

인공지능 스펙트럼 센싱 기반 실시간 저피탐 통신 탐지기 설계 및 구현

조성환, 최범영, 정의림*

국립한밭대학교

josseong1227@gmail.com, zerotiger0930@gmail.com, *erjeong@hanbat.ac.kr

Design and Implementation of an AI-Based Spectrum Sensing System for Real-time LPI Communication Detection

Seong-Hwan Jo, Bum-Young Choi, Eui-Rim Jeong*

Hanbat National University

요약

최근 자폭 드론 및 비인가 무선 기기의 확산으로 인해 저피탐(Low Probability of Intercept, LPI) 통신 신호에 대한 조기 탐지 기술의 중요성이 증가하고 있다. 그러나 이러한 신호는 저전력 송신과 빠른 주파수 호핑 특성을 가지므로 에너지 탐지 기반 스펙트럼 센싱 기법으로는 낮은 SNR 환경에서 신뢰성 있는 탐지가 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 논문에서는 스펙트로그램 기반 주파수 탐지를 객체 탐지(Object Detection) 문제로 정의하여, YOLOv8 기반 인공지능 스펙트럼 센싱 파이프라인을 제안한다. 제안한 시스템은 Raspberry Pi 기반 온디바이스 환경에서 구현되어 외부 서버 연결 없이 실시간 스펙트럼 분석이 가능하다. 실험 결과, IoU 0.9 기준, SNR -3 dB 환경에서도 약 97.8%의 탐지 성능을 유지하였으며, 기존 분석 장비로는 식별이 어려운 조건에서도 안정적인 주파수 호핑 신호 탐지가 가능함을 확인하였다.

I. 서론

최근 전장 환경 및 국방 위협 시나리오에서 자폭 드론과 같은 저고도·저속 비행체의 활용이 급증하고 있다. 이러한 무기 체계는 레이더 반사면적(RCS)이 작아 레이더 기반 탐지가 어렵다는 한계를 가진다[1]. 이에 따라 드론 자체를 탐지하는 방식보다는, 드론과 조종자 간의 무선 통신 신호를 탐지하는 접근이 효과적인 대안으로 주목받고 있다[2].

그러나 적군은 수 ms 이하의 빠른 주파수 호핑과 저전력 송신을 활용하여 무선 신호 노출을 최소화하며, 이로 인해 기존 에너지 탐지 기반 스펙트럼 센싱 기법은 낮은 SNR 환경에서 탐지 성능이 급격히 저하된다[3]. 이러한 한계를 극복하기 위해 인공지능 기반 스펙트럼 센싱 기법이 대안으로 제시되고 있으나, 대부분의 인공지능 기반 접근법은 클라우드 환경을 전제로 한다는 한계를 가진다[4].

실제 전장 환경에서는 통신 인프라의 파괴, 전파 교란, 보안상의 제약으로 인해 외부 서버와의 안정적인 연결을 보장할 수 없다. 따라서 탐지 시스템은 외부 인프라에 의존하지 않고, 현장에서 신속하고 독립적인 판단을 수행할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 신호 수집부터 분석 및 판단에 이르는 전 과정을 현장에서 처리하는 온디바이스 기반 탐지 시스템이 필요하다.

이에 본 논문은 서버 연결에 의존하지 않고, 제한된 연산 자원 환경에서도 동작 가능한 인공지능 기반 스펙트럼 센싱 시스템을 설계·구현하여, 저피탐 통신 신호를 실시간으로 탐지하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 본 논문은 스펙트로그램 이미지를 활용하여 주파수 탐지를 객체 탐지 문제로 정의하고, 이에 대한 접근 방안으로 YOLOv8 기반의 온디바이스 스펙트럼 센싱 파이프라인을 제

안한다. 제안하는 시스템은 Raspberry Pi 환경에서 저피탐 특성을 가진 RF 신호를 수신받아 스펙트로그램으로 변환해 실시간으로 추론한다.

