

2.4GHz대역에서의 FHSS기반의 운용 드론에 의한 주변기기 혼간섭 분석

최재혁^{1*}^{1*}가천대학교 AI·소프트웨어학부 교수

On the Impact of FHSS-based Drones Operation on Radio Interference in the 2.4GHz Band

Jae-Hyuk Choi^{1*}^{1*}Professor, School of Computing, Gachon University, Seongnam-si 13120, Korea

[요약]

대표적 무인 항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle) 시스템인 드론은 군사적 목적은 물론, 최근에는 다양한 산업 및 개인·민간 분야에 널리 활용되고 있다. 드론을 조종하고 촬영 영상 및 수집한 데이터를 전송하기 위해서 전파를 이용한 무선통신을 사용하며, 주로 비면허대역인 ISM(Industrial, Scientific, Medical) 대역을 이용하고 있다. 드론의 광범위한 활용성과 대중성을 고려할 때, 드론의 운용을 위해 사용되는 제어용 무선 통신 기술을 이해하고 드론 운용으로 인한 주변의 전파 간섭에 대해 명확한 분석이 필요하다. 본 논문에서는 2.4GHz대역을 이용한 드론 운용으로 인한 동일 대역에 공존하는 주변의 통신 시스템, 특히 무선랜(Wireless LAN, WLAN)에 대한 간섭 효과를 분석한다. 이를 위해 대표적인 드론용 무선 통신 기술인 주파수 호핑 확산 스펙트럼(frequency hopping spread spectrum, FHSS)기반의 OcuSync 2.0에 대한 시뮬레이터를 MATLAB을 이용하여 구현을 하고, 운용 드론의 수, WLAN 기기로부터의 거리, 채널 상태 등의 다양한 요소들에 따라 2.4GHz에서 드론 운영이 WLAN 사용에 미치는 간섭 정도를 분석하였다.

[Abstract]

With the high popularity of unmanned aerial vehicles (UAVs) including drones, it is becoming important to understand the wireless communication technologies for drone operation and to analyze the problems of coexistence and interference with other communication technologies coexisting in the unlicensed frequency band. In this paper, we analyze the interference effect on the performance of Wireless LAN(WLAN) coexisting in the same band due to the operation of the drone using the 2.4GHz band. To this end, we implemented a simulator for OcuSync 2.0, a wireless transmission and communication technology for DJI drones, using MATLAB. This study provides an in-depth analysis of the degree of interference owing to drone operation at 2.4GHz on the performance of WLAN coexisting in the same band for various factors including the number of operating drones, the link distance to the target WLAN device, and channel conditions.

색인어 : 드론, 주파수 호핑 확산 스펙트럼, 드론 주파수, 2.4GHz 공존, 혼간섭**Keyword** : Drone, Frequency-Hopping Spread Spectrum, Drone Frequency, Coexistence in 2.4GHz, Interference<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2022.23.12.2537>

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 09 November 2022; Revised 28 November 2022

Accepted 01 December 2022

***Corresponding Author; Jae-Hyuk Choi**

Tel: +82-31-750-8657

E-mail: jchoi@gachon.ac.kr

I. 서론

최근 드론으로 대표되는 소형 무인항공기(UAV, unmanned aerial vehicle)는 높은 활용도와 손쉬운 사용성에 따른 폭발적 수요에 맞추어 비약적인 기술 발전과 급속한 대중화가 이뤄졌다. 특히, 드론은 군사, 재난 관리, 농업, 수송, 통신 등 다양한 영역의 응용서비스에 널리 활용되고 있다. 이러한 UAV의 활용은 현재 추세로 판단하면 현대 사회의 필수적인 부분이 될 것으로 예상되고 있다.

민간 드론의 급속한 발전과 빠른 보급은 미인가 상태로 비행 금지 구역 무단 비행, 테러 및 공공 보안 위협, 개인 사생활 침해 등 군사적, 사회적 문제 야기하고 있다 [1,2]. 이에 따라, 최근 전세계적으로 드론으로 인한 위협 대응하기 위한 안티드론 기술이 주목을 받고 있으며, 드론 및 무인기에 대한 탐지, 식별, 추적, 무력화할 수 있는 기술이 활발히 연구되고 있다 [3,4,5].

