

OFDM 레이더 시스템을 위한 YOLO 기반 물체의 속도 및 거리 추정

현인영, 윤승미, 전소연, 정의림*(교신저자)
국립한밭대학교

ihnyoungh@gmail.com, ysm4518@gmail.com, jeonssol1109@gmail.com, *erjeong@hanbat.ac.kr

YOLO-based Estimation of the Velocity and Distance of Objects for OFDM Radar Systems

Hyun In Young, Yun Seung Mi, Jeon So Yeon, Jeong Eui Rim*(Corresponding author)
Hanbat National University

요약

본 논문은 OFDM 레이더 시스템을 통해 얻은 2 차원 주기도를 활용하여 YOLO(you only look once)를 통해 물체의 속도와 거리를 동시에 추정하는 기법을 제안한다. OFDM 레이더는 통신 신호를 활용해 물체 탐지를 가능하게 하여 통신과 레이더를 동시에 수행할 수 있게 해 준다. OFDM 레이더는 타겟에 반사되어 수신된 신호에서 얻은 2 차원 주기도에서 국부 정점(peak)을 찾아 물체의 속도와 거리를 추정한다. 본 연구에서는 국부 정점을 찾기 위해 객체 검출 딥러닝 모델 중 YOLO를 활용하는 것을 제안한다. 제안하는 방법은 국부 정점과 함께 물체의 속도와 거리를 동시에 예측한다. 모의 실험을 통해 제안하는 기법의 성능을 검증한 결과, 전송 OFDM의 심볼의 개수와 상관없이 SNR이 높아질수록 오차가 줄어들며, 그 오차 성능이 비슷함을 확인한다.

I. 서론

현재 전파를 사용하는 센싱(sensing)과 통신(communication) 기술은 독립적으로 개발되었다. 특히 자율주행 등 레이더의 수요가 많아지면서 레이더 시스템 사이의 주파수 충돌 문제 및 이로 인한 주파수 부족 문제가 심각해지고 있다. 따라서 통신과 레이더가 동일한 주파수를 사용하는 통신-센싱 융합이 향후 이동통신의 중요한 문제로 대두되었다. 6G에서는 센싱의 높은 해상도 성능과 초고속 데이터 전송을 위해 센싱과 통신을 통합하는 ISAC(integrated sensing and communication) 서비스를 도입하였다. [1][2]

ISAC을 실현하기 위한 기술 중 하나인 빔포밍(beamforming)은 원하는 물체 방향으로만 무선 신호를 집중시키고 다른 신호로 인한 간섭을 줄이는 기술이다. 이때, 원하는 물체에 신호를 집중시키기 위해서는 레이더를 통해 물체의 속도와 거리를 정확하게 측정해야 한다. OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 레이더는 OFDM 통신 신호를 레이더 신호로 사용함으로써 물체 탐지 및 시스템 간 통신을 동시에 수행한다.[3] 이는 주파수 자원을 효율적으로 사용하면서 많은 양의 데이터 전송과 동시에 물체의 속도 및 거리를 추정할 수 있다. 그러나, 물체가 실시간으로 움직이거나, 환경이 변하는 상황에서 빔포밍을 위한 실시간 위치 추적은 해결해야 하는 어려운 문제이다.

본 논문에서는 OFDM 레이더 시스템에서 YOLO(you only look once)를 기반으로 물체의 속도 및 거리를 동시에 추정하는 알고리즘을 제안한다. YOLO는 실시간 객체 탐지에 적합한 인공지능 모델로, 이미지에서 물체의 종류와 위치를 추정할 수 있다. YOLO가 탐지한 물체의

위치 정보는 레이더 신호 처리를 통해 얻은 2 차원 주기도(periodogram)에서의 속도 및 거리 정보를 의미한다. 제안하는 알고리즘은 모의 실험을 통해 OFDM 심볼 개수와 상관없이 속도, 거리 추정 성능이 우수한 것을 확인한다. 또한, SNR(signal to noise ratio)이 높아질수록 OFDM 심볼의 개수와 상관없이 오차가 줄어들며, 그 오차 성능이 비슷하다.

