

장애물을 고려한 비면허대역 공중-지상 채널 경로 손실 측정

이 헌 제*, 한 수정*, 변 정 일*, 최 지 훈°

Path Loss Measurement for Air-to-Ground Channels in Unlicensed Bands with Obstacles

Hun Je Lee*, Su Jeong Han*, Jung-Il Byeon*, Jihoon Choi°

요 약

본 논문에서는 비면허대역에서 장애물을 고려한 공중-지상 채널의 경로 손실 변화를 파악하기 위해 드론을 이용한 채널 측정 실험을 진행한다. 공중-지상 채널 실측을 위해 드론에 상용 무선랜 라우터를 부착하고, 무선랜카드를 장착한 지상 수신기를 가시선 위치, 장애물 뒤, 차량 안, 차량 위에 배치한다. 2.4 GHz 및 5 GHz 비면허대역에서 무선랜 비콘 신호를 이용해서 경로 손실을 측정한다. 드론이 무선랜 라우터의 신호 전송에 미치는 영향을 파악하기 위해 드론에 부착된 라우터의 방사 패턴을 실측한다. 또한, 고도각 및 수평 거리를 변화시키면서 경로 손실을 측정하고, 장애물이 경로 손실에 미치는 영향을 분석한다. 이를 통해 고도각, 수평 거리, 장애물을 반영한 공중-지상 채널 파라미터를 도출한다.

키워드 : 공중-지상 채널, 채널 측정, 경로 손실 예측, 비면허대역, 드론

Key Words : Air-to-ground channel, channel measurement, path loss, unlicensed band, drone

ABSTRACT

In this paper, we conduct field measurement using a drone to examine the path loss variation of air-to-ground (A2G) channels with obstacles in unlicensed bands. For A2G channel measurement, a commercial WiFi router is attached to the drone, and several ground receivers with wireless local area network (LAN) cards are placed in a line-of-sight position, behind an obstacle, inside a vehicle, and on a car trunk. The path loss is measured using WiFi beacon signals in 2.4 GHz and 5 GHz unlicensed bands. To examine the effect of the drone body on the signal transmission of the WiFi router, the radiation pattern is measured using the router attached to the drone. Also, we measure the path loss by changing the elevation angle and ground distance, and analyze the effect of obstacles on the path loss. Through the measurement campaign, the A2G channel parameters are derived considering the elevation angle, the ground distance, and the obstacles.

* 이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021R1A4A2001316, 2022R1F1A1073999).

• First Author : School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University, dlgsjwp@kau.kr, 학생회원

° Corresponding Author : School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University, jihoon@kau.ac.kr, 종신회원

* School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University, paransea03@kau.kr, start2ji@kau.kr, 학생회원

논문번호 : 202209-208-A-RN, Received September 14, 2022; Revised November 18, 2022; Accepted November 27, 2022

1. 서 론

최근 회전익을 사용한 멀티 콥터형 무인기와 고정익 무인기 기술의 비약적인 발전에 따라 군과 민간에서 다양한 분야에 무인기를 활용하고 있다. 이에 따라 기존 지상 및 위성 통신 인프라를 이용해서 무인기 사용자에게 통신 서비스를 제공하는 기술과 무인기 기지국을 사용하여 지상 사용자에게 무선 통신 서비스를 제공하는 기술이 활발히 연구되고 있다. 무인기를 기지국으로 사용하는 경우 낮은 비용으로 통신 음영 지역을 해소하고 지상 기지국의 경계에 위치한 사용자의 전송 속도를 높일 수 있다¹⁾. 무인기 기지국은 기존 지상 기지국에 비해 이동성이 높고 높은 고도에서 신호를 송수신하므로 LoS(Line of Sight) 채널 환경에서 지상 사용자와 연결할 확률이 높아지는 장점이 있다. 특히 고도 변경을 통한 커버리지 조정, 무인기 위치 및 이동 경로 변경을 통해 사용자 분포를 고려한 능동적인 배치가 가능하다²⁾. 따라서 자연재해, 전쟁과 같은 예상하지 못한 비상 상황이 발생하여 지상 기지국의 기능이 마비되는 경우 무인기를 이용하여 신속하게 이동형 기지국을 구축함으로써 네트워크 서비스를 복구할 수 있다³⁾. 무인기를 사용한 이동통신 네트워크의 구축 및 최적화를 위해 [4]에서는 무인기 하향링크 명령 및 제어 채널을 위한 차세대 다중 사용자 대규모 MIMO(Multi-Input Multi-Output) 네트워크를 제안했고, [5]에서는 무인기 통신의 고속, 저지연, 안정성 확보를 위한 고려사항을 토대로 향후 연구 방향을 제시하였다.

