

# 신호 부공간에서 구한 방위각 이노베이션을 이용한 다중표적 방위각 추적 알고리즘

## (Multiple Target Angle Tracking Algorithm Using Angular Innovation Extracted from Signal Subspace)

柳昌秀\*, 李秀滢\*, 李均景\*

(Chang-Soo Ryu, Su-Hyoung Lee, and Kyun-Kyung Lee)

### 요 약

본 논문에서는 신호 부공간을 이용하여 표적들의 방위각 이노베이션을 구함으로써, 별도의 데이터연관 기법이 필요 없으며 간단한 구조의 효율적인 다중표적 방위각 추적 알고리즘을 제안하였다. 신호 부공간은 PAST와 같은 신호 부공간 추적 알고리즘을 이용하여 추정된다. 추정된 신호 부공간과 방위각 이노베이션이 만족시키는 비선형 행렬방정식을 유도하고, 이를 Taylor 급수 전개하여 선형근사화 한다. 이렇게 선형근사화하여 얻은 선형 행렬방정식으로부터 최소제곱법을 이용하여 방위각 이노베이션을 구한다. 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 알고리즘의 효율적이고 우수한 성능을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, a multiple target angle tracking algorithm that can avoid data association problem and has a simple structure is proposed by obtaining the angular innovation of the targets from a signal subspace. The signal subspace is recursively estimated by a signal subspace tracking algorithm, such as PAST. A nonlinear matrix equation which satisfy the estimated signal subspace and the angular innovation is induced and expanded into a Taylor series for linear approximation. The angular innovation is obtained by solving the approximated linear matrix equation in the least square sense. The good performance of the proposed algorithm is demonstrated by various computer simulations.

### I. 서 론

소나, 레이더, 원거리 탐지, 통신, 항공교통제어 등 다양한 분야에서 다중표적의 방위각 추적 문제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1-4)</sup>. 일반적인 표적의 방위각 추적은 표적신호가 배열센서(sensor array)에 도달하는 시간차인 시간지연을 추정하고, 이로부터 표적의

방위각을 추정하여 그 궤적을 추적한다<sup>5)</sup>. 이 경우 데이터연관(data association) 과정이 필요하며, 특히 표적의 개수가 많거나 표적들이 교차하는 경우 데이터연관은 매우 어려운 문제이다.

Park 등<sup>6)</sup>은 데이터연관 과정이 필요 없는 다중표적 방위각 추적 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 센서출력 공분산행렬(sensor output covariance matrix)과 칼만필터와 같은 상태모델추정기(state model estimator)를 이용하여 구한 추정공분산행렬의 차인 공분산행렬 변화량을 선형근사화한 후, 최소제곱법(least square method)을 이용하여 각 표적의 방위각 이노베이션을 구한다. 이 방위각 이노베이션을 이용하여 방위각 예측치를 쇄신(update)하여 현재의 방위각을 추정함으로써

\* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(School of Electronic & Electrical Engineering, Kyungpook National University)

接受日字:1999年3月23日, 수정완료일:1999年11月16日

표적의 방위각 궤적을 추적하게 된다. 이 알고리즘은 별도의 데이터연관 과정이 필요 없으며 구조가 간단하다는 장점을 가지고 있으나, 표적이 근접하는 경우 공분산행렬의 랭크(rank)가 줄어들어 의하여 교차하는 표적의 개수가 많은 상황에서 추적 성능이 나빠진다.

최근에 Yang은 배열센서의 출력으로부터 신호 부공간(signal subspace)을 순환적으로 추적하는 PAST (Projection Approximation Subspace Tracking) 알고리즘<sup>7)</sup>을 제안하였다. PAST는 적절한 투영근사(projection approximation)를 사용하여 신호 부공간을 적응적으로 채신하는 알고리즘으로 MUSIC<sup>8)</sup>과 같은 일괄 고유치 분해(batch eigenvalue decomposition)기법에 비해 신호대 잡음비가 작은 경우 오차가 증가하지만 계산 시간이 매우 작은 이점이 있다.

