

비면허 대역 드론 운용에 따른 드론과 Wi-Fi의 공존 분석 연구

황재룡¹ · 최재혁^{2*}¹해군사관학교 사이버과학과 부교수 ^{2*}가천대학교 AI·소프트웨어학부 교수

Coexistence of Drones and Wi-Fi Networks in the Unlicensed Band

Jae-Ryong Hwang¹ · Jae-Hyuk Choi^{2*}¹Associate Professor, Department of Cyber Science, R.O.K Naval Academy, Korea^{2*}Professor, School of Computing, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

[요약]

오늘날 드론은 군사적 목적뿐만 아니라 도심 속에서 배달, 영상 촬영, 추적 및 감시, 건물 안전 진단 등 다양한 민간 서비스에서 폭넓게 사용되고 있다. 주어진 임무 수행을 위해 드론을 제어하고 촬영한 영상과 수집한 데이터를 전송하기 위해 많은 드론 제조업체는 표준화된 또는 독자적인 RF 무선 통신 기술을 사용하여 비면허 ISM(Industrial, Scientific, Medical) 대역에서 작동한다. 드론이 도심과 거주지 주변에서 다양한 민간 서비스에 활용되는 점을 고려할 때, 비면허 대역을 이용한 드론 운용을 위해 사용되는 제어 및 데이터 송수신용 RF 무선 통신 기술을 이해하고, 드론 운용으로 인해 발생할 수 있는 잠재적인 비면허 대역상 무선 간섭에 대해 명확한 분석이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 다양한 시나리오의 실측 실험을 통해 드론용 통신이 ISM 대역에 사용 중인 주변 Wi-Fi 성능에 미치는 영향을 측정하였다. 또한, 드론이 Wi-Fi으로의 성능 영향도를 분석하기 위한 분석 모델을 제안하고, 대표적인 드론용 무선 통신 기술인 주파수 호핑 확산 스펙트럼(FHSS) 기반의 드론 제어 기술을 시뮬레이터에 구현을 하고, Wi-Fi 기기로부터의 거리, 프레임 크기, 간섭 세기 등의 다양한 요소들에 따라 드론 운영이 Wi-Fi사용에 미치는 간섭 정도를 분석하였다. 다양한 시나리오의 실험과 시뮬레이션을 통해 드론의 비행이 Wi-Fi에 현저한 성능 저하를 유발한다는 사실을 확인하였다.

[Abstract]

Today, drones are extensively utilized not only for military purposes but also in various civilian fields such as delivery, aerial photography, tracking and surveillance, and building safety diagnostics within urban areas. Many drone manufacturers utilize standardized or proprietary radio frequency (RF) communication technologies to control drones and transmit captured video footage and collected data, operating within unlicensed industrial, scientific, medical (ISM) bands. Considering the diverse applications in urban and residential areas, it is important to understand these wireless communication technologies utilizing unlicensed bands and analyze potential interference caused by drone operations in such bands. We investigate the impact of wireless drone transmission systems on the performance of nearby Wi-Fi networks coexisting in the ISM band through field experiments in various scenarios. In particular, we investigated the effect of frequency hopping spread spectrum (FHSS)-based drone transmission systems on the performance of coexisting Wi-Fi networks according to various factors such as distance from Wi-Fi devices, frame lengths, and interference levels. Experimental and simulation results reveal that wireless drone transmission systems in the ISM band cause significant performance degradation in coexisting Wi-Fi networks.

색인어 : 드론, 무선랜, 간섭, ISM 대역 공존, 드론 통신 신호 분석**Keyword** : Drone, Wi-Fi, Interference, Coexistence in ISM band, Drone Transmission Signal Analysis<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2023.24.8.1841>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 29 June 2023; Revised 20 July 2023

Accepted 31 July 2023

***Corresponding Author, Jae-Hyuk Choi**

Tel: +82-031-750-8657

E-mail: jchoi@gachon.ac.kr

1. 서론

오늘날 드론은 항공 촬영, 환경 모니터링, 구조임무 수행 등 다양한 분야에서 널리 활용되고 있으며, 드론 관련 기술의 발전과 가격 하락으로 인해 개인 사용자부터 공공기관까지 드론의 보급이 가속화되고 있다.

하지만, 이 같은 민간 드론의 급속한 발전과 빠른 보급은 아파트나 주택에서 무단촬영에 의한 사생활 침해나, 공항이나 군 시설 등 비행금지구역에서 불법비행을 통해 공공안전을 위협하는 등 사회적, 군사적 문제를 야기하고 있다[1],[2]. 이에 따라, 최근 전 세계적으로 안티드론 기술에 대한 관심이 높아지고 있으며, 드론과 무인기를 탐지, 식별, 추적, 무력화하는 기술이 활발히 연구되고 있다[1]-[12].

일반적인 드론의 탐지는 크게 1) 레이더를 이용한 탐지 [3],[4], 2) 소리를 이용한 탐지[5],[6], 3) 카메라 영상 및 이미지를 이용한 탐지[7], 4) RF(Radio Frequency)를 이용한 탐지[8]-[12]로 구분할 수 있다[1]. 이 중에서 RF 기반의 드론 탐지 방법이 최근 많은 주목을 받고 있다. 드론의 비행을 제어하고 수집된 정보(영상, 이미지, 각종 관측 정보 등)를 전송하기 위해 지상관제소와 통신 링크를 유지하는데, RF 기반 탐지 방법은 드론과 지상 관제소와의 RF 통신 스펙트럼을 모니터링하여 드론을 탐지하는 접근이다. RF 기반의 드론 탐지는 카메라 이미지나 소리 기반의 탐지법과는 달리, 드론과의 가시거리(Line-of-Sight)가 확보되지 않아도 탐지가 가능하고, 날씨에 큰 영향을 받지 않으면서 탐지 성능이 뛰어난 장점이 있다[8]. 드론이 야기하는 사생활 침해 등의 사회적 문제가 주로 건물에 많은 도심과 거주지 주변에서의 발생하는 것을 고려하면, RF기반 탐지는 다른 탐지 기술과 결합하여 도심과 거주지 주변에서 폭넓게 활용 가능하다. 더욱이, RF 기반 탐지방법은 최근에는 머신러닝과 딥러닝을 이용하여 RF 무선신호의 전송 특징이나 통신 프로토콜의 특징을 이용하여 탐지 성능을 대폭 개선한 연구들이 활발히 진행되어 왔다[9]-[16].