실험 결과, 제안하는 시스템은 온디바이스로 안정적인 구동이 가능하며, 저 SNR 환경에서도 주파수 호핑 신호에 대해 높은 탐지 정확도를 달성한다.

II. 제안 방법

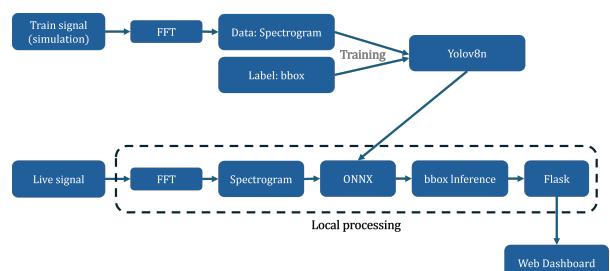


그림 1: 제안하는 시스템 파이프라인

[그림 1]은 본 논문에서 제안하는 인공지능 스펙트럼 센싱 파이프라인의 전체 구조를 나타낸다. 해당 시스템은 크게 학습 단계와 실시간 추론 단계로 구성된다.

II.I. 시뮬레이션 기반 학습 단계

학습 단계에서는 시뮬레이션 환경에서 생성된 주파수 호핑 신호를 FFT 기반의 스펙트로그램으로 변환하고, 신호 구간을 Bounding box로 라벨링하여 데이터셋을 구축한다. 이를 사용해 YOLOv8 객체 탐지 모델을 학습시켜, 신호의 존재 여부와 주파수 위치를 동시에 식별할 수 있도록 한다.

*교신 저자

II.II. 실시간 온디바이스 추론 단계

실시간 추론 단계에서는 SDR(Software Defined Radio)로 수신한 실제 RF 신호를 스펙트로그램으로 변환해, 경량화된 ONNX 포맷의 YOLOv8 모델에 입력한다. 모든 추론 과정은 Raspberry Pi 환경에서 수행되며, 탐지 결과는 Flask 기반 대시보드를 통해 실시간으로 시각화한다.

III. 실험 환경 및 결과

III.I. 실험 환경

본 논문에서는 제안 시스템의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션 환경에서 생성된 주파수 호핑 신호를 활용한다. 데이터 생성 방법과 모델 학습을 위한 하이퍼파라미터 설정은 [표 1]과 같다.

표 1: 데이터 생성 및 모델 학습 파라미터

항목 (Category)	설정 값 (Value)
<i>Data Generation Settings</i>	
Signal Type	Frequency Hopping
SNR Range	-5 dB – 10 dB (Uniform)
Image Resolution	256 × 128 (Freq × Time)
Dataset Size	60,000 (Train: 50k / Test: 10k)
Signal Ratio	1:1 (Busy: Idle)
<i>Model Hyperparameters</i>	
Model Architecture	YOLOv8n
Training Type	Scratch (No Pre-trained)
Optimizer	AdamW
Batch Size	32
Learning Rate	10^{-3} (Initial)
IoU Threshold	0.7

생성된 주파수 호핑 신호는 스펙트로그램 이미지로 변환하며, 학습에 사용한 데이터의 예시는 [그림 2]와 같다.

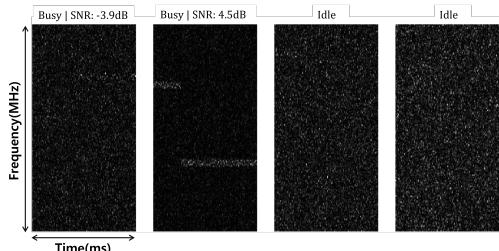


그림 2: 스펙트로그램 이미지

모델은 실시간성과 메모리 효율성을 고려하여 YOLOv8 객체 탐지 모델을 사용하며, 스펙트로그램의 고유한 패턴 학습을 위해 데이터 증강 없이 Scratch 방식으로 학습한다.

