



Received: 2025/07/10
Revised: 2025/07/25
Accepted: 2025/08/31
Published: 2025/09/30

***Corresponding Author:**

Youngdoo Choi

Dept. of Electronics and Control Engineering,
Republic of Korea Naval Academy
1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyung-sangnam-do, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5309
E-mail: chododo78@navy.ac.kr

확장 칼만 필터를 적용한 다중경로 수중 음향 신호의 실시간 표적 추적 알고리즘 연구

A Study on Real-time Target Tracking Algorithm for Multipath Underwater Acoustic Signals Using Extended Kalman Filter

최영두*

해군 소령/해군사관학교 전자제어공학과 조교수

Youngdoo Choi*

LCDR, ROK Navy/Assistant professor, Dept. of Electronics and Control
Engineering, Republic of Korea Naval Academy

Abstract

본 논문은 확장 칼만 필터(EKF)를 적용하여 다중경로 수중 음향 신호 기반의 실시간 표적 추적 알고리즘을 제안한다. 직접파와 해저면 반사파의 도달시간 정보를 융합하여 표적의 3차원 위치를 추정하며, 모의실험 결과 평균 1 m - 3.5 m 이내의 위치 오차와 1.5 m/s 이내의 음속 추정 오차로 높은 정확도와 실시간성을 확인하였다. 제안 기법은 해양 환경 변화와 노이즈에도 강인하며, 수중 탐사·로봇 등 다양한 분야에 효과적으로 적용될 수 있다.

This paper proposes a real-time target tracking algorithm based on multipath underwater acoustic signals using the Extended Kalman Filter (EKF). By integrating the time-of-arrival information from both direct and seabed-reflected paths, the system estimates the three-dimensional position of the target. Simulation results demonstrate high accuracy and real-time performance, with an average position error within 1 to 3.5 meters and a sound speed estimation error within 1.5 m/s. The proposed method is robust against environmental variations and noise in underwater settings, making it suitable for applications such as underwater exploration and robotics.

Keywords

확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter),
다중경로 수중음향 신호(Multipath Underwater Acoustic
Signal),
실시간 표적 추적(Real-time Target Tracking)

1. 서론

수중 환경에서의 표적 위치 추적은 해양 탐사, 수중 로봇 항법, 군사 감시, 해저 자원 개발 등 다양한 분야에서 핵심적인 역할을 한다. 음향 신호는 전자기파가 급격히 감쇠되는 수중 환경에서 유일하게 장거리 전파가 가능한 매체로, 수중 표적의 탐지와 추적에 널리 활용되고 있다. 그러나 실제 해양 환경에서는 해저면 및 수면 반사, 수온 및 염분 변화에 의한 음속 분포의 불확실성, 다중경로 신호 간섭, 센서 노이즈 등 다양한 요인으로 인해 표적의 위치를 실시간으로 정확하게 추정하는 데 큰 어려움이 존재한다.

특히, 다중경로(multipath) 현상이 나타날 때 직접파뿐만 아니라 해저면 및 수면에서 반사된 신호가 수신기에 도달함으로써 신호의 도달 시간(TOA, time of arrival) 및 세기(SNR)에 영향을 미치고, 이로 인해 표적 위치 추정의 정확도가 저하된다. 또한, 수중 음속은 온도, 염분, 수압 등 환경 조건에 따라 시공간적으로 변화하므로, 고정된 음속을 가정한 기존의 위치 추정 알고리즘은 환경 변화에 취약하다.

기존의 수중 표적 추적 연구는 주로 직접파 신호의 도달 시간 또는 시간 차이(TDOA, time difference of arrival)를 이용한 삼변측량(trilateration) 방식이나, 단순 칼만 필터(KF, Kalman filter)를

이용한 선형 상태 추정에 초점을 맞추어 왔다. 하지만 실제 환경에서는 신호 전파 경로의 비선형성, 음속의 불확실성, 다중경로 반사 신호의 영향, 센서 노이즈 등으로 인해 기존 방법만으로는 실시간 고정밀 추적이 어렵다. 최근에는 비선형 시스템에 강인한 확장 칼만 필터(EKF, extended Kalman filter) 기반의 추적 알고리즘이 제안되고 있으나, 대부분 단일 경로 신호 또는 고정 음속 가정에 머무르고 있어, 실제 해양 환경의 복잡성을 충분히 반영하지 못하고 있다[1-3].

