

OcuSync 기반 상업용 드론이 2.4GHz 무선랜 시스템에 미치는 채널 간섭 특성 분석

고호정*

한국폴리텍대학교 시소소프트웨어과 교수

Analysis of Channel Interference Characteristics of OcuSync-based Commercial Drones on 2.4GHz WLAN Systems

Ho-Jeong Ko*

Professor, Department of AI Software, Korea Polytechnic

요약 본 논문은 2.4GHz ISM 대역을 공유하는 무선랜(WLAN) 환경에서 상업용 드론(DJI OcuSync) 운용에 따른 전파 간섭 영향을 몬테카를로 기법으로 분석하였다. 실환경 특성을 반영한 Modified Hata Model로 무선랜 서비스 반경을 산출하고, 드론의 비행 고도 및 이격 거리에 따른 통신 품질 변화를 정량적으로 고찰하였다. 시뮬레이션 결과, 고도 50m 비행 시 최악의 조건에서 최소 100m 이상의 보호 이격 거리가 요구되며, 간섭 허용 임계치(5%) 내에서 최대 12대의 드론이 상호 간섭 없이 공존 가능성을 확인하였다. 본 연구 결과는 ISM 대역 드론의 간섭 회피 알고리즘 설계 및 효율적인 주파수 공유를 위한 운용 가이드라인의 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

주제어 : 드론, OcuSync, 무선랜, 간섭분석, 보호이격거리, 2.4GHz 공존밀도

Abstract This paper analyzed the radio interference impact of commercial drone (DJI OcuSync) operations on Wireless Local Area Network (WLAN) environments sharing the 2.4GHz ISM band using the Monte-Carlo method. The WLAN service radius was calculated using the Modified Hata Model to reflect real-world environment characteristics, and changes in communication quality were quantitatively examined according to the drone's flight altitude and separation distance. Simulation results revealed that a minimum protection separation distance of at least 100m is required under the worst-case conditions at a flight altitude of 50m. Furthermore, it was confirmed that up to 12 drones can coexist without mutual interference within an interference protection threshold of 5%. These research results are expected to be utilized as fundamental data for designing interference avoidance algorithms and operational guidelines for efficient frequency sharing of ISM-band drones.

Key Words : Drone, OcuSync, WLAN, Interference Analysis, Protection Distance, 2.4GHz Coexistence Density

*교신저자 : 고호정(hjko@kopo.ac.kr)