본 논문에서는 센서출력 공분산행렬 대신에 PAST와 같은 신호 부공간 추적 알고리즘을 이용하여 얻은 신호 부공간으로부터 표적들의 방위각 이노베이션을 구하는 선형방정식을 유도하였다. 이 선형방정식은 신호 부공간과 방위각 이노베이션이 만족시키는 비선형 행렬방정식을 방위각 예측치에서 Taylor 급수를 전개하여 선형근사화함으로써 유도되었다. 이렇게 유도된 선형방정식을 이용하여 구한 방위각 이노베이션을 표적의 방위각 궤적을 추적하는데 이용함으로써, Park 등이 제안한 알고리즘과 같이 별도의 데이터연관 과정이 필요 없으며 간단한 구조를 가지지만, 추적 성능은 우수한 다중 표적 방위각 추적 알고리즘을 제안하였다.

II장에서 문제설정을 하였으며, III장에서 신호 부공간을 이용한 다중표적 방위각 추적 알고리즘을 제안하였다. IV장에서 제안한 알고리즘의 우수한 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺었다.

## II. 문제설정

그림 1과 같이  $N$ 개의 표적이 있을 때,  $M$ 개의 센서가 등 간격  $d$ 로 배열된 선배열센서의 센서출력을 이용하여 표적의 방위각  $\{\theta_i(t), i = 1, 2, \dots, N\}$ 을 추적하고자 한다. 시간  $t$ 에서  $m$ 번째 센서의 출력을 협대역 신호모델을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>6)</sup>.

$$r_m(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t) e^{j\omega \tau_{im}(t)} + n_m(t) \quad (1)$$

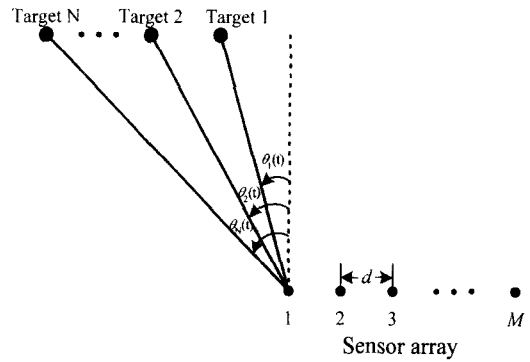


그림 1. 추적을 위한 배열센서의 기하학적 구조  
Fig. 1. Array geometry for tracking.

여기서  $s_i(t) = E_i(t) e^{j\omega t}$ 는 전송주파수가  $\omega$ 인  $i$ 번째 표적의 복소신호이며,  $n_m(t)$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 인  $m$ 번째 센서의 센서잡음이다. 센서잡음은 가우시안 백색잡음이고, 이들은 서로 상관관계가 없으며 표적신호들과도 상관관계가 없다고 가정한다.  $\tau_{im}(t)$ 는  $i$ 번째 표적신호의 첫 번째 센서와  $m$ 번째 센서사이에서의 시간지연이다. 표이 센서로부터 멀리 떨어져 있을 경우, 센서에 도달되는 표적신호는 평면파로 간주할 수 있으며, 시간지연과 표적의 방위각 사이에는 다음과 같은 관계식이 존재한다.

$$\tau_{im}(t) = (d/c)(m-1) \sin \theta_i(t) \quad (2)$$

여기서  $c$ 는 파의 속도이며,  $d$ 는 두 센서의 간격이다. 그리고 센서출력은 다음 식과 같이 벡터로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t) &= \sum_{i=1}^N s_i(t) \mathbf{a}_i(t) + \mathbf{n}(t) \\ &= \mathbf{A}(t) \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 센서출력벡터  $\mathbf{r}(t)$ 와 신호벡터  $\mathbf{s}(t)$  그리고 센서잡음벡터  $\mathbf{n}(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t) &= [r_1(t), r_2(t), \dots, r_M(t)]^T \\ \mathbf{s}(t) &= [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T \\ \mathbf{n}(t) &= [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T \end{aligned} \quad (4)$$

행렬  $\mathbf{A}(t)$ 는 방위행렬(direction matrix)이라 하며, 일반적으로 복소행렬이 되고 센서들의 기하학적 구조에 의존하며, 선배열센서인 경우 방위행렬은 다음과 같다.