이에 비해, 드론을 원격으로 제어하여 운용하기 위해 사용하는 무선 통신 기술로 인한 혼간섭 문제는 아직까지 주목을 받고 있지 못하고 있다. 드론의 원격 제어 및 조종을 위해서 다양한 무선통신 기술이 사용된다. 위성통신은 군사용 및 방송용으로 사용되며, 셀룰러 통신은 군집 기반의 상업용 드론 서비스를 위해 널리 사용되고 있다. 드론 운용의 비용이나 유연한 드론의 활용 측면에서 많은 상업용 드론은 2.4GHz (2.4GHz - 2.5GHz), 5.8GHz (5.725GHz - 5.875GHz) 대역의 ISM(Industrial, Scientific, Medical) 대역을 이용한 무선 통신 기술을 활용하고 있다. 하지만, ISM 대역은 가장 보편적이고 대중화된 인터넷 접속 기술인 무선랜(WLAN)을 비롯하여 Bluetooth, ZigBee 등의 다양한 통신 시스템이 공존하는 주파수 대역이고, 이러한 이기종 통신시스템간의 상호 간섭과 공존 문제(coexistence)가 가장 큰 이슈가 되고 이에 대한 많은 연구가 있었다 [6][7]. 하지만, 드론 운용으로 인한 ISM 대역에서의 혼간섭 문제는 아직까지 주목을 받지 못하고 있다. 따라서, 드론의 광범위한 응용성과 빠른 대중화 속도를 고려할 때, 드론의 운용에 사용되는 제어 무선 통신 기술이 ISM 비면허 대역에 공존하게 되는 상황에서 드론 운용으로 인한 주변의 통신 시스템으로의 전파 간섭에 대해 명확한 분석이 필요한 시점이다.

본 논문에서는 상업용 드론 시장에서 널리 활용되고 있는 FHSS기반의 드론 제어 통신 기술이 비면허 대역인 2.4GHz ISM대역에서 사용하는 경우, 운용 중인 드론으로 인한 공존하는 WLAN로의 간섭 정보를 운용 드론의 수, Wi-Fi 기기로부터의 거리, 채널 상황 등에 대해 분석한다. 이를 위해 MATLAB 기반의 시뮬레이터 구현을 수행하였고, 실제 드론 운용 환경에 맞게 여러 요인과 다양한 드론 운용 시나리오에 대해 종합적 영향을 정량적으로 분석하였다.

많은 이기종 통신 시스템이 공존하는 복잡한 ISM 대역에서 드론 제어 신호에 대한 높은 안정성 및 간섭 저항성을 확보하기 위해, 세계 주요 드론 제조사들은 주파수 도약 대역

확산 (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS)방식 기반의 무선통신기술을 사용한다 [8]. 특히, 세계 최대 드론 기업인 DJI는 OcuSync라는 FHSS (제어신호) 및 OFDM(Data 신호)기반의 고유의 드론용 제어 및 영상 전송용 통신 기술을 개발하여 최대 8km의 송신거리와 40Mbps의 데이터 송수신 속도를 제공한다 [9, 10, 11]. 표1은 대표적 상업용 드론들에 사용되는 무선통신을 정리한 내용이다. 본 연구에서도 대표적인 상용 FHSS 기반 원격 드론 관제 통신 기술인 OcuSync 2.0을 MATLAB을 이용하여 구현하고 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1. 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 (OFDM)	2.4GHz, 5.8GHz
Phantom 4	Lightbrige (FHSS)	2.4GHz	Lightbridge (OFDM)	2.4GHz
RC Pro	WLAN, Bluetooth	2.4GHz 5.8GHz	WLAN Bluetooth	2.4GHz 5.8GHz
Mavic Air 2	DJI Enhanced WLAN(FHSS)	2.4GHz	DJI Enhanced WLAN(OFDM)	2.4GHz, 5.8GHz
Parrot ANAFI	WLAN (OFDM)	2.4GHz 5.2, 5.8GHz	WLAN (OFDM)	2.4GHz 5.2, 5.8GHz