접수일 2026년 03월 24일

수정일 2026년 04월 13일

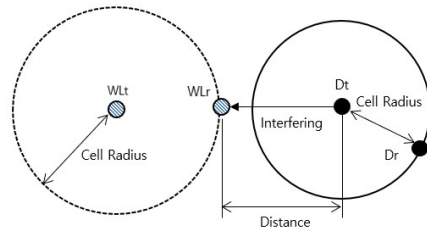
심사완료일 2026년 04월 21일

1. 서론

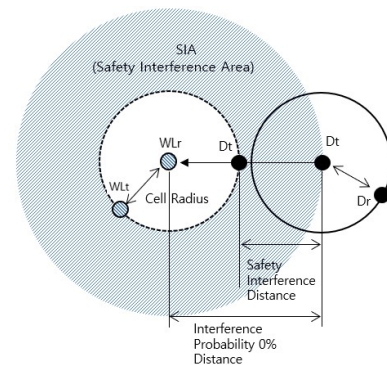
최근 스마트 시티 구축과 모바일 트래픽의 폭발적인 증가로 인해 도심 지역 내 비면허 대역인 2.4GHz ISM(Industrial, Scientific, and Medical) 대역의 스펙트럼 밀집도는 한계에 다다르고 있다[1,2,3,4]. 이러한 주파수 포화 상태에도 불구하고, 무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle) 산업은 물류, 감시, 농업 등 다양한 분야로 확장되며 그 활용도가 급격히 높아지고 있다. 특히 상용 드론의 대다수는 제조 비용 절감과 범용성을 위해 별도의 주파수 라이선스가 필요 없는 2.4GHz ISM 대역을 기체 제어(C2, Command and Control) 및 데이터 전송을 위한 주 통신 채널로 채택하고 있다[5,6]. 이는 제한된 주파수 자원을 두고 기존의 지상 무선 통신 기기들과 공중의 드론이 공존해야 하는 환경을 조성하고 있다. 이러한 환경에서 드론이 사용하는 통신 방식과 기존 무선랜(Wi-Fi) 간의 전파 간섭이 발생할 수 있다. 드론은 높은 고도에서 운용되기에 지상 기기보다 훨씬 넓은 가시거리(LoS, Line-of-Sight) 환경을 가지며, 이는 드론의 RF 신호가 지상의 광범위한 무선랜 액세스 포인트(AP) 및 단말기들에게 하향 링크 간섭원으로 작용할 수 있다[7,8,9,10]. 그러나 드론 운용이 기존 지상 무선랜 네트워크 성능에 미치는 영향에 관한 연구는 상대적으로 적은 실정이다. 드론의 보급 속도가 가속화됨에 따라 다수의 드론이 군집 비행하거나 도심 밀집 지역을 통과할 때, 기존 통신 인프라(Wi-Fi)가 겪게 될 데이터 처리량(Throughput) 저하와 패킷 손실 문제는 더 이상 간과할 수 없는 잠재적 위협이다. 따라서 드론의 안전한 운용뿐만 아니라 기존 통신망의 안정된 운영을 보장하기 위해서는, ISM 대역 내 이기종 시스템 간의 상호 간섭 영향에 대한 정량적으로 분석이 요구된다[11,12]. 본 논문에서는 상업용 드론 시장에서 보편적으로 활용되는 드론 전파 신호가 2.4GHz 대역의 무선랜(IEEE 802.11 계열)과 공존할 때 발생하는 전파 간섭 특성을 분석한다. 구체적으로는 시뮬레이션을 통해 드론과 무선랜 기기 사이의 전파 간섭 유효 거리(Effective Interference Distance)를 산출하고, 특정 공간 내에서 운용되는 드론의 밀도(Density of UAVs)가 무선랜의 성능 저하에 미치는 영향을 분석한다. 이를 통해 향후 도심지 드론 운용 시 전파 간섭을 최소화할 수 있는 물리적 이격 거리와 적정 운용 대수에 대한 가이드라인을 제시한다.

2. 전파 간섭 시나리오 및 분석 방법

본 연구에서의 간섭 분석 모델은 크게 이격 거리에 따른 영향 분석(그림 1)과 기기 밀도 기반의 공존 분석(그림 2)으로 이원화하여 설정하였다. 시스템 모델링을 위해 각 요소를 다음과 같이 정의한다. 희생원(Victim): 드론으로부터 간섭 신호를 받는 무선랜 단말(WLr), 원하는 신호원(Desired Source): WLr에 정상 신호를 송신하는 무선랜 AP(WLt), 간섭원(Interferer): 무선랜 통신에 영향을 미치는 드론(Dt), 드론 수신부: Dt로부터 제어 신호를 수신하는 드론 제어기(Dr). 거리 기반 시나리오에서는 최악의 간섭 환경(Worst-case)을 위해, WLt와 Dt의 최대 서비스 반경 경계면에 각각 WLr과 Dr을 배치하였다. 이후 WLr과 Dt 사이의 물리적 거리 d 를 가변시키며, 상호 영향이 없는 지점부터 WLr의 간섭 허용 기준을 충족하는 범위를 산출한다. 본 논문에서는 이 임계 구간을 간섭 유효 거리(Interference Effective Distance)로 명명한다. 밀도 기반 시나리오에서는 앞선 단계에서 도출된 유효 구간 면적을 안전 간섭 영역(Safety Interference Area)으로 설정한다. 해당 영역 내에서 드론(Dt)의 개체 수를 변화시키며 통계적 간섭 확률을 정량화 한다. 이때 드론은 설정된 영역 내에서 확률적으로 무작위 배치(Random



[Fig. 1] Scenario Model for Distance



[Fig. 2] Scenario Model for Density

distribution)되며, 무선랜의 통신 품질을 저해하지 않는 범위 내에서 최대로 수용 가능한 드론의 밀도와 개수를 도출한다.