무인기 기반 이동통신 네트워크 구축을 위해서는 공중-지상(Air-to-Ground) 채널 특성에 대한 분석이 중요하므로 최근 채널 실측 데이터에 기반한 연구가 활발히 수행되고 있다. [6]에서는 드론을 이용한 실측을 통해 고도 및 수평 거리 변화에 따른 경로 손실과 RMS(Root Mean Square) 지연 확산 등의 채널 파라미터를 도출했고, [7]에서는 이를 확장하여 무지향성 안테나와 지향성 안테나를 사용한 공중-지상 채널 특성 비교 실험을 진행했으며, [8]에서는 크레인에 SDR(Software Defined Radio) 기반 신호 수신 장비를 탑재에서 도심, 시골, 공업지역에 대한 공중-지상 채널 특성을 도출하였다. [9]에서는 전파의 직진성이 강한 밀리미터파 대역에서 무인기 중계기 이용시 실시간 통신 링크 측정을 통한 중계기 위치 최적화 기법을 제안하고, 테스트베드 제작을 통해 성능 개선을 검증하였다. 밀리미터파 대역 공중-지상 채널 특성을 파악하기 위해 광선 추적(Ray Tracing) 기법, 3차원 기

하 채널 모델, 자체 제작한 밀리미터파 측정 장치를 이용한 채널 실측 기법에 적용되었다¹⁰⁻¹²⁾.

한편, 기존 상용 통신 시스템을 적용한 공중-지상 채널 특성을 파악하기 위해 LTE(Long-Term Evolution) 기지국을 사용하거나 무선랜 비면허대역에 대한 채널 실측 연구가 진행되어 왔다¹³⁻²⁰⁾. 상용 LTE 기지국 신호와 드론을 이용한 실측을 통해 드론 고도와 고도각을 반영한 경로 손실 모델을 정의하고^{13,14)}, 고도에 따른 다중 경로 지연 확산 파라미터를 도출하였다¹⁵⁾. 또한, [16]에서는 시골 지역에서 LTE 기지국 신호를 이용한 실험을 통해 고도에 따른 공중-지상 채널 품질을 측정했고, [17]에서는 도심 지역과 준도심 지역에서 드론 고도 변화에 따라 공중-지상 통신을 수행하는 LTE 기지국의 변화를 측정했으며, [18]에서는 무인기와 장애물을 위한 채널 파라미터 보정이 적용된 채널 모의실험 기법을 제시하였다. [19]에서는 5 GHz 비면허대역에서 항공기를 이용해서 해수면 근처의 채널 특성을 측정했고, [20]에서는 드론을 이용한 2.4 GHz 및 5 GHz 비면허대역 공중-지상 채널 실측을 통해 가시선 환경에서 고도각 변화에 따른 경로 손실을 고려한 채널 모델을 제시하였다.

최근 도심에서 많이 사용되는 옥외 지상 소형 기지국의 경우 송수신기 사이에 가시선 채널이 확보될 확률이 상대적으로 높으므로 커버리지 내의 특정 건물, 지형, 장애물 등의 영향을 크게 받는다. 이에 따라 특정 장애물을 고려하여 경로 손실 예측 모델을 보정하거나 광선 추적 기법 등을 통해 경로 손실을 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다²¹⁾. 공중-지상 채널의 경우 일반적으로 가시선 통신 확률이 지상 소형 기지국에 비해 더욱 높아진다. 그런데 대부분의 기존 공중-지상 채널 특성 연구는 도심, 부도심, 대학 캠퍼스, 활주로 주변, 공업 지역 등의 환경에서 경로 손실을 측정하고, 이를 기반으로 로그거리(Log-distance) 채널 모델을 적용하여 평균적인 경로 손실 예측 모델을 제시하는 방향으로 진행되어 왔다^{7,12-15)}.

