

실측 테이터 기반 Bistatic 환경에서의 Range 및 Range-Rate 칼만 필터 추적 기법

이정훈, 전민욱, 김형남*

부산대학교

landon4906@pusan.ac.kr, *hnkim@pusan.ac.kr

Range and Range-Rate Kalman Filter Tracking in a Bistatic Environment Using Experimental Data

Jeong Hun Lee, Min-Wook Jeon, Hyoung-Nam Kim*

Pusan National Univ.

요약

본 논문에서는 수동 레이더(passive radar)의 bistatic 환경에서 표적의 궤적을 추정하기 위한 칼만 필터 기반 추적 기법의 성능을 분석한다. 기존 레이더 추적에서 널리 사용되는 range - velocity 상태 모델은 bistatic 환경에 직접 적용하기 어렵다는 한계가 있어, 본 연구에서는 상태 벡터를 bistatic range와 bistatic range-rate로 정의한 추적 모델을 적용한다. 각 프레임의 range - Doppler 맵에서 추출된 다수의 측정 후보에 대해 칼만 필터 예측값과 거리 기준 최근접 이웃(nearest neighbor) 기반 측정 연관을 수행한다. 해당 기법을 횡령산 DTV(digital television) 송신소와 부산대학교 내 수신 거점에서 수집한 실측 데이터에 적용한 결과, bistatic range 및 range-rate가 연속적이고 평활한 궤적으로 추정됨을 확인하였고, 이를 통해 실질적인 추적 유효성을 검증하였다.

I. 서론

최근 드론과 같은 소형 이동 표적의 증가로 인해, 기존 능동 레이더를 보완할 수 있는 수동 레이더(passive radar) 기반 감시 기술에 대한 관심이 증가하고 있다 [1, 2]. 특히 방송 송신소를 이용하는 PCL(passive coherent location) 시스템은 별도의 송신 장비 없이 표적을 탐지할 수 있다는 점에서 주목받고 있다. 이러한 PCL 시스템은 기준 신호와 감시 신호 간의 상관 처리를 통해 bistatic range와 Doppler 주파수 정보를 획득할 수 있다. 하지만 실제 환경에서 얻어진 측정값은 잡음과 클러터의 영향으로 표적의 연속적인 운동 특성에 의해 프레임 간 변동성이 크기 때문에, 표적 궤적을 안정적으로 추정하기 위해서는 시간적으로 분리된 관측 정보를 결합하는 추적 기법이 필요하다.

일반적인 레이더 표적 추적에서는 거리와 속도로 구성된 range - velocity 상태 모델이 널리 사용된다. 그러나 수동 레이더 기반 bistatic 환경에서는 관측된 Doppler 성분이 표적의 실제 속도가 아닌 bistatic 거리의 시간 변화율에 해당하므로, 기존 range - velocity 모델을 그대로 적용하면 상태 모델과 관측값 간의 물리적 불일치가 발생한다. 이러한 특성으로 인해 추적 결과의 안정성과 일관성이 저하되는 한계가 존재한다. 본 논문에서는 이러한 bistatic 환경의 특성을 고려하여 상태 벡터를 bistatic range와 range-rate로 정의하고[3], 칼만 필터 기반 추적을 수집된 PCL 데이터에 적용하여 실측 환경에서의 추적 안정성을 분석한다.

II. 칼만 필터(Kalman Filter) 기반 Bistatic Range - Rate 추적 기법

칼만 필터는 잡음이 포함된 측정값으로부터 선형 동적 시스템의 상태를 재귀적으로 추정하는 기법으로, 예측 단계와 측정 갱신 단계를 반복함으로써 시간에 따라 변화하는 상태를 추정할 수 있다 [4]. 본 논문에서는 프