시뮬레이션의 신뢰성을 확보하기 위해, 본 연구에서는 최악의 통신 환경(Worst-case scenario)을 가정하였다. 이에 따라 희생원인 WLR과 드론 제어기인 Dr을 각각 원하는 신호원(WLt, Dt)의 통신 가능 한계점인 최대 서비스 반경 끝단에 배치하였다. 시스템의 서비스 반경은 송수신부 간의 안정적인 연결을 보장하기 위한 링크 버짓(Link Budget) 산출 결과를 바탕으로 결정 된다. 본 모델에서 적용한 2.4GHz ISM 대역의 WLAN(IEEE 802.11n) 주요 파라미터는 표 1과 같다. 이를 기반으로 수신 감도와 주요 제원을 고려한 최대 허용 경로 손실(MAPL, Maximum Available Path Loss)은 식 (1)을 통해 계산되었으며, 최종 산출된 수치는 표 2에 정리하였다.

$$MAPL = EIRP - Sensitivity + \sum (Loss + Gain) \quad (1)$$

$$= 106dB$$

$$L = -27.6 + 20\log(\sqrt{(h_2 - h_1)^2 + (d)^2}) \quad (2)$$

$$+ 20\log(f) + fix(\frac{d}{d_{room}})L_{wi} + k_f[\frac{k_f + 2}{k_f + 1} - b]L_f$$

$$k_f = |floor(\frac{h_2}{h_{floor}}) - floor(\frac{h_1}{h_{floor}})| \quad (3)$$

- L_{wi} : loss of wall (default 5dB)
- L_f : loss between adjacent floor (default 18.3dB)
- b : empirical parameter (default 0.46)
- d_{room} : size of room (default 4m)
- h_{floor} : height of each floor (default 3m)
- h_1 : height of the receiver (m)
- h_2 : height of the transmitter (m)
- d : the distance between the transmitter and receiver (m)

본 연구에서는 실제 실내 전파 환경의 감쇄 특성을 반영하기 위해 Modified Hata Model (indoor-indoor)을 채택하여 시스템의 최대 셀 커버리지를 산출하였다. 앞서 도출된 MAPL 값을 해당 전파 모델 식(2)와 (3)에 대입한 결과, Urban indoor-indoor 환경에서의 2.4GHz 무선랜 서비스 반경은 약 30m인 것으로 분석 되었다. 이 격 거리 기반 시나리오에서는 WLR과 Dt의 가용 커버리지를 기준으로, 최악의 간섭 조건인 최대 서비스 반경 경계면에 WLR과 Dr을 각각 배치하였다. 이후 WLR과 간섭원(Dt) 사이의 물리적 거리 d를 단계적으로 변화시키며, 간섭 영향이 전무한 지점부터 희생원(WLR)의 통신 품질 유지 기준을 충족하는 임계 지점까지를 분석하였다. 본 고에서는 이 물리적 범위를 '최대 간섭 허용 구간(Maximum Interference Allowable Range)'으로 명