이와 함께, 드론을 원격으로 제어하고 운용하기 위해 사용되는 RF(Radio Frequency) 무선 통신 기술로 인한 비면허 대역(licensed band)에서의 기존 통신 시스템과의 혼간섭 문제가 주목을 받고 있다. 많은 민간 드론의 경우는 비용이나 유연한 활용을 이유로, 간섭이 없는 셀룰러 통신 대신, 비면허 대역인 2.4GHz (2.4GHz - 2.5GHz), 5.8GHz (5.725GHz - 5.875GHz) ISM(Industrial, Scientific, Medical) 대역을 이용한 무선 통신 기술을 활용하고 있다. 하지만, ISM 대역은 가장 보편적이고 대중화된 인터넷 접속 기술인 Wi-Fi, Bluetooth 등의 다양한 통신 시스템이 이용 중인 대역으로, 드론이 근처에서 운용 중일 경우는 상호 간섭을 유발할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 드론 운용으로 인한 ISM대역에서의 Wi-Fi에 대한 혼간섭 문제는 아직까지 주목을 받지 못하고 있다. 본 연구에서는 ISM 대역을 이용하는 상용 드론이 보편화 되면서 드론의 제어 및 영상데이터를 주고 받는 RF 통신

신호가 가정이나 기업 또는 공공기관에서 이용 중인 인근의 Wi-Fi 서비스에 실제 어떠한 영향을 미치는지 실측 실험과 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다.

본 논문은 다음과 같은 구성으로 이루어져 있다. 2장에서는 드론 운용으로 인한 주변 Wi-Fi 성능에 미치는 영향을 비면허 대역에서의 실측 실험을 통해 조사하고 3장에서 실험 결과를 분석한다. 4장에서는 상세한 분석을 위한 시뮬레이터 구현 내용과 분석 결과를 설명한다. 5장은 RF 기반의 드론 통신으로 인한 간섭 관련 연구와 드론 운용과 관련하여 본 논문의 실험 결과와 연관성이 깊은 RF통신을 이용한 드론 감지 기법에 대한 선행 연구들을 요약하였다. 비면허 대역에서의 간섭 마지막으로 6장에서는 결론을 도출하고 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 드론 운용에 의한 간섭 영향 실험 개요

표 1은 상업용 드론에서 사용되는 제어 및 영상 전송을 위한 무선 통신에 대해 요약한 내용이다. 다양한 통신 시스템이 공존하는 복잡한 ISM 대역에서 드론 제어 신호의 안정성과 간섭 저항성을 보장하기 위해 세계 주요 드론 제조업체들은 FHSS(Frequency Hopping Spread Spectrum, 주파수 도약 대역 확산) 방식을 기반으로 한 무선 통신 기술을 사용한다[17]. 특히, 전세계 상업용 드론 시장의 70% 이상의 점유율을 갖는 세계 최대 드론 기업인 DJI는 OcuSync라는 FHSS(제어 신호)와 OFDM(데이터 신호) 기반의 독자적인 드론 제어 및 영상 전송용 통신 기술을 개발하여 최대 8km의 전송 거리와 40Mbps의 데이터 전송 속도를 제공한다[18], [19]. 따라서, DJI 상업용 드론의 독보적 위치와 대중적 사용 현황을 고려하면, ISM대역에서의 OcuSync에 대한 이해가 무엇보다 중요하다. 따라서, 본 실험에서는 대표적인 상용 DJI 드론을 사용하여 간섭 실험을 진행하였다.

표 1. 민간 드론용 통신 기술 비교

Table 1. Comparison of wireless communications for drones

Model	Remote Control (RC)		Video	
	Protocol	Frequency	Protocol	Frequency
DJI Mavic Pro 2	OcuSync2.0 (FHSS)	2.4GHz, 5.8GHz	OcuSync 2.0 (100Mbps)	2.4GHz, 5.8GHz
Mavic 2 Zoom	OcuSync2.0 (FHSS)	2.4GHz, 5.8GHz	OcuSync 2.0 (100Mbps)	2.4GHz, 5.8GHz
RC Pro	Wi-Fi, Bluetooth	2.4GHz, 5.8GHz	Wi-Fi, Bluetooth	2.4GHz, 5.8GHz
Mavic Air 2S	OcuSync 3.0 (FHSS)	2.4GHz	OcuSync 3.0 (150Mbps)	2.4GHz, 5.8GHz
Parrot ANAFI	Wi-Fi (OFDM)	2.4GHz, 5.2, 5.8GHz	Wi-Fi (OFDM)	2.4GHz, 5.2, 5.8GHz

실험 환경: 그림 1, 3는 실험을 수행한 소속 기관의 지하 3층 주차장 공간 구조를 도식한 것으로, 실험 공간에서는 2.4GHz 대역에 Wi-Fi 신호가 감지되지 않는다. 성능 측정은 802.11n Wi-Fi AP(Access Point)와 노트북 2대를 사용하여 진행하였다. 간섭원으로는 DJI 드론 Mini2 1대를 사용하였으며, 해당 드론은 2.4GHz의 11번 채널을 이용하여 운용하였다. 최대 TCP 처리율을 측정하기 위해 iperf3를 사용(노트북 각각에 iperf3 서버, iperf3 클라이언트를 설치)하였고, 각각 30초씩 총 4회의 측정을 수행하여 평균값을 도출하였다. 실험은 2개의 정적 시나리오와 1개의 동적 시나리오로 구성되었다.

