

논문 2011-48IE-1-4

효율적인 방위각 이노베이션 계산식을 가진 수정된 다중표적 방위각 추적 알고리즘

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

류 창 수*

(Chang Soo Ryu)

요 약

Ryu 등은 방위각 이노베이션을 효율적으로 구할 수 있는 계산식을 가진 다중표적 방위각 추적 알고리즘을 제안하였으며, 이 알고리즘은 데이터연관 문제가 발생하지 않는다는 장점을 가지고 있다. Ryu 알고리즘의 효율적인 방위각 이노베이션 계산식은 선배열센서를 사용하는 경우에 대하여 유도하였기 때문에, Ryu 알고리즘은 선배열센서에만 적용이 가능하다. 다중표적 방위각 추적 문제를 연구하는 많은 분야에서 다양한 형태의 배열센서를 사용하고 있다. 특히, 소나(Sonar)에서는 선배열센서 뿐만 아니라 원통형 배열센서도 많이 사용되고 있으며, 원통형 배열센서를 사용하는 대표적인 소나로 선체고정형 소나(Hull Mounted Sonar)가 있다. 본 논문에서 Ryu의 다중표적 방위각 추적 알고리즘을 원통형 배열센서에 적용할 수 있도록 수정하고, 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 수정된 알고리즘의 추적성능을 확인한다.

Abstract

Ryu et al. proposed a multiple target angle-tracking algorithm with efficient equation for angular innovation, and Ryu's algorithm has good feature that it has no data association problem. Ryu's algorithm is only applicable to linear sensor array, because its efficient equation for angular innovation is derived in case of using a linear sensor array. In a many fields studying multiple target angle-tracking, the various shapes of sensor array are used. In sonar, a cylindrical sensor array is as much used as a linear sensor array, a example is hull mounted sonar. In this paper, Ryu's algorithm is modified to be applicable to cylindrical sensor array, and the tracking performance of a modified algorithm is verified by various computer simulations.

Keywords : DOA Tracking, Sensor Array, Signal Subspace, Hull Mounted Sonar

I. 서 론

소나, 레이더, 통신 등 다양한 분야에서 움직이고 있는 다중표적의 방위각을 추적하는 문제에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 다중표적의 방위각을 추적하는 일반적인 방법은 방위각 추정 알고리즘으로 방위각을

추정하고, 추정된 방위각을 연관시켜 주는 데이터연관 필터로 구성되어 있다^[1~2].

Ryu 등은 기존의 다중표적 방위각 추적 기법과 접근 방법이 다른 방위각 추적 기법으로써 방위각 이노베이션을 효율적으로 구할 수 있는 계산식을 가진 다중표적 방위각 추적 알고리즘을 제안하였다^[3]. 이 알고리즘은 기존의 기법과는 달리 데이터연관 문제가 발생하지 않는 간단한 구조로 되어 있는 장점을 가지고 있다. Ryu 알고리즘은 센서출력신호로부터 PAST 알고리즘과 같은 신호부공간 추정 알고리즘^[4~5]을 이용하여 신호부공간을 추정한 후, 추정된 신호부공간으로부터 방위각 이

* 정회원, 영남이공대학

(Div. of Electronics & Information Engineering,
Yeungnam College of Science & Technology)

※ 이 논문은 2009학년도 영남이공대학 연구조성비 지원에 의한 것임.

접수일자: 2011년1월28일, 수정완료일: 2011년3월2일

노베이션 계산식을 이용하여 표적의 방위각 이노베이션을 구한다. Ryu 알고리즘에서는 이렇게 구한 방위각 이노베이션을 각 표적에 할당된 칼만필터의 입력으로 사용함으로써 표적들의 방위각 궤적을 추적한다. Ryu 알고리즘에서 제안한 효율적인 방위각 이노베이션 계산식은 선배열센서를 사용하는 경우에 대하여 유도하였기 때문에, Ryu 알고리즘은 선배열센서에만 적용이 가능하다. 그러나 다중표적 방위각 추적 문제를 다루고 있는 많은 분야에서 다양한 형태의 배열센서를 사용하고 있다. 특히, 소나에서는 선배열센서 뿐만 아니라 원통형 배열센서도 많이 사용되고 있으며, 원통형 배열센서를 사용하는 대표적인 소나로써 선체고정형 소나가 있다^[6].

