

스펙트럼 센싱을 위한 YOLOv8 기반 신호 유무 탐지 기법

이득한, 최근원, 이재현, 정의림*

국립한밭대학교

hain7576@naver.com, chlrmnsdnjs33@naver.com,

leejh980247@gmail.com, *erjeong@hanbat.ac.kr

YOLOv8-Based Signal Presence Detection Method for Spectrum Sensing

Lee Deuk Han, Choi Geun Won,

Lee Jae Hyeon, Jeong Eui Rim*(Corresponding author)

Hanbat National University

요약

본 논문은 저피탐 통신 환경에서 신호 유무를 판단하기 위해 YOLO(You Only Look Once) 기반 객체 탐지 기법을 활용한 스펙트럼 센싱 방법을 제안한다. 시간-주파수 영역의 스펙트로그램을 입력으로 하여 YOLOv5와 YOLOv8 모델의 신호 유무 판단 성능을 비교하였으며, 오탐률 0% 조건에서 정탐률을 분석하였다. 실험 결과, 정탐률 65% 기준에서 YOLOv8은 YOLOv5 대비 약 1.9dB 향상된 성능을 보였다. 이를 통해 실시간 스펙트럼 센싱 기술에 있어 YOLO 기반의 객체 탐지 기법의 적용 가능성을 확인하였다.

I. 서 론

전시 상황에서 적군의 통신 신호를 조기에 탐지하고 분석하는 것은 작전 상황을 정확히 파악하고 선제 대응을 가능하게 하므로 전술적 의사결정에 매우 중요한 역할을 한다. 적군이 사용하는 저피탐(LPI, Low Probability of Intercept) 통신 시스템은 전파 노출을 최소화해 레이더 및 청킹 시스템의 탐지되지 않도록 설계된 통신 방식으로, 은밀한 정보를 주고받기 위해 사용된다.[1] 대표적으로 주파수를 빠르게 변화시키는 주파수 호핑(Frequency Hopping), 송신 전력을 매우 낮게 설정하는 저전력 송신(Low-power Transmission) 등 다양한 기술을 활용해 탐지를 어렵게 만든다. 따라서 적군의 저피탐 통신 신호를 판단하는 기술 개발 또한 중요하다. 최근에는 딥러닝 기반의 객체 탐지 기법을 활용한 스펙트럼 센싱 기술이 주목받고 있으며, 특히 시간-주파수 영역에서 나타나는 미약한 신호 패턴을 스펙트로그램으로 변환한 뒤 이를 인공지능 모델로 분석함으로써 저피탐 통신 신호를 탐지하는 방안이 연구되고 있다.[2]

본 논문에서는 스펙트럼 센싱에서 신호 유무를 판단하기 위해 YOLO(You Only Look Once) 기반의 객체 탐지 모델을 활용한다. YOLO는 CNN 기반의 one-stage detector로, 입력 이미지를 한 번만 통과시켜 객체의 위치와 클래스를 동시에 예측하는 실시간 객체 탐지 모델이다. 본 연구에서 시간-주파수 영역에서 생성된 스펙트로그램 상에 신호는 가로로 긴 막대 형태로 나타나며, 이를 객체로 간주할 수 있다. 객체 탐지 모델인 YOLO를 활용하면 스펙트로그램 상의 신호 유무를 판단할 수 있다. 따라서 YOLOv5와 YOLOv8을 활용하여 신호 유무 판단 성능을 비교 분석한다.

II. 스펙트럼 센싱 시스템 모델

본 논문에서 제안하는 YOLO 기반 스펙트럼 센싱은 수신된 광대역 신호

의 스펙트럼 정보를 활용하여, 관찰 중인 주파수 대역 내 신호의 존재 여부를 객체 탐지(Object Detection) 방식으로 판단한다. 그림 1은 YOLO 기반 스펙트럼 센싱의 전체적인 처리 과정을 나타낸 것이다. 수신된 신호를 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환하기 위해 FFT(Fast Fourier Transform)를 적용하여 변환하고, 그 결과를 시간 축으로 누적한 뒤 제곱하여 시간-주파수 영역의 2차원 스펙트로그램을 생성한다. 생성된 스펙트로그램은 YOLO 모델의 입력으로 사용되며, YOLO 모델은 입력된 스펙트로그램 상에서 신호가 존재할 것으로 판단되는 위치에 대해 예측 바운딩 박스를 출력한다. 이 예측 바운딩 박스로 신호 유무를 결정한다.