III. 실험 결과 분석

3-1 시나리오1: Good Channel Condition

우선, 드론이 움직임이 없는 정적인 상황에서 Wi-Fi에 미치는 성능 영향을 실험하였다. 그림1-(a)은 첫 시나리오의 실험 구성을 나타낸 것으로, AP와 노트북을 8m 거리에 위치시켜 전송을 수행하였다. 무간섭(No drone) 상황에서는 Wi-Fi는 평균 72.5Mbps의 높은 성능을 나타내는 매우 좋은 채널 상태의 환경이었다. 이 환경에 대해, 4개 지점에서 드론을 위치시켜 동작을 시킨 후 Wi-Fi의 성능 변화를 살펴보았다. 이 중 ①, ②지점은 Wi-Fi 클라이언트와 LOS(Line-Of-Sight) 상태이며 ③, ④는 NLOS(Non-Line-of-Sight) 상태인 위치에 해당된다.

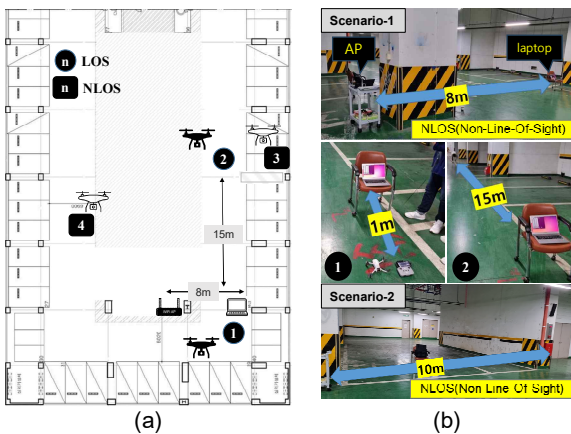


그림 1. 실험 환경: (a) 시나리오1 구성: Wi-Fi는 좋은 채널 상태, (b) 실험 환경
 Fig. 1. Experiment environment: (a) Scenario 1 set-up: good channel condition, (b) measurement environment

그림 2는 시나리오1 실험에 대한 결과를 나타낸다. 드론 운용이 되지 않을 경우의 72.5Mbps의 평균 처리율은 LOS 상황인 ① (클라이언트와 1m 거리), ② (클라이언트와 15m 거리)

지점에서 드론이 운용될 경우, 각각 23.7 Mbps (No drone 대비 32.7%), 31.8 Mbps (42.8%)로 감소하였다. NLOS 상황인 ③, ④ 경우도 각각 63.9 Mbps (88.0%), 38.4 Mbps (52.9%) 수준으로 감소하였다. ②와 ④ 지점은 클라이언트와 거리가 15m 이상임에도 Wi-Fi의 성능에 큰 영향을 준 것을 발견할 수 있었다. 또한, ②와 ③의 위치는 Wi-Fi 클라이언트에서 직선거리로 2m 정도 차이임에도 불구하고, 성능 감소폭의 규모는 ③ NLOS 대비하여 ② LOS이 월등히 컸다.

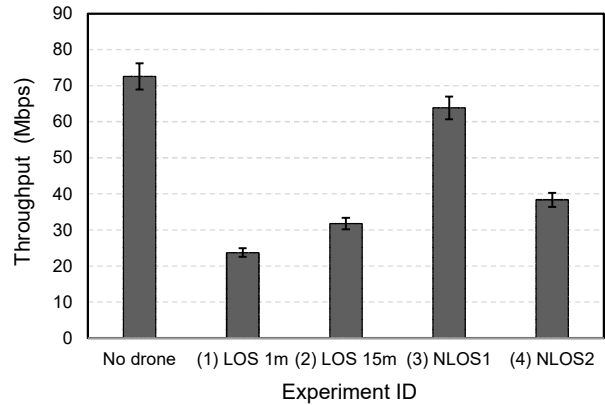


그림 2. 시나리오1에 대한 실험 결과
 Fig. 2. Experimental results for Scenario 1

3-2 시나리오2: Moderate Channel Condition

그림 3-(a)는 두 번째 정적인 상황에 대한 실험 시나리오로 Wi-Fi 클라이언트-AP를 NLOS 상태로 10m 거리에 위치를 시켰고 무간섭(No drone)상황에서는 평균 23.3Mbps인 보통 수준의 채널 상태를 갖는 환경이었다. 앞 시나리오와 마찬가지로 ①~④의 4개 지점에서 드론을 위치시켜 동작을 시킨 후 Wi-Fi의 성능 변화를 살펴보았다.

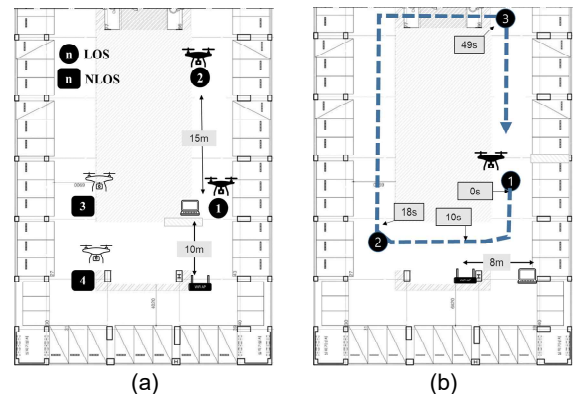


그림 3. 실험 환경: (a) 시나리오2 구성: Wi-Fi는 보통의 채널 상태, (b) 시나리오3 구성: 이동성
 Fig. 3. Experiment environment: (a) Scenario 2: moderate channel condition, (b) Scenario 3: drone mobility