레임별로 획득되는 bistatic range - Doppler 측정을 시간적으로 결합하여 표적의 연속적인 궤적을 추정하기 위해 칼만 필터를 적용하였다. 수동 레이더 기반 bistatic 환경에서 CAF(cross-ambiguity function)를 통해 관측되는 Doppler 주파수는 표적의 실제 속도 자체를 의미하지 않으며, 송신기 - 표적 - 수신기로 정의되는 bistatic 거리의 시간 변화율에 비례하는 값으로 해석된다. 따라서 Doppler 측정을 velocity 상태 변수로 직접 사용하는 경우, 상태 모델과 측정 모델 간의 물리적 불일치가 발생할 수 있다 [5]. 본 논문에서는 이러한 특성을 고려하여 상태 벡터를 bistatic 거리와 그 변화율로 다음과 같이 정의하였다 [3].

$$x_k = [R_k, \Delta R_k]. \quad (1)$$

여기서 R_k 는 k 번째 프레임에서의 bistatic range이며, ΔR_k 는 bistatic range-rate를 의미한다. CAF에서 추출된 Doppler 주파수 $f_{D,k}$ 는 송신 신호의 파장 λ 를 이용하여 다음과 같이 bistatic range-rate로 변환된다.

$$\Delta R_k = s \lambda f_{D,k}. \quad (2)$$

s 는 표적의 접근 또는 이탈 방향에 따른 부호를 나타낸다. 표적의 운동은 짧은 관측 구간에서 등속 운동을 따른다고 가정하였으며, 이에 따라 상태 전이 모델은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$x_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_{k-1} + u_k. \quad (3)$$



그림 1. 실험 환경 구성 및 기준 채널과 감시 채널 지향 방향

각 프레임에서 CAF를 통해 다수의 range - Doppler 후보가 추출되므로, 칼만 필터의 측정 간섭을 위해 대표 측정값을 선택하는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 칼만 필터의 예측 측정치와 각 후보 측정치 간의 거리 차이를 비교하는 최근접 이웃(nearest neighbor) 기준을 적용해 측정값을 선택하였으며, 선택된 측정값을 이용하여 bistatic range 및 range-rate를 추정하였다. 상태 잡음 및 측정 잡음 공분산 행렬은 실측 환경에서 관측된 bistatic range 및 Doppler 측정의 변동 특성을 기반으로 설정하였다.

III. 실험 환경 및 결과

본 논문에서 적용한 추적 기법을 검증하기 위해 실제 수동 레이더 환경에서 수집된 PCL 데이터를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 수신기는 부산대학교 제10공학관에 설치하였으며, 황령산 송신소에서 송출되는 DTV(digital television) 신호(KBS1, 701 MHz)를 대상으로 0.5초 간격으로 약 1분 동안 연속 수집하였다 [6]. 기준 채널과 감시 채널 안테나의 방향은 그림 1과 같이 서로 다른 지향 방향을 갖도록 배치하였으며, 표적 드론은 DJI INSPIRE 2 모델을 사용하여 감시 채널 안테나 시야 내에서 기동하도록 설정하였다. 수집된 신호에 대해 각 프레임마다 기준 채널과 감시 채널 신호 간의 상관 처리를 통해 CAF를 계산하고, 이로부터 bistatic range 및 Doppler 후보를 추출하였다. 이후 프레임별로 획득한 후보들을 칼만 필터 기반 추적 알고리즘의 입력으로 사용하였다.

그림 2는 실측 데이터에 bistatic range 및 range-rate 기반 칼만 필터를 적용하여 추정된 bistatic range - Doppler 궤적을 나타낸다. 검은 점선은 CAF를 통해 선택된 측정값을, 붉은 실선은 칼만 필터에 의해 추정된 궤적을, 자주색 점선은 예측 단계를 통해 계산된 상태를 각각 나타낸다. 실측 데이터의 특성상 개별 측정값은 잡음의 영향을 받아 불연속적인 변동을 보이지만, 칼만 필터를 적용함으로써 시간적으로 평활화된 궤적이 추정됨을 확인할 수 있다. 특히 bistatic 환경에서 Doppler 측정을 velocity로 직접 해석하는 대신 bistatic range-rate로 변환하여 상태 변수로 사용함으로써, 관측량과 상태 모델 간의 물리적 일관성을 유지할 수 있었으며, 이를 통해 실측 데이터 환경에서도 안정적인 추적 결과를 얻었다.

