

전자기 방사 통제 환경에서의 초저음파·전자기 복합 센서 기반 지능형 드론 탐지 모델 연구

이건희, 김동호, 윤영삼
서울과학기술대학교 국방융합과학대학원 국방ICT융합공학과
leehoo2@naver.com

A Study on Intelligent Drone Detection Model Based on Infrasound-Electromagnetic Composite Sensors in Emission Control Environments

Gunhee Lee, Dongho Kim, Youngsam Yoon
Graduate School of National Defense Convergence, SEOUL TECH,
Dept. of National Defense ICT Convergence Engineering

요약

본 논문은 자율 비행 기반 전자기 방사 통제(Emission Control) 환경에서 드론 탐지 공백을 해결하고자, 초저음파와 전자기 신호를 융합한 하이브리드 탐지 모델을 제안한다. 제안 모델은 두 채널의 데이터를 시간축으로 동기화하고 적응형 가중치 융합 기법을 적용해, 전자적 신호 부재 시 초저음파 채널 가중치를 높여 탐지 연속성을 확보하고 전파 간섭 환경에선 오경보를 억제한다. 본 연구는 국가 중요시설에서의 저비용·고효율 대드론 방어 체계 구축에 기여할 것이다.

1. 서론

최근 자율 비행 및 전자기 방사 통제(Emission Control)를 포함한 드론의 위협이 증대되고 있다. 이는 기존의 전자기 센서(RF) 탐지망을 우회하여 보안 공백을 야기하며, 도심 및 복잡한 산업 환경에서의 전파 간섭으로 인한 오탐지율 증가도 주요 한계이다. 본 연구에서는 이러한 전자기적 탐지의 한계를 극복하기 위해, 드론의 물리적 회전익 구동 시 불가피하게 발생하는 초저음파(Infrasound) 특성 신호와 전자기 센서의 복합 분석을 통한 하이브리드 탐지 기법을 제안한다. 전자기 센서가 표적의 '전자적 존재'와 '기종 정보'를 식별하는 동안, 초저음파 기반의 물리적 특성 신호 분석은 표적의 실질적인 '비행 활동'을 증명함으로써 두 정보 간의 상호보완적(Complementary) 관계를 구축하고 탐지 신뢰도를 극대화하는 데 목적이 있다.

2. 관련 연구 및 데이터 구성

2.1 초저음파 기반 물리적 탐지

드론의 음향 특성은 시간-주파수 도메인 분석을 통해 식별 가능하며 SVM 기반 분류 시스템으로 그 유효성이 입증된 바 있다[1]. 그러나 기존 음향 탐지 연구의 대부분은 가청 주파수 대역(20Hz 이상)에 집중되어 있어 저고도·장거리 환

경에서 감쇄가 심하나, 20Hz 미만의 초저음파는 대기 감쇄가 적고 회절 특성이 우수해 장거리 및 비가시선(NLOS) 탐지에 유리하다. 특히 드론 비행 시 발생하는 초저음파는 모터의 기계적 진동과 회전익의 공력 소음이 결합된 고유의 하모닉스(Harmonics) 패턴을 형성한다. 본 연구에서는 고정밀 초저음파 수집 장비를 활용하여 실제 비행 상황에서의 물리적 데이터를 획득하고, 표적의 고유 진동 특성을 분석하기 위한 데이터셋을 구축한다.

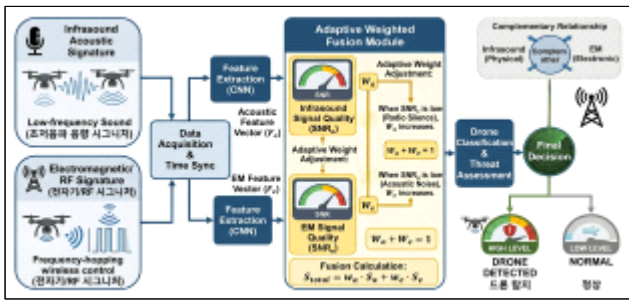
2.2 전자기 센서 기반 전자적 탐지

드론의 전자기 신호를 비행 모드별로 수집한 오픈소스 데이터셋 기반의 딥러닝 탐지·식별 연구가 진행된 바 있다[2]. 그러나 전자기 기반 탐지는 드론이 자율 비행 모드로 전자기 방사를 통제하는 무선 신호 부재 상황에서는 근본적인 탐지 공백이 발생하며, 도시의 전파 간섭 환경에서는 오경보율이 증가하는 한계를 지닌다. 본 연구에서는 경제성과 범용성을 고려하여 SDR(Software Defined Radio) 기반의 전자기 센서를 구성하고 2.4GHz 및 5.8GHz 대역의 광대역 신호를 실시간 모니터링한다. 실험의 양적 신뢰도 확보를 위해 'DroneRF' 데이터셋과 실제 전자기 센서 수집 데이터를 병행 활용하며, 전자기 센서가 포착한 제어 주파수와 초저음파 센서가 포착한 기계적 진동 주파수 간의 신호 정합성(Signal Coherence)을 검증하기 위한 기초 자료로 사용한다.