명한다. 기기 밀도 기반 시나리오의 거리 시나리오에서 도출된 최대 허용 영역을 기반으로 수행된다. 해당 영역 내에서 드론(Dt)의 개체 밀도를 가변적으로 조정하며 통계적 간섭 발생 확률을 정량화하였다. 이때 Dt는 분석 영역 내에서 확률적 무작위 분포를 따르며, 무선랜의 간섭 허용치 범위 내에서 안정적인 공존이 가능한 드론의 최대 운용 개수를 도출 하였다. 시뮬레이션을 위해 국제전기통신연합인 ITU-R에서 권고하는 전파 간섭 분석 도구인 ECO(European Communication Office)에서 개발한 SEAMCAT(v5.4.2)을 사용하였다. 시뮬레이션시 간섭확률은 1에서 간섭 보호 비를 만족하는 신호의 수신 횟수와 전체 시뮬레이션 이벤트 발생 횟수의 비를 뺀 값인 $P_I = 1 - (N_{good}/N_{all})$ 으로 계산되며, 통계적 신뢰도를 확보하기 위해 이벤트 발생 횟수를 20,000회로 수행 하였고, 모의실험은 Windows 11 Pro(64bit) 운영체제에서 Intel i7 CPU, 32GB RAM환경에서 진행 되었다. 통상적으로 무선망 간섭 분석에서는 2~5% 이내의 간섭 확률을 안정적인 운용 기준으로 간주하는 점에 착안하여, 본 연구에서도 간섭 확률 5%를 임계치(Threshold)로 설정하고 이에 부합하는 물리적 거리와 운용 밀도를 분석 하였다[13,14,15].

<Table 1> Parameter for WLAN System

Parameter	Value	Unit
Frequency	2432	MHz
Channel Bandwidth	20	MHz
Sensitivity	-76	dBm
Antenna Height (Tx/Rx)	1.5 / 1	m
Antenna Peak Gain	5	dBi
Output Power	20	dBm

<Table 2> Link budget of WLAN System

Parameter	Value	Unit
Tx	Power	20 dBm
	Antenna gain	6 dBi
	EIRP	26 dBm
Rx	Sensitivity	-76 dBm
	Antenna gain	6 dBi
	Fading Margin	2 dB
	total	80 dB
MAPL	106	dB

3. 시뮬레이션 구성 및 분석

본 장에서는 전 세계 상업용 드론 시장을 선도하는 DJI 사의 독자적인 무선 전송 기술인 OcuSync와 범용적으로 사용되는 2.4GHz ISM 대역 기반의 WLAN(IEEE 802.11n) 시스템을 연구 대상으로 설정하여, 앞서 설계한 간섭 시나리오를 구체화하고 이에 따른 정량적 간섭 영향을 분석하고자 한다.

특히 OcuSync 기술은 드론과 조종기 간의 고화질 영상 전송 및 제어를 위해 넓은 대역폭과 가변적인 주파수 도약 특성을 지니고 있으므로, 이를 일반적인 무선랜 환경에 대입하여 기기 간의 물리적 거리와 운용 밀도 변화에 따른 통신 품질 저하 정도를 SEAMCAT 기반의 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 다각도로 검증한다. 이러한 분석 과정을 통해 서로 다른 전송 방식을 사용하는 두 시스템이 동일한 주파수 대역 내에서 공존할 때 발생하는 상호 간섭의 특성을 도출하고, 안정적인 드론 운용을 위한 보호 이격 거리와 최적의 기기 밀도 가이드라인을 제시한다.

3.1 시뮬레이션 결과 분석 및 간섭 완화 효과

본 연구에서 활용된 2.4GHz ISM 대역 기반 OcuSync 시스템의 시뮬레이션을 위해 설정된 주요 파라미터는 표 3에 명시하였으며, 해당 시스템의 주파수 특성을 반영한 전파 채널 방사 마스크(Emission Mask) 규격은 표 4와 같다. 그림 3은 수신 단말인 WLR이 서비스 반경의 최외곽 경계면에 배치된 시나리오를 보여주며, 이때 WLt로부터 수신되는 희망 신호의 강도가 최소가 되는 최악의 통신 조건(Worst-case)을 나타낸다. 무선랜 시스템의 안정적인 운용을 위한 통계적 간섭 허용 임계치를 5%로 설정하였을 때, 시뮬레이션 분석 결과 드론(OcuSync)이 무선랜에 미치는 유효 간섭 거리 구간은 약 100m에서 400m 사이인 것으로 도출 되었다.

