論文2001-38SC-11-1

효율적으로 방위각 이노베이션을 구하는 다중표적 방위각 추적 알고리즘

(Multiple Target Angle Tracking Algorithm with Efficient Equation for Angular Innovation)

柳 昌 秀 *, 李 章 植 **, 李 均 景 *

(Chang-Soo Ryu, Jang-Sik Lee, and Kyun-Kyung Lee)

요 약

최근에 Ryu 등은 추정된 신호부공간(signal subspace)으로부터 구한 방위각 이노베이션을 이용하여 다중표적의 방위각을 추적하는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 데이터를 연관시키면서 동시에 표적의 방위각을 구하기 때문에 기존의 추적 알고리즘과 달리 별도의 데이터연관 기법이 필요 없으며, 구조가 간단하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 표적의 개수가 N일 때, 각 표적의 방위각 이노베이션을 구하기 위하여 차원이 $(2N+1)\times(2N+1)$인 실행렬의 역행렬을 구하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 표적의 조향벡터를 신호부공간에 투영할 때, 투영오차가 0이 된다는 사실로부터 방위각 이노베이션을 구하기 위한 새로운 선형방정식을 제안하였다. 제안한 새로운 선형방정식은 Ryu의 알고리즘에서 사용하는 식과는 달리 한 개의 방위각 이노베이션만을 변수로 사용하기 때문에 역행렬을 구할 필요가 없고 효율적이다.

Abstract

Recently, Ryu et al. proposed a multiple target angle tracking algorithm using the angular innovation extracted from the estimated signal subspace. This algorithm obtains the angles of targets and associates data simultaneously. Therefore, it has a simple structure without data association problem. However it requires the calculation of the inverse of a real matrix with dimension $(2N+1)\times(2N+1)$ to obtain the angular innovations of N targets. In this paper, a new linear equation for angular innovation is proposed using the fact that the projection error is zero when the target steering vector is projected onto the signal subspace. As a result, the proposed algorithm dose not require the matrix inversion and is computationally efficient.

* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

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

** 正會員, 斗源工科大學 컴퓨터應用制御科

(Dept. of Computer Applied Control, Doowon Technical College)

※ 이 논문은 수중음향특화센터와 2001년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었습니다.

接受日字:2001年8月20日, 수정완료일:2001年10月4日

I. 서 론

선배열센서를 이용하여 움직이는 표적의 방위각을 추적하는 문제는 지난 수십년 동안 레이다, 소나, 통신, 산업응용 등 다양한 분야에서 많이 연구되어져 왔다[1]. 표적의 방위각을 추적하기 위한 기존의 알고리즘은 방위각 추정 알고리즘[1, 2]과 추정된 방위각을 연관시켜 주는 데이터연관필터[3]로 구성되어 있는 복잡한 구조를 가지고 있다.

방위각 추적을 위한 다른 한 기법으로써, 표적의 방위각 데이터를 자동적으로 연관시키면서 동시에 표적의 방위각을 추정하여 추적하는 알고리즘들이 연구되어져 왔다[4-8]. 이러한 알고리즘들은 기존의 방위각 추적 알고리즘에 비해 별도의 데이터연관필터가 필요없으며 구조가 간단하다는 장점을 가지고 있다. 최근에 Ryu 등은 이들 알고리즘의 장점들을 그대로 유지하면서 신호부공간으로부터 구한 방위각 이노베이션을 이용하여 보다 효과적인 다중표적 방위각 추적 알고리즘을 제안하였다[8]. 표적의 개수가 N으로 알려져 있을 때, Ryu의 알고리즘은 N개의 칼만필터를 사용한다. 칼만필터에서 구한 표적들의 방위각 예측치는 신호부공간 추적 알고리즘[9]을 이용하여 구한 신호부공간으로부터 각 표적의 방위각 이노베이션을 구하는데 사용된다. 칼만필터는 측정치 대신에 이 방위각 이노베이션을 이용하여 표적의 상태벡터를 쇄신(update)한다. Ryu의 알고리즘은 조향벡터를 신호부공간의 선형조합으로 표현할 수 있다는 사실로부터 구한 비선형 관계식을 Taylor 급수 전개하여 선형근사화함으로써, 각 표적들의 방위각 이노베이션을 구하기 위한 선형행렬방정식을 구한다. 이 선형 행렬방정식은 방위각 이노베이션뿐만 아니라 조향벡터를 신호부공간의 선형조합으로 표현하기 위한 $2N$개의 실인수를 동시에 구하여야 한다. 그러므로 이 행렬방정식은 $(2N+1)$개의 변수를 가지며, 한 표적의 방위각 이노베이션을 구하기 위해서는 차원이 $(2N+1)\times(2N+1)$인 실행렬의 역행렬을 구하는 것이 필요할뿐만 아니라, 행렬들의 곱셈이 필요하다.