III.II. 정량적 성능 평가

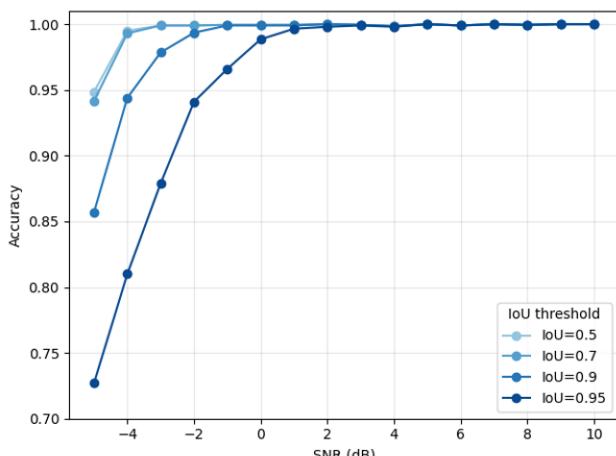


그림 3: 제안 모델의 성능 평가 결과 그래프

[그림 3]는 SNR 조건에 따른 시뮬레이션 환경에서의 주파수 탐지 성능을 나타낸다. SNR이 높아짐에 따라 탐지 성능이 향상되는 경향을 보이며, 낮은 SNR 환경에서도 비교적 안정적인 성능을 유지함을 확인할 수 있다. 특히 제안한 모델은 IoU 0.9 기준에서 SNR -3 dB 환경에서도 약 97.8%의 탐지 정확도를 달성하여, 기존 에너지 탐지 기반 스펙트럼 센싱 기법으로는 신뢰성 있는 탐지가 어려운 SNR 구간에서도 신호의 주파수 위치를 효과적으로 식별할 수 있음을 보여준다.

III.III. 정성적 성능 평가

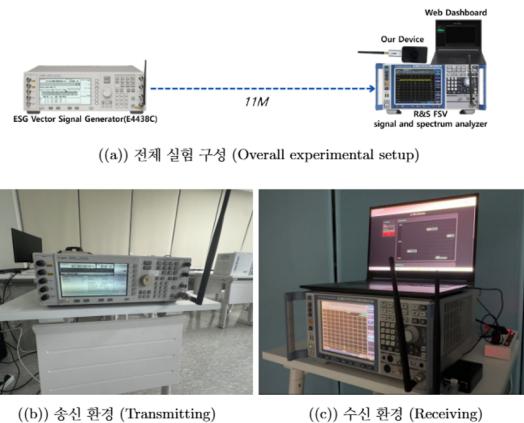


그림 4: 실제 환경 실험 구성

실제 환경에서의 성능을 평가하기 위해 [그림 4]의 (c)와 같이 구축된 수신 환경에서 상용 스펙트럼 분석기와 제안 시스템의 탐지 결과를 비교한다. 상용 장비에서 신호 에너지가 잡음 바닥(Noise Floor)과 유사하여 유효한 식별이 어려운 반면, 제안 시스템은 이러한 호핑 신호를 성공적으로 탐지하고 그 위치를 Bounding Box로 시각화한다. 이는 기존 에너지 탐지 방식으로는 식별이 어려운 저피탐 통신 환경에서도, 제안 시스템은 신호의 존재 여부 및 위치를 효과적으로 파악할 수 있음을 정성적으로 확인하였다.

참고 문헌

- C.-M. Choi, “국방 스텔스 기술 동향 및 전망,” *The Magazine of KIICE*, vol. 13, no. 2, pp. 27–33, 2012.
- L. D. Han, C. G. Won, L. J. Hyeon, and J. E. Rim, “Yolov8-based signal presence detection method for spectrum sensing,” in *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences*, The Korean Institute of Communications and Information Sciences, 2025.
- C. Lee, J. Oh, C. Song, D. Hur, and S. Cho, “Analysis of mathematical approaches for accurate sensing in spectrum sensing based on energy detection method,” in *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences*, The Korean Institute of Communications and Information Sciences, 2023.
- J. S. Yoo, Y. S. Cho, C. J. Kim, 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*, vol. 30, no. 1, pp. 25–32, 2023.