반면, 그림 4는 WLR이 서비스 반경 내에서 확률적으로 무작위 배치되는 실환경 시나리오를 반영하고 있으며, 이는 신호 강도가 가장 낮은 최악의 경우부터 가장 양호한 베스트 케이스까지의 변동성을 모두 포함하는 분석 모델이다. 이러한 동적인 환경 조건을 적용할 경우, 동일한 간섭 허용치 기준 하에서 무선랜과 드론 간의 간섭 유효 구간은 55m에서 350m 범위로 소폭 축소됨을 확인할 수 있다. 마지막으로 그림 5는 그림 3과 동일한 최악의 조건 하에서, 주파수 도약방식을 사용하는 드론 시스템에 LBT(Listen Before Talk) 간섭 회피 기술을 결합했을 때의 개선 효과를 나타낸다. LBT 알고리즘이

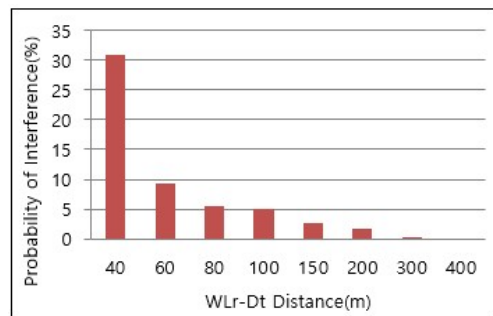
적용된 드론은 무선랜이 이미 점유하고 있는 채널을 실시간으로 감지하여 호핑 리스트에서 적응적으로 제외함으로써 충돌을 방지한다. 시뮬레이션 결과, 주파수 공유 환경에서 치명적인 영향을 미치는 동일 채널(Co-channel) 간섭이 효과적으로 억제됨에 따라 전체적인 간섭 확률이 기존 대비 비약적으로 감소하였음을 검증하였다.

〈Table 3〉 Parameter for Drone system

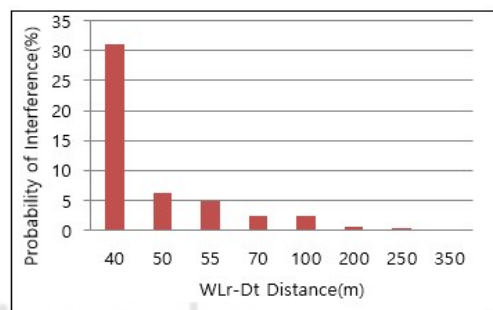
Parameter	Value	Unit
Frequency	2431.5	MHz
Channel Bandwidth	1.4	MHz
Antenna Height (Drone)	50	m
Antenna Gain	2	dBi
Output Power	20	dBm

〈Table 4〉 Spectrum emission mask of Ocusync Drone system

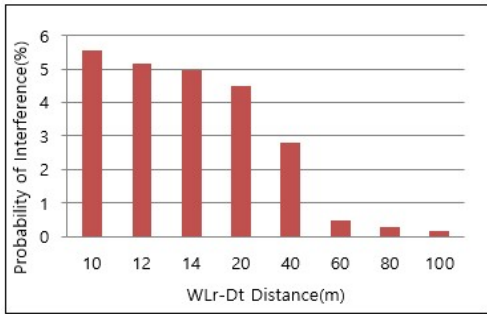
Frequency Offset(MHz)	Attenuation (dBc)
~ -2.8	-45
-1.5	-28
-0.7	-20
-0.6 ~ 0.6	0
0.7	-20
1.5	-28
2.8 ~	-45



[Fig. 3] Simulation Result (WLR-WLr distance= 30m)



[Fig. 4] Simulation Result (WLR-WLr distance= random)