2.3 이중 센서 융합 기반 탐지

전자기와 음향 특징을 융합한 딥러닝 기반 분류 모델은 저 SNR(-10dB) 환경에서 약 91%의 분류 정확도를 달성하며 단일 센서 대비 우수한 잡음 내성을 보임이 확인되었다[3]. 그러나 해당 연구는 고정 가중치 방식으로 설계되어 '무선 신호 부재' 시나리오에서의 탐지 연속성을 보장하기 어렵다는 한계가 있다. 본 연구는 이 점에 착안하여, 실시간 신호 품질에 따라 가중치를 동적으로 조절하는 적응형 융합 메커니즘을 통해 무선 신호가 부재한 상황에서도 탐지 연속성을 확보하는 방향으로 차별화를 꾀한다.

3. 하이브리드 탐지 모델



[그림 1] Proposed Hybrid Drone Detection System

본 연구에서 제안하는 모델은 그림 1과 같이 이중 센서로부터 수집된 데이터를 시간축으로 동기화하고, 이를 CNN 기반의 적응형 가중치 융합(Adaptive Weighted Fusion) 기법을 통해 분석하는 구조를 가진다. 시스템은 초저음파와 전자기 센서 수집부로 이원화되어 운영되며, 각 채널에서 추출된 특징은 다중 채널 CNN의 입력값으로 사용된다. 특히, CNN 내부에 설계된 가중치 산출 네트워크는 입력 특징에서 전파 간섭 정도나 배경 소음 같은 환경적 요소를 파악하여, 이를 기반으로 다음과 같은 가중치 합 산출식을 적용하여 최종 탐지 여부를 판정한다.

$$S_{total} = w_a \times S_a + w_e \times S_e, (w_a + w_e = 1) \quad (1)$$

Eq. 1에서 S_a 와 S_e 는 각각 초저음파(audio) 및 전자기(em) 센서의 탐지 점수를 의미하며, w_a 와 w_e 는 실시간 신호 품질에 따라 변하는 신뢰도 가중치이다. 전자기 신호가 방출되지 않는 전자기 침묵(Radio Silence) 상황이 발생할 경우, 시스템은 전자기 채널의 가중치(w_e)를 최소화하는 대신 초저음파 채널에서 포착되는 드론 특유의 하모닉스(Harmonics) 패턴에 높은 가중치(w_a)를 부여하여 탐지 연속성을 확보한다. 반대로 전파 간섭이 심한 환경에서는 두 신호의 정합성을 교차 검증함으로써 드론 외 신호로 인한 오경보를 효과적으로 필

터링한다. 이러한 학습 기반의 적응형 융합 방식은 단일 센서 체계의 탐지 공백을 메우고 전체 시스템의 강건성을 보장하는 핵심 기제로 작용한다.

본 연구의 유효성을 검증하기 위해 실제 수집된 초저음파 데이터와 오픈소스 전자기 신호를 다양한 SNR 조건에서 합성한 데이터셋 기반의 분석 환경을 구축하였다. 특히, 자율 비행 드론의 전자기 방사 통제 상황을 모사한 '무선 신호 부재' 시나리오를 통해, 단일 센서 대비 하이브리드 모델이 탐지 연속성을 확보할 수 있음을 입증하고자 한다. 전자적 신호 부재 시 발생하는 미탐지(False Negative)를 초저음파 채널의 물리적 특성 분석으로 보완함으로써 전체 시스템의 재현율(Recall)을 획기적으로 개선함과 동시에 복잡한 전파 환경에서의 오경보를 이중 신호 간 정합성 검증으로 효과적으로 억제하여 탐지 정밀도(Precision)를 동시에 높이는 성과를 거두었다. 최종적으로 소형 임베디드 보드 환경에 최적화된 연산 설계를 통해, 제안 기법이 실제 보안 현장에서 저비용·고효율의 대드론 방어 체계로 활용될 수 있는 실용성을 입증할 것으로 기대한다.

4. 결론

본 연구는 전자기 센서의 한계인 '무선 신호 부재'로 인한 탐지 공백을 해결하고자 초저음파 특성 신호 기반의 하이브리드 탐지 모델을 제안하였다. 특히 CNN이 실시간 환경 요소를 분석하여 가중치를 조절하는 적응형 융합 메커니즘을 통해, 자율 비행 드론에 대한 탐지 연속성을 확보하고 오경보를 효과적으로 억제할 수 있음을 이론적으로 제시하였다. 본 결과는 국가 중요시설 보호를 위한 저비용·고효율 대드론 방어 체계 구축의 기초 자료로 활용될 것이며, 향후 지자기 및 지면 진동 센서 등 추가적인 물리 센서 융합을 통해 도심 환경에 최적화된 다층적 보안 시스템으로 고도화할 계획이다.

참고문헌

[1] A. Bernardini et al., "Drone detection by acoustic signature identification," *Electronic Imaging*, 2017.
 [2] M. S. Allahham et al., "DroneRF dataset: A dataset of drones for RF-based detection, classification and identification," *Data in Brief*, 2019.
 [3] A. Frid et al., "Drones Detection Using a Fusion of RF and Acoustic Features and Deep Neural Networks," *Sensors*, 2024.