본 논문에서는 Ryu 알고리즘이 가지는 장점을 유지하면서 원통형 배열센서에 적용할 수 있도록 Ryu 알고리즘을 수정한다. 그리고 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 Ryu 알고리즘과 수정된 알고리즘의 추적성능을 비교분석 해 봄으로써 수정된 알고리즘이 원통형 선배열센서에 적용할 수 있음을 확인한다.

II장에서 Ryu 알고리즘을 요약하였으며, III장에서 Ryu 알고리즘을 원통형 배열센서에 적용할 수 있도록 수정한 방위각 추적 알고리즘을 제안하였다. IV장에서 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 수정된 알고리즘의 추적성능을 확인하였고, V장에서 결론을 맺었다.

II. Ryu의 방위각 추적 알고리즘

Ryu 알고리즘은 선배열센서를 사용한다는 가정 하에서 제안되었다. 그림 1에서 움직이고 있는 N 개의 표적이 서로 상관관계가 없는 신호를 발생할 때, M 개의 센서가 등 간격 d 로 배열된 선배열센서의 출력벡터 $\mathbf{r}(k)$ 는 센서잡음이 존재하는 경우 표본시간(sampling time)

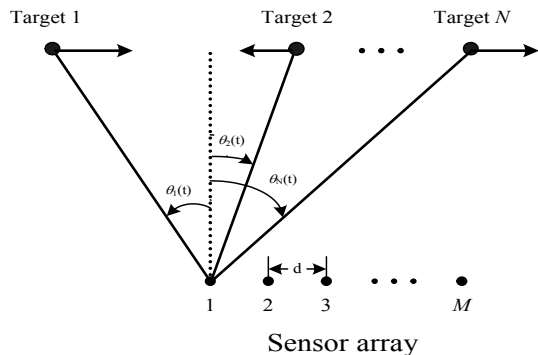


그림 1. 선배열센서를 사용한 표적의 방위각 추적
Fig. 1. Target angle tracking using linear sensor array.

k 에서 다음과 같이 나타낼 수 있다^[7-8].

$$\mathbf{r}(k) = \sum_{n=1}^N s_n(k) \mathbf{a}_n(k) + \mathbf{n}(k) \quad (1)$$

여기서 $s_n(t)$ 는 n 번째 표적의 표적신호이며, 센서잡음 벡터 $\mathbf{n}(k)$ 는 백색 가우시안 잡음으로 평균이 0이고 분산이 σ^2 이다. 센서잡음들은 서로 상관관계(correlation)가 없으며, 표적신호들과도 상관관계가 없다고 가정한다. 그리고 n 번째 표적의 조향벡터(steering vector) $\mathbf{a}_n(k)$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{a}_n(k) = [1, \gamma_n(k), \dots, \gamma_n^{M-1}(k)]^T \quad (2)$$

여기서 $\gamma_n(k) = e^{j\omega(d/c)\sin\theta_n(k)}$ 이고, ω 와 c 는 전송주파수와 신호전송속도이다. $\theta_n(k)$ 는 n 번째 표적의 방위각으로써 선배열센서의 기준센서에서 수직방향을 기준으로 표적과 이루는 각으로 정의하며, 기준센서는 선배열센서의 좌측 첫 번째 센서로 정의한다. 그리고 윗첨자 T 는 행렬의 전치(transpose)를 나타낸다.

표본시간 k 에서 n 번째 표적의 방위각 이노베이션 $\delta\theta_n(k)$, 방위각 $\theta_n(k)$, 방위각 예측치 $\hat{\theta}_n(k|k-1)$ 의 관계는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta\theta_n(k) = \theta_n(k) - \hat{\theta}_n(k|k-1) \quad (3)$$

표본시간 k 에서의 신호부공간 $W(k)$ 는 PAST와 같은 신호부공간 추적 알고리즘을 이용하여 추정할 수 있으며 $M \times N$ 행렬이다. Ryu 등은 n 번째 표적의 조향벡터 $\mathbf{a}_n(k)$ 가 신호부공간 상에 존재하기 때문에 조향벡터를 신호부공간에 투영(projection) 시키면 투영오차가 0이 된다는 사실을 이용함으로써, 표적의 방위각 이노베이션을 구하는 선형방정식을 유도하였다. 식 (4)는 조향벡터와 신호부공간 사이의 관계를 나타내고 있다.

$$P_W^\perp(k) \mathbf{a}_n(k) = 0 \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

여기서 $P_W^\perp(k) = I - P_r(k)$, $P_r(k) = W(k)(W^H(k)W(k))^{-1}W^H(k)$ 이며, $P_r(k)$ 는 투영행렬(projection matrix)이다. 그리고 윗첨자 H 는 공액복소전치(conjugate transpose)를 의미하며, I 는 $M \times M$ 단위행렬을 의미한다.

