알고리즘과 제안 알고리즘이 유사함을 알 수 있고, 코히어런트한 다중 표적인 경우 RYU 알고리즘은 추적오차도 급격히 증가하고 68%의 추적 성공률을 나타내 추적 성능이 저하되는 것

에 비해 제안된 알고리즘은 추적오차도 유지되고 98% 방위 추적 성공률을 나타내 추적 성능이 유지됨을 알 수 있다.

[그림 4]와 [그림 5]는 교차 기동하는 다중 표적에 대한 두 알고리즘의 일반적인 방위 추적 결과를 나타낸 것이다. [그림 4]는 비코히어런트 표적에 대해 RYU 알고리즘 및 제안한 알고리즘 모두 성공적으로 추적을 수행함을 나타내고 있다. 그러나 [그림 5]에서 보는 바와 같

표 1. 근접 기동하는 표적에 대한 알고리즘의 성능 비교

Table 1. Performance comparison of algorithms for the closed targets.

알고리즘	비코히어런트 표적		코히어런트 표적	
	RMSE (deg ²)	추적성공률 (%)	RMSE (deg ²)	추적성공률 (%)
RYU 알고리즘	0.0010	100	1.3397	68
제안 알고리즘	0.0096	100	0.0181	98

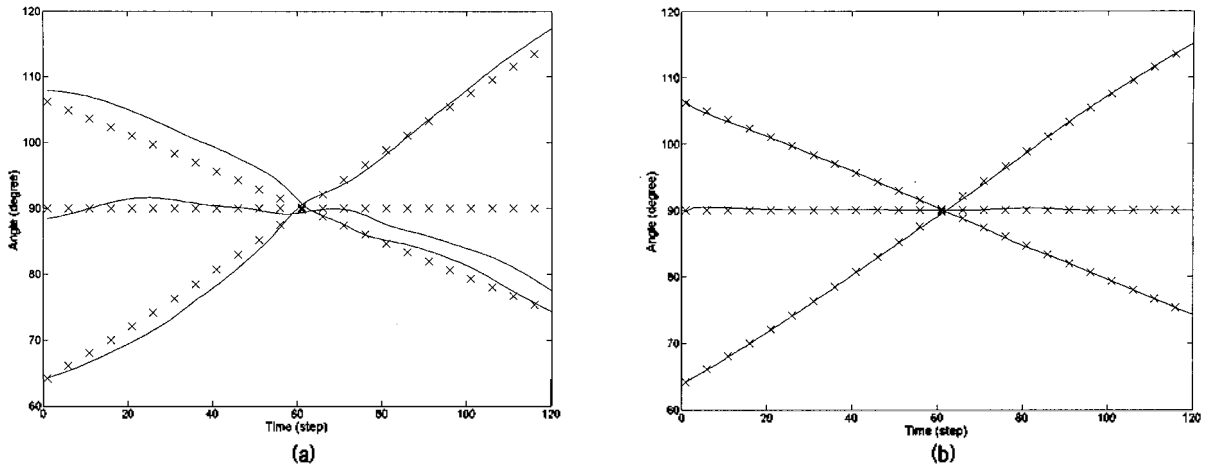


그림 5. 교차 이동하는 코히어런트 표적에 대한 방위 추적 결과(x: 실제 방위, 실선: 추정 방위) (a) RYU 알고리즘 (b) 제안 알고리즘
 Fig. 5. Angle-tracking simulation result for the crossing targets in coherent case(x: exact bearing, solid: estimated bearing) (a) Ryu's algorithm, (b) proposed algorithm.

이 코히어런트 표적에 대해 RYU 알고리즘은 방위 추적이 정상적으로 유지되지 않는 반면에 제안한 알고리즘은 성공적으로 방위 추적을 수행함을 알 수 있다. [표 2]는 교차 이동 시나리오에 대해 두 알고리즘의 성능을 비교한 것으로 비코히어런트한 다중 표적인 경우 추적오차 성능 및 추적 성공률이 RYU 알고리즘과 제안 알고리즘이 유사함을 알 수 있고, 코히어런트한 다중 표적인 경우 RYU 알고리즘은 추적오차도 급격히 증가하고 56%의 추적 성공률을 나타내 추적 성능이 저하되는 것에 비해 제안된 알고리즘은 비코히어런트뿐 아니라 코히어런트한 다중 표적에 대해서도 추적오차도 유지되고 100% 방위 추적 성공률을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 제안 알고리즘은 RYU의 알고리즘에 비해 코히어런트 표적에 대해 우수한 추적 성능을 유지하는 장점이 있는 반면에 많은 연산량을 필요로 하는 단점이 있다.