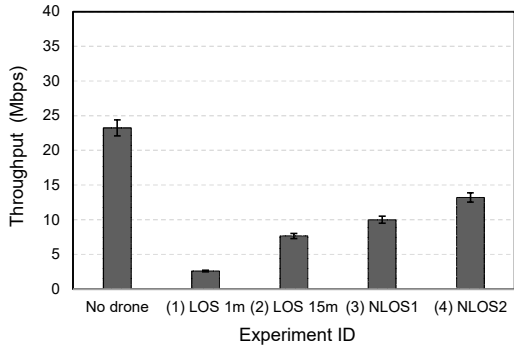


그림 4. 시나리오2에 대한 실험 결과
 Fig. 4. Experimental results for Scenario 2

그림 4는 시나리오2 실험에 대한 결과로 드론 운용이 되지 않을 경우의 23.3Mbps의 평균 처리율은 LOS 상황인 ① (클라이언트와 1m 거리), ② (클라이언트와 15m 거리) 지점에서 드론이 운용될 경우 각각 2.6 Mbps (No drone 대비 11.2%), 7.7 Mbps (32.9%)로 큰 폭으로 감소하였다. NLOS 상태로 클라이언트와 15m 이상인 ③, ④ 지점의 경우도 각각 9.9 Mbps (43.0%), 13.2 Mbps (56.8%) 수준으로 크게 감소하였다. Wi-Fi의 채널 상태가 좋았던 시나리오 1과 비교했을 경우, 채널 상태가 상대적으로 좋지 않은 시나리오2의 성능 감소 폭이 큼을 보여주고 있다.

3-3 시나리오3: 운용 드론의 이동에 따른 영향

그림 3-(b)는 운용 중인 드론이 Wi-Fi 주변에서 이동을 하는 경우에 따른 간섭의 영향에 대한 실험 시나리오를 나타낸다. 그림1-(a)와 같은 구성의 Wi-Fi에 대해 운용 드론이 60초 시간동안 ①→②→③→①의 경로 이동로 드론과 컨트롤러를 함께 이동 시키면서 Wi-Fi 성능에 대한 영향을 살펴보았다. 이 중 ②→③ 사이의 경로에서는 NLOS 상태이며 그 외 경로에서는 LOS 상태이다.

그림 5는 시간에 따른 Wi-Fi의 성능 변화를 나타낸다. 드론의 위치에 따라서 Wi-Fi 성능에 영향을 줌을 발견할 수 있었으며, LOS인 경우에 가장 큰 영향을 주고, NLOS인 경우는 거리와 다중 경로 페이딩 (multi-path fading) 등 여러 전파 및 환경 요인에 따라 Wi-Fi의 성능에 영향을 줌을 발견할 수 있었다.

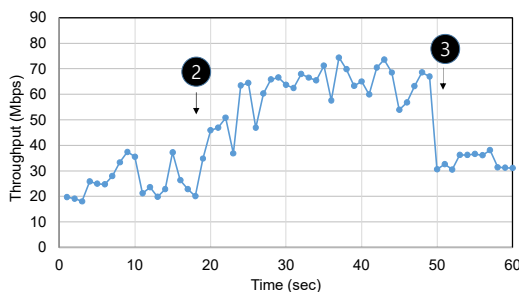


그림 5. 시나리오3에 대한 실험 결과
 Fig. 5. Experimental results for Scenario 3

3-4 실측 결과 요약

위 실험을 통해, 단 한 개의 드론만을 운용하는 환경에서도 주파수가 겹치는 채널을 이용하는 Wi-Fi에 큰 성능 저하가 발생한다는 것을 확인하였다. Wi-Fi 기기와 거리가 가까운 경우 (1m), 좋은 채널 환경(시나리오1)는 32.7%까지 떨어지며, 보통 채널 환경(시나리오2)는 11.2%로 무간섭 대비 90% 가까운 성능 저하를 야기함을 확인할 수 있었다. 이는 Wi-Fi 채널 상태가 좋지 않을수록 같은 수준의 간섭에 대해 성능 저하가 클 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 실외에서 드론 운용하는 환경에 해당하는 NLOS 인 경우라도 실내의 Wi-Fi에 대해 뚜렷한 성능 저하를 일으킬 수 있다는 것을 확인했다.

IV. 시뮬레이션 기반 간섭 분석

본 장에서는 III장의 실험 결과를 바탕으로, 드론 운용이 인근의 Wi-Fi에 미치는 영향을 상세히 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위해 세계 최대 드론 기업인 DJI의 OcuSync 2.0이라는 FHSS 기반의 제어 및 영상 전송 통신 기술을 구현하고, 다양한 드론 운용 시나리오를 구성할 수 있는 시뮬레이션 환경을 구축하였다.

그림 6은 MATLAB의 WLAN ToolBox와 Waveform Library를 사용하여 FHSS 기반의 Ocusync를 시뮬레이터로 구현한 결과를 보여준다. OcuSync 제어 신호는 2.400 ~ 2.4835 GHz 주파수 대역 중 40MHz 대역폭의 범위에서 1.4 MHz 대역폭으로 30개의 채널로 세분화 후 이 채널 중 하나를 선택하여 파형을 형성하게 하였다. 각 제어 신호의 전송 주기는 10ms로 설정하였고, 각 주기의 첫 $T_{on} = 1.1ms$ 시간 동안 송신 후, T_{off} 동안은 전송을 하지 않는다 (즉, 주기가 $T_{on} + T_{off} = 10ms$). OcuSync의 동적 주파수 호핑을 구현하여 다음 주기의 전송에서는 30개의 채널 중 다른 채널을 랜덤 (random) 또는 순차적 주파수 호핑(sequential hopping) 형태로 채널을 변경하였다(그림 6-(a)).