$$A(t) = [ \mathbf{a}_1(t), \mathbf{a}_2(t), \dots, \mathbf{a}_N(t) ] \quad (5)$$

여기서  $\mathbf{a}_i(t) = [ 1, \gamma_i(t), \dots, \gamma_i^{M-1}(t) ]^T$ 는 조향벡터 (steering vector)라 하며,  $\gamma_i(t)$ 는 다음 식과 같다.

$$\gamma_i(t) = e^{j\omega \frac{d}{c} \sin \theta_i(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

### III. 제안한 알고리즘

PAST는 센서출력벡터를 이용하여 신호 부공간을 적응적으로 채신하여 추적하는 알고리즘이다. 그러므로 표본 시간  $k$ 에서 PAST 알고리즘을 이용하여 신호 부공간을 추정할 수 있고, 조향벡터  $\mathbf{a}_i(k)$ 는 추정한 신호 부공간  $W(k) = [ \mathbf{w}_1(k), \mathbf{w}_2(k), \dots, \mathbf{w}_N(k) ]$ 의 선형조합으로 표현할 수 있으며 식 (7)과 같다[8].

$$\mathbf{a}_i(k) = c_{i1}(k) \mathbf{w}_1(k) + c_{i2}(k) \mathbf{w}_2(k) + \dots + c_{iN}(k) \mathbf{w}_N(k), \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

여기서  $\{c_{ij}(k), i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N\}$ 는 복소인수이다.

표적모델은 등각속도 모델로써, 표적의 방위각과 방위각 변화율로 구성된 2차 상태벡터를 가지는 칼만필터를 사용하여 시간  $k-1$ 에서 예측한, 시간  $k$ 에서의  $i$ 번째 표적의 방위각 예측치를  $\hat{\theta}_i(k|k-1)$ 이라 하고, 시간  $k$ 에서의  $i$ 번째 표적의 방위각 이노베이션 (angular innovation)을  $\delta\theta_i(k)$ 라 하면, 식 (7)에서 조향벡터의  $m$ 번째 요소는 방위각 예측치와 방위각 이노베이션을 이용하여 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_i^{m-1}(k) &= e^{j\omega \frac{d}{c} (m-1) \sin \theta_i(k)} \\ &= e^{j\omega \frac{d}{c} (m-1) \sin (\hat{\theta}_i(k|k-1) + \delta\theta_i(k))} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $\theta_i(k) = \hat{\theta}_i(k|k-1) + \delta\theta_i(k)$ 이다.

식 (8)을 식 (7)에 대입하면, 식 (9)와 같은 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

식 (9)에서 시간  $k$ 에서의 방위각 예측치  $\hat{\theta}_i(k|k-1)$ 는 칼만필터를 이용하여 구할 수 있으며, 신호 부공간  $W(k)$ 는 PAST 알고리즘으로 추정할 수 있다. 그러므

$$\begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\omega \frac{d}{c} \sin (\hat{\theta}_i(k|k-1) + \delta\theta_i(k))} \\ e^{j\omega \frac{d}{c} 2 \sin (\hat{\theta}_i(k|k-1) + \delta\theta_i(k))} \\ \vdots \\ e^{j\omega \frac{d}{c} (M-1) \sin (\hat{\theta}_i(k|k-1) + \delta\theta_i(k))} \end{bmatrix} = W(k) \begin{bmatrix} c_{i1}(k) \\ c_{i2}(k) \\ c_{i3}(k) \\ \vdots \\ c_{iN}(k) \end{bmatrix}, \quad i = 1, \dots, N \quad (9)$$

