

MIMO 레이다를 이용한 타겟 위치 추정 및 안테나 각도 조정을 통한 드론 탐지 정확도 향상 방법

김승환*, 정한솔, 한승규, 정영호
한국항공대학교

chg05069@gmail.com, yhjung@kau.kr

Method of Enhancing Drone Detection Accuracy through Target Localization and Antenna Angle Adjustment using MIMO Radar

Seung Hwan Kim*, Han Sol Jung, Seung Kyu Han, Young-Ho Jung
Korea Aerospace University

요약

MIMO FMCW 레이다를 이용하여 표적의 방위각을 추정하고, 레이다의 방향을 해당 방향으로 조정한 후 표적이 드론인지 여부를 식별하는 방법을 제안하였다. 제안 방법을 사용하여 추정된 위치를 기반으로 안테나의 각도를 조정하였을 때, 레인지-도플러 맵을 이용한 Alexnet 전이학습 기반 분류기의 드론 탐지 성능이 안테나 각도 조정 전에 비해 향상되는 것을 관찰할 수 있었다.

I. 서론

최근 드론 기술의 발전과, 가격 하락으로 드론이 널리 보급됨에 따라 보안안전 사고 등의 문제가 제기되고 있으며, 이로 인해 드론 탐지 기술의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 특히, MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 레이다 시스템의 경우 여러 안테나 요소를 활용하여 향상된 목표물 탐지와, 공간 해상도를 제공하기 때문에, 작고 빠르게 움직이는 드론의 정밀한 추적 및 식별을 가능하게 한다 [1]. 이러한 MIMO 레이다 시스템에서 드론이 레이다 안테나의 주엽(main lobe) 밖에 위치한다면, 신호 강도가 감소하는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자 타겟의 위치를 추정하고, 해당 방향으로 안테나 각도를 조정(tilting)하여 타겟 분류 정확도를 높이는 방법을 제안한다.

II. 본론

1. 신호 각도에 따른 안테나 이득

일반적인 1차원 FMCW 레이다는 안테나 이득을 증가시키기 위해 특정 방향으로 지향성을 보이는 안테나를 사용한다. 안테나 이득이란 안테나가 특정 방향으로 투사하는 전력을 나타내는 지표이다. 안테나 이득이 높을수록 더 많은 전력을 특정 방향으로 집중시켜, 더 멀리 있는 목표물까지 신호를 보낼 수 있다.

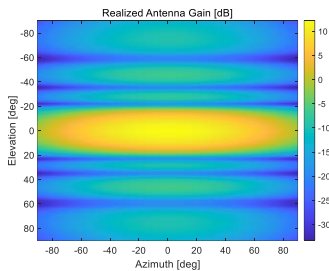


그림 1. TINYRAD 안테나 이득 (2D)

그림 1은 Analog Devices사 EV-TINYRAD24G 레이다의 방위각 및 고도각에 대한 단일 안테나 이득을 나타낸 것이다 [2]. TINYRAD24G 레이다는 2TX, 4RX 안테나를 가지고 있으며, 실험에서는 거리-각도 맵을 생성하기 위해 1TX, 4RX 안테나를 사용하였다.

2. 거리-각도 맵

거리-각도 맵은 동일 거리 정보를 가진 FMCW 레이다 신호를 신호의 도착 각도(DOA)에 대해 분해하여 이미지를 획득한다. 이로 인해 FMCW 레이다 신호를 속도에 대해 분해하여 속도 정보를 획득하는 거리-도플러 맵이나 시간-도플러 맵과는 달리, 거리-각도 맵에서는 동일 거리에 위치한 타겟의 도플러 신호 함에 대한 방향 정보를 획득할 수 있다.

본 논문의 실험에서는 동일 거리에 있는 신호 샘플들에 대해 MUSIC 알고리즘을 사용하여 거리-각도 맵을 생성하였다. 이러한 거리-각도 맵에서 각 요소들의 값은 해당 거리 및 각도에서의 MUSIC 의사 스펙트럼 값을 의미한다. MUSIC 알고리즘을 사용한 거리-각도 맵은 다른 방식에 비해 낮은 SNR 환경에서도 좋은 각도 분해능을 보여주고 [3], 타겟이 없는 영역에 대한 MUSIC 의사 스펙트럼 값이 균질(homogeneous)하기 때문에 임계값(threshold)을 이용한 타겟 탐지 또는 CA-CFAR (Cell Averaging Constant False Alarm Rate)을 이용한 타겟 탐지에 유리하다.