본 논문에서는 표적의 조향벡터를 신호부공간에 투영(projection)할 때, 조향벡터가 신호부공간안에 존재함으로 투영오차가 0이 된다는 사실로부터 조향벡터와 신호부공간사이의 비선형 관계식을 먼저 구한다. 이 비선형 관계식을 Ryu의 알고리즘에서와 같이 Taylor 급수 전개하여 선형근사화함으로써 방위각 이노베이션을 구하기 위한 선형방정식을 유도하였다. 이 선형방정식은 Ryu의 알고리즘과는 달리 방위각 이노베이션만을 변수로 가지기 때문에, 차원이 $(2N+1)\times(2N+1)$인 실행렬의 역행렬을 구할 필요가 없으며, 한 개의 변수만을 가지므로 방위각 이노베이션은 간단한 연산에 의해 효율적으로 구할 수 있다. 그러므로 방위각 이노베이션을 구할 때, 이 새로운 식을 이용하면 방위각 이노베이션을 구하기 위한 연산량을 줄일 수 있다. 이 새로운 식을 Ryu의 방위각 추적 알고리즘에 사용함으로써 Ryu의 알고리즘의 장점들을 그대로 유지하면서 효율적인 방위각 추적 알고리즘을 제안하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 선배열센서를 이용한 표적의 방위각 추적 문제를 센서의 출력신호 모델과 함께 설명하였으며, III장에서는 방위각 이노베이션을 구하기 위한 선형방정식을 유도하고, 제안한 방위각 추적 알고리즘을 요약하였다. IV에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 알고리즘이 Ryu의 알고리즘에 비해 추적오차는 동등하지만 연산량이 감소하였음을 확인하였으며, V장에서는 결론을 맺었다.

II. 문제설정

M개의 센서가 등 간격 d로 배열된 선배열센서가 움직이고 있는 N개의 원거리 표적으로부터 발생한 신호를 센서잡음이 존재하는 환경에서 수신한다고 가정한다. 그림 1은 표적의 방위각 추적을 위한 선배열센서와 표적들 사이의 기하학적 구조를 설명하고 있다. 표적의 방위각 $\{\theta_n(t),\ n=1,2,\cdots,N\}$은 선배열센서의 기준센서에서 수직방향을 기준으로 표적과 이루는 각으로 정의한다. 여기서 기준센서는 선배열센서의 좌측 첫 번째 센서로 정의한다. 협대역신호모델(narrowband signal model)을 사용할 때, 시간 t에서 m번째 센서의 출력은 다음과 같다[1].

$$r_m(t) = \sum_{n=1}^{N} s_n(t)\, e^{j\omega\tau_{mn}(t)} + n_m(t) \qquad (1)$$

여기서 $s_n(t)$는 n번째 표적의 신호로써 복소신호이며,

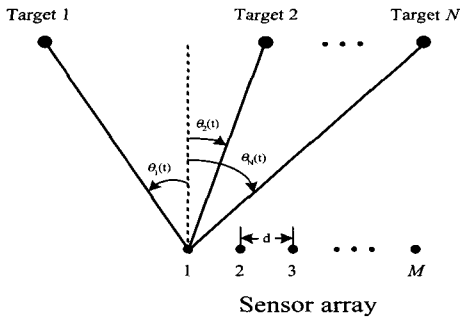


그림 1. 표적 추적을 위한 표적과 선배열센서의 기하학적 구조

Fig. 1. Geometry of uniform linear array and targets for tracking target.

ω는 전송주파수이다. $n_m(t)$는 m번째 센서의 백색 가우시안 잡음으로 평균이 0이고 분산이 σ^2이다. 센서잡음들은 서로 상관관계(correlation)가 없으며, 표적신호들과도 상관관계가 없다고 가정한다. $\tau_{mn}(t)$는 n번째 표적신호가 선배열센서에 도달할 때, 기준센서와 m번째 센서 사이의 시간지연이다. 표적이 선배열센서로부터 멀리 떨어져 있는 원거리 표적인 경우 표적신호는 평면파로 간주할 수 있으며, 시간지연 $\tau_{mn}(t)$과 표적의 방위각사이의 관계식을 선배열센서와 표적의 기하학적 구조로부터 쉽게 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$\tau_{mn}(t) = \frac{d}{c}(m-1)\sin\theta_n(t) \tag{2}$$