II. OFDM 레이더 시스템 모델

제안하는 기법의 시스템 모델은 그림 1과 같다. 변조된 신호에 대해 푸리에 역변환(inverse FFT)을 수행한 후, 순환 전치(cycle prefix, CP)를 추가하여 안테나를 통해 송신한다. 송신한 신호가 물체에 반사되어 수신되면, 변조 효과를 제거한 후, 이 과정을 연달아 송신되는 OFDM 심볼에 대해서 수행하여 2 차원 신호를 생성한다. 생성된 신호에 대해 2D FFT를 통해 거리-도플러 신호를 얻은 다음 절대값을 취하여 2 차원 주기도를 얻는다. 이렇게 얻은 2 차원 주기도로부터 물체의 속도와 거리를 추정한다. 2 차원 주기도는 그림 2와 같다.

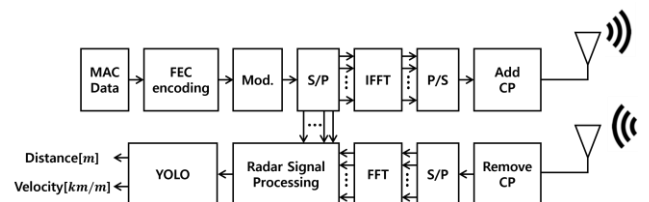


그림 1. OFDM Radar 시스템 모델

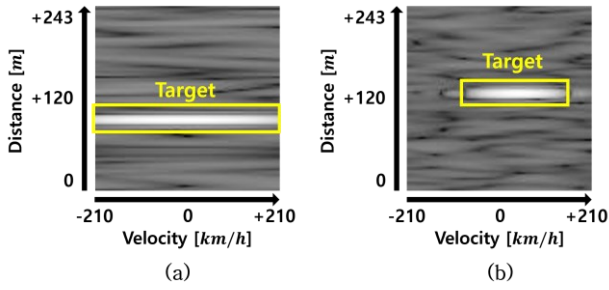


그림 2. 2차원 주기도 (a) 2 symbols (b) 8 symbols

2차원 주기도에서 물체 탐지 및 식별은 주기도의 국부적 정점(peak)을 검출하는 것으로 수행된다. 만약, 2차원 FFT의 크기가 $N_{FFT} \times M_{FFT}$ 일 때, (\hat{n}, \hat{m}) 원소에서 정점이 검출되었다면, 해당물체의 거리는 식 1, 속도는 식 2와 같이 계산된다. c_0 는 광속도를 의미하며 Δf 는 부반송파 간격을 의미한다. 또한, f_c 와 T_0 는 각각 반송파 주파수와 전체 OFDM 심볼 구간을 의미한다. OFDM의 심볼의 개수가 증가할수록 레이다 시스템의 도플러 분해능이 높아져 OFDM의 심볼의 개수가 적을 때보다 더 정확한 속도 정보를 파악할 수 있다.

$$d = \frac{c_0 \hat{n}}{2\Delta f N_{FFT}} \quad (1)$$

$$v = \frac{c_0 \hat{m}}{2f_c T_0 M_{FFT}} \quad (2)$$

III. 제안하는 기법

OFDM 레이다 시스템을 통해 얻은 2차원 주기도를 활용하여 YOLO를 통해 물체의 속도와 거리를 동시에 추정하는 기법을 제안한다. YOLO는 입력 이미지에서 CNN(convolutional neural network)을 기반으로 특징을 추출하고, 이미지 내 객체의 종류와 객체의 위치를 추정한다. 이때, 2차원 주기도는 흑백 이미지로 표현되며, 이를 YOLO에 입력하면 탐지된 물체의 (\hat{x}, \hat{y}) 좌표가 출력된다. 이 좌표들은 2차원 주기도에서 각각 물체의 속도 및 거리를 의미한다. 제안하는 기법은 주기도만을 활용하여 물체의 속도와 거리를 예측하는 회귀(regression) 문제로, 주기도 외에 추가적인 정보는 필요하지 않다.

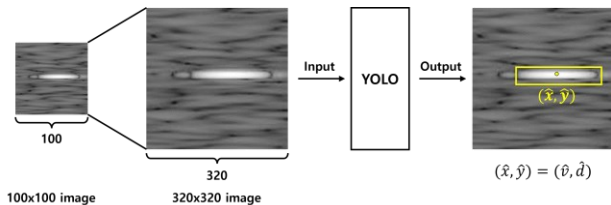


그림 3. YOLO 기반 물체의 속도 및 거리 추정 블록도

IV. 모의 실험 환경 및 결과

학습 및 테스트 데이터 생성은 MATLAB, YOLO의 학습 및 성능 검증은 딥러닝 프레임워크인 Tensorflow를 통해 진행하였다. OFDM 레이다의 전송 설계 환경 파라미터는 다음과 같다. 전체 OFDM 심볼 구간은 $35.74 \mu s$, 부반송파 간격은 30 kHz 이다. 전체 4,096개의 부반송파 중 1,284개가 사용되어 신호의 대역폭은 약 40 MHz 이다. 샘플링 주파수는 122.88 MHz , IFFT 및 FFT의 크기는 4096이다. 중심 주파수는 28 GHz , CP의 길이는 296이며, 2차원 FFT의