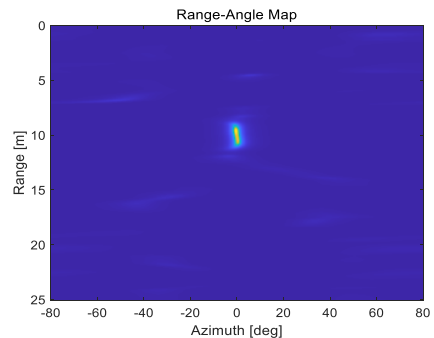


그림 2. 호버링하는 드론의 거리-각도 맵

그림 2는 거리 10m, 방위각 0° 및 고도각 0°위치에서 호버링하는 드론을 촬영하여 얻은 데이터에 MTF 필터를 적용한 뒤, MUSIC 의사 스펙트럼 크기를 계산하여 이미지로 나타낸 거리-각도 맵 예시이다.

3. 실험 과정

실험은 그림 1의 안테나 이득을 고려하여 적절한 방위각 및 고도각을 선정하여 진행하였다.

표 1. 드론 비행 지점 (각도)

비행 각도	0°	10°	20°	30°	40°	50°
안테나 이득	12.6dBi	12.0dBi	11.6dBi	10.8dBi	9.66dBi	8.25dBi

표 1의 비행각도에 대해 16m 거리에서 호버링하는 DJI Phantom 4 드론을 레이더를 이용하여 300회 촬영하고, 획득한 데이터가 클러터의 영향을 받지 않도록 MTI(Moving Target Indication) 필터를 적용하였다. 이후 필터링 된 데이터의 MUSIC 의사 스펙트럼 값을 0.5° 간격으로 계산하여 거리-각도 맵을 생성하였다. 또한 타겟 분류를 위해 그림 3과 같이 거리-도플러 맵을 생성하고, 해당 이미지를 CNN(Convolutional Neural Network) 네트워크의 한 종류인 Alexnet을 통해 드론 유무를 분류하도록 학습시켰다. 학습과정에서는 총 6 Epoch 동안 학습을 진행하였으며, Learning Rate는 0.0003으로 설정하였다. 학습과 테스트 데이터셋의 비율은 7:3이며, 타겟의 클래스는 드론 존재 및 드론 미존재, 총 두 가지 카테고리로 설정하였다.

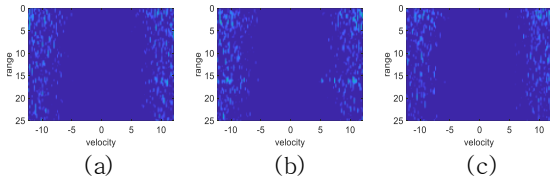


그림 3. 거리-속도 맵 이미지

- (a) 비행각도 40°, 안테나 각도 조정 전 거리-속도 맵
- (b) 비행각도 40°, 안테나 각도 조정 후 거리-속도 맵
- (c) 드론 미존재 거리-속도 맵

4. 실험 결과

실험에서 획득한 각각 300개의 거리-각도 맵에 대해 MUSIC 의사 스펙트럼 값이 최대인 지점을 타겟의 위치로 추정하고, 추정된 각도와 드론의 실제 비행각도와의 차이를 통해 DOA 오차를 획득하였다. 이 때, 오경보(False alarm) 및 미탐지(Miss detection)에 의한 각도 추정 오류를 배제하기 위해 추정된 거리가 실제 거리와 3m 이상 차이나거나 추정된 각도가 실제 각도와 20° 이상 차이나는 경우, DOA 오차에 포함시키지 않고 별도로 분류하였다. 이후 획득한 DOA 오차의 평균 및 표준 편차를 구하여 표 2와 같은 결과를 획득하였다. 또한 안테나 이득 별로 DOA 오차 누적확률분포를 계산하여 그림 4와 같이 나타내었다.