로 식 (9)는 실수 값인  $i$ 번째 표적의 방위각 이노베이션  $\delta\theta_i(k)$ 와 복소인수  $\{c_{ij}(k), j = 1, \dots, N\}$ 를 미지수로 가지는 행렬 방정식이다. 식 (9)에서 각 표적의 방위각 이노베이션들을 구할 수 있다면, 시간  $k$ 에서의 방위각 추정치  $\hat{\theta}_i(k|k)$ 는 각 표적의 방위각 예측치를 방위각 이노베이션으로 채신함으로써 추정할 수 있다. 또한, 이 과정을 반복적으로 수행함으로써 별도의 데이터연관 기법을 사용하지 않고 각 표적의 방위각을 추적할 수 있다. 그러나 식 (9)는 비선형 행렬 방정식으로 방위각 이노베이션을 구하기 어려우므로 해를 쉽게 구하기 위하여 식 (9)를 선형근사화 한다. 선형근사화를 위하여 식 (9)의 왼쪽 항의  $m$ 번째 요소를 1차 항까지 Taylor 급수 전개하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_i^{m-1}(k) &\simeq \hat{\gamma}_i^{m-1}(k|k-1) + j\omega \frac{d}{c} (m-1) \\ &\quad \cos \hat{\theta}_i(k|k-1) \hat{\gamma}_i^{m-1}(k|k-1) \delta\theta_i(k) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $\hat{\gamma}_i^{m-1}(k|k-1) = e^{j\omega \frac{d}{c} (m-1) \sin \hat{\theta}_i(k|k-1)}$ 이다.

식 (10)을 조향벡터  $\mathbf{a}_i(k)$ 에 대입하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_i(k) &= \begin{bmatrix} 1 \\ \gamma_i(k) \\ \gamma_i^2(k) \\ \vdots \\ \gamma_i^{M-1}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \hat{\gamma}_i(k|k-1) \\ \hat{\gamma}_i^2(k|k-1) \\ \vdots \\ \hat{\gamma}_i^{M-1}(k|k-1) \end{bmatrix} \\ &+ j\omega \frac{d}{c} \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\hat{\theta}_i(k|k-1)) \hat{\gamma}_i(k|k-1) \\ 2 \cos(\hat{\theta}_i(k|k-1)) \hat{\gamma}_i^2(k|k-1) \\ \vdots \\ (M-1) \cos(\hat{\theta}_i(k|k-1)) \hat{\gamma}_i^{M-1}(k|k-1) \end{bmatrix} \delta\theta_i(k) \\ &= \hat{\mathbf{a}}_i(k|k-1) + \hat{\mathbf{b}}_i(k|k-1) \delta\theta_i(k), \quad i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)을 식 (9)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{a}}_i(k|k-1) = B_i(k) \mathbf{y}_i(k), \quad i=1, \dots, N \quad (12)$$

여기서

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{a}}_i(k|k-1) &= \hat{\mathbf{a}}_{ir}(k|k-1) + j\hat{\mathbf{a}}_{ii}(k|k-1) \\ B_i(k) &= [-\hat{\mathbf{b}}_i(k|k-1) \quad \mathbf{w}_1(k) \quad \mathbf{w}_2(k) \quad \dots \quad \mathbf{w}_N(k)] \\ &= B_{ir}(k) + jB_{ii}(k) \\ \mathbf{y}_i(k) &= [\delta\theta_i(k), c_{i1}(k), \dots, c_{iN}(k)]^T \\ &= \mathbf{y}_{ir}(k) + j\mathbf{y}_{ii}(k) \end{aligned}$$

이다.

$\hat{\mathbf{a}}_{ir}(k|k-1), B_{ir}(k), \mathbf{y}_{ir}(k)$ 는 복소행렬의 실수부이고,  $\hat{\mathbf{a}}_{ii}(k|k-1), B_{ii}(k), \mathbf{y}_{ii}(k)$ 는 허수부이다. 여기서  $\delta\theta_i(k)$ 는 실수이므로  $\mathbf{y}_{ii}(k)$ 의 첫 번째 요소는 0이다. 식 (12)의 해  $\mathbf{y}_i(k)$ 를 최소제곱법을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\tilde{\mathbf{y}}_i(k) = (\bar{B}_i(k)^T \bar{B}_i(k))^{-1} \bar{B}_i(k)^T \tilde{\mathbf{a}}_i(k), \quad i=1, \dots, N \quad (13)$$