V. 결론

본 논문에서는 배열 센서의 출력 신호 공분산 행렬로부터 추정할 수 있는 신호 고유 벡터와 대각합이 배열

표 2. 교차 이동하는 표적에 대한 알고리즘의 성능 비교
 Table 2. Performance comparison of algorithms for the crossing targets.

알고리즘	비코히어런트 표적		코히어런트 표적	
	RMSE (deg ²)	추적성공률 (%)	RMSE (deg ²)	추적성공률 (%)
RYU 알고리즘	0.0836	100	1.9439	56
제안 알고리즘	0.1311	100	0.1327	100

센서 수가 되도록 정규화된 잡음 공분산 행렬의 곱과 표적 조향 벡터와의 선형결합 관계로부터 조향 벡터의 직교투영 오차를 최소화하는 표적의 방위각을 추정함으로써 다중 표적에 대한 방위 추적 알고리즘을 제안하였다. 또한 기존 알고리즘의 제한 사항 및 제안한 알고리즘의 특성을 이론적으로 확인하였고, 근접 및 교차로 이동하는 다중 표적에 대한 시뮬레이션 결과를 통하여 기존의 알고리즘은 비코히어런트 표적에 대해 우수한 추적 성능을 나타내지만 코히어런트 표적에 대해서는 추적 성능이 급격히 저하되는 반면 제안한 알고리즘은 비코히어런트 표적뿐 아니라 코히어런트 표적에도 대해서 우수한 추적 성능 나타냄을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. BAR-SHALOM, Y., FORTMANN, T.E., *Tracking and data association* (Academic Press, Inc., 1988).
2. SWORD, C.K., SAMAN, M., and KAMEN, E.W., "Multiple target angle tracking using sensor array outputs", *IEEE trans. Aerosp. Electron Syst.*, 1990, 26 (2), 367-373.
3. SCHMIDT, R. O., "Multiple emitter location and signal parameter estimation", *IEEE trans. Ante.*, 1986, 34, 276-280.
4. LO, K.W., and LI, C.K., "An improved multiple target angle tracking algorithm", *IEEE trans. Aerosp. Electron Syst.*, 1992, 28 (3), 797-804.
5. PARK, S.B., RYU, C.S., and LEE, K.K., "Multiple target angle tracking algorithm using predicted angles", *IEEE trans. Aerosp. Electron Syst.*, 1994, 30 (2), 643-648.

6. RYU, C.-S., LEE, S.-H., LEE, K.-K., "Multiple target angle tracking algorithm using angular innovations extracted from signal subspace", Electron. Lett., 1999, 35 (18), 1520-1522.
7. LIM, J.-S., CHOI, Y.J., YOON, S.-J., "VFF-PASTd based multiple target angle tracking with angular innovation", J. Acoust. Soc. Kor., 2003, 22 (1E), 19-25.
8. RYU, C.-S., LEE, J.-S., and LEE, K.-K., "Multiple target angle-tracking algorithm with efficient equation for angular innovation", Electron. Lett., 2002, 38 (10), 483-484.
9. Hwang S. B., Kim J. S., Kim H. S., Nam K. G., "Multiple target angle-tracking using angular innovations extracted from noise subspace", J. Acoust. Soc. Kor., 2005, 24 (1E), 34-37.
10. JAMES A. C., "Direction-of-arrival estimation using signal subspace modeling", IEEE trans. Aerosp. Electron Syst., Jan. 1992, 28 (1), 64-79.

저자 약력

• 황수복 (Soo-Bok Hwang)

한국음향학회지 제19권 제8호 참조

• 김진석 (Jin-Seok Kim)

한국음향학회지 제24권 제1E호 참조

• 김현식 (Hyun-Sik Kim)

한국음향학회지 제24권 제1E호 참조

• 박명호 (Myoung-Ho Park)

한국음향학회지 제19권 제7호 참조

• 남기곤 (Ki-Gon Nam)

한국음향학회지 제24권 제1E호 참조