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템 모델 및 분석 시나리오에 대해 설명하고, 3장에서는 구현한 시뮬레이터 내용을 소개한다. 4장에서는 분석 결과를 설명하고, 끝으로 5장에서는 결론 및 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 시스템 모델 및 분석 시나리오

그림 1은 본 연구에서 분석을 위해 고려하는 시스템을 나타낸다. 2.4GHz 대역에서 (1) N개의 Ocusync 2.0 기반의 드론 제어 통신(N개의 운용 드론)이 공존하며 (2) 다양한 크기의 강도(5단계 - 매우 강함, 강함, 보통, 약함, 매우 약함)로 간섭을 일으킬 경우, (3) AP로부터 d m거리에서 데이터를 수신 중인 무선랜 단말에 대한 성능 영향을 분석한다. 이는 운용 드론의 수, Wi-Fi 기기로부터의 거리, 무선랜 단말과 AP 사이의 채널 상태 등의 요인을 각각 고려한 것이며, 각 요소 별로 표2의 값을 이용하여 2.4GHz에서 드론 운영이 무선랜의 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

표 2. 분석 내용 및 환경 변수

Table 2. Target environment and parameters

Parameter	Value
(1) Number of Drone-Controller pairs (N)	0~30
(2) Interference level	5 level (Very Strong, Strong, Moderate, Weak, very weak)
(3) WLAN link distance (d)	1~10 m

분석을 위한 대상 무선랜에 사용된 환경 변수는 표3에 정리하였다. 2.4GHz 대역의 간섭 분석의 취지에 맞게 대상 무선랜은 2.4GHz 대역을 주로 사용하는 OFDM기반의 IEEE 802.11n을 고려하였다[12]. 2.4 GHz를 대상으로 한 본 분석의 결과는 5GHz 대역의 드론 운용에 대해서도 IEEE 802.11ax/ac 등의 최신 표준의 WLAN에 유사한 형태의 간섭의 영향 파악에 활용될 수 있다.

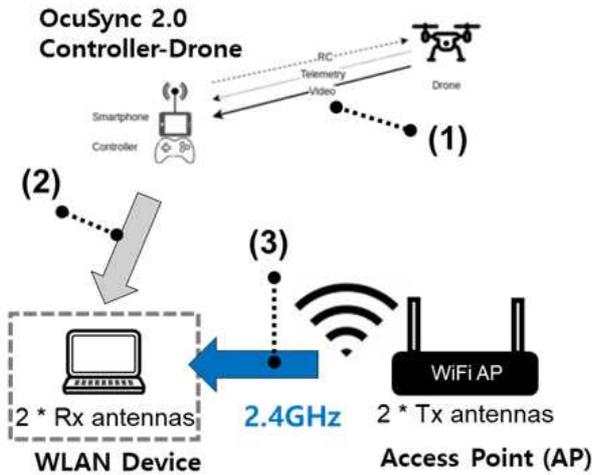


그림 1. 시스템 모델 및 분석 시나리오
Fig. 1. System model and analysis scenario

표 3. 분석 대상 무선랜 설정값

Table 3. Parameters for target WLAN network

Parameter	Value
WLAN Standard	802.11n (High Throughput)
Number of Channels	13
Bandwidth	20 Mhz
Modulation	OFDM
Modulation Coding Scheme (MCS)	MCS 15 / 2 spatial stream, 64-QAM fixed
Antennas	2 transmitters, 2 receivers pairs
Packet length	1500 Bytes
Propagation model	Pathloss and Shadowing model
AWGN level	-90 dBm

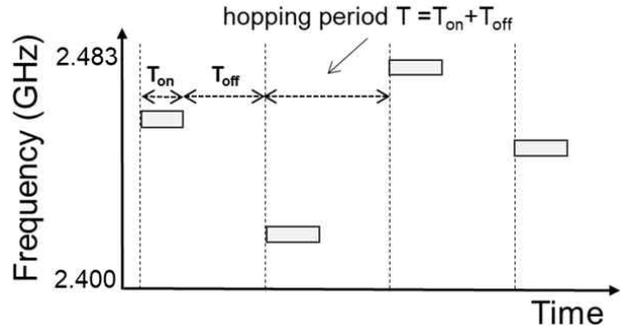


그림 2. FHSS 기반 드론 제어 신호의 호핑 패턴
Fig. 2. The hopping pattern of FHSS-based Drone controller signal

