

YOLOv8을 이용한 OFDM 레이다 시스템에서의 다중 객체 개수 및 거리/속도 추정

고은아, 전소연, 정의림*

국립한밭대학교

dms1163@naver.com, jeonssol1109@gmail.com, *erjeong@hanbat.ac.kr

Multi-Object Detection and Range/Velocity Estimation in OFDM Radar System Using YOLOv8

Ko Eun A, Jeon So Yeon, Jeong Eui Rim*

Hanbat National University

요약

본 논문은 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 레이다 시스템에서 YOLOv8 딥러닝 모델을 활용하여 다중 객체의 개수와 거리 및 속도를 동시에 추정하는 기법을 제안한다. OFDM 레이다 신호로부터 생성된 2차원 주기도를 YOLOv8 모델의 입력으로 사용하여 객체의 거리와 속도 정보를 추출한다. 모의실험을 통해 제안하는 기법의 OFDM 심볼 수 및 SNR에 따른 성능을 분석하였으며, 기존 YOLOv5 기반 방식과 비교하여 우수한 성능을 보였으며, 특히 SNR이 열악한 환경에서도 오차가 크게 감소하는 경향을 확인하였다. 제안하는 기법은 2차원 주기도만을 활용하여 다중 객체의 거리, 속도 및 개수를 추정할 수 있어, 차세대 이동 통신(6G)의 통신-센싱 융합(ISAC) 시스템에 효과적으로 활용될 수 있다.

I. 서론

최근 레이다 시스템은 자율주행, 드론, 사물인터넷(IoT) 등 다양한 분야에서 필수적인 센싱 기술로 자리 잡고 있다. 고속 데이터 전송과 고정밀 센싱이 동시에 요구되면서 주파수 차원 부족 및 충돌 문제가 심화되어 주파수의 효율적 공유 및 재사용이 주목받고 있으며, 차세대 이동 통신 시스템(6G)은 센싱과 통신 기능을 통합한 ISAC(Integrated Sensing And Communication)을 핵심 기술로 채택하고 있다.

직교 주파수 분할 다중화(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 레이다 시스템은 OFDM 변조 방식을 레이다 시스템에 적용한 기술로, 고속 데이터를 저속 병렬 신호로 변환하여 직교 주파수에 실어 전송함으로써 주파수 간섭을 줄이고 효율적인 데이터 전송이 가능하다. 또한 넓은 대역폭과 높은 주파수 분해능으로 정확한 거리 및 속도 추정이 가능하고, 다중 경로 환경에서도 안정적으로 동작하며, 별도의 센싱용 주파수 할당 없이도 통신과 레이다 기능을 동시에 수행할 수 있다.

본 논문에서는 OFDM 레이다 시스템의 2차원 주기도와 YOLOv8을 활용하여 다중 객체의 개수와 거리 및 속도를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 선행 연구는 YOLOv5s 기반되었으며[1], 본 논문에서는 YOLOv5s와 YOLOv8s의 성능을 비교한다. YOLOv5 대비 우수한 성능을 보이며, 낮은 SNR(Signal to Noise Ratio) 환경에서도 낮은 오차 성능을 유지하는 경향을 보인다.

II. OFDM 레이다 시스템 모델

OFDM 레이다 시스템의 구조는 그림 1과 같다. 송신단에서 변조된 신호에 대해 푸리에 역변환(Inverse FFT)를 수행하여 시간 영역의 OFDM 심볼을 생성한다. 이후 CP(Cyclic Prefix)를 추가하여 무선 채널을 통해 전송한다. 이 신호는 통신 수신기로 전달될 뿐만 아니라, 전방의 물체에