IV. 결론

본 논문에서는 수동 레이더 기반 bistatic 환경에서 수집된 실측 PCL 데이터를 이용하여 표적의 궤적을 추정하는 칼만 필터 기반 추적 기법의 성능을 분석하였다. 기존의 range - velocity 상태 모델 대신, bistatic 환경에서 Doppler 관측의 물리적 의미를 반영할 수 있도록 bistatic range와 bist

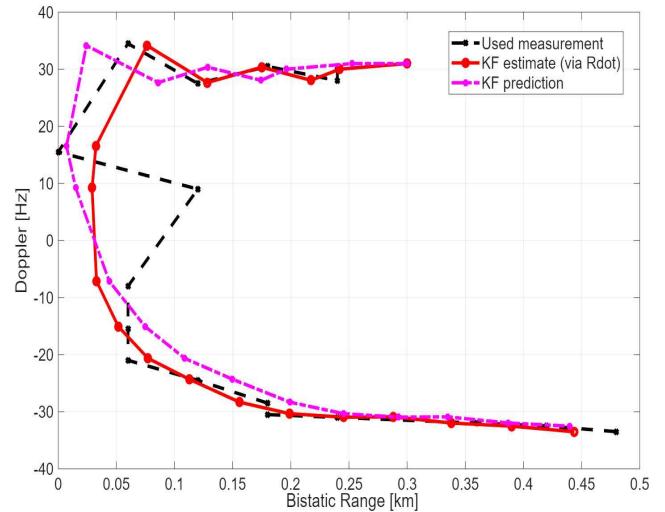


그림 2. 칼만 필터를 적용한 range-Doppler 궤적 추정 결과

atic range-rate로 구성된 상태 벡터를 정의하였다. 또한, CAF를 통해 추출된 다수의 range - Doppler 후보 중에서 칼만 필터의 예측값과 가장 근접한 후보를 선택하는 최근접 이웃 기반 측정 연관 방식을 적용하였다. 실측 데이터 기반 실험 결과, 개별 측정값의 변동에도 불구하고 본 연구에서 적용한 기법을 통해 시간적으로 평활화된 bistatic range 및 range-rate 궤적을 추정할 수 있음을 확인하였다. 이는 각도 정보가 제공되지 않는 수동 bistatic 환경에서도 관측량과 상태 모델 간의 물리적 일관성을 유지한 추적이 가능함을 보여준다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00557790)

참 고 문 헌

- [1] 최지환, 신한섭, 김태오, 김태경, “최근 바이스테틱 레이더 기술 동향,” *항공우주산업기술동향*, 제 13권 1호, 2015, pp. 160~165
- [2] T. Martelli, F. Murgia, F. Colone, C. Bongianni, and P. Lombardo, “Detection and 3D localization of ultralight aircrafts and drone with a WiFi-based Passive Radar,” *International Conference on Radar Systems (Radar 2017)*, Belfast, UK, Oct. 2017, pp.23~26
- [3] J. B. Pearson III and E. B. Stear, “Kalman filter applications in airborne radar tracking,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-10, no. 3, pp. 319 - 329, May 1974.
- [4] 김호재, 김형남, “바이스테틱 센서를 이용한 칼만 필터 기반 개체 추적 시스템 성능 분석,” *대한전자공학회 하계학술대회 논문집*, 제주, 2021년 6월, pp. 1176 - 1178.
- [5] S. V. Bordonaro, P. Willett, and Y. Bar-Shalom, “Performance analysis of the converted range rate and position linear Kalman filter,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 3, pp. 1751 - 1765, Jul. 2014.
- [6] 박도현, 박근호, 박지훈, 김형남, “드론 탐지를 위한 DTV 기반 수동형 레이더의 실측 결과 분석,” *2021년도 한국전자과학회 하계종합학술대회 논문집*, Vol. 8, No. 1, pp. 601-602, 2020.