III. FHSS 기반 OcuSync 시뮬레이션 구현

본 연구에서는 대표적인 상용 FHSS 기반 원격 드론 관제 (Remote Control) 통신 기술인 OcuSync 2.0을 MATLAB을 이용하여 모델링하고 다양한 드론 운용 시나리오를 구성할 수 있는 시뮬레이션 환경을 구축하였다. FHSS기반의 OcuSync은 그림2과 같은 방식으로 시간에 따라 주파수를 변경하며 무선 신호가 전송되며, 시뮬레이션을 위한 환경변수는 표4에 요약된 값을 사용하였다.

표 4. Ocusync 드론 컨트롤러 환경 변수

Table 4. Parameters for Ocusync Drone Controller

Parameter	Value
Frequency Range	2.400 ~ 2.483 GHz
Maximum Transmission Power	20 dBm (100 mW)
Number of Channels	30
Channel Bandwidth	1.4 MHz
Transmission Period (Ton)	1.1 ms
Period (Ton+Toff)	10.0 ms
Channel Hopping Method	(i) Random hopping, (ii) Sequential hopping

그림3은 MATLAB의 WLAN ToolBox 및 파형 라이브러리(Waveform Library) 등을 이용하여 FHSS 기반의 Ocusync를 시뮬레이터로 구현한 내용을 보여준다. N개의 원격 조종기가 동시에 공존하는 파형생성도 가능하도록 구현하였으며, 생성된 파형은 주어진 전파 모델에 따라 송신기에 수신되는 WLAN의 수신 파형(signal-of-interest waveform)에 혼합되어 수신이 되도록 구현하였다. 마지막으로, 수신된 신호의 수신 성공률 기반으로 PER(Packet Error Rate)를 측정하고 이를 처리율 계산에 반영하여 WLAN성능을 도출하는 절차로 분석을 수행하였다.

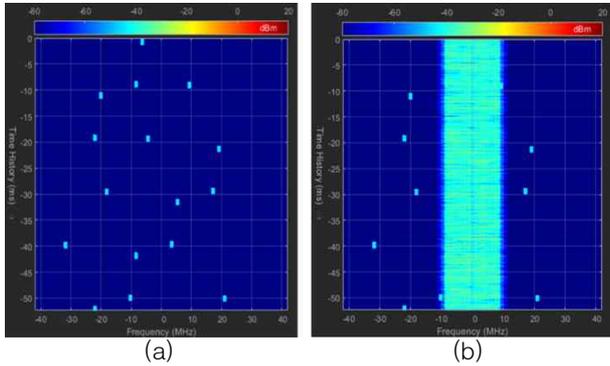


그림 3. MATLAB을 이용한 무선 제어용 FHSS (a) 송신부, (b) 수신부(WLAN 신호와 혼합되어 수신되는 파형 구현)
Fig. 3. Waveform Generation for FHSS-based Drone Controller

IV. 결과 분석

4-1 간섭원 (Drone-Controller pair) 수의 영향

먼저 드론 운용 대수에 따른 간섭효과를 분석하였다. 분석을 위해 그림1의 인자 (1)에 해당하는 Drone-Controller 개수를 0개 (무간섭), N = 1, 3, 5, 15, 20, 30 로 변화 시키며 무선랜 단말의 수신 패킷의 PER(Packet Error Rate), 처리율 (Goodput)의 변화 분석하였다. 또한, 무선랜 단말과 간섭원 사이의 거리를 3개의 값 - 매우 강함(15m 거리), 보통 (27.5m), 매우 약함 (50m) 거리- 에 대해 영향 파악 파악했다. 무선랜은 실내 사용 환경을 고려하고자 비가시상황(Non Line of Sight, Non-LOS)에서 무선랜AP~무선랜기기는 7m의 환경을 고려한 값으로 MATLAB 시뮬레이터에서 설정하였고, 이 경우 무간섭(N=0) 상황에서도 기본적으로 PER=0.1 정도 값을 갖는 상황을 가정하였다.