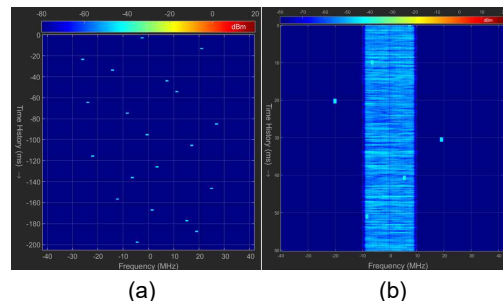


그림 6. MATLAB을 이용한 동적 주파수 호핑 기반의 DJI OcuSync의 (a) 송신부, (b) 수신부(Wi-Fi 신호와 혼합되어 수신되는 파형 구현

Fig. 6. MATLAB waveform generation for dynamic frequency hopping-based drone communication

생성된 파형은 주어진 전파 모델(propagation model)에 따라 그림 6-(b)에서와 같이 송신기에 수신되는 Wi-Fi의 수신 파형에 혼합되어 수신될 수 있도록 구현하였고, 수신된 신호의 수신 성공률을 기반으로 FER(Frame Error Rate)를 측정하고, 이를 처리율 계산에 반영하여 Wi-Fi의 성능을 분석하였다. Wi-Fi 클라이언트와의 거리를 (i) 매우 먼거리(very far), (ii) 먼거리(far), (iii) 근접(near) 세 가지 상태에서 각각 동일한 수준의 간섭을 발생시킨다는 조건에 대해 아래 시뮬레이션을 수행하였다.

4-1 Wi-Fi 전송 거리에 따른 영향도 분석

III장에서 같은 수준의 간섭에 대해 Wi-Fi 채널 상태에 따라 크게 영향을 받는 것을 확인하였다. 이에 대한 상세한 분석을 위해 추가 시뮬레이션을 통해 Wi-Fi 사용 환경에 따른 간섭의 정도를 파악하였다.

그림 7은 Wi-Fi AP와 클라이언트 간의 링크 거리(link distance)에 따른 FER를 나타낸다. 이는 주어진 Wi-Fi 채널 상태에 대해 운용 드론에서 Wi-Fi 클라이언트로의 세 개의 다른 간섭 정도(약/weak, 중/moderate, 강/strong)에 대해 각각이 어떤 영향을 주는 지를 나타낸다. 동일한 수준의 간섭에 대해 Wi-Fi 채널 상태가 좋을 경우(1~4m 무선 링크 거리)에 비해 채널 상태가 좋지 않을 경우(10m 이상 거리)에 영향을 크게 받는 것을 확인할 수 있었다. 이는 무선 신호의 고유한 특성으로 FER은 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)이 감소할수록 증가하는데, 이에 같은 간섭신호(잡음) 크기에 대해 수신해야 하는 신호(signal-of-interest)의 크기가 작아지기 때문이다. 이는 III장의 실측 실험 결과(그림2, 그림4)와 시뮬레이션 결과가 일치된다.

그림 8은 그림7의 결과에 대한 Wi-Fi 클라이언트의 UDP 트래픽(1500Bytes, 포화상태) 처리율을 나타낸다. 분석 결과로는 Wi-Fi의 링크 거리가 길어지고, 드론으로부터의 간섭 정도가 강해짐에 비례해서 처리율이 감소함을 확인할 수 있었다.

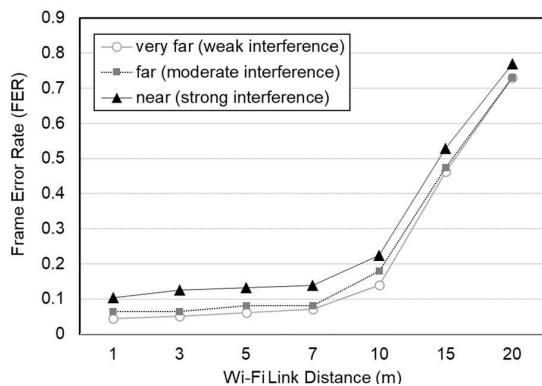


그림 7. Wi-Fi 링크 거리(상태)에 따른 FER
Fig. 7. FER for various Wi-Fi link distances

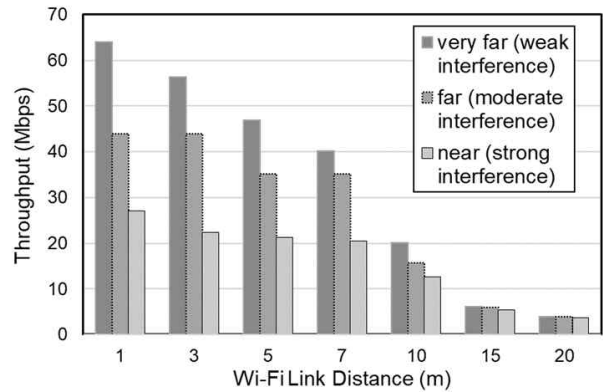


그림 8. Wi-Fi 링크 거리(상태)에 따른 처리율 (UDP, 포화상태)
Fig. 8. UDP Throughput for various Wi-Fi link distances

4-2 프레임 길이에 따른 FER 변화 분석

다음으로는 동일 간섭 상황에서 Wi-Fi 전송 프레임 길이(전송 시간)에 따른 수신 프레임 전송 에러율을 살펴보았다. 시뮬레이션 환경으로는 4-1에서 링크 거리를 10m에 대해서 3가지의 드론에서 강도에 대해 다양한 프레임 길이(100, 500, 1024, 1250, 1500 Bytes)에 대해 FER를 구현한 MATLAB 시뮬레이션으로 도출하였다.