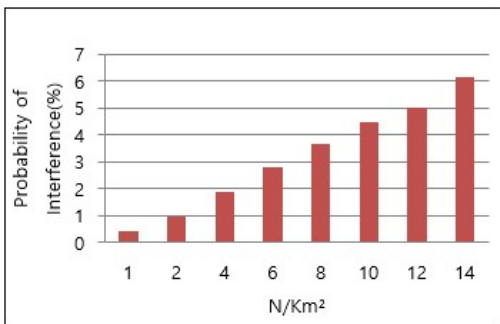


[Fig. 5] Simulation Result using LBT (WLT-WLr distance= 30m)

3.2 밀도 기반 시나리오분석 및 공존용량 도출

그림 6은 앞선 거리 시나리오(그림 3)를 통해 산출된 유효 간섭 영역을 기반으로, 해당 범위 내에서 간섭원인 드론(Dt)의 밀도 변화에 따른 통계적 영향을 분석한 시뮬레이션 결과이다. 본 분석 모델에서는 희생원인 무선랜 단말(WLr)을 중심으로 설정된 유효 간섭 반경 내에서 다수의 드론 기체가 확률적으로 무작위 분포(Random Distribution)하는 실험경을 모사하였다.

시뮬레이션 분석 결과, 무선랜 시스템의 안정적인 통신 품질을 보장하기 위한 간섭 허용 임계치인 5%를 기준으로 했을 때, WLr은 유효 영역 내에 존재하는 *최대 12 개의 드론(Dt)과 상호 간섭 영향을 최소화하며 공존할 수 있는 것으로 확인되었다. 이는 특정 밀도 이상의 드론이 동일 구역에서 동시 운용될 경우 무선랜의 처리율(Throughput) 저하가 급격히 발생할 수 있음을 시사하며, 도출된 결과값은 향후 드론과 무선랜 기기 간의 효율적인 주파수 공유 및 운용 밀도 가이드라인을 수립하는데 중요한 정량적 근거로 활용될 수 있다.



[Fig. 6] Simulation Result for Density (WLT-WLr distance=30m, WLr-Dt distance= 100m)

4. 결론

본 논문에서는 2.4GHz ISM 대역을 공유하는 무선랜 시스템 환경에서, 인접하여 운용되는 드론 통신시스템으로 인해 발생하는 전파 채널 간섭 시나리오를 통해 정량적인 분석을 수행하였다. 특히 실제 실내의 복합 환경의 전파 특성을 반영하기 위해 Modified Hata Model을 활용하여 무선랜의 서비스 반경을 산출하였으며, 이를 바탕으로 동일 채널상에서 발생하는 드론 기기와의 상호 간섭 영향을 몬테카를로 방식으로 검증하였다. 시뮬레이션 분석 결과, 드론이 50m 상공에서 비행하며 운용될 경우 무선랜 수신기의 신호 강도가 최저가 되는 Worst-case 기준으로 최소 100m 이상의 보호 이격 거리가 확보되어야 안정적인 통신 품질 유지가 가능함을 확인하였다. 또한, 거리 시나리오를 통해 도출된 최대 간섭 허용 구간 내에서 기기 밀도를 분석한 결과, 간섭 확률 5%를 준수하는 범위 내에서 최대 12대의 드론 기기가 무선랜과 공존하며 동시 운용될 수 있다는 수치를 도출하였다. 본 연구의 분석 결과는 향후 ISM 대역을 활용하는 드론 시스템의 효율적인 전파 간섭 회피 알고리즘 설계 및 주파수 자원 관리 기법을 수립하는 데 있어 기초 연구 자료로 활용될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] M.A.Al-Khasawneh and A.M.Al-Anzi, "Optimized Chaotic Frequency Hopping for Improved Spectrum Coexistence in 2.4 GHz ISM Band," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.24, No.3, pp.412-425, 2025.
- [2] J.Park, K.S.Kim, and R.Miller, "Wireless Coexistence of Cellular LBT Systems and BLE 5 in the 2.4 GHz ISM Band: Challenges in Smart City Deployments," IEEE Access, Vol.10, pp.15432-15445, 2022.
- [3] L.Chen and H.Wang, "Optimized Coverage Enhancement and Performance Analysis of Wi-Fi 7 Networks with 5G and Small Cell Integration in High-Density Urban Areas," International Journal of Communication Systems, Vol.38, No.1, pp.45-59, 2025.
- [4] S.Gupta and V.Sharma, "Cross-Technology Interference: Detection, Avoidance, and Coexistence Mechanisms in the ISM Bands for IoT-Enabled Smart Cities," Journal of Network and Computer Applications, Vol.210, pp.103-120, 2025.
- [5] A.M.Al-Anzi and M.A.Al-Khasawneh, "Deep Learning-based RF Jamming and Modulation Detection for Smart Drone Neutralization in 2.4 GHz ISM Band," IEEE Transactions on Intelligent Transportation