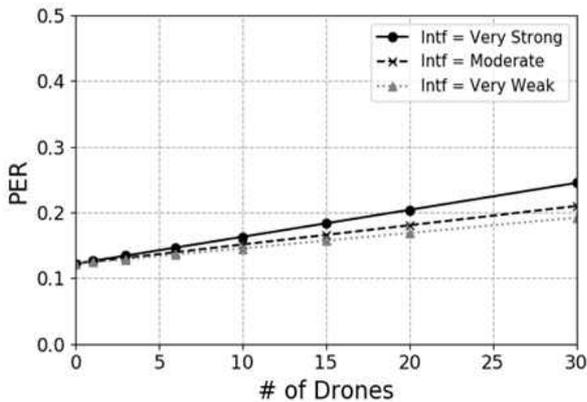


그림 4. 운용 드론 수에 따른 주어진 간섭 조건에서의 PER
Fig. 4. Packet error rate(PER) for different number of operating drones and degree of interference

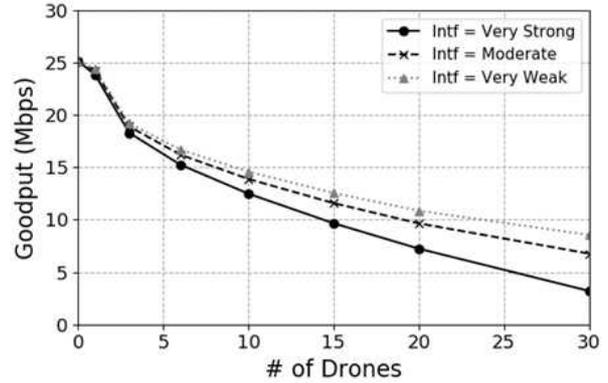


그림 5. 운용 드론 수에 따른 주어진 간섭 조건에서의 처리율
Fig. 5. Goodput for different number of operating drones and degree of interference

그림4와 그림5는 각각 간섭원인 드론 운용 대수에 따른 PER과 처리율(Goodput)을 나타낸다. 운용하는 드론의 수가 증가할수록 PER은 정비례해서 증가 (N=0에서 N=30개로 증가시 최대 PER 0.15 증가)함을 확인할 수 있다. 주목할 점은 증가되는 PER에 비해 처리율의 감쇄가 상대적으로 매우 크다는 것이다. 드론이 5개일 경우 최대 35%, 2개일 경우 최대 20% 수준의 성능 저하를 야기하며, 30개의 드론이 존재할 경우 87%까지 감쇄되었다. 이것은 OcuSync의 전송이 10ms 마다 1.1ms 동안 채널을 점유하게 되는데 이 시간 동안 무선랜은 Listen-Before-Talk (LBT)의 일종인 Carrier-sense multiple access(CSMA)방식에 의해 채널이 사용 중으로 판단하여 채널 사용할 수 없게 되므로 채널 사용 시간이 감소하여, 그 감소 시간에 비례하여 성능 저하되며 그 정도는 운용 드론의 수에 비례하여 커진 것이 원인이다. 또한, 같은 수의 간섭원에 대해 간섭 강도가 커질수록 처리율이 낮아지며, 이는 PER이 커지는 영향이 반영된 것이다.