본 논문에서는 다중경로 수중 음향 신호의 도달 시간 정보를 실시간으로 융합하고, 확장 칼만 필터를 적용하여 표적의 3차원 위치와 속도를 연속적으로 추정하는 실시간 표적 추적 시스템을 제안한다. 제안 시스템은 다중 비콘(부이)에서 수신된 직접파 및 반사파 신호의 도달 시간, 환경 변화에 따른 음속 변동성, 센서 노이즈 등을 동적으로 보정함으로써, 기존 방법 대비 위치 추정의 정확도와 환경 적응성을 크게 향상시키는 것을 목표로 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 다중경로 수중 음향 신호 모델과 확장 칼만 필터의 이론적 배경을 다루고, 3장에서는 제안하는 실시간 표적 추적 시스템의 전체 구조와 EKF 기반 알고리즘의 구현 방법을 상세히 설명한다. 4장에서는 모의실험을 통해 제안 기법의 성능을 검증하고, 5장은 결론이다.

2. 이론적 배경

수중 음향 신호는 해수면, 해저면, 수온약층 등 다양한 경계면에서 반사, 굴절, 산란 현상을 통과하여 전파된다. 이러한 전파 특성으로 인해 동일한 신호가 여러 경로(직접파, 수면 반사파, 해저면 반사파 등)를 통해 수신기에 도달하게 되며, 이를 다중경로 현상이라 한다. 다중경로 신호는 도달 시간, 위상, 세기 등에 차이를 보이며, 신호 간섭이나 정보 손실의 원인이 되기도 한다. 그러나 각 경로의 도달 시간 차이를 정밀하게 분석하면 표적의 위치 정보를 더욱 정확하게 추정할 수 있는 중요한 단서를 얻을 수 있다.

수중 음향 신호의 전파 속도(음속)는 수온, 염분, 압력 등 환경 인자에 따라 시공간적으로 변화한다. 실제 해양 환경에서는 이러한 음속의 불확실성까지 함께 고려해야 하며, 이는 표적 위치 추정의 정확도에 직접적인 영향을 미친다.

다중경로 환경에서 여러 비콘(부이) 또는 센서가 표적에서 방출된 신호의 도달 시간(TOA)을 측정하면, 각 비콘-표적 간의 거리 정보를 얻을 수 있다. 비콘 i 에서의 도달 시간 측정식은 다음과 같다.

$$t_i = \frac{\|p - b_i\|}{c_i} + n_i \quad (1)$$

여기서, t_i 는 비콘 i 에서 측정된 도달 시간, p 는 표적의 위치 벡터, b_i 는 비콘 i 의 위치, c_i 는 해당 경로에서의 유효 음속, n_i 는 측정 노이즈를 나타낸다.

여러 비콘으로부터의 도달 시간 정보를 융합함으로써 표적의 3차원 위치를 추정할 수 있다. 직접파 및 반사파와 같은 다중경로 신호를 모두 활용할 경우, 단일 경로 기반 방법에 비해 위치 추정 정확도를 크게 향상시킬 수 있다.

칼만 필터(KF)는 선형 시스템에서 상태(위치, 속도 등)와 측정(거리, 도달 시간 등) 간의 관계를 최적화하여 잡음과 불확실성을 보정하는 알고리즘이다. 수중 표적 추적에서는 신호의 도달 시간과 표적 위치 간의 관계가 비선형이므로, KF를 비선형 시스템에 확장한 확장 칼만 필터(EKF)가 널리 사용된다. EKF는 상태 예측, 측정 선형화(자코비안 계산), 상태 및 공분산 갱신의 과정을 반복하며, 비선형성, 잡음, 환경 변화에 강인하다.

실시간 추적 시스템에서는 다중경로 신호 분리, 이상치(outlier) 제거, 음속 불확실성 보정, 계산 효율성 등 다양한 요소를 함께 고려해야 한다. 직접파와 반사파 신호를 구분하고, 이상치나 잡음에 의한 오류 측정값을 실시간으로 제거하는 게이팅(gating) 기법이 필요하다. 또한, 표적-비콘 간의 유효 음속을 동적으로 추정하여 환경 변화에 적응할 수 있어야 하며, 실시간 추적을 위해 EKF의 연산 효율 및 수렴 속도를 최적화하는 것이 중요하다.

3. 시스템 구조 및 알고리즘 구현

본 논문에서 제안하는 실시간 표적 추적 시스템은 다중경로 수중 음향 신호의 도달 시간 정보를 실시간으로 융합하고, 확장 칼만 필터(EKF)를 적용하여 표적의 3차원 위치와 속도를 연속적으로 추정하는 구조를 갖는다. 본 장에서는 시스템의 전체 구조와 EKF 기반 알고리즘의 구체적인 구현 방법을 기술한다.

3.1 시스템 아키텍처

제안하는 시스템은 크게 다음과 같은 단계로 구성된다. 첫째, 다중 비콘(부이) 및 표적 환경을 설정하고, 표적의 이동에 따라 송신된 수중 음향 신호를 각 비콘에서 수신한다. 둘째, 수신 신호로부터 직접파 및 반사파 등 다중경로 신호의 도달 시간을 추출한다. 셋째, 도달 시간 정보를 EKF의 측정값으로 입력하여 표적의 위치, 속도, 그리고 환경 음속을 실시간으로 추정한다. 마지막으로, 실시간 이상치 게이팅 및 결과 출력을 통해 추적의 신뢰성과 실시간성을 보장한다.