그림 9는 다양한 프레임 길이에 대한 FER을 나타낸 결과로, 프레임의 길이가 길어질수록 FER이 커짐을 확인하였다. 이는 FHSS 기반 OcuSync의 드론 제어 신호와의 충돌의 확률이 높아지기 때문이다. 1500 Bytes의 긴 프레임을 전송할 경우는 100 Bytes의 프레임을 전송할 때 대비하여, FER이 최대 2.11배 증가됨을 확인하였다. Wi-Fi를 이용해 TCP 전송을 할 경우는 길이가 긴 TCP data가 TCP ACK에 비해 상대적으로 큰 영향을 받을 수 있음을 알 수 있다.

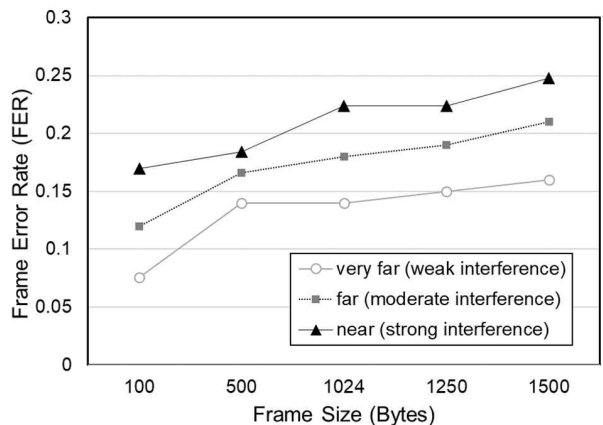


그림 9. 프레임 크기에 따른 FER
Fig. 9. FER for various frame sizes

4-4 시뮬레이션 결과 요약

본 시뮬레이션 결과는 Wi-Fi 채널 상태가 좋지 않을 경우, 동일한 수준의 간섭에 더 큰 영향을 받는다는 것을 보여주고

있으며, 이는 III장의 실측결과와도 일치한다.

결론적으로, 드론 운용으로 인한 비면허 대역의 주변 Wi-Fi의 성능 저하는 다음 두가지 요인에 의해 발생한다. 첫째, 신호 간섭에 의한 프레임 전송 에러율(FER)의 증가이다. 이는 무선 통신의 기본적인 성질로서 신호대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio)에 의해서 전송 성공여부가 결정되는 것에 기인한다. 둘째로, Wi-Fi의 CSMA (또는 Listen-Before-Talk) 기반의 채널 접속 방식으로 인해 주변에서 운용되는 드론이 채널을 사용 중으로 간주되어 채널 사용 가능 시간이 감소함에 기인한다. 이러한 두 가지 요인이 결합하여 2.4GHz 주파수 대역에서 주변의 Wi-Fi 성능이 저하된다.

V. 관련 연구

앞 장의 연구 결과에서 살펴보았듯이 ISM대역의 RF 통신으로 드론을 운영함에 있어 Wi-Fi 서비스에 심각한 간섭이 야기함을 알 수 있다. 이와 관련한 연구는 ISM 대역의 간섭 및 다양한 무선 이기종 시스템들의 공존 문제와 드론용 RF통신에 대한 이해를 바탕으로 한 RF기반 드론 탐지의 두 가지 방향으로 정리될 수 있다.

먼저, 서론에서 언급하였듯이 RF 기반 드론 통신 기술을 활용한 RF기반 드론 탐지는 뛰어난 탐지 성능을 보여주고 있으며, 지금까지 다양한 연구가 진행되어 왔다. 우선, 드론이 전송하는 RF 무선신호의 전송 특징이나 통신 프로토콜의 특징을 이용하는 연구들이 진행되어 왔다[9]-[12]. P. Nguyen[9]은 드론과 지상관측소 사이의 RF 통신을 수동 관측함으로써 드론을 식별하는 방법은 제안하였다. 이 논문에서는 이동 중인 드론의 프로펠러에 의해 야기되는 RF 신호의 특성이 개인 휴대전화나 이동 중인 자동차에서 발생하는 무선신호의 특성과 다름을 보여주고 있다. C. Zhao[10]는 신호의 진폭 엔벨로프(amplitude envelope)를 계산하여 제어 신호의 RF 지문(fingerprint)을 추출하고 드론을 분류하기 위해 Wasserstein 생성 적대 신경망(AC-WGAN)을 제안하였다. 이와는 달리 제어 및 영상전송을 위한 통신 프로토콜의 특징을 이용한 드론 탐지방법도 제시되었다. I. Bisio[11]는 드론의 제어 및 영상전송을 하는 무선 트래픽에 대한 통계적 지문 분석을 수행하여 드론을 탐지하는 방안을 제시하였다. 추출된 특징에는 MAC 주소, Wi-Fi 패킷 길이, 지속시간, 평균 채킷 도착 시간 등이 포함되었다. 이와 같은 특징들은 머신러닝 알고리즘을 활용하는데 사용하여 높은 탐지율이 나타남을 보여주었다. 그러나, Wi-Fi의 경우 보안성을 고려하여 SSID를 숨기거나 패킷을 WPA2등의 암호화 기법을 적용하는 경우가 있다. A. Alipour-Fanid[12]는 암호화된 Wi-Fi 트래픽의 패킷 크기와 도착 시간으로부터만 특징을 추출하여 효율적으로 드론을 탐지하고 작동 모드를 식별할 수 있음을 보여주었다.