4-2 간섭 강도의 영향

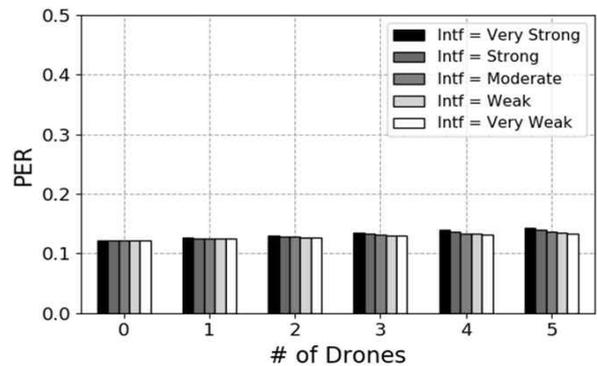


그림 6. 간섭 강도에 따른 무선랜 단말의 PER
Fig. 6. Packet error rate(PER) for various levels of interference when operating 1 to 5 drones

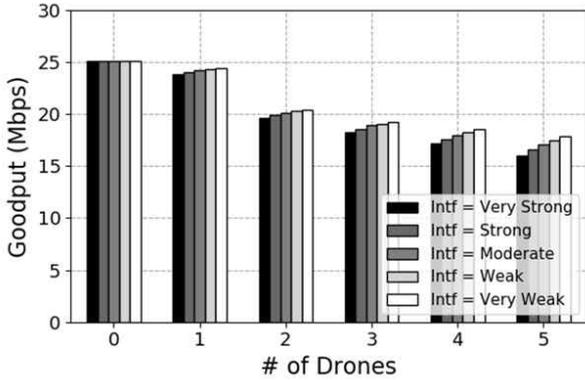


그림 7. 간섭 강도에 따른 무선랜 단말의 처리율
 Fig. 7. Goodput for various levels of interference when operating 1 to 5 drones

다음으로, N=0~5개의 간섭원이 있는 환경에서 그림1의 (2)인자에 해당하는 드론의 간섭 강도(5개의 다른 거리에서 운영)에 따른 성능에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 간섭 강도는 매우 강함(15m 거리), 강함(20m), 보통(27.5m), 약함(37.5m), 매우 약함(50m)의 5단계로 설정하여 분석을 수행하였다.

그림6과 그림7는 각각 소수(0~5개)의 드론 운영 상황에서의 각각 무선랜의 PER과 처리율에 대한 시뮬레이션 결과이다. 우선, 본 결과를 통해 드론의 거리가 가까울수록, 드론의 개수가 많을수록 무선랜의 성능 감쇄폭이 큰 것을 확인할 수 있다. 그림6의 결과는 간섭의 강도가 강할수록 PER의 증가 하였으나, 증가폭은 무간섭 대비 5개 드론은 PER이 3%정도 증가하는 수준임을 나타낸다. 소수의 드론의 개수가 증가할수록 성능이 저하되는 더 큰 요인은 (앞의 결과와 유사하게) 채널 점유로 인한 무선랜의 자원 사용 시간이 줄어드는 요인이 큰 것으로 파악된다.