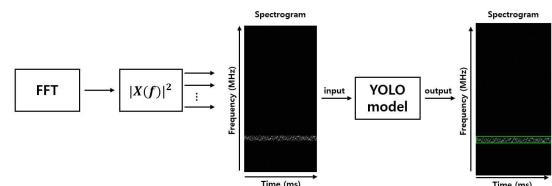


그림 1. YOLO 기반 스펙트럼 센싱 블록도

III. 스펙트로그램

스펙트로그램은 FFT 크기 256, 관찰 길이 128의 2차원 흑백 이미지로 시간-주파수 영역의 전력 분포를 시각화한 것이다. 각 픽셀은 정규화된 전력값을 나타내며, 전력이 클수록 밝게, 작을수록 어둡게 표현된다. 그림 2는 다양한 SNR 조건에서 생성된 스펙트로그램 예시를 보여준다. 그림 2의 (a)는 SNR -4dB로 신호의 전력이 잡음의 전력보다 작아 정규화 후 신호가 잡음에 묻혀 흐릿하게 나타나며, (b)는 SNR 8dB로 신호의 전력이 잡음의 전력보다 상대적으로 커서 신호와 잡음이 뚜렷하게 구분된다. (c)는 신호의 전력이 존재하지 않아 잡음의 전력만 정규화되어 무작위한 분포의 스펙트로그램으로 표현된다.

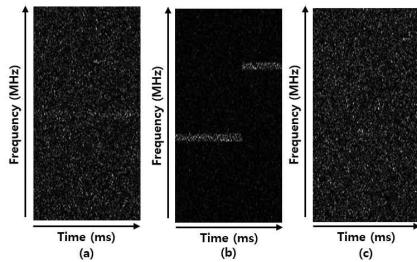


그림 2. 스펙트로그램 이미지

(a) SNR=-4dB, Signal ON (b) SNR=8dB, Signal ON (c) Signal OFF

IV. 예측 바운딩 박스를 활용한 판단 기준

그림 3은 생성된 스펙트로그램을 입력으로 하여 YOLO 모델이 신호 유무를 판단한 결과를 보여준다. 이때, 신호의 실제 위치를 나타내는 실제 바운딩 박스(Ground Truth Bounding Box)와 YOLO 모델이 생성한 예측 바운딩 박스(Predicted Bounding Box) 간의 IoU(Intersection over Union)가 0보다 큰 경우, 정탐(True Positive)으로 간주한다. 그림 3의 (a)는 정탐의 예시를 보여준다. 반면, 실제 바운딩 박스가 존재하지만 예측 바운딩 박스가 없거나 IoU가 0인 경우는 미탐(False Negative)으로 분류된다. (c)는 이러한 미탐의 예시를 보여준다. 또한 실제 바운딩 박스가 존재하지 않을 때, 예측 바운딩 박스가 생성된 경우는 오탐(False Positive)으로 판단하며, (b)가 오탐의 예시를 보여준다. 이러한 방식으로 각 스펙트로그램에 대해 신호 유무를 구별한다.

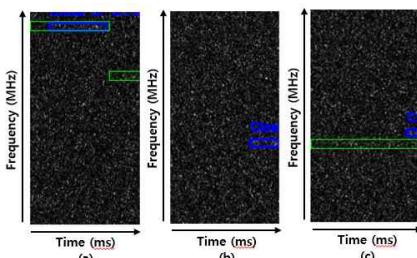


그림 3. YOLO 모델의 신호 탐지 결과

(a) 정탐 (b) 오탐 (c) 미탐

V. YOLO 모델 학습 설정

본 논문에서는 YOLO의 버전 중 각각 YOLOv5s 모델과 YOLOv8s 모델을 사용한다. 모델 학습 시 YOLOv5 모델의 경우, Optimizer는 AdamW, Learning Rate는 0.001, Batch Size는 32로 설정하고 YOLOv8 모델의 경우, Optimizer는 AdamW, Learning Rate는 0.001, Batch Size는 64로 설정한다. 두 모델 모두 사전 학습 가중치는 사용하지 않고 조기종료(Early Stopping)를 사용한다.