반사되어 레이다 신호로 활용된다. 반사된 신호로부터 CP를 제거한 후 FFT를 수행하여 주파수 영역 신호로 변환한다. 다수의 OFDM 심볼을 누적하여 2차원 FFT를 수행함으로써 2차원 주기도를 생성한다. 이 주기도는 거리와 속도 정보를 동시에 포함하는 Range-Doppler 이미지이며, 이 이미지 내의 국부적 정점(Peak)을 검출함으로써 객체의 존재 여부와 거리 및 속도를 추정할 수 있다. 2차원 FFT의 크기가 $N_{FFT} \times M_{FFT}$ 일 때, (\hat{n}, \hat{m}) 에서 정점이 검출되었다면, 해당 물체의 거리와 속도는 각각식(1), (2)를 통해 계산된다. 이때, c_0 는 광속도, Δf 는 부반송파 간격, f_c 는 반송파 주파수, T_0 는 전체 OFDM 심볼 구간을 의미한다. OFDM 심볼의 개수가 증가할수록 레이다 시스템의 도플러 분해능이 향상되어 더 정확한 속도 정보를 얻을 수 있다.

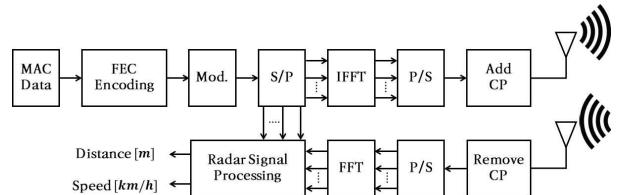


그림 1. OFDM Radar 시스템 블록도

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

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

III. 제안하는 다중 물체 추정 알고리즘

본 연구에서는 OFDM 레이다 시스템으로부터 생성된 2차원 주기도 이미지를 YOLOv8 모델의 입력으로 활용하여, 다중 객체의 개수와 거리 및 속도를 동시에 추정하는 알고리즘을 제안한다. 그림 2은 제안하는 다중 물체 추정 알고리즘의 전체 흐름을 시각적으로 나타낸 것이다. 본 접근법은 주기도 이미지 이외의 추가 정보 없이도 거리 및 속도 추정이 가능하다는 장점이 있다.

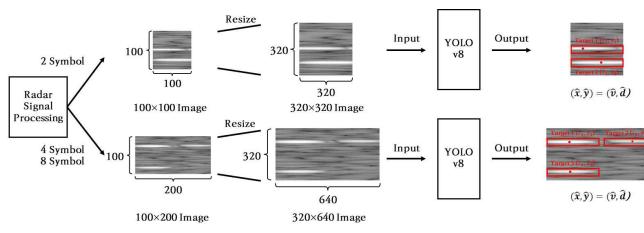


그림 2. 제안하는 다중 물체 추정 알고리즘

IV. 모의실험 환경 및 결과

본 연구에서는 MATLAB을 이용하여 학습 및 데이터를 생성하고, Tensorflow 기반의 딥러닝 프레임워크를 이용하여 YOLO 모델의 학습 및 성능 검증을 수행하였다. OFDM 레이다 시스템의 주요 파라미터는 표 1에 정리되어 있다.

표1. 모의실험 환경

Parameter	Value
OFDM Symbol Duration	$35.74\ \mu s$
Sampling Frequency	128.88 MHz
IFFT(FFT) Size	4096
Bandwidth	40 MHz
Center Frequency	28 GHz
Length of CP	296
Num. of OFDM Symbol	2,4,8
2D FFT Size	$2048 \times 128, 2048 \times 256$
Cropped Region Size	$100 \times 100, 200 \times 100$
Num. of Target	1 ~ 5
SNR Range	-10 ~ 20 dB
Num. of Train Data	50,000
Num. of Test Data	110,000

YOLO 모델의 학습을 위한 하이퍼파라미터는 모델의 버전 및 심볼 수에 따라 표2에 제시하였다. 모든 모델은 최대 100 Epoch까지 학습하였으며, 과적합을 방지하기 위해 조기 종료(Early Stopping)를 적용하였다. 성능 지표는 평균 절대 오차(Mean Absolute Error, MAE)를 사용하였다.