4-3 무선랜 사용 환경별 영향도 분석

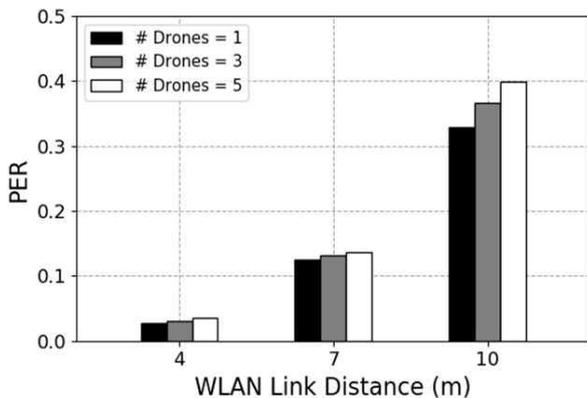


그림 8. 무선랜 링크 거리(상태)에 따른 PER
 Fig. 8. PER for various WLAN link distances

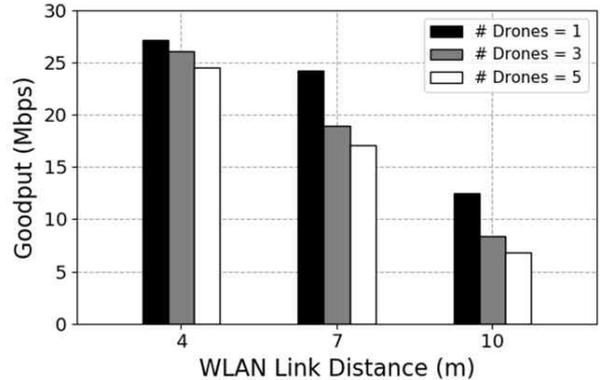


그림 9. 무선랜 링크 거리(상태)에 따른 처리율
 Fig. 9. Goodput for various WLAN link distances

무선랜 사용 환경은 대상 무선 단말과 AP 간의 링크 거리에 따른 채널 상태에 크게 영향을 받는다. 이에, 동일한 간섭강도에 대해 그림1의 인자 (3)에 해당하는 무선 링크 거리를 4m, 7m, 10m로 바꿔가며 무선랜 성능으로의 영향을 확인하였다.

그림8와 그림9는 주어진 간섭 환경에 대해 무선랜 링크 거리에 따른 PER과 처리율을 각각 보여준다. 동일한 수준의 간섭에 대해서도 무선랜의 채널 상태가 좋을 경우(4m 무선 링크 거리)에 비해 채널 상태가 좋지 않을 경우(10m 거리)에 영향을 크게 받는 것을 확인할 수 있었다. 운용 드론의 수가 N=1에서 N=5로 증가할 때, 링크 거리 4m의 경우는 12%의 감쇄가 이뤄진 반면, 링크 거리 10m의 경우는 51%의 성능 감쇄가 나타났다. 이는 그림8에서 보이는 PER의 증가의 원인이 가장 큰 것에 기인한다. PER은 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)이 감소할수록 증가하는데, 이에 같은 잡음(간섭신호) 크기에 대해 수신 신호의 크기가 작아지기 때문이다.

4-4 분석 요약

위 분석 결과를 관측된 결과는 다음과 같이 세가지로 요약된다.

첫째, 운용하는 드론의 수가 늘어날수록 주변 무선랜에 간섭의 강도는 커지며, 이로 인한 성능 감쇄가 증가한다. 특히, 작은 수의 운용 드론(1~5개)의 경우에도 간섭으로 인해 무선랜의 성능이 현저히 저하된다.

둘째, 간섭원인 Drone 또는 Drone Controller가 무선랜 단말에 가까울수록 간섭의 영향이 커졌다.

셋째, 채널 상태가 좋지 않은 무선랜은 동일한 수준의 간섭에 더 큰 영향을 받는다.

드론 운용으로 인한 성능 저하는 아래 2가지 요인에 의해 발생한다. (i) 신호 간섭(신호-잡음 관계)에 의한 무선랜 전송 에러율(PER)의 증가이며, (ii) 무선랜의 채널 사용 제어를 결정하는 LBT (Listen-Before-Talk 또는 CSMA)에 의해 주변 운용드론 수가 증가할수록 무선랜의 채널 사용할 수 있는

시간을 감소시키며, 이 두가지 요인이 결합되어 2.4GHz에 공존하는 주변의 무선랜의 성능 저하를 야기한다.

V. 결 론

본 연구에서는 MATLAB 기반으로 한 드론 통신 환경에 대한 시뮬레이터 구현에 기반한 분석을 수행하였고, 운용 드론의 수, 무선랜 기기로부터의 거리 (간섭강도), 무선랜 채널 상황(사용 환경) 등의 다양한 요소들에 따라 2.4GHz에서 드론 운영이 무선랜 사용에 미치는 간섭 정도를 파악하였다. 드론이 외부에 운용되는 일반적 상황인 비가시상황(Non-LOS)인 경우와 운용 드론의 대수가 소수인 경우도 주파수가 겹치는 인근 무선랜에는 큰 성능 저하를 찾아올 수 있음을 정량적으로 확인하였다. 본 연구에서는 상업용 드론의 대중화가 이미 이뤄진 오늘날, 그동안 주목받지 못했지만 잠재적 사회적 문제가 될 수 있는 비면허 대역에서의 드론과 기존 통신시스템 사이의 공존 및 간섭 문제를 다뤘다. 드론 운용에 따른 간섭의 정도를 정량적으로 도출한 본 연구의 결과는 비면허대역에서 드론 및 무인기의 효율적인 운용을 위한 정책수립이나 관련 기술개발에 중요한 참조로 활용할 수 있는 중요한 의미를 갖는다.