여기서  $\tilde{\mathbf{a}}_i(k) \triangleq \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{a}}_{ir}(k|k-1) \\ \hat{\mathbf{a}}_{ii}(k|k-1) \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{y}}_i(k) \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{ir}(k) \\ \mathbf{y}_{ii}(k) \end{bmatrix},$

$$\bar{B}_i(k) \triangleq \begin{bmatrix} B_{ir}(k) & -\bar{B}_{ii}(k) \\ B_{ii}(k) & \bar{B}_{ir}(k) \end{bmatrix},$$

$\bar{B}_{ir}(k)$  : 행렬  $B_{ir}(k)$ 의 첫 번째 열을 제거한 행렬  
 $\bar{B}_{ii}(k)$  : 행렬  $B_{ii}(k)$ 의 첫 번째 열을 제거한 행렬  
 $\bar{\mathbf{y}}_{ii}(k)$  : 벡터  $\mathbf{y}_{ii}(k)$ 의 첫 번째 요소를 제거한 벡터이다.

시간  $k$ 에서의 표적의 방위각 추정치는 식 (13)에서 구한  $\tilde{\mathbf{y}}_i(k)$ 의 첫 번째 요소인 방위각 이노베이션을 이용하여 식 (14)와 같이 방위각 예측치를 쇠신함으로써 구할 수 있다.

$$\hat{\theta}_i(k|k) = \hat{\theta}_i(k|k-1) + g_i(k) \delta\theta_i(k), \quad i=1, \dots, N \quad (14)$$

여기서  $g_i(k)$ 는 시간  $k$ 에서의 칼만필터이득이다.

### IV. 시뮬레이션

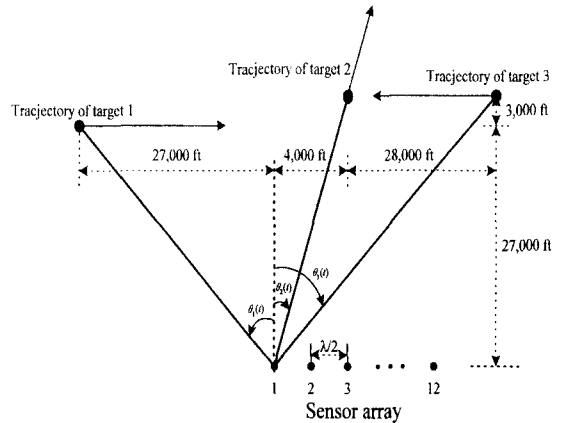
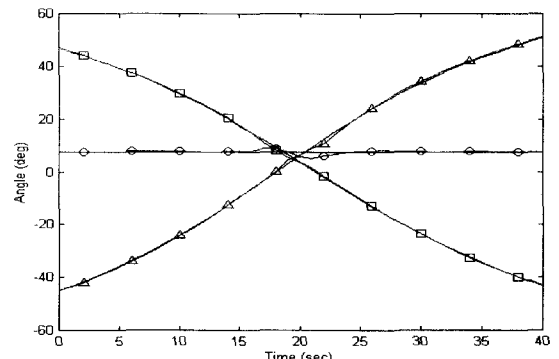


그림 2. 시뮬레이션을 위한 표적과 배열센서의 기하학적 구조

Fig. 2. Three crossing target simulation geometry.

제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 세 표적의 방위각 궤적이 가까이 근접하는 그림 2의 시나리오<sup>[6,9]</sup>에서 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 두 표적은 선배열센서에 평행하게 서로 반대 방향으로 움직이고, 다른 하나의 표적은 기준 센서에서 같은 방위각을 유지하면서 멀어지게 움직이고 있다. 표적의 속도는 각각 1500 ft/s이며, 방위각 궤적은 세 시점에서 서로 교차한다. 선배열센서는 12개의 센서 반 파장( $\lambda/2$ )의 등 간격으로 배열되어 있고, 각 센서잡음크기  $\sigma^2$ 은 1이라 가정하였다. 표본주기  $[(k-1)T, kT]$ 동안 단편(snap shot)의 개수는 50으로 하였고, 표본주기  $T$ 는 1초로 정하였다.