Ryu 알고리즘은 식 (4)로부터 유도한 선형방정식을 이용하여 표적의 방위각 이노베이션을 구하고, 구한 방

위각 이노베이션을 각 표적에 할당된 칼만필터의 입력으로 사용함으로써 표적들의 방위각 궤적을 추적한다.

III. 수정된 방위각 추적 알고리즘

Ryu 알고리즘은 그림 1과 같이 선배열센서를 사용한다는 가정 하에서 유도하였기 때문에 그림 2와 같은 원통형 배열센서에 적용할 수 없다. 원통형 배열센서는 선체고정형 소나 등에서 실제로 많이 사용되고 있다. 본 장에서는 Ryu의 방위각 추적 알고리즘을 원통형 배열센서에 적용할 수 있도록 수정한다.

원통형 배열센서의 출력벡터는 선배열센서의 출력벡터인 식 (1)과 형태는 같다. 그러나 식 (1)에서 조향벡터 $\mathbf{a}_n(k)$ 는 배열센서의 형상에 의해서 결정된다. 원통형 배열센서와 선배열센서는 형상이 다르기 때문에 조향벡터는 서로 다르며, 원통형 배열센서의 형상에 맞는 조향벡터를 구하는 것이 필요하다. M 개 센서로 구성된 배열센서인 경우에 표본시간 k 에서 n 번째 표적에 대한 조향벡터의 일반화된 형태는 식 (5)와 같다.

$$\mathbf{a}_n(k) = [\gamma_{1n}(k), \gamma_{2n}(k), \dots, \gamma_{mn}(k), \dots, \gamma_{Mn}(k)]^T \quad (5)$$

여기서 $\gamma_{mn}(k) = e^{j\omega D_{mn}(k)}$ 이며, $D_{mn}(k)$ 는 표본시간 k 에서 n 번째 표적신호에 대한 좌표의 원점과 m 번째 센서 사이의 시간지연을 나타낸다.

그림 2에서 표적과 원통형 배열센서의 기하학적 구조를 이용하여 시간지연 $D_{mn}(k)$ 를 구하면 식 (6)과 같다.

$$D_{mn}(k) = \frac{R}{c} [\sin\phi_m \sin\theta_n(k) + \cos\phi_m \cos\theta_n(k)] \quad (6)$$

여기서 ϕ_m 은 m 번째 센서의 좌표축과 이루는 각도이며, R 은 원통형 배열센서의 반경이다. 식 (6)을 식 (5)에 대입하면 원통형 배열센서의 조향벡터를 구할 수 있으며, n 번째 표적에 대한 조향벡터의 m 번째 요소인 $\gamma_{mn}(k)$ 는 식 (7)과 같다.

$$\gamma_{mn}(k) = e^{j\frac{\omega}{c} R [\sin\phi_m \sin\theta_n(k) + \cos\phi_m \cos\theta_n(k)]} \quad (7)$$

식 (3)을 식 (7)에 대입하면 식 (8)과 같다.

$$\gamma_{mn}(k) = e^{j\frac{\omega}{c} R [\sin\phi_m \sin(\hat{\theta}_n(k|k-1) + \delta\theta_n(k)) + \cos\phi_m \cos(\hat{\theta}_n(k|k-1) + \delta\theta_n(k))]} \quad (8)$$

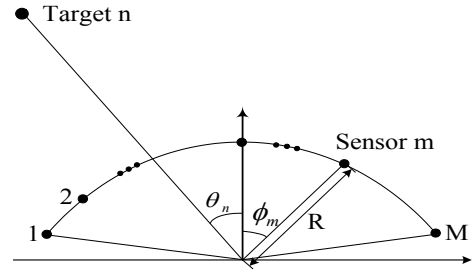


그림 2. 원통형 배열센서를 사용한 표적의 방위각 추적
Fig. 2. Target angle tracking using cylindrical array.