본 논문에서는 공중-지상 채널에서 특정 장애물에 의해 가시선이 가려지는 경우나 차량에 의해 수신기 주변의 전파 산란 환경이 변할 때 이에 의한 경로 손실 변화를 분석한다. 이를 위해 비면허대역에서 장애물 유무 및 종류에 따른 공중-지상 채널의 경로 손실 변화를 드론을 이용하여 측정한다. 실측을 위해 드론에 상용 휴대용 무선랜 라우터를 부착하고, 지상의 가시선 위치, 장애물 뒤, 차량 안, 차량 위에 노트북에 내장된 무선랜 수신기를 배치한다. 휴대용 무선랜 라우터에서 2.4 GHz 및 5 GHz 무선랜 비콘(Beacon)

신호를 송신하고, 드론을 이용하여 송신기의 고도와 송수신기 사이의 수평 거리를 변화시켜서 고도각 및 수평 거리와 경로 손실의 상관 관계, 장애물 유무 및 종류에 따른 경로 손실 변화를 측정한다. 또한, 실험에 사용한 드론이 반사 및 산란을 통해 수신 신호 전력에 미치는 영향을 파악하기 위해 무선랜 라우터를 드론에 부착한 상태에서 방사 패턴을 실측한다. 최종적으로 기존 공중-지상 채널 경로 손실 모델링에 널리 사용되는 로그-거리 예측 모델을 도입하고, 실측한 경로 손실 데이터를 이용하여 장애물 유무에 따른 공중-지상 채널 경로 손실 예측을 위한 파라미터를 도출한다.

II. 측정 환경 구성 및 경로 손실 계산

공중-지상 채널 측정 실험은 그림 1과 같이 한국항공대학교 드론비행장에서 무선랜 송수신기를 사용해서 실시하였다. 드론에 탑재한 휴대용 무선랜 라우터에서 신호를 발신하고 지상 수신기에서 수신 전력을 측정한다. 송신부 및 수신부 구성은 다음과 같다.

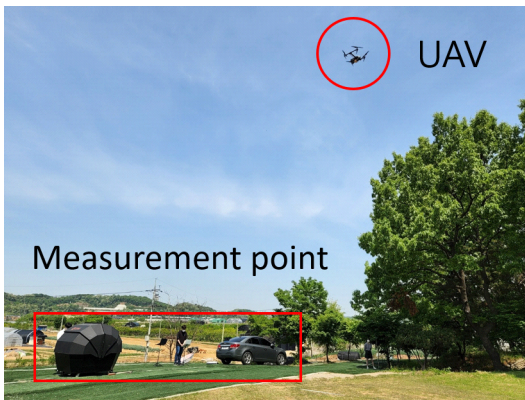


그림 1. 공중-지상 채널 측정 실험 환경 (한국항공대학교 드론비행장)
Fig. 1. A2G channel measurement setup (Drone test site at Korea Aerospace University).

2.1 송신부 구성

송신부는 드론과 상용 휴대용 무선랜 라우터로 구성된다. 드론은 인스파이어2를 사용했고, 기체 무게 3440g, 최대 이륙 중량 4000g 이며, 기체 크기는 가로 42.7cm × 폭 42.5cm × 높이 31.7cm 이다. 휴대용 무선랜 라우터는 4G LTE 네트워크를 백홀로 사용해서 Wi-Fi 4 무선랜 신호를 송수신하고, 2.4 GHz 및 5 GHz 대역을 지원한다. 무선랜 라우터는 송신 신호의 반사 및 산란을 최소화하고 드론 조종을 위한 센서를