(a)

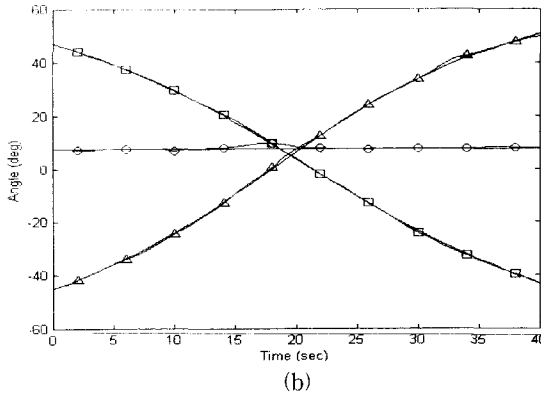


그림 3. 교차하는 방위각 궤적의 대표적인 추적 예 (SNR=5dB,  $\Delta$  표적 1,  $\circ$  표적 2,  $\square$  표적 3)  
 (a) MUSIC(PDA) (b) 제안한 알고리즘  
 Fig. 3. A typical sample run for crossing tracks. (SNR=5dB,  $\Delta$  target 1,  $\circ$  target 2,  $\square$  target 3)  
 (a) MUSIC(PDA) (b) Proposed algorithm

표적의 방위각을 추적하는 일반적인 방법은 MUSIC과 같은 방위각 추정 알고리즘을 이용하여 방위각을 추정하고, PDA(Probabilistic Data Association)[1]와 같은 필터를 이용하여 데이터연관 과정을 거쳐 추적하는 것이다. 이 방법은 일괄 고유치 분해를 통하여 방위각을 추정하여야 하므로 계산 시간이 많이 소요되며 데이터연관 과정이 필요하지만 좋은 추적 성능을 가지고 있다. 한편, Park 등은 데이터연관 과정이 필요 없는 간단한 구조의 방위각 추적 알고리즘을 제안하였다. 이 두 알고리즘과 제안한 알고리즘의 성능을 비교 평가하기 위하여 그림 2의 시나리오에서 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저, MUSIC(PDA) 알고리즘과 제안한 알고리즘의 추적 성능을 확인하기 위하여, 신호대 잡음비가 5 dB에서 두 알고리즘을 이용하여 세 표적을 추적하였다. 대표적인 추적 결과는 그림 3과 같다. 그림 3(a)는 MUSIC(PDA) 알고리즘을 이용한 것이고, 그림 3(b)는 제안한 알고리즘을 이용한 것으로서 두 알고리즘이 표적들을 성공적으로 추적하였다. 그림 3에서 제안한 알고리즘의 추적 성능이 MUSIC(PDA) 알고리즘의 추적 성능과 거의 동등함을 확인할 수 있다.

다음으로, MUSIC(PDA) 알고리즘, Park의 알고리즘, 제안한 알고리즘의 추적 성공률을 확인하기 위하여, 신호대 잡음비가 0 dB, 5 dB, 10 dB에서 각각 100번의 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 각각의 방위각 궤적들을 성공적으로 추적한 추적 성공률은 표 1

과 같다. Park의 알고리즘은 표적들이 서로 가까이 근접하는 경우, 공분산행렬의 랭크가 줄어들어 추적 성능이 매우 저하됨을 표 1로부터 알 수 있다. 그러나 MUSIC(PDA) 알고리즘은 연산량이 많고 구조가 복잡하지만 추적 성능은 우수하다. 한편, 제안한 알고리즘은 Park의 알고리즘과 같이 연산량이 적고 데이터연관 과정이 필요 없는 간단한 구조를 가지지만, 추적 성공률은 각 신호대 잡음비에서 90% 이상으로 MUSIC(PDA) 알고리즘과 거의 동등한 성능을 가짐을 표 1로부터 알 수 있다.

표 1. 교차하는 방위각 궤적의 추적 성공률(%)  
 Table 1. Success rate for crossing tracks(%).

Algorithm \ SNR	0 dB	5 dB	10 dB
MUSIC(PDA)	94	96	98
Park's	51	62	67
Proposed	92	95	98

알고리즘들의 연산량을 비교하기 위하여 표본주기 동안의 부동소수점 연산(floating point operation)량을 계산하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. 제안한 알고리즘의 연산량은 Park의 알고리즘과 거의 같으며, MUSIC(PDA) 알고리즘보다는 매우 작음을 표 2에서 확인할 수 있다.