식 (8)을 $\delta\theta_n(k)$ 대하여 1차 항까지 테일러급수를 전개하고 1차식으로 근사화하면, $\delta\theta_n(k)$ 대한 $\gamma_{mn}(k)$ 의 선형근사화된 식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_{mn}(k) &\cong e^{j\frac{\omega}{c} R [\sin\phi_m \sin\hat{\theta}_n(k|k-1) + \cos\phi_m \cos\hat{\theta}_n(k|k-1)]} \\ &+ j\frac{\omega}{c} R [\sin\phi_m \cos\hat{\theta}_n(k|k-1) - \cos\phi_m \sin\hat{\theta}_n(k|k-1)] \\ &\times e^{j\frac{\omega}{c} R [\sin\phi_m \sin\hat{\theta}_n(k|k-1) + \cos\phi_m \cos\hat{\theta}_n(k|k-1)]} \delta\theta_n(k) \\ &= \gamma_{mn}(k|k-1) \\ &+ j\frac{\omega}{c} R [\sin\phi_m \cos\hat{\theta}_n(k|k-1) - \cos\phi_m \sin\hat{\theta}_n(k|k-1)] \\ &\times \gamma_{mn}(k|k-1) \delta\theta_n(k) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $\gamma_{mn}(k|k-1) = e^{j\frac{\omega}{c} R [\sin\phi_m \sin\hat{\theta}_n(k|k-1) + \cos\phi_m \cos\hat{\theta}_n(k|k-1)]}$.

식 (9)를 식 (5)에 대입하면 방위각 이노베이션 $\delta\theta_n(k)$ 에 대해서 선형근사화된 원통형 배열센서의 조향벡터를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_n(k) &= \begin{bmatrix} \gamma_{1n}(k|k-1) \\ \gamma_{2n}(k|k-1) \\ \vdots \\ \gamma_{Mn}(k|k-1) \end{bmatrix} \\ &+ j\frac{\omega}{c} R \begin{bmatrix} [\sin\phi_1 \cos\hat{\theta}_n(k|k-1) - \cos\phi_1 \sin\hat{\theta}_n(k|k-1)] \gamma_{1n}(k|k-1) \\ [\sin\phi_2 \cos\hat{\theta}_n(k|k-1) - \cos\phi_2 \sin\hat{\theta}_n(k|k-1)] \gamma_{2n}(k|k-1) \\ \vdots \\ [\sin\phi_M \cos\hat{\theta}_n(k|k-1) - \cos\phi_M \sin\hat{\theta}_n(k|k-1)] \gamma_{Mn}(k|k-1) \end{bmatrix} \delta\theta_n(k) \\ &= \hat{\mathbf{a}}_n(k|k-1) + \hat{\boldsymbol{\alpha}}_n(k|k-1) \delta\theta_n(k) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서

$$\hat{\mathbf{a}}_n(k) = [\gamma_{1n}(k|k-1), \gamma_{2n}(k|k-1), \dots, \gamma_{Mn}(k|k-1)]^T$$

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}}_n(k|k-1) = j\frac{\omega}{c} R \begin{bmatrix} [\sin\phi_1 \cos\hat{\theta}_n(k|k-1) - \cos\phi_1 \sin\hat{\theta}_n(k|k-1)] \gamma_{1n}(k|k-1) \\ [\sin\phi_2 \cos\hat{\theta}_n(k|k-1) - \cos\phi_2 \sin\hat{\theta}_n(k|k-1)] \gamma_{2n}(k|k-1) \\ \vdots \\ [\sin\phi_M \cos\hat{\theta}_n(k|k-1) - \cos\phi_M \sin\hat{\theta}_n(k|k-1)] \gamma_{Mn}(k|k-1) \end{bmatrix}$$

n 번째 표적의 방위각 이노베이션을 구하기 위한 선형방정식을 유도하기 위하여, 조향벡터와 신호부공간의 관계적인 식 (4)에 식 (10)을 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & P_W^\perp(k) \mathbf{a}_n(k) \\ &= P_W^\perp(k) (\hat{\mathbf{a}}_n(k|k-1) + \hat{\boldsymbol{\alpha}}_n(k|k-1) \delta\theta_n(k)) \quad (11) \\ &= \mathbf{0} \end{aligned}$$