3.2 상태 및 측정 벡터 정의

본 시스템의 EKF 상태벡터는 식(2)와 같이 정의된다.

$$x_k = [x, y, z, v_x, v_y, v_z, c]^T \quad (2)$$

여기서 (x, y, z) 는 표적의 3차원 위치를, (v_x, v_y, v_z) 는 속도를, c 는 유효 음속을 나타낸다.

측정 벡터는 각 비콘에서 측정된 도달 시간(TOA)으로 구성되며, 비콘이 N 개일 경우 식 (3)과 같이 표현된다.

$$z_k = [t_1, t_2, \dots, t_N]^T \quad (3)$$

3.3 EKF 예측 및 갱신 단계

3.3.1 상태 예측

상태 예측은 등속 운동을 가정한 상태전이 행렬 F 를 이용하여 식 (4)와 같이 수행된다.

$$\hat{x}_{k|k-1} = F\hat{x}_{k-1|k-1} \quad (4)$$

오차 공분산 예측은 식 (5)와 같다.

$$P_{k|k-1} = FP_{k-1|k-1}F^T + Q \quad (5)$$

여기서, Q 는 프로세스 잡음 공분산 행렬이다.

3.3.2 측정 선형화 및 자코비안 계산

측정 방정식은 비콘 i 에 대해 식 (6)과 같이 비선형으로 정의된다.

$$h_i(x_k) = \frac{\|p_k - b_i\|}{c} \quad (6)$$

자코비안 행렬 H 의 각 행은 식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial h_i}{\partial x} = \left[\frac{(x - x_i)}{d_i c}, \frac{(y - y_i)}{d_i c}, \frac{(z - z_i)}{d_i c}, 0, 0, 0, -\frac{d_i}{c^2} \right] \quad (7)$$

여기서, $d_i = \|p_k - b_i\|$ 이다.

3.3.3 상태 갱신 및 이상치 게이팅

칼만 이득 K_k 는 식 (8)과 같이 계산된다.

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T [H_k P_{k|k-1} H_k^T + R]^{-1} \quad (8)$$

상태 갱신은 식 (9)와 같다.

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \{z_k - h(\hat{x}_{k|k-1})\} \quad (9)$$

오차 공분산 갱신은 식 (10)과 같다.

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (10)$$

이상치 게이팅은 각 비콘의 혁신값 $|z_{i,k} - h_i(x_{k|k-1})|$ 이 2시그마를 초과할 경우, 해당 측정값을 무시(0으로 대체)하는 방식으로 적용된다.

3.3.4 실시간 표적 추적 실현

본 시스템은 센서 데이터(도달 시간)를 실시간으로 수신하여 EKF 루프를 반복 수행함으로써 실시간 표적 추적을 실현한다.

4. 모의실험 및 결과

제안한 EKF 기반 다중경로 수중 음향 신호 실시간 표적 추적 시스템의 성능 검증을 위해 수행한 모의실험 결과를 다음과 같이 제시한다. 실험은 MATLAB 환경에서 실제 해양 음향 특성을 반영하여 진행되었다.

4.1 모의실험 환경 및 설정

모의실험 환경은 다음과 같이 설정하였다. 평균 음속은 1,500 m/s로 가정하였고, 표적이 이동하는 중에 ± 2 m/s 범위 내에서 무작위로 변화하도록 하였다. 비콘(부이)은 4개를 사용하였으며, 각각 (0,0,0), (2000,0,0), (0,2000,0), (2000,2000,0)의 수면 위치에 배치하였다. 수중 표적의 초기 위치와 속도는 (500, 800, 60) m, (1.2, 1.0, -0.2) m/s로 설정하였다. 시뮬레이션은 1초 간격, 총 50스텝으로 진행하였으며, 도달 시간(TOA) 측정값에는 표준편차 3 ms (SNR 20 dB)의 가우시안 노이즈를 추가하였다. 더불어 실제 환경의 다중경로 효과와 음속 불확실성을 반영하였다.

4.2 실험 절차

실험은 다음과 같은 절차로 진행되었다. 첫째, 등속 운동과 무작위 외란을 결합하여 표적의 실제 이동 궤적을 생성하였다. 둘째, 각 비콘의 도달 시간(TOA) 측정값을 실제 거리 및 음속 기반으로 계산하고, 여기에 가우시안 노이즈를 추가하였다. 셋째, EKF 기반 실시간 추정 알고리즘을 적용하여 예측, 자코비안 선형화, 상태 갱신, 이상치 게이팅 과정을 반복 수행하였다. 넷째, 각 스텝마다 실제 위치/음속과 EKF 추정값을 비교하여 위치 오차(RMSE), 음속 추정 오차, 실시간 궤적을 분석하였다.