여기서 c는 신호전송속도이다.
선배열센서의 출력은 벡터 표기법을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\boldsymbol{r}(t) = \sum_{n=1}^{N} s_n(t)\,\boldsymbol{a}_n(t) + \boldsymbol{n}(t) \tag{3}$$

여기서 센서출력벡터 $\boldsymbol{r}(t)$, 잡음벡터 $\boldsymbol{n}(t)$는 복소벡터로써 다음과 같이 각각 정의하며, T는 전치(transpose)를 의미한다.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{r}(t) &= [\,r_1(t), r_2(t), \cdots, r_M(t)\,]^T \\ \boldsymbol{n}(t) &= [\,n_1(t), n_2(t), \cdots, n_M(t)\,]^T\end{aligned} \tag{4}$$

그리고 조향벡터(steering vector) $\boldsymbol{a}_n(t) = [\,1, \gamma_n(t), \cdots, \gamma_n^{M-1}(t)\,]^T$의 $\gamma_n(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma_n(t) = e^{j\omega\frac{d}{c}\sin\theta_n(t)}, \quad n = 1, 2, \cdots, N \tag{5}$$

Ⅲ. 제안한 알고리즘

1. 방위각 이노베이션 계산

신호부공간 추적 알고리즘[9]은 센서출력벡터를 이용하여 신호부공간을 적응적으로 쇄신하여 추적하는 알고리즘으로 기존의 고유치분해 기법에 기반을 둔 일괄처리 알고리즘에 비해 연산량이 적다. 표본시간 k에서 신호부공간 추적 알고리즘을 이용하여 추정한 신호부공간을 $W(k) = [\,\boldsymbol{w}_1(k), \boldsymbol{w}_2(k), \cdots, \boldsymbol{w}_N(k)\,]$이라 할 때, Ryu의 알고리즘[8]에서는 n번째 표적의 조향벡터 $\boldsymbol{a}_n(k)$가 신호부공간의 선형조합으로 식 (6)과 같이 표현할 수 있다는 사실로부터 방위각 이노베이션을 구하기 위한 선형근사화 행렬방정식을 유도하였다. 식 (6)에서 미지수는 $\boldsymbol{a}_n(k)$로부터 생기는 방위각 이노베이션 $\delta\theta_n(k)$와 복소인수 $\{c_{np}(k),\ p = 1, \cdots, N\}$이며, 복수인수는 2개의 실수값으로 표현되므로 실수값 미지수는 $(2N+1)$개가 된다. 선형근사화 행렬 방정식에서 이 실수 미지수들의 값을 구하기 위해서는 행렬들의 곱셈에 의한 차원이 $(2N+1)\times(2N+1)$인 실행렬을 구하고 이 행렬의 역행렬을 구하는 것이 필요하며, 이 역행렬이 포함된 행렬들의 곱셈이 추가적으로 필요하다.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{a}_n(k) = {} & c_{n1}(k)\,\boldsymbol{w}_1(k) + c_{n2}(k)\,\boldsymbol{w}_2(k) + \cdots \\ & + c_{nN}(k)\,\boldsymbol{w}_N(k), \quad n = 1, \cdots, N\end{aligned} \tag{6}$$

n번째 표적의 조향벡터 $\boldsymbol{a}_n(k)$는 추정한 신호부공간에 존재한다는 것은 알려져 있는 입증된 사실이다[2]. 이 사실로부터 조향벡터 $\boldsymbol{a}_n(k)$를 신호부공간 $W(k)$에 투영(projection)시키면 그 투영오차는 0이 된다. 제안한 알고리즘에서는 Ryu의 알고리즘과 달리 이 사실을 이용하며, 이 것은 실제로 Ryu의 알고리즘에서 식 (6)을 유도하기 위하여 사용한 사실과 수학적으로 동일한 표현이다. 이 사실로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$P^{\perp}(k)\,\boldsymbol{a}_n(k) = \boldsymbol{0} \tag{7}$$

여기서 $P^{\perp}(k) = I - P_r(k)$이며, 행렬 $P_r(k) = W(k)(W^H(k)W(k))^{-1}W^H(k)$는 신호부공간 $W(k)$로 투영하는 투영행렬(projection matrix)이다. 그리고 I는 차원이 $M\times M$인 단위행렬이며, H는 복소공액전치(complex conjugate transpose)를 의미한다.