표 1. 휴대용 무선랜 라우터 규격
Table 1. Specifications for the mobile Wi-Fi router

LTE	Standard	LTE Rel9 Cat4 FDD
	Frequency band	FD LTE: B3, B8
Wi-Fi	Standard	IEEE802.11a/b/g/n
	Frequency band	2.4GHz, 5GHz
	Antenna configuration	1TX/1RX
Power	Rated voltage	3.8V
	Battery capacity	2,450mAh
Size /Weight	110.6mm × 62.6mm × 8.6mm / 78g	



그림 2. 드론에 부착된 휴대용 무선랜 라우터
Fig. 2. Mobile Wi-Fi router attached to the drone

방해하지 않도록 그림 2와 같이 드론 하단에 부착하였다.

2.2 수신부 구성

수신부는 노트북 5대로 구성되어 있으며 외장 무선랜카드와 노트북 내장 무선랜카드를 사용하였다. 외장 무선랜카드는 USB로 노트북과 연결되는 상용 제품으로 2.4 GHz 및 5 GHz 대역에서 Wi-Fi 5 전송 규격을 지원하고 최대 433 Mbps로 전송 가능하다. 내장 랜카드는 2.4 GHz 및 5 GHz 대역에서 160 MHz 대역폭을 지원하고, 전송 규격은 표 2에서와 같이 노트북 마다 상이하다. Laptop 1의 경우 Wi-Fi 5 전송 규격을 지원하고 최대 1.73 GHz로 전송 가능하고, Laptop 2, 3의 경우 Wi-Fi 6 전송 규격을 지원하여 최대 2.4 Gbps로 전송 가능하다. 수신 신호를 측정하기 위해 그림 3과 같이 무선랜 네트워크를 모니터링하고 수신 신호 전력을 주기적으로 저장할 수 있는 공개 소프트웨어를 사용하였다.



그림 3. 공개 소프트웨어 Homedale을 사용한 수신 신호 측정 (5 GHz, CH40)
 Fig. 3. Received signal measurement using the freeware Homedale (5 GHz, CH40).

표 2. 무선랜카드 종류별 전송 규격
 Table 2. Specification for various wireless LAN cards

Type	Laptop Built-in 1	Laptop Built-in 2	Laptop Built-in 1	External LAN card
Measurement Location	LOS1/LOS2/ Inside car	On the car	Behind obstacles	All positions
Band	2.4/5 GHz	2.4/5 GHz	2.4/5 GHz	2.4/5 GHz
Standard	Wi-Fi 5	Wi-Fi 6	Wi-Fi 6	Wi-Fi 5
Max. rate	1.73Gbps	2.4Gbps	2.4Gbps	433 Mbps

2.3 경로 손실 계산

수신부의 무선랜카드에서 측정된 비콘 평균 수신 전력을 이용해서 경로 손실을 다음과 같이 계산한다.

$$PL(\text{dB}) = P_t(\text{dB}) + G_t(\text{dB}) + G_r(\text{dB}) - P_r(\text{dB}) \quad (1)$$

이때 P_t 는 휴대용 무선랜 라우터의 송신 전력으로 2.4 GHz와 5 GHz 두 대역 모두 11 dBm으로 동일하다. P_r 은 노트북에 내장된 무선랜 수신기에서 측정된 비콘의 평균 수신 전력을 의미하고, G_t 는 실험에 사용한

무선랜 라우터의 송신 안테나 이득으로 3 dBi 이며, G_r 은 수신부 무선랜카드의 안테나 이득을 나타내며 0 dBi로 설정하였다.