4.3 실험 결과

실험 결과, Fig. 1과 같이 EKF 추정 궤적은 실제 표적 이동 경로에 근접하게 수렴하였다. 50스텝 평균 위치 오차(RMSE)는 Fig. 2와 같이 1.2 m - 3.5 m 범위로, 음속 불확실성(± 2 m/s)이 존재함에도 불구하고 실시간 추적 오차가 5 m 이하로 유지되었다. 이상치 게이팅을 적용한 결과, 노이즈 급증 구간이나 반사 신호 오류가 발생하는 경우에도 오차가 급등하지 않고 안정적으로 추적이 이루어졌다.

음속 추정 성능 역시 우수하였다. Fig. 3에서와 같이 실제 음속 변화에 대해 EKF 추정값이 빠르게 적응하였으며, 음속 추정 오차는 표준편차 약 1.5 m/s 이내로 나타났다.

전체 50프레임 추적에 소요된 시간은 1초 미만(일반 PC 기준)으로, 실시간 위치/음속 동시 추정이 가능함을 확인하였다.

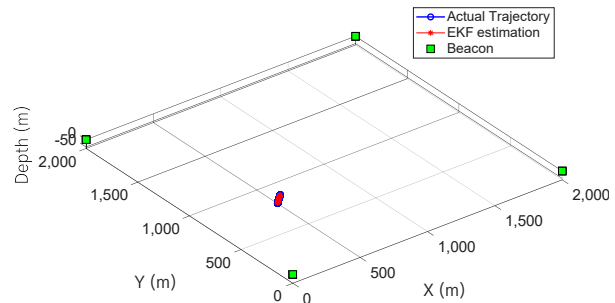


Fig. 1. 3D target tracking results

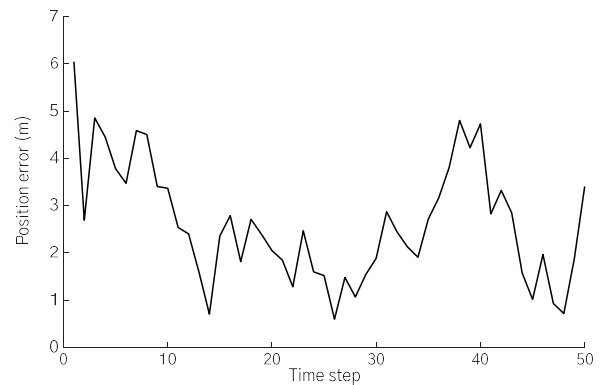


Fig. 2. Real-time position estimation error

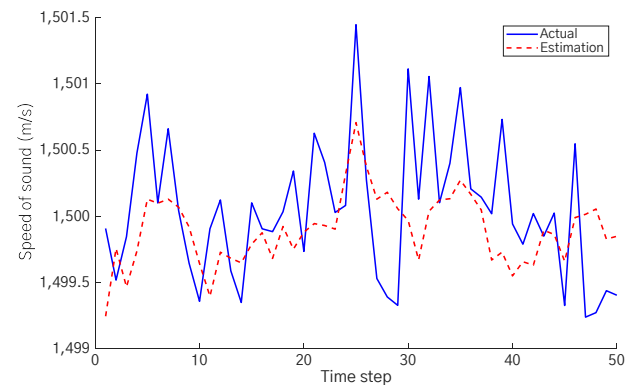


Fig. 3. Real-time sound speed estimation

5. 결론

본 논문에서는 다중경로 수중 음향 신호의 도달 시간 정보를 실시간으로 융합하고, EKF를 적용하여 표적의 3차원 위치와 속도를 연속적으로 추정하는 실시간 표적 추적 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 다중 비콘(부이)에서 수신된 직접파 신호의 도달

시간, 환경 변화에 따른 음속 변동성, 센서 노이즈 등을 동적으로 보정함으로써, 기존 방법 대비 위치 추정의 정확도와 환경 적응성을 크게 향상시켰다.

참고문헌

[1] 조현덕. (2021). “다중경로 도달시간차이를 이용한 확장칼만필터 기반의 표적 위치추정 기법.” 한국산학기술학회논문지, 22(6), pp. 251-257. DOI: 10.5762/KAIS.2021.22.6.251

[2] Huang, J. (2023). “An Underwater Target Tracking Algorithm Based on Extended Kalman Filter.” *Wireless Communications and Mobile Computing*, 9916531.

DOI: 10.1155/2023/9916531

[3] Zhang, Q., & Zhang, C. (2021). “Tracking Control of Autonomous Underwater Vehicles with Acoustic Localization and Extended Kalman Filter.” *Applied Sciences*, 11(17), 8038.

DOI: 10.3390/app11178038