표2. 모델 버전에 따른 하이퍼파라미터

Hyperparameters	Values					
	2 symbol		4 symbol		8 symbol	
Model version	YOLO v5	YOLO v8	YOLO v5	YOLO v8	YOLO v5	YOLO v8
Learning rate	0.001	0.001	0.001	0.01	0.001	0.01
Batch size	16	32	32	32	32	32
Optimizer	SGD	SGD	Adam	SGD	Adam	SGD

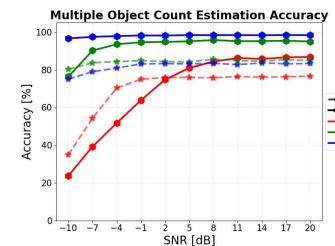


그림 3. SNR에 따른 YOLOv5와 YOLOv8의 다중 객체의 개수 추정에 대한 평균 정확도

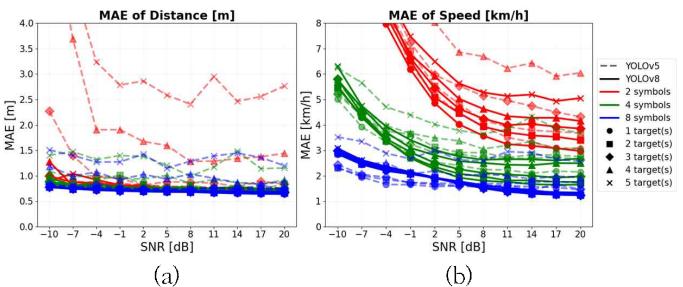


그림 4. SNR에 따른 YOLOv5와 YOLOv8의 평균 절대 오차(MAE)
(a) 다중 객체 거리에 대한 MAE (b) 다중 객체 속도에 대한 MAE

그림 3, 4는 SNR에 따른 YOLOv5와 YOLOv8 모델의 다중 객체의 개수와 거리 및 속도 추정 성능을 시각화한 것이다. 실험 결과, 모든 심볼의 수와 다중 객체 조건에서 YOLOv8이 YOLOv5 대비 전반적으로 더 우수한 성능을 기록하였다. 특히 심볼의 수가 적고, SNR이 낮은 환경에서 두 모델 간의 성능 차이가 뚜렷하게 나타났다. 구체적으로, 심볼 2개를 사용한 환경에서 5개의 객체가 존재할 때, YOLOv5는 최대 $10.77m$ 의 거리 오차와 $26.36km/h$ 의 속도 오차를 기록한 반면, YOLOv8은 각각 $0.9m$, $14.51km/h$ 로 오차가 크게 감소하였다. 심볼의 수가 증가함에 따라 두 모델 모두 속도 예측 오차가 감소하는 경향을 보였으나, YOLOv8의 감소 폭이 더 크고 전반적인 예측 정확도가 높았다. 이는 복잡한 통신 환경에서도 견고하고 정확한 거리와 속도 추정이 가능함을 의미한다.

V. 결론

본 논문에서는 OFDM 레이다 시스템에서 YOLOv8 모델을 활용한 다중 객체의 개수, 거리 및 속도 추정 기법을 제안하였다. 제안 방법은 표적으로부터 반사된 OFDM 신호로부터 생성된 2차원 주기도를 YOLO의 입력으로 사용하여, 다중 물체의 개수뿐만 아니라 거리와 속도를 예측한다. 시뮬레이션을 통해 기존 YOLOv5 모델과의 성능을 비교한 결과, 제안 방법이 낮은 SNR 환경 및 다중 객체 조건에서 우수한 추정 성능을 보였다. 이는 복잡하고 열악한 환경에서도 안정적으로 동작함을 의미하며, 기지국과 이동국 간의 통신과 동시에 레이다 신호처리를 수행하여 차세대 통신-센싱 융합 시스템의 핵심 기술로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] S. -Y. Jeon, I. -Y. Hyun and E. -R. Jeong, "Velocity and Distance Estimation of Multiple Objects Using YOLO-Based OFDM Radar System," 2024 15th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju Island, Korea, Republic of, 2024, pp. 2214-2216, doi: 10.1109/ICTC62082.2024.10826738.