III. 휴대용 무선랜 라우터 방사패턴 측정

3.1 무선랜 라우터 방사패턴 측정 실험 환경 구성

송신 안테나 이득이 무선랜카드 수신 신호 전력에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험에 사용한 휴대용 무선랜 라우터의 방사패턴을 측정한다. 우선 무선랜 라우터 주변의 장애물을 최소화한 개방 공간에서 방사패턴 측정을 진행하고, 다음으로 무선랜 라우터를 드론에 부착한 후 방사패턴 변화를 측정한다. 무선랜 라우터를 1.2 m 높이에 고정하고, 송신기에서 10 m 떨어진 위치에 1.2 m 높이로 수신기를 배치한 후 2.4 GHz 및 5 GHz 대역에서 각각 실험을 진행한다. 개방 공간 실험에서는 그림 4와 같이 삼각대를 이용해서 무선랜 라우터가 앞쪽으로 돌출되도록 고정하고, 드론 부착 실험에서는 그림 2와 같이 무선랜 라우터가 부착된 상태에서 받침대를 이용해서 높이를 조정한다. 그림 5와 같이 삼각대를 이용해서 수신기 역할을 하는 노트북을 3대 배치하고, 2대는 내장 무선랜카드를 사용하고 나머지 1대는 외장 무선랜카드를 사용한다.



그림 4. 개방 상태 실험시 휴대용 무선랜 라우터
 Fig. 4. Mobile Wi-Fi router for open space experiments.



그림 5. 무선랜 송신기와 수신기 배치
 Fig. 5. Placement of Wi-Fi transmitter and receivers.

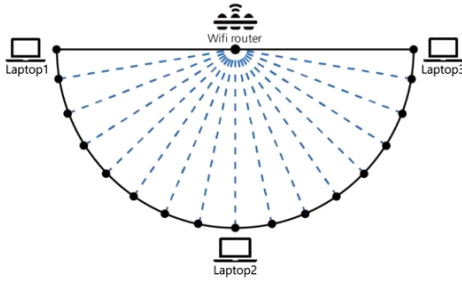


그림 6. 휴대용 무선랜 라우터 방사 패턴 측정 개념도
Fig. 6. Measurement setup for radiation pattern of mobile Wi-Fi router.

그림 6과 같이 무선랜 라우터를 기준으로 방위각을 $\frac{\pi}{16}$ 씩 변화시키면서 2초 간격으로 평균 수신 전력을 저장한다. 실험시 2.4 GHz 대역의 CH 9번, 5 GHz 대역의 CH 40번을 사용하였다.

3.2 방사패턴 측정 결과

그림 7과 8은 개방 공간에서 측정한 무선랜 라우터의 방사패턴을 나타낸다. 전체적으로 방위각 10도 ~ 170도 사이에서는 방사되는 신호 전력이 유사하게 나타나고, 0도 근처와 180도 근처에서는 신호 전력이 5 ~ 10 dB 정도 감쇄된다. 방위각에 따른 방사전력 최대 편차는 2.4 GHz 대역에서 내장 무선랜카드 1, 내장 무선랜카드 2, 외장 무선랜카드 각각 6.1 dB, 10.1 dB, 9.8 dB로 측정되었고, 5 GHz 대역의 경우 각각 8.7 dB, 8.4 dB, 10.6 dB로 측정되었다.

그림 9와 10은 휴대용 무선랜 라우터를 드론에 부착한 상태에서 측정한 방사패턴을 나타낸다. 전체적으

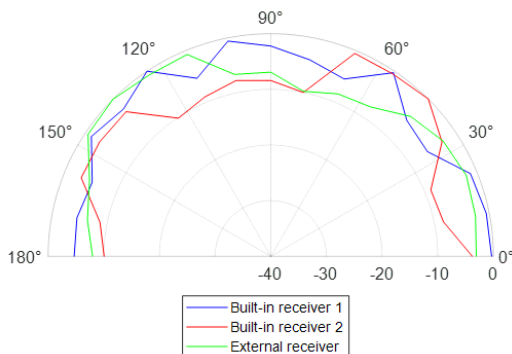


그림 7. 드론에 부착한 무선랜 라우터의 2.4 GHz 대역 방사패턴
Fig. 7. Open space radiation pattern of the mobile Wi-Fi router in 2.4 GHz band.