표본시간 k에서 n번째 표적의 방위각 $\theta_n(k)$와 방위각 예측치 $\widehat{\theta_n}(k|k-1)$ 그리고 방위각 이노베이션 $\delta\theta_n(k)$의 관계는 $\theta_n(k) = \widehat{\theta_n}(k|k-1) + \delta\theta_n(k)$이다. 표본시간 $k-1$에서 예측한 표적의 방위각 예측치는 칼만필터를 이용하여 구할 수 있으며, 표적의 방위각 정보는 추정된 신호부공간에 존재한다. 그러므로 방위각 이노베이션, 방위각 예측치, 추정된 신호부공간사이의 관계식을 구하면 방위각 이노베이션을 구할 수 있다. 이 관계식을 구하기 위하여 식 (5)에서 $\theta_n(k)$대신에 $\widehat{\theta_n}(k|k-1) + \delta\theta_n(k)$를 대입하면, n번째 표적의 조향

벡터의 m번째 요소는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\gamma_n^{m-1}(k) &= e^{j\omega\frac{d}{c}(m-1)\sin\theta_n(k)} \\ &= e^{j\omega\frac{d}{c}(m-1)\sin(\hat{\theta}_n(k|k-1)+\delta\theta_n(k))}\end{aligned} \tag{8}$$

식 (8)을 식 (7)의 조향벡터 $\boldsymbol{a}_n(k)$에 대입하면 n번째 표적의 방위각 이노베이션에 대한 비선형방정식을 얻을 수 있으며, 이 비선형방정식에서 행렬 $P^{\perp}(k)$와 방위각 예측치 $\hat{\theta}_n(k|k-1)$을 알고 있으므로 방정식의 해를 구하면, 표적의 방위각 이노베이션을 구할 수 있다. 그러나 이 방정식은 비선형방정식으로 방위각 이노베이션에 대한 닫힌 해(closed form solution)를 구할 수 없다. 그러므로 닫힌 해를 구하기 위하여 이 비선형방정식을 Taylor 급수 전개를 이용하여 선형근사화 한다. 이 방정식에서 조향벡터의 m번째 요소를 1차 항까지 Taylor 급수 전개하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\gamma_n^{m-1}(k) \simeq\ & \hat{\gamma}_n^{\,m-1}(k|k-1) \\ & + j\omega\frac{d}{c}(m-1)\cos\hat{\theta}_n(k|k-1) \\ & \hat{\gamma}_n^{\,m-1}(k|k-1)\,\delta\theta_n(k)\end{aligned} \tag{9}$$

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

식 (9)를 조향벡터 $\boldsymbol{a}_n(k)$에 대입하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{a}_n(k) &= \begin{bmatrix}1\\ \gamma_n(k)\\ \gamma_n^2(k)\\ \vdots\\ \gamma_n^{M-1}(k)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1\\ \hat{\gamma}_n(k|k-1)\\ \hat{\gamma}_n^{\,2}(k|k-1)\\ \vdots\\ \hat{\gamma}_n^{\,M-1}(k|k-1)\end{bmatrix} + j\omega\frac{d}{c} \\ &\begin{bmatrix}0\\ \cos(\hat{\theta}_n(k|k-1))\hat{\gamma}_n(k|k-1)\\ 2\cos(\hat{\theta}_n(k|k-1))\hat{\gamma}_n^{\,2}(k|k-1)\\ \vdots\\ (M-1)\cos(\hat{\theta}_n(k|k-1))\hat{\gamma}_i^{\,M-1}(k|k-1)\end{bmatrix}\delta\theta_n(k) \\ &= \hat{\boldsymbol{a}}_n(k|k-1) + \hat{\boldsymbol{b}}_n(k|k-1)\delta\theta_n(k)\end{aligned} \tag{10}$$

식 (10)을 식 (7)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}P^{\perp}(k)\,\boldsymbol{a}_n(k) &= P^{\perp}(k)(\hat{\boldsymbol{a}}_n(k|k-1) \\ &\quad + \hat{\boldsymbol{b}}_n(k|k-1)\delta\theta_n(k)) \\ &= \boldsymbol{0}\end{aligned} \tag{11}$$

그리고 식 (11)을 이항 정리하면 다음과 같다.

$$\boldsymbol{u}_n(k)\delta\theta_n(k) = \boldsymbol{y}_n(k) \tag{12}$$

여 기 서 $\boldsymbol{u}_n(k) = P^{\perp}(k)\,\hat{\boldsymbol{b}}_n(k|k-1)$, $\boldsymbol{y}_n(k) = -P^{\perp}(k)\,\hat{\boldsymbol{a}}_n(k|k-1)$이다.