VI. 모의실험 환경 및 결과

모의실험 데이터는 MATLAB으로 생성하였고, 모델 학습과 검증은 PyTorch로 수행하였다. 훈련 및 검증 데이터는 SNR -10~20[dB] 범위에서 무작위한 SNR을 갖도록 각각 50,000개와 10,000개씩 생성하였다. 테스트 데이터는 SNR -10~20[dB] 범위에서 1dB 간격으로 10,000개씩, 총 310,000개로 구성되며 Busy와 Idle의 비율은 1:1로 구성하였다.

그림 4는 YOLOv5와 YOLOv8의 오탐 성능을 비교한 결과를 보여준다. 두 모델의 공정한 비교를 위해 각각의 Confidence Threshold를 조절하였고, YOLOv5는 0.5, YOLOv8은 0.8로 설정하였다. 이 조건에서 두 모델 모두 SNR -10~20[dB] 범위에서 오탐률(False Alarm Rate) 0%를 보여

준다.

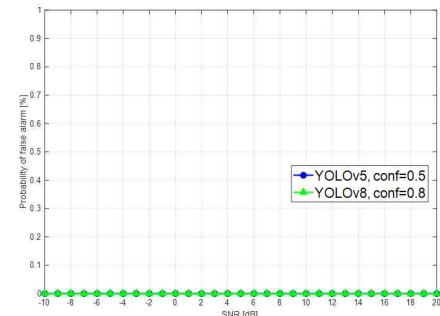


그림 4. SNR에 따른 YOLOv5 및 YOLOv8의 오탐 성능 그래프

그림 5는 YOLOv5와 YOLOv8의 정탐 성능을 비교한 결과를 나타낸다. 정탐률 65%를 기준으로 비교했을 때, YOLOv8은 YOLOv5보다 약 1.9dB 우수한 성능을 보인다. 이는 YOLOv8이 더 낮은 SNR 환경에서도 신호를 효과적으로 검출할 수 있다는 것을 보여준다.

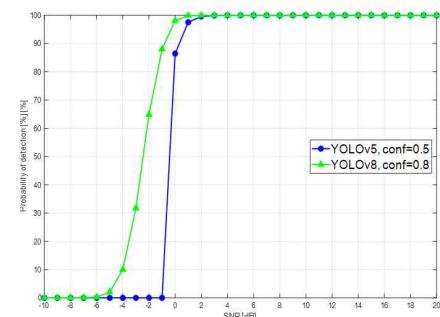


그림 5. SNR에 따른 YOLOv5 및 YOLOv8의 정탐 성능 그래프

VII. 결론

본 논문에서는 저피탐 환경에서의 신호 탐지를 위해 YOLO를 활용한 스펙트럼 센싱 기법을 제안하였다. 생성된 2차원 스펙트로그램에서 신호를 가로로 긴 객체로 볼 수 있었고 이 스펙트로그램을 YOLOv5와 YOLOv8 모델의 입력으로 넣어서 신호 유무를 판단하였다. 모의실험 결과, 두 모델 모두 SNR -10~20dB 범위에서 오탐률 0% 조건을 만족하였고, 정탐률이 65% 기준에서 YOLOv8은 YOLOv5에 비해 약 1.9dB 우수한 정탐 성능을 보였다. 이 결과는 저피탐 통신 환경에서 신호를 효과적으로 탐지할 수 있음을 보여주었고, YOLO 기반 탐지 기법의 적용 범위를 넓히는 데 있어 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] I. S. Lee, S. J. Oh, "Detection Probability Improvement Scheme Optimized for Frequency-Hopping Signal Detection," Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, 29(10), pp. 783-790, 2018.
- [2] J. S. Yoo, Y. S. Cho, C. J. Kim, H. Y. Choi, and Y. S. Kim, "Time and Accuracy Trade-off of LPI Radar Classification Technology Based on Time-Frequency Analysis and Deep Learning," Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, 34(1), pp. 25-32, 2023.