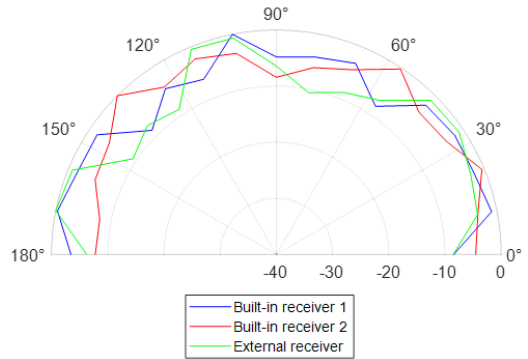


그림 8. 드론에 부착한 무선랜 라우터의 5 GHz 대역 방사패턴
Fig. 8. Open space radiation pattern of the mobile Wi-Fi router in 5 GHz band.

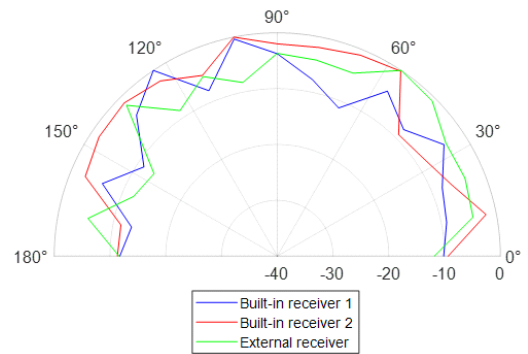


그림 9. 드론에 부착한 무선랜 라우터의 2.4 GHz 대역 방사패턴
Fig. 9. Radiation pattern of the mobile Wi-Fi router attached at the drone in 2.4 GHz band.

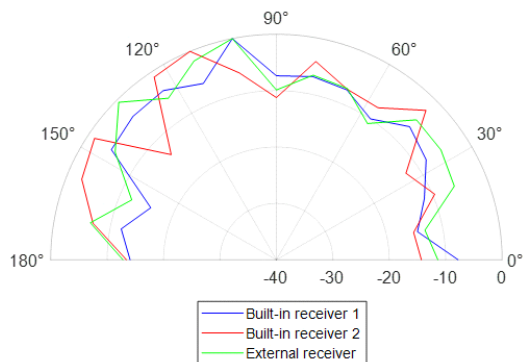


그림 10. 드론에 부착한 무선랜 라우터의 5 GHz 대역 방사패턴
Fig. 10. Radiation pattern of the mobile Wi-Fi router attached at the drone in 5 GHz band.

로 방위각 10도 ~ 170도 사이에서는 개방 공간 측정 결과와 마찬가지로 방위각에 무관하게 방사되는 신호 전력이 유사하게 나타난다. 0도 근처와 180도 근처에서는 10도 ~ 170도 범위에서 측정할 값 대비 신호 전력이 12 ~ 15 dB 정도 감소된다. 무선랜 라우터를 부착한 드론 기체가 방위각 0도 및 180도 방향으로의 신호 방사에 장애물로 작용한 것으로 보인다. 방위각에 따른 방사전력 최대 편차는 2.4 GHz 대역에서 내장 무선랜카드 1, 내장 무선랜카드 2, 외장 무선랜카드를 사용할 때 각각 13.3 dB, 11.4 dB, 13.4 dB로 측정되었고, 5 GHz 대역의 경우 각각 15.9 dB, 15.2 dB, 13.2 dB로 측정되었다. 드론 기체에 의한 반사 및 산란으로 인해 개방 공간에서 측정할 방사패턴 대비 전체적으로 방사패턴 편차가 증가한 것을 확인할 수 있다.

IV. 고도각에 따른 경로 손실 변화 측정

4.1 고도각에 따른 경로 손실 측정 환경 구성

공중-지상 채널에서 고도각에 따른 경로 손실 변화를 확인하기 위해 그림 11과 같이 드론에 탑재된 송신기와 지상 수신기의 거리를 28 m 로 고정하고, 드론의 고도를 변경하면서 수신 신호 전력을 실측한다. 이때 고도각은 0도에서 90도까지 10도 간격으로 변경한다.