식 (12)는 선형방정식이며, $\boldsymbol{u}_n(k)$과 $\boldsymbol{y}_n(k)$는 $M\times 1$ 복소벡터이고 방위각 이노베이션 $\delta\theta_n(k)$는 실수 값이다. 그러므로 각 표적의 방위각 이노베이션은 식 (12)의 해 $\delta\theta_n(k)$를 최소제곱법을 이용하여 구함으로써 식 (13)과 같이 구할 수 있으며, 식 (13)은 스칼라 값을 스칼라 값으로 나누는 형태이며 Ryu의 알고리즘과는 달리 차원이 $(2N+1)\times(2N+1)$인 실행렬의 역행렬을 구할 필요가 없다. 식 (13)은 Ryu의 알고리즘과 같은 수학적 사실에 근거하여 유도된 식이므로 Ryu의 알고리즘에서의 방위각 이노베이션을 구하는 식과 수학적으로 동일하다.

$$\delta\theta_n(k) = \frac{\bar{\boldsymbol{u}}_n(k)^T\,\bar{\boldsymbol{y}}_n(k)}{\bar{\boldsymbol{u}}_n(k)^T\,\bar{\boldsymbol{u}}_n(k)}, \quad n = 1, 2, \cdots, N \tag{13}$$

여기서 $\bar{\boldsymbol{u}}_n(k) = \begin{bmatrix}\boldsymbol{u}_{nR}(k)\\ \boldsymbol{u}_{nI}(k)\end{bmatrix}$, $\bar{\boldsymbol{y}}_n(k) = \begin{bmatrix}\boldsymbol{y}_{nR}(k)\\ \boldsymbol{y}_{nI}(k)\end{bmatrix}$

이고, $\boldsymbol{u}_{nR}(k)$와 $\boldsymbol{y}_{nR}(k)$는 복소벡터의 실수부이고, $\boldsymbol{u}_{nI}(k)$와 $\boldsymbol{y}_{nI}(k)$는 허수부이다.

2. 방위각 추적 알고리즘

등속도모델을 이용한 칼만필터의 n번째 표적의 동역학 상태방정식(dynamic state equation)과 측정 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다[3].

$$x_n(k+1) = Fx_n(k) + w_n(k) \tag{14}$$

$$z_n(k) = Hx_n(k) + v_n(k) \tag{15}$$

여기서 $x_n(k) = [\,\theta_n(k)\ \dot{\theta}_n(k)\,]^T$, $F = \begin{bmatrix}1 & T\\ 0 & 1\end{bmatrix}$, $H = [\,1\ 0\,]$이고, 모델잡음 $w_n(k)$와 측정잡음 $v_n(k)$의 평균은 0이며 각각의 공분산행렬과 분산은 $Q_n(k)$와 $\sigma^2_{z_n}(k)$이다.

식 (14), 식 (15), 방위각 이노베이션 $\delta\theta(k)$와 방위각 이노베이션의 분산 $s(k)$를 이용한 n번째 표적의 칼만 필터의 식들은 다음과 같다.

$$\hat{x}_n(k|k-1) = F\,\hat{x}_n(k-1|k-1) \tag{16}$$

$$P_n(k|k-1) = FP_n(k-1|k-1)F^T + Q_n(k) \tag{17}$$

$$\hat{x}_n(k|k) = \hat{x}_n(k|k-1) + G_n(k)\delta\theta_n(k) \tag{18}$$

$$P_n(k|k) = [I - G_n(k)H]P_n(k|k-1) \tag{19}$$

$$G_n(k) = P_n(k|k-1)H^T s_n^{-1}(k) \tag{20}$$

여기서 $G_n(k)$는 칼만필터의 이득이다.

표적의 방위각을 추적하기 위하여 N개의 칼만필터을 초기화하며, 이를 위하여 먼저 MUSIC[2]과 같은 방위각 추정 알고리즘을 이용하여 표적의 개수 및 표적들의 방위각을 추정한다. 식 (16)에서 상태벡터 예측치 $\hat{x}_n(k|k-1)$의 첫 번째 요소가 방위각 예측치 $\hat{\theta}_n(k|k-1)$이며, 이 방위각 예측치를 이용하여 방위각 이노베이션 $\delta\theta_n(k)$를 구한다. 방위각 이노베이션을 이용하여 식 (18)로부터 상태벡터의 추정치 $\hat{x}_n(k|k)$을 구할 수 있으며, $\hat{x}_n(k|k)$의 첫 번째 요소가 표본시간 k에서 추적하고자하는 n번째 표적의 방위각 추정치 $\hat{\theta}_n(k|k)$가 된다. 제안한 다중표적 방위각 추적 알고리즘의 흐름도는 그림 2와 같으며, 각 단계를 다음과 같이 요약할 수 있다.