표 2. 표본주기 동안의 부동소수점 연산량  
 Table 2. Number of floating point operations for sampling interval.

Algorithm	MUSIC (PDA)	Park's	Proposed
Operation number	$1,840 \times 10^3$	$145 \times 10^3$	$144 \times 10^3$

MUSIC(PDA) 알고리즘과 제안한 알고리즘이 가지는 추정 오차의 크기를 확인하기 위하여 각 신호대 잡음비에서 평균제곱오차를 구한 결과는 표 3과 같다. 신호대 잡음비가 큰 10 dB인 경우 두 알고리즘의 평균제곱오차는 거의 같다. 그러나 신호대 잡음비가 작은 0dB인 경우 제안한 알고리즘이 MUSIC(PDA) 알고리즘보다 추정 오차가 큼을 알 수 있다. 이는 PAST 알고리즘이 신호 부공간을 순환적으로 추정하는 근사화 알고리즘으로 연산량은 적으나, 일괄 고유치 분해 기법을 사용

함으로써 연산량이 많은 MUSIC 알고리즘에 비해 신호 대 잡음비가 작은 경우 그 성능이 저하되기 때문이다.

표 3. 평균제곱오차 (deg<sup>2</sup>)  
Table 3. Mean square error (deg<sup>2</sup>).

Algorithm	SNR		
	0 dB	5 dB	10 dB
MUSIC(PDA)	0.3203	0.2049	0.1595
Proposed	0.7140	0.3817	0.1879

제안한 알고리즘을 두 방위각 궤적이 기동(maneuver)하는 경우에 적용하였으며, 그림 4는 그 대표적인 추적 결과이다. 두 궤적의 최소각차(minimum angular distance)가 7.4° 인 경우, 시뮬레이션 결과는 97%의 좋은 추적 성공률을 보였다. 또한 제안한 알고리즘을 표적이 4 개인 경우에 적용하였다. 그 결과 신호대 잡음비가 0 dB, 5 dB, 10 dB에서 각각 91%, 96%, 98%의 추적 성공률을 보였다. 이는 제안한 알고리즘이 기동하는 방위각 궤적이거나 표적의 개수가 변하는 것과 같은 다양한 시나리오에서 추적 성능이 우수함을 보여준다.

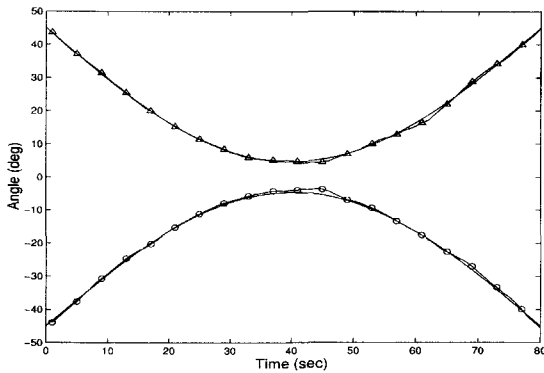


그림 4. 기동하는 방위각 궤적의 대표적인 추적 예 (SNR=5dB, △ 표적 1, ○ 표적 2)  
Fig. 4. A typical sample run for maneuvering tracks (SNR=5dB, △ target 1, ○ target 2)

제안한 알고리즘에서 사용하는 칼만필터의 이노베이션 백색화(innovation whiteness)을 분석하기 위하여,  $i$  번째 표적의 시간평균 자기상관통계(time-average autocorrelation statistic)인 식 (15)를 사용하여 이노베이션의 백색화 실험(whiteness test)<sup>[1]</sup>을 수행하였다.

$$\rho_i(l) = \sum_{k=1}^N \delta\theta_i(k) \delta\theta_i(k+l) \left[ \sum_{k=1}^N \delta\theta_i^2(k) \sum_{k=1}^N \delta\theta_i^2(k+l) \right]^{-1/2} \quad (15)$$

여기서  $l$  은 시간 간격(time step)이다. 이노베이션 백색화 실험의 결과는 그림 5와 같으며, 각 표적의 이노베이션들이 95% 신뢰영역(confidence region) [-0.31, 0.31]안에 대부분 있으므로 이노베이션이 백색(white)임을 확인할 수 있다.