표 2. DOA 추정 실험 결과

비행각도	안테나 이득	DOA 오차 (평균)	DOA 오차 (표준편차)
0°	12.6dBi	0.409°	0.412
10°	12.0dBi	0.808°	0.545
20°	11.6dBi	0.418°	0.435
30°	10.8dBi	1.089°	0.659
40°	9.66dBi	1.699°	1.697
50°	8.25dBi	5.047°	2.805

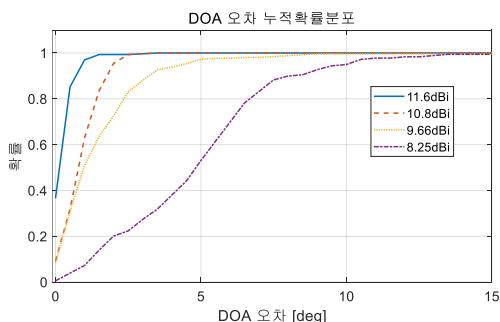


그림 4. 안테나 이득에 따른 DOA 오차 누적확률 분포

표 2에서 드론의 비행각도가 안테나 주엽으로부터 벗어날수록 안테나 이득이 감소하여 DOA 오차가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 그림 4에서 각도 추정 오류가 없을 때 DOA 오차가 95% 이내로 발생하는 지점이 드론의 비행각도가 20°, 30°, 40°, 50° 일 때 각각 1°, 2°, 4.5°, 10°인 것을 확인하였다. 후술할 드론 판별 정확도에서 위와 같은 수준의 오차는 DOA 오차가 발생하더라도 드론을 정확하게 판별 가능할 것임을 보여준다.

표 3. 각도별 드론 탐지 정확도

비행각도	정확도 (조정 전)	정확도 (조정 후)
0°	100%	-
10°	100%	100%
20°	100%	100%
30°	100%	100%
40°	97.78%	100%
50°	58.59%	100%

Alexnet 모델을 이용하여 드론의 유무를 판별한 결과는 표 3과 같다. 비행 각도 0°부터 30°까지는 안테나 각도 조정 전에도 드론의 마이크로 도플러 신호가 비교적 잘 관찰되어 각도 조정 전후의 정확도가 100%로 나타난다. 하지만, 비행 각도가 40°일 때는 각도 조정 전 정확도가 97.78%에서 조정 후 100%로, 약 2.22% 상승되었다. 또한, 비행 각도가 50°일 때는 정확도가 58.59%에서 조정 후 100%로, 정확도가 41.41%로 크게 상승하였다. 이를 통해 제안하는 위치 추정 및 안테나 각도 조정 방식이 드론 탐지의 정확도를 높이는 데 기여할 수 있음을 확인하였다.

III. 결론

실험에서 레이더와 드론 사이 거리가 16m일 때, 드론의 비행각도가 안테나 주엽에서 최대 50° 벗어나 있더라도 DOA 오차가 10° 이상 발생할 확률이 5% 이하임을 보였다. 이러한 결과는 드론의 거리-각도 맵 기반의 위치 추정이 가능함을 보여준다. 또한 추정된 위치 정보를 바탕으로 안테나 각도를 조정함으로써 CNN 기반 드론 탐지 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 이에 따라, 제안하는 위치 추정 및 안테나 각도 조정 방식은 드론 탐지 정확도를 개선하는데 도움이 된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 과제(결과물)은 교육부와 한국연구재단의 지원으로 지원을 받아 수행된 첨단분야 혁신융합대학사업(차세대통신)의 연구 결과입니다.

Following are results of a study on the "Convergence and Open Sharing System(NCCOSS)" Project, supported by the Ministry of Education and National Research Foundation of Korea.

참 고 문 헌

- [1] Rohjani, N.; Shaker, G. "Comprehensive Review: Effectiveness of MIMO and Beamforming Technologies in Detecting Low RCS UAVs." Remote Sens. 2024, 16, 1016. [https:// doi.org/10.3390/rs16061016](https://doi.org/10.3390/rs16061016)
- [2] TINYRAD, "UG-1790: EVAL-TINYRAD24G User Guide", EVAL-TINYRAD Design Center
- [3] A. Badawy, T. Khattab, D. Trincherro, T. Elfouly and A. Mohamed, "A Simple Angle of Arrival Estimation System," 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 1-6, San Francisco, CA, USA, March 2017. doi: 10.1109/WCNC.2017.7925867