단계 1. 방위각 추정 알고리즘을 이용하여 표본시간 $k=-1,0$에서 표적들의 방위각을 추정하고, 이를 이용하여 각 표적에 칼만필터의 상태벡터와 상태벡터의 공분산행렬을 다음과 같이 초기화한다.

$$\hat{x}_n(0|0) = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_n(0|0) \\ \hat{\theta}_n(0|0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_n(0) \\ \dfrac{\hat{\theta}_n(0) - \hat{\theta}_n(-1)}{T} \end{bmatrix}$$

$$P_n(0|0) = \begin{bmatrix} \sigma^2_{z_n} & \dfrac{\sigma^2_{z_n}}{T} \\ \dfrac{\sigma^2_{z_n}}{T} & \dfrac{\sigma^2_{z_n}}{T^2} \end{bmatrix}, \quad n=1,2,\cdots,N \tag{21}$$

단계 2. 식 (16)을 이용하여 상태벡터의 예측치 $\{\hat{x}_n(k|k-1),\ n=1,2,\cdots,N\}$을 계산하고, 이로부터 방위각 예측치 $\{\hat{\theta}_n(k|k-1),\ n=1,2,\cdots,N\}$을 구한다.

단계 3. 신호부공간 $W(k)$로부터 각 표적의 방위각 이노베이션 $\{\delta\theta_n(k), n=1,2,\cdots,N\}$을 식 (13)을 이용하여 계산한다.

단계 4. 식 (18)을 이용하여 각 표적의 상태벡터의 추정치 $\{\hat{x}_n(k|k),\ n=1,2,\cdots,N\}$을 계산하고, 이로부터 방위각 추정치 $\{\hat{\theta}_n(k|k),\ n=1,2,\cdots,N\}$을 구한다.

단계 5. 다음 표본시간에서 표적의 방위각을 추적하기 위하여 단계 2부터 순환적으로 수행한다.

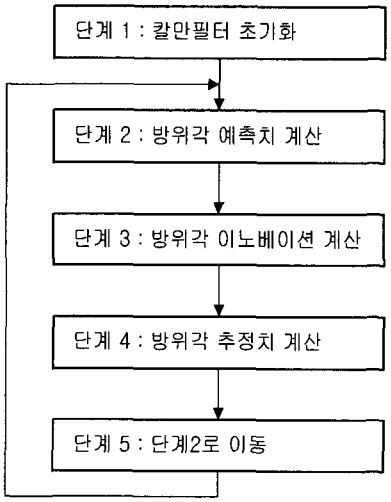


그림 2. 제안한 방위각 추적 알고리즘의 흐름도
Fig. 2. Flow chart of the proposed angle tracking algorithm.

Ⅳ. 시뮬레이션

제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 5개의 표적의 방위각 궤적이 서로 근접하여 교차하거나 기동하는 시뮬레이션 시나리오에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 선배열센서의 센서개수는 $M=15$로 하였으며, 센서간격은 $d=1$(m)로 정하였다. 그리고 센서잡음크기는 $\sigma^2=1$로 가정하였다. 표본간격 $[(k-1)T,\ kT]$동안 단편개수 $N_s=30$으로 사용하였으며, 표본주기는 $T=1$초로 정하였다.

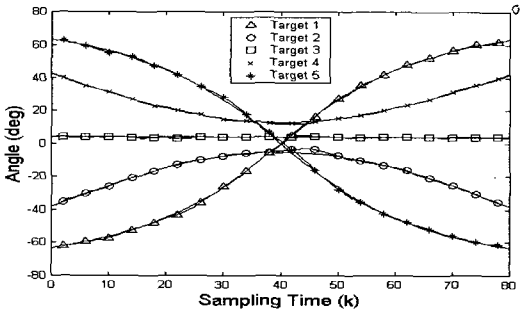
n번째 표적을 위한 칼만필터의 모델잡음의 공분산행렬 $Q_n(k)$와 측정잡음의 분산 $\sigma^2_{z_n}(k)$는 다음과 같이 정하였다.

$$Q_n(k) = \begin{bmatrix} \frac{T^3}{3} & \frac{T^2}{2} \\ \frac{T^2}{2} & T \end{bmatrix} q, \quad q = 1^\circ$$
$$\sigma^2_{z_n}(k) = 4^\circ \qquad n = 1, 2, \cdots, N \tag{22}$$