또한, ISM 밴드에서 다양한 목적의 전파들이 함께 존재하

는 상황에서 드론을 탐지하는 연구들도 진행되어 왔다 [9],[13]-[15]. M. Ezuma[13]는 상용 드론 제어기가 전송하는 신호를 배경잡음 및 간섭 신호와 구별하는 방법을 제안하였다. 탐지된 RF 신호의 대역폭과 변조기법을 통해 Wi-Fi 및 블루투스의 신호와 간섭이 있는 상황에서 드론의 전송 신호와 구분할 수 있음을 보여주었다. S. Basak[14]는 다중 드론이 존재하는 환경에서 RF 채널 변화가 드론 분류에 미치는 영향을 보여주면서, 주파수 도메인 RF 시그니처를 사용하여 최대 7대의 드론을 동시에 분류할 수 있음을 보여준다. C. J. Swinney[15]는 2.4GHz의 블루투스 및 Wi-Fi 신호 간섭이 드론 감지 및 분류에 미치는 영향을 평가하였다. 실험을 통하여 블루투스의 간섭이 Wi-Fi 보다 영향력이 더 큰 것을 보여주고 있으며, 주파수 도메인 특성이 시간 도메인 특성보다 간섭의 영향이 큰 것으로 나타난다. P. Hell[15]은 도심지역에서 ISM 대역을 사용하는 무선 단말기가 포화되고 있는 상황에서 드론의 확산에 의해 Wi-Fi 서비스와 드론이 서로 간섭이 일어날 수 있음을 보여주었다.

다음으로, ISM 대역에서의 Wi-Fi망과의 공존 문제는 그동안 다양한 관점에서 활발히 연구되어온 분야이다. 최근에는 ISM대역에서 이동통신 서비스와의 공존에 관한 연구도 진행되어 왔다. Y. Gao[20]는 비면허대역에서 서비스가 가능한 LTE-LAA(Licensed Assisted Access)와 Wi-Fi 서비스가 공존할 때 처리율 성능을 분석하는 새로운 모델을 제시하였다. LTE-LAA 통신 프로토콜의 초기 백오프 윈도우 크기 또는 센싱 시간을 조정하여 Wi-Fi와 비례적인 공정성을 유지하면서 공존할 수 있음을 보여주었다. ISM대역의 RF가 드론의 제어와 데이터 전송을 위해 보편적으로 사용됨에 따라 향후에는 드론과 기존서비스와의 공존에 관한 연구도 진행될 필요가 있다. A. A. Eltholth[21]에서는 2.4GHz 대역에서 여러 무선 통신 시스템에서 간섭을 관리하기 위한 최적화된 카오틱 주파수 호핑 기법을 제안하였다. Wi-Fi, 블루투스 등의 무선 통신 시스템에서 사용하는 2.4GHz의 비인가 ISM 주파수 대역에서 간섭 및 공존 문제를 완화하기 위해 스펙트럼 공유, 적응형 주파수 호핑 및 통계적 신호 전송을 포함한 여러 접근 방식이 개발되었다[22]-[24].

그럼에도 불구하고, 본 연구에서 수행한 드론 운용으로 인한 ISM대역에서의 Wi-Fi에 대한 간섭 문제는 아직까지 주목을 받지 못하였고, 실측과 시뮬레이션을 통해 ISM 비면허 대역에서 드론 제어 및 데이터 전송을 위한 RF 통신이 Wi-Fi 성능에 대한 연구는 미미한 상황이다.

VI. 결 론

본 연구에서는 ISM 비면허 대역을 이용하는 드론의 보급으로 인해 드론의 제어 및 데이터 전송을 위한 RF 통신이 인근의 Wi-Fi 서비스에 미치는 영향을 조사하였다. 다양한 시

나리오의 실험과 시뮬레이션을 통해 드론의 비행이 Wi-Fi에 현저한 성능 저하를 유발한다는 사실을 확인하였다. 드론이 다양한 용도로 활용되고 보편화 되면서 ISM 대역에서 드론 통신에 의한 Wi-Fi 서비스 간섭은 드론과 Wi-Fi를 포함한 여러 통신 시스템과의 공존 문제로 확대할 수 있다. 향후 연구에서는 Wi-Fi 서비스에 의한 드론의 성능 영향을 분석하고 실시간 정보를 전송하는 드론의 서비스 품질을 향상시킬 수 있는 연구를 진행하고 이를 실제 운용 환경에서 실험을 통해 검증할 예정이다.

감사의 글

이 성과는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00252039).

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2023-00252039).

참고문헌

- [1] B. Taha and A. Shoufan, "Machine Learning-Based Drone Detection and Classification: State-of-the-Art in Research," *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 138669-138682, September 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942944>
- [2] G. Ding, Q. Wu, L. Zhang, Y. Lin, T. A. Tsiftsis, and Y.-D. Yao, "An Amateur Drone Surveillance System Based on the Cognitive Internet of Things," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 56, No. 1, pp. 29-35, January 2018. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700452>
- [3] J. Park, D.-H. Jung, K.-B. Bae, and S.-O. Park, "Range-Doppler Map Improvement in FMCW Radar for Small Moving Drone Detection Using the Stationary Point Concentration Technique," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 68, No. 5, pp. 1858-1871, May 2020. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2961911>
- [4] F. Fioranelli, M. Ritchie, H. Griffiths, and H. Borrión, "Classification of Loaded/unloaded Micro-Drones Using Multistatic Radar," *Electronics Letters*, Vol. 51, No. 22, pp. 1813-1815, October 2015. <https://doi.org/10.1049/el.2015.3038>
- [5] M. Nijim and N. Mantrawadi, "Drone Classification and Identification System by Phenome Analysis Using Data Mining Techniques," in *Proceedings of 2016 IEEE Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*, Waltham: MA, pp. 1-5, May 2016. <https://doi.org/10.1109/THS.2016.7568949>
- [6] Z. Shi, X. Chang, C. Yang, Z. Wu, and J. Wu, "An Acoustic-Based Surveillance System for Amateur Drones Detection and Localization," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 69, No. 3, pp. 2731-2739, March 2020. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2964110>
- [7] A. Coluccia, A. Fascista, A. Schumann, L. Sommer, M. Ghenescu, T. Piatrik, ... and I. González, "Drone-vs-Bird Detection Challenge at IEEE AVSS2019," in *Proceedings of 2019 16th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*, Taipei, Taiwan, pp. 1-7, September 2019. <https://doi.org/10.1109/AVSS.2019.8909876>
- [8] H. Zhang, T. Li, Y. Li, J. Li, O. A. Dobre, and Z. Wen, "RF-Based Drone Classification Under Complex Electromagnetic Environments Using Deep Learning," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 23, No. 6, pp. 6099-6108, March 2023. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3242985>
- [9] P. Nguyen, M. Ravindranatha, A. Nguyen, R. Han, and T. Vu, "Investigating Cost-Effective RF-based Detection of Drones," in *Proceedings of the 2nd Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications for Civilian Use (DroNet '16)*, Singapore, pp. 17-22, June 2016. <https://doi.org/10.1145/2935620.2935632>
- [10] C. Zhao, C. Chen, Z. Cai, M. Shi, X. Du, and M. Guizani, "Classification of Small UAVs Based on Auxiliary Classifier Wasserstein GANs," in *Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Abu Dhabi, UAE, pp. 206-212, December 2018. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2018.8647973>
- [11] I. Bisio, C. Garibotto, F. Lavagetto, A. Sciarbone, and S. Zappatore, "Unauthorized Amateur UAV Detection Based on WiFi Statistical Fingerprint Analysis," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 56, No. 4, pp. 106-111, April 2018. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700340>
- [12] A. Alipour-Fanid, M. Dabaghchian, N. Wang, P. Wang, L. Zhao, and K. Zeng, "Machine Learning-Based Delay-Aware UAV Detection and Operation Mode Identification Over Encrypted Wi-Fi Traffic," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, Vol. 15, pp. 2346-2360, 2020. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2019.2959899>
- [13] M. Ezuma, F. Erden, C. K. Anjinappa, O. Ozdemir, and I. Guvenc, "Detection and Classification of UAVs Using RF Fingerprints in the Presence of Wi-Fi and Bluetooth Interference," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, Vol. 1, pp. 60-76, 2020. <https://doi.org/10.1109/O>