식 (11)을 이항 정리하면, $\delta\theta_n(k)$ 를 미지수로 가지는 선형방정식을 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$P_W^\perp(k) \hat{\boldsymbol{\alpha}}_n(k|k-1) \delta\theta_n(k) = -P_W^\perp(k) \hat{\mathbf{a}}_n(k|k-1) \quad (12)$$

식 (12)에서 최소제곱법(least square solution)을 이용하여 $\delta\theta_n(k)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\delta\theta_n(k) = \frac{\mathbf{A}_n^T(k) \boldsymbol{\Psi}_n(k)}{\mathbf{A}_n^T(k) \mathbf{A}_n(k)} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

여기서

$$\mathbf{A}_n(k) = \begin{bmatrix} \text{Re}[P_W^\perp(k) \hat{\boldsymbol{\alpha}}_n(k|k-1)] \\ \text{Im}[P_W^\perp(k) \hat{\boldsymbol{\alpha}}_n(k|k-1)] \end{bmatrix}, \boldsymbol{\Psi}_n(k) = \begin{bmatrix} \text{Re}[-P_W^\perp(k) \hat{\mathbf{a}}_n(k|k-1)] \\ \text{Im}[-P_W^\perp(k) \hat{\mathbf{a}}_n(k|k-1)] \end{bmatrix}$$

그리고 $\text{Re}[\cdot]$ 와 $\text{Im}[\cdot]$ 는 복소벡터의 실수부와 허수부를 나타낸다.

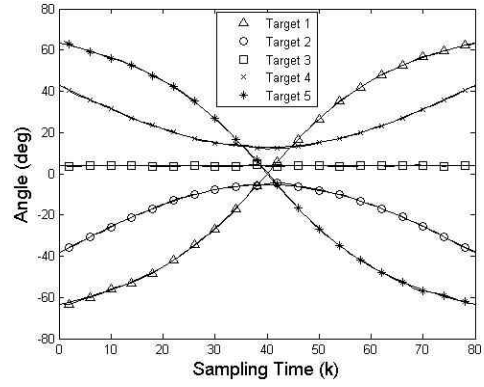
원통형 배열센서에 적용할 수 있도록 수정된 방위각 추적 알고리즘은 식 (13)을 사용하며, 식 (13)에서 구한 각 표적의 방위각 이노베이션을 각 표적마다 할당된 칼만필터의 상태벡터를 갱신하는데 사용함으로써 표적의 방위각 궤적을 추적한다. 표적의 방위각 추정치 $\hat{\theta}_n(k|k)$ 는 방위각 예측치 $\hat{\theta}_n(k|k-1)$ 와 방위각 이노베이션 $\delta\theta_n(k)$ 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\theta}_n(k|k) = \hat{\theta}_n(k|k-1) + g_n(k) \delta\theta_n(k) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

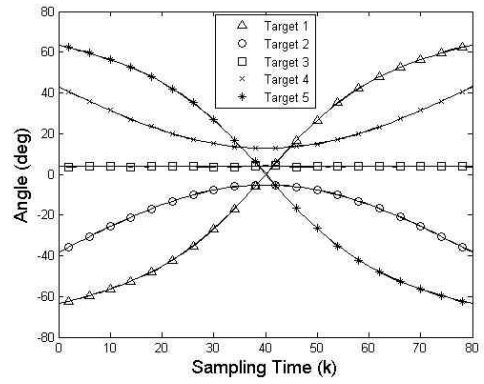
여기서 $g_n(k)$ 는 칼만필터이득(Kalman filter gain)이다.

IV. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 수정된 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 5개의 방위각 궤적이 서로 교차하는 시뮬레이션 시나리오를 설정하였다. 그리고 Ryu 알고리즘과 수정된 알고리즘을 선배열센서와 원통형 배열센서에



(a)



(b)

그림 3. 방위각 궤적 추적 결과(SNR=5dB)
(a) Ryu의 알고리즘 (b) 수정된 알고리즘
Fig. 3. DOA tracking results(SNR=5dB)
(a) Ryu's algorithm (b) Modified algorithm.