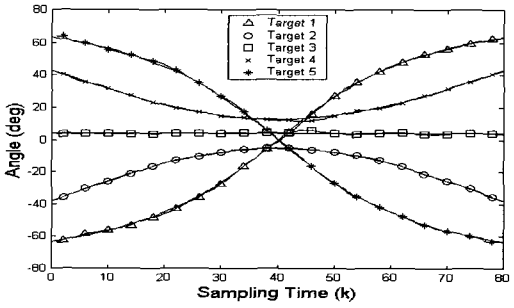
그림 3은 신호대잡음비가 0 dB인 시뮬레이션 시나리오에서 표적의 방위각 궤적을 추적한 대표적인 결과로써, (a)는 Ryu의 알고리즘의 방위각 궤적 추적 결과이며, (b)는 제안한 알고리즘의 방위각 궤적 추적 결과이다. 두 알고리즘이 유사한 추적성능을 가짐을 확인할 수 있다. 두 알고리즘의 성능을 구체적으로 확인하기 위하여 같은 시뮬레이션 시나리오에서 신호대잡음비가 0 dB, 5 dB, 10 dB에 대하여 100번의 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 Ryu의 알고리즘과 제안한 알고리즘이 가지는 추적오차의 평균제곱오차(mean square error)와 방위각 이노베이션을 구하기 위한 평균부동소수점 연산량을 몬테칼로 시뮬레이션으로부터 구한 것이다.

제안한 알고리즘은 Ryu의 알고리즘이 표적의 조향벡터가 신호부공간에 존재한다는 입증된 사실의 동일한 근거로부터, 방위각 이노베이션을 구하기 위한 효율적인 선형방정식을 Ryu의 알고리즘과는 다른 수학적 표현으로부터 유도함으로써 제안되었으며, 두 알고리즘의 구조는 동일하다. 그리고 제안한 선형방정식은 Ryu의 알고리즘과 같이 Taylor 급수전개에 의한 동일한 근사화 과정을 거쳐 얻는다. 그러므로 두 알고리즘의 추적오차를 결정하는 방위각 이노베이션의 정확도는 정성적으로 동일하며, 따라서 두 알고리즘의 추적오차는 동일한 것으로 정성적으로 예측할 수 있다. 표 1에서 제안한 알고리즘의 추적오차가 Ryu의 알고리즘과 거의 동등한 추적오차를 가짐을 확인할 수 있으며, 이는 정성적인 분석과 일치한다.

제안한 알고리즘의 방위각 이노베이션을 구하기 위한 연산량을 Ryu의 알고리즘과 비교하기 위하여 Matlab에 내장되어 있는 flops 함수를 이용하여 FLOPS(Floating Point Operations) 단위로 측정하였으며, 실수의 곱셈과 덧셈은 1 FLOPS로 복소수의 곱셈과 덧셈은 6 FLOPS와 2 FLOPS로 각각 측정한다. 표본시간 k에서 제안한 알고리즘의 모든 표적의 방위각 이노베이션을 구하기 위한 연산량은 식 (7)의 행렬 $P^{\perp}(k)$, 식 (12)의 $\boldsymbol{u}_n(k)$와 $\boldsymbol{y}_n(k)$, 식 (13)을 계산하는데 필요한 연산량의 총합으로 추정할 수 있다. 행렬 $P^{\perp}(k)$를 계산하는데 필요한 연산량은 $\{2(2N)^3 + 16MN^2 + 8M^2N\}$ FLOPS로 추정할 수 있으며, 이 때 곱셈(나눗셈)과 덧셈(뺄셈)만을 계산하였으며 다른 식들의 연산량 계산에서도 곱셈과 덧셈만을 계산하였다. $\boldsymbol{u}_n(k)$, $\boldsymbol{y}_n(k)$, 식 (13)은 각 표적마다 구하는 것이므로 N번의 계산이 필요하며, 이들을 구하는데 필요한 연산량은 $\{16M^2 + 8M\} \times N$ FLOPS로 추정할 수 있다. 그러므로 제안한 알고리즘의 방위각 이노베이션을 구하기 위한 총 연산량은 $\{2(2N)^3 + 16MN^2 + 8M^2N\} + \{16M^2 + 8M\} \times N$ FLOPS로 추정할 수 있다. Ryu의 알고리즘에서는 $(2N+1) \times (2N+1)$ 실행렬의 역행렬 계산, 그리고 이 역행렬 $2M \times (2N+1)$ 실행렬들, 벡터들의 곱셈들은 N번 구하는 것이 필요하며, 이것의 총 연산량은 $\{2(2N+1)^3 + 8M(2N+1)^2 + 4M(2N+1)\} \times N$ FLOPS로 추정할 수 있다. 두 알고리즘의 추정된 연산량에서, 제안한 알고리즘은 표적의 개수가 증가함에 따



(a)



(b)

그림 3. 방위각 궤적의 대표적인 추적 예(SNR= 0 dB)
(a) Ryu의 알고리즘 (b) 제안한 알고리즘

Fig. 3. A typical sample run for tracking angular tracks(SNR = 0 dB)
(a) Ryu's algorithm (b) Proposed algorithm.