향후 연구에서는 비면허 대역에서의 사용되는 FHSS 기반의 다양한 드론 제어 신호 및 통신 기술을 분석하고, 딥러닝 등의 데이터 기반의 분류 기술을 이용해 다른 통신시스템의 무선 신호와 구별하는 무선 신호 기반의 드론 인지 및 탐지 연구를 수행할 예정이다. 또한, 2.4 GHz 대역에 존재할 수 있는 40MHz 대역의 WLAN, Bluetooth, ZigBee 등 시스템으로의 드론 운용으로 인한 간섭 영향을 분석할 예정이다.

감사의 글

이 성과는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2020R1A2C1013308).

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF-2020R1A2C1013308).

참고문헌

[1] T. Huynh-The, Q. Pham, T. Nguyen, D. Costa, and D. S. Kim, "RF-UAVNet: High-Performance Convolutional Network for RF-Based Drone Surveillance Systems," *IEEE Access*, No.10, pp. 49696-49707, 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172787>

[2] V. Chamola, P. Kotes, A. Agarwal, N. Gupta, and M. Guizani, "A comprehensive review of unmanned aerial vehicle attacks and neutralization techniques," *Ad hoc networks*, vol. 111, pp.102324, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>

[3] I. J. Lee, S. H. Choi, I. O. Joo, J.W. Jeon, J. H. Cha, and J.Y. Ahn, "Technical Trends on Low-Altitude Drone Detection Technology for Countering Illegal Drones", *Electronics and Telecommunications Trends*, Vol. 37, No. 1, Feb., 2022. <https://doi.org/10.22648/ETRI.2022.J.370102>

[4] S. Basak, S. Rajendran, S. Pollin, and B. Scheers, "Combined RF-based drone detection and classification," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, No. 8, vol. 1, pp.111-120, 2021. <https://doi.org/10.1109/TCCN.2021.3099114>

[5] J. Gan, et al. "SAS-SEINet: A SNR-Aware Adaptive Scalable SEI Neural Network Accelerator Using Algorithm-Hardware Co-Design for High-Accuracy and Power-Efficient UAV Surveillance," *Sensor*, pp. 6532, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22176532>

[6] L. Polak, et al. "On the Coexistence of LTE and Wi-Fi in the 2.4 GHz ISM band," in *Proceeding of 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing*, pp. 24-27, 2019. <https://doi.org/10.1109/TSP.2019.8769070>

[7] G. Naik, et al. "Coexistence of Wireless Technologies in the 5 GHz Bands: A Survey of Existing Solutions and a Roadmap for Future Research," *IEEE communications surveys & tutorials*, No. 20, Vol. 3, pp. 1777-1798, 2018. <https://doi.org/2018.10.1109/COMST.2018.2815585>

[8] K. Sung-Geon, N. Yeong-Hoon, H. Ic-Pyo, and Y. Jong-Gwan, "Stepwise RF Measurement Method for the Analysis of Drone's Communication Signals," *THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE* No. 32, vol. 4, pp. 370-376, 2021. <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2021.32.4.370>

[9] 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*, No. 7, pp.177198-177210, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936418>

[10] R. David Jan, Evaluation of Drone Neutralization Methods Using Radio Jamming And Spoofing Techniques, Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology in Stockholm, 2020.

[11] DJI. Compare Mavic Series and Other Consumer Drones [Internet]. Available: <https://www.dji.com/products/compare-consumer-drones>

- [12] N. Bitar, et al. “Wireless Technology Identification Using Deep Convolutional Neural Networks,” in *Proceeding of 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications*, pp. 2166-9589, 2017.
<https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292183>



최재혁 (Jae-Hyuk Choi)

2008년 : 서울대학교 대학원 (공학박사-무선통신)

2008년~2011년: University of Michigan 박사후 연구원

2011년~현 재: 가천대학교 AI·소프트웨어학부 부교수

※ 관심분야 : 모바일컴퓨팅, 무선통신시스템, 인공지능