Systems, Vol.26, No.2, pp.115-129,2025.

- [6] R.Miller and K.S.Kim, "Impact of Urban Spectral Density on the Reliability of Command and Control (C2) Links for Commercial UAVs," International Journal of Wireless Information Networks, Vol.31, No.1, pp.12-25, 2024.
- [7] R.Miller, K.S.Kim, and J.Park, "Impact of UAV Altitude and Line-of-Sight Propagation on Terrestrial Wi-Fi Access Points in Dense Urban Scenarios," IEEE, Vol.12, pp.8920-8935, 2024.
- [8] L.Chen and H.Wang, "Fundamental Limits on the Coexistence of Aerial Users and Terrestrial Wi-Fi Networks: A Stochastic Geometry Approach," Journal of Network and Computer Applications, Vol.238, pp.104-119, 2025.
- [9] T.J.Watson, "Evaluating the Interference Footprint of Commercial UAVs on Terrestrial Wireless Infrastructure under LoS Conditions," Computer Networks, Vol.205, Article108745, 2022.
- [10] H.Tanaka and Y.Sato, "3D Interference Modeling for UAV-to-Terrestrial Communications in the 2.4 GHz ISM Band," IEEE Communications Letters, Vol.28, No.4, pp. 843-847, 2024.
- [11] M.A.Al-Khasawneh and S.Gupta, "Quantitative Analysis of Throughput Degradation and Packet Loss in Terrestrial WLANs due to UAV Swarm Coexistence in 2.4 GHz ISM Band," Journal of Network and Computer Applications, Vol.245, 2025.
- [12] J.Zhang, "Impact of Drone Swarm Mobility on the Quality of Service (QoS) of Urban Wi-Fi Infrastructure: An NS-3 Based Emulation Study," Drones, Vol.9, No.8, pp.584-601, 2025.
- [13] European Communications Office, SEMCAT Handbook,
- [14] R.Miller, K.S.Kim, and J.Park, "Geometric Interference Modeling and Effective Distance Estimation for UAV-to-Ground Coexistence in Saturated ISM Bands," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.25, No.1, pp. 112-127, 2026.
- [15] L.Chen, H.Wang, and Y.Li, "Stochastic Geometry Analysis of Aggregate Interference and Maximum Permissible UAV Density in Dense Urban Wi-Fi Networks," IEEE Internet of Things Journal, Vol.11, No.4, pp.5890-5905, 2024.

고 호 정(Ho-Jeong Ko)

[종신회원]



- 2001년 2월 : 경희대학교 전자전 파공학과 (학사/석사)
- 2016년 2월 : 서울과학기술대학교 정보통신융합공학과 (박사)
- 2010년 10월 ~ 2016년 7월 : 삼성SDS 수석연구원
- 2016년 8월 ~ 현재 : 한국폴리텍 대학 AI소프트웨어과 교수

<관심분야>

정보통신융합, 이동통신, AI, 사물인터넷, RFIC