라 N^3으로 증가하지만 Ryu의 알고리즘은 N^4으로 증가한다. 그러므로 표적이 증가할수록 제안한 알고리즘이 Ryu의 알고리즘보다 연산량에 있어서 효율적임을 추정할 수 있다. 표적의 개수가 5개일 때, 제안한 알고리즘의 방위각 이노베이션을 구하기 위한 평균부동소수점 연산량은 Ryu의 알고리즘의 40%로 감소함을 표 1에서 확인할 수 있다. 표적의 개수가 많아지는 경우 두 알고리즘의 방위각 이노베이션을 구하기 위한 연산량의 차이는 더 커진다. 표적의 개수가 6개일 때, 제안한 알고리즘의 방위각 이노베이션을 구하기 위한 연산량은 Ryu의 알고리즘의 28.5%로 표적이 5개 일 때보다 더 감소하며 보다 효율적임을 확인할 수 있다.

표 1. 두 알고리즘의 성능

Table 1. Performance of two algorithms.

알고리즘	방위각 궤적의 MSE($\deg^2$) $N=5$			방위각 이노베이션의 평균 연산량(FLOPS)	
	0 dB	5 dB	10 dB	$N=5$	$N=6$
Ryu의 알고리즘	0.30195	0.17520	0.11273	92,482	158,138
제안한 알고리즘	0.30126	0.17285	0.12803	35,895	45,101

V. 결 론

본 논문에서는 방위각 이노베이션을 구하기 위한 새로운 식을 제안하였다. 이 새로운 식은 $(2N+1)$개의 실변수를 구하기 위하여 차원이 $(2N+1)\times(2N+1)$인 실행렬의 역행렬을 구하는 것이 필요한 Ryu의 선형행렬 방정식과는 달리 한 개의 방위각 이노베이션을 선형방정식의 간단한 계산으로 구할 수 있으므로 효율적이다. 제안한 알고리즘이 추적한 방위각 궤적의 평균제곱오차는 Ryu의 알고리즘이 가지는 방위각 궤적의 평균제곱오차와 동등하다. 5개 표적의 방위각 궤적을 추적하는 시뮬레이션 시나리오에서, 방위각 이노베이션을 구하기 위한 연산량에 있어서는 제안한 알고리즘이 Ryu의 알고리즘에서 필요한 연산량의 40%로 감소하며, 표적의 개수가 6개 인 경우에는 28.5%로 감소한다. 그러므로 표적의 개수가 증가할수록 제안한 알고리즘이 Ryu의 알고리즘에 비해 더욱 효율적이다.

참 고 문 헌

[1] Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, Array Signal Processing Conception and Techniques, Prentice-Hall, 1993.

[2] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-34, no. 3, pp. 276~280, Mar. 1986.

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

[4] C. K. Sword, M. Samaan and E. W. Kamen, "Multiple target angle tracking using sensor array outputs," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 26, no. 2, pp. 367~373, Mar. 1990.

[5] K. W. Lo and C. K. Li, "An improved multiple target angle tracking algortithm," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-28, no. 3, pp. 797~804, July 1992.

[6] C. R. Rao, L. Zhang and L. C. Zhao, "Multiple target angle tracking using sensor array outputs," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 29, no. 1, pp. 268~271, Jan. 1993.

[7] 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.

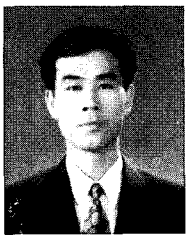
[8] Chang-Soo Ryu, Su-Hyoung Lee and Kyun-Kyung Lee, "Multiple target angle tracking algorithm using angular innovations extracted from signal subspace," Electronics Letters, vol. 35, No. 18, pp. 1520~1522, Sep. 1999.

[9] Bin Yang, "Projection approximation subspace tracking," IEEE Transactions on Signal processing, vol. 43, no. 1, pp. 95~107, Jan. 1995.

저 자 소 개

柳 昌 秀(學生會員)

1992년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1994년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 3월~1997년 12월 : 국방과학연구소 연구원. 2000년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료. 1998년 3월~현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. <주관심분야> 표적추적 및 추정, 수중음향신호처리, 배열센서 신호처리



李 章 植(正會員)

1984년 2월 : 경북대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사). 1986년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1996년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료. 1986년~1997년 : 국방과학연구소 선임연구원. 1997년~현재 : 두원공과대학 컴퓨터응용제어과 교수. <주관심분야> 수중음향신호처리, 표적위치추정, 표적탐지 및 추적

李 均 景(正會員) 第32卷 B編 第14號 參照

현재 : 경북대학교 전자전기공학부 교수