노트PC에 내장된 무선랜카드를 사용했고, 노트북PC의 방향이 경로 손실에 미치는 영향을 확인하기 위해 노트북PC 2대는 장애물 없이 드론 방향을 정면으로 바라보도록 배치했고, 노트북PC 1대는 드론과 직각 방향으로 배치했다. 또한, 장애물이 고도각에 따른 경로 손실에 미치는 영향을 파악하기 위해 그림 12와 같이

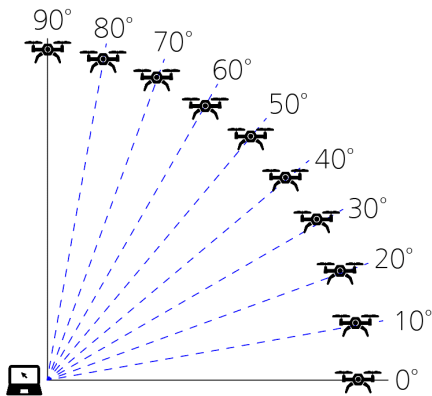


그림 11. 고도각에 따른 경로 손실 측정 환경 개념도
Fig. 11. Path loss measurement setup for various elevation angles.

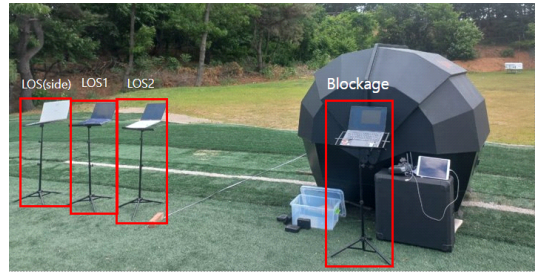


그림 12. 고도각에 따른 경로 손실 측정시 수신기 배치
Fig. 12. Placement of Wi-Fi receivers for path loss measurement according to the elevation angle.

폭 1.8 m × 높이 1.5 m × 두께 2.0 m 의 장애물 뒤에 노트북PC 1대를 추가로 배치하였다 (Blockage). 3장에서 방사패턴을 측정할 때와 동일하게 2.4 GHz 대역의 CH 9번, 5 GHz 대역의 CH 40번을 사용하였다.

4.2 고도각에 따른 경로 손실 측정 결과

그림 13과 그림 14는 2.4 GHz 대역과 5 GHz 대역에서 고도각에 따른 경로 손실 변화를 각각 나타낸다. LOS1(front)과 LOS2(front)는 노트북PC 2대를 드론 정면 방향으로 배치해서 측정할 값이고, LOS(side)는 노트북PC를 드론과 수직 방향으로 배치해서 장애물 없이 측정할 결과이며, Blockage는 장애물 뒤에서 실측한 값을 나타낸다. 전체적으로 주파수 대역, 수신기의 측정 환경과 상관없이 고도각이 증가함에 따라 경로 손실이 점진적으로 감소하는 경향을 보인다. 고도각 4.0도 대비 고도각 90도일 때 경로 손실을 비교하면, LOS1과 LOS2의 경우 2.4 GHz 및 5 GHz 대역에서 각각 7.2 dB, 8.1 dB 감소했고, LOS(side)의 경우 5.5 dB, 5.2 dB 감소했다. 특히 Blockage의 2.4 GHz에서

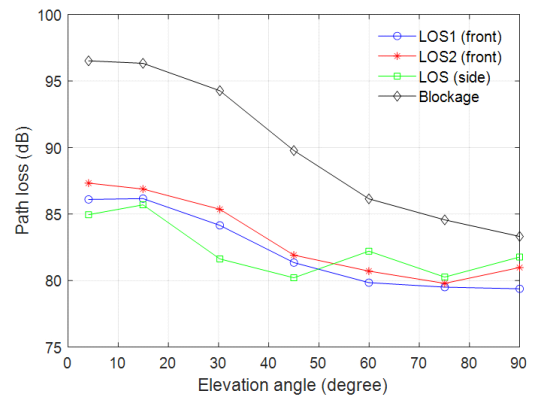


그림 13. 2.4 GHz 대역에서 고도각에 따른 경로 손실 변화
Fig. 13. Path loss variation according to the elevation angle in 2.4 GHz band.