각각 적용하여 표적의 방위각 궤적을 추적한 결과를 비교분석 하였다. 시뮬레이션에서 센서의 개수는 선배열센서와 원통형 배열센서에서 동일하게 15개를 사용하였으며, 선배열센서의 센서간격은 표적신호의 반파장이 되는 0.12m로 설정하였다. 그리고 원통형 배열센서의 반지름은 1m로 설정하고 센서는 $-84^\circ \sim 84^\circ$ 사이에 12° 간격으로 배치하였다. 그림 3은 두 방위각 추적 알고리즘의 대표적인 방위각 추적 결과를 보여주고 있으며, 두 알고리즘의 방위각 추적 성능이 유사함을 확인할 수 있다. 두 알고리즘의 추적 성능을 좀 더 구체적으로 비교분석하기 위하여, 신호대잡음비가 0dB, 5dB, 10dB인 경우에 대하여 100번의 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하였다. 몬테칼로 시뮬레이션 결과로부터 두 알고리즘이 추적한 방위각 궤적과 실제 방위각 궤적의 평균 제곱오차를 구하여 표 1에 나타내었다. 표 1에서 Ryu 알고리즘과 수정된 알고리즘의 성능이 유사함을 확인

표 1. 방위각 추적결과의 평균제곱오차(deg²)
Table 1. RMSE of tracking result(deg²).

SNR	0dB	5dB	10dB
Ryu 알고리즘	0.3083	0.1698	0.1044
수정된 알고리즘	0.2580	0.1232	0.1027

할 수 있다. 이 결과로부터 본 논문에서 제안한 수정된 방위각 추적 알고리즘의 방위각 추적성능이 Ryu 알고리즘의 성능과 유사하게 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 수정된 방위각 추적 알고리즘이 원통형 배열센서에 적용할 수 있음을 보여주고 있다.

V. 결 론

Ryu의 다중표적 방위각 추적 알고리즘에서 선배열센서에 적합하도록 유도된 방위각 이노베이션 계산식을 원통형 배열센서에 적합하게 유도함으로써, Ryu의 방위각 추적 알고리즘을 원통형 배열센서에 적용할 수 있도록 수정하였다. 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 원통형 배열센서를 사용하는 수정된 알고리즘과 선배열센서를 사용하는 Ryu 알고리즘의 추적성능이 유사함을 확인함으로써 제안한 수정된 알고리즘이 원통형 배열센서 적용할 수 있음을 확인하였다. 수정된 방위각 추적 알고리즘은 Ryu 알고리즘과 동일한 구조를 가지고 있기 때문에 Ryu 알고리즘이 가지는 데이터연관 문제가 발생하지 않는다는 장점을 그대로 유지한다.

참 고 문 헌

[1] Y. Bar-Shalom and T. E. Fortmann, *Tracking and Data Association*, Academic Press, 1988.
 [2] Don H. Johnson and dan E. Dudgeon, *Array Signal Processing Conception and Techniques*, Prentice-Hall, 1993.
 [3] Chang-Soo Ryu, Jang-Sik Lee and Kyun-Kyung Lee, "Multiple target angle-tracking algorithm with efficient equation for angular innovation," *Electronics Letters*, vol. 38, No. 10, pp. 483-484, May. 2002.
 [4] Bin Yang, "Projection approximation subspace tracking," *IEEE Transactions on Signal processing*, vol. 43, no. 1, pp. 95-107, Jan. 1995.
 [5] K. Abed-Meraim, A. Chkief, and Y. Hua, "Fast

orthonormal PAST algorithm," *IEEE Signal processing letters*, vol. 7, no. 3, pp. 60-62, Mar. 1995.

[6] A. D. Waite, *SONAR for Practising Engineers 3rd Edition*, John Wiley & Sons Ltd, 2002.
 [7] Joseph C. Hassab, *Underwater Signal and Data Processing*, CRC, 1989.
 [8] S. Unnikrishna Pillai and C. S. Burrus, *Array Signal Processing*, Springer-Verlag New York 1989.

저 자 소 개



류 창 수(정회원)

1992년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업.
 1994년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업.
 2002년 경북대학교 전자공학과 박사 졸업.

1994년~1997년 국방과학연구소 연구원.

2002년~현재 영남이공대학 전자정보계열 부교수
 <주관심분야 : 배열신호처리, 이동통신, 표적 탐지 및 추적>