크기는 2048×128 이다. 학습 데이터는 SNR(signal to noise ratio) -10 dB 부터 20 dB 범위에서 무작위로 55,000개 생성한다. 테스트 데이터는 SNR -10 dB 에서 20 dB 범위에서 3 dB 간격으로 생성하며, 각각의 SNR마다 10,000개를 생성한다. 전체 주기도에서 크롭된 영역의 크기는 100×100 으로 추정 가능한 속도 및 거리는 각각 $-210 \sim 210 \text{ km/h}$, $0 \sim 243 \text{ m}$ 에 해당한다. 2차원 주기도를 JPEG(joint photographic experts group) 압축 포맷의 이미지로 변환하여 YOLO의 학습 및 테스트를 진행한다. 본 논문에서는 YOLO의 여러 버전 중 객체를 빠르고 정확하게 탐지할 수 있다고 알려진 YOLOv5s 모델을 사용한다. 이때, YOLOv5s는 입력 이미지의 크기가 32배수일 때 성능이 높은 것으로 알려져 있으므로 그림 3과 같이 2차원 주기도를 320×320 의 크기로 확장하여 학습을 진행한다. 테스트 시 성능지표는 평균 절대 오차(mean absolute error, MAE)를 사용한다.

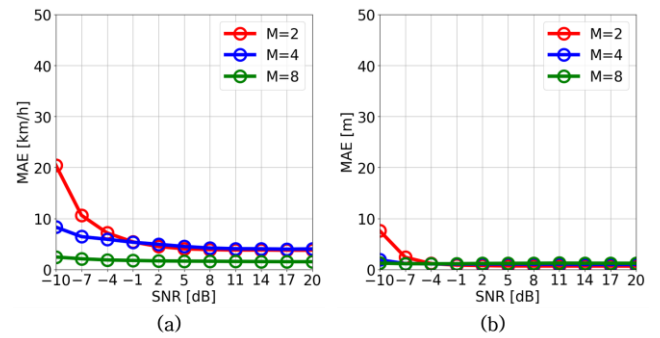


그림 4. SNR에 따른 YOLOv5s의 성능

그림 4는 제안하는 기법의 SNR에 따른 성능 그래프이다. 선의 색상으로 OFDM 심볼 개수(M)를 구분하였으며, 각각 OFDM 심볼 개수가 2, 4, 8일 때의 MAE 그래프이다. 그림 4의 (a)는 속도에 대한 MAE, (b)는 거리에 대한 MAE를 의미한다. 속도와 거리 모두 SNR이 낮은 환경에서는 심볼 개수가 많을수록 추정 오차가 줄어든다. 또한, SNR이 높아질수록 OFDM 심볼의 개수와 상관없이 오차가 줄어들며, 그 오차 성능이 비슷하다.

모의 실험을 통해 낮은 SNR 구간에서는 심볼 개수를 적절히 늘리면 속도 및 거리의 추정 오류를 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 높은 SNR 구간에서는 전송 심볼 개수와 상관없이 오차 성능이 비슷하므로 적은 심볼 개수를 사용하는 것이 효율적이다.

참고 문헌

- [1] D.M.Baek & T.Y.Kim, "Sixth-Generation Networks and Integrated Sensing and Communications," ETRI Electronics and Telecommunications Trends, vol. 38, no. 6, pp. 107-118, 2023.
- [2] D.H.Kim & B.C.Jung, "Research Trends of Emerging Technology for Dual-Function Radar-Communications," The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol. 45, no. 10, pp. 1782-1792, 2020.
- [3] Sit, Y. L., Sturm, C., Reichardt, L., Zwick, T., & Wiesbeck, W. "The OFDM joint radar-communication system: An overview." Proceedings of the International Conference on Advances in Satellite and Space Communications, pp. 69-74, 2011.