JCOMS.2019.2955889

[14] S. Basak, S. Rajendran, S. Pollin, and B. Scheers, "Drone Classification from RF Fingerprints Using Deep Residual Nets," in *Proceedings of 2021 International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS)*, Bangalore, India, pp. 548-555, January 2021. <https://doi.org/10.1109/COMSNETS51098.2021.9352891>

[15] C. J. Swinney and J. C. Woods, "RF Detection and Classification of Unmanned Aerial Vehicles in Environments with Wireless Interference," in *Proceedings of 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Athens, Greece, pp. 1494-1498, June 2021. <https://doi.org/10.1109/ICUAS51884.2021.9476867>

[16] P. Hell, M. Mezei, and P. J. Varga, "Drone Communications Analysis," in *Proceedings of 2017 IEEE 15th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMi)*, Herl'any, Slovakia, pp. 213-216, January 2017. <https://doi.org/10.1109/SAMI.2017.7880305>

[17] S.-G. Kim, Y.-H. Noh, I.-P. Hong, and J.-G. Yook, "Stepwise RF Measurement Method for the Analysis of Drone's Communication Signals," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 32, No. 4, pp. 370-376, April 2021. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2021.32.4.370>

[18] S. Wei, M. Zhang, G. Wang, X. Sun, L. Zhang, and D. Chen, "Robust Multi-Frame Joint Frequency Hopping Radar Waveform Parameters Estimation Under Low Signal-Noise-Ratio," *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 177198-177210, August 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936418>

[19] R. D. Jan, Evaluation of Drone Neutralization Methods Using Radio Jamming And Spoofing Techniques, Ph.D. Dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2020.

[20] Y. Gao and S. Roy, "Achieving Proportional Fairness for LTE-LAA and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 19, No. 5, pp. 3390-3404, May 2020. <https://doi.org/10.1109/TWC.2020.2973145>

[21] A. A. Eltholth, "Improved Spectrum Coexistence in 2.4 GHz ISM Band Using Optimized Chaotic Frequency Hopping for Wi-Fi and Bluetooth Signals," *Sensors*, Vol. 23, No. 11, 5183, May 2023. <https://doi.org/10.3390/s23115183>

[22] T. Xu, M. Zhang, Y. Zeng, and H. Hu, "Harmonious Coexistence of Heterogeneous Wireless Networks in Unlicensed Bands: Solutions from the Statistical Signal

Transmission Technique," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol. 14, No. 2, pp. 61-69, June 2019. <https://doi.org/10.1109/MVT.2019.2891790>

[23] Y. Wang, Q. Zhang, Z. Wei, L. Kui, F. Liu, and Z. Feng, "Performance Analysis of Uncoordinated Interference Mitigation for Automotive Radar," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 72, No. 4, pp. 4222-4235, April 2023. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3222448>

[24] Z. Zhao, X. Wu, X. Zhang, J. Zhao, and X.-Y. Li, "ZigBee vs WiFi: Understanding Issues and Measuring Performances of Their Coexistence," in *Proceedings of 2014 IEEE 33rd International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC)*, Austin: TX, pp. 1-8, December 2014. <https://doi.org/10.1109/PCCC.2014.7017082>

황재룡(Jae-Ryong Hwang)



2002년 : 해군사관학교 졸업
2006년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부
컴퓨터공학 석사 졸업
2011년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부
컴퓨터공학 박사 졸업

2011년~현 재: 해군사관학교 사이버과학과 부교수

※관심분야 : 컴퓨터 네트워킹, 무선통신, 이동컴퓨팅에서 자원 할당

최재혁(Jae-Hyuk Choi)



2008년 : 서울대학교 대학원 (공학박사
-무선통신)

2008년~2011년: University of Michigan 박사후 연구원

2011년~현 재: 가천대학교 AI·소프트웨어학부 교수

※관심분야 : 모바일컴퓨팅, 무선통신시스템, 인공지능