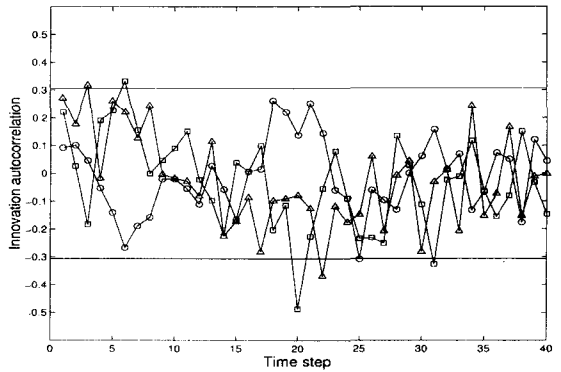


그림 5. 95% 신뢰영역을 가진 이노베이션 자기상관 (SNR=5dB, △ 표적 1, ○ 표적 2, □ 표적 3)  
Fig. 5. Innovation autocorrelation with 95% confidence region (SNR=5dB, △ target 1, ○ target 2, □ target 3)

### V. 결론

본 논문에서는 선형근사화 방법을 이용하여 신호 부공간에서 표적의 방위각을 추출하고 그 궤적을 추적하는 다중 표적 방위각 추적 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 연산량이 적으며 별도의 데이터연관 과정이 필요 없는 간단한 구조를 가지지만, MUSIC 알고리즘에 데이터연관 기법을 결합하여 이루어진 복잡한 구조의 연산량이 많은 기존의 추적 알고리즘과 거의 동등한 성능을 가진다. 그러므로 제안한 알고리즘은 소나, 레이더, 항공교통제어 등에서 다중표적의 방위각 궤적을 추적하는데 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고 문헌

[1] Y. Bar-Shalom and T. E. Fortmann, *Tracking and Data Association*, Academic Press, 1988.

- [2] S. S. Blackman, *Multiple Target Tracking with Radar Application*, Artech House, 1986.
- [3] K. C. Chang and Y. Bar-Shalom, "Joint probabilistic data association for multitarget tracking with possibly unresolved measurements and manuevers," *IEEE Transactions on Automatic control*, vol. AC-29, no. 7, pp. 585-594, July 1984.
- [4] T. E. Fortmann, Y. Bar Shalom, and M. Scheffe, "Sonar tracking of multiple targets using joint probabilistic data association," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. OE-8, no. 3, pp. 173-184, July 1983.
- [5] G. C. Carter, "Coherence and time delay estimation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 75, no. 2, pp. 236-255, Feb. 1987.
- [6] S. B. Park, C. S. Ryu and K. K. Lee, "Multiple target angle tracking algorithm using predicted angles," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-30, no. 2, pp. 643-648, April. 1994.
- [7] Bin Yang, "Projection approximation subspace tracking," *IEEE Transactions on Signal processing*, vol. 43, no. 1, pp. 95-107, Jan 1995.
- [8] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-34, pp. no. 3, 276-280, Mar. 1986.
- [9] K. W. Lo and C. K. Li, "An Improved multiple target angle tracking algorithm," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-28, no. 3, pp. 797-804, July. 1992.

---

 저 자 소 개
 

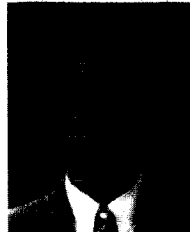
---



柳昌秀(學生會員)

1968년 5월 18일생. 1992년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1994년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 3월~1997년 12월 국방과학연구소 연구원. 1998년 3월~현재 경북대학교

대학원 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심 분야는 수중음향신호처리, 표적추적 및 추정



李秀瀞(學生會員)

1970년 9월 14일생. 1994년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1996년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1996년 3월~현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중.

주관심 분야는 수중음향신호처리, 표적의 상태 추정 및 추적

李均景(正會員) 第32卷 B編 第4號 參照

현재 경북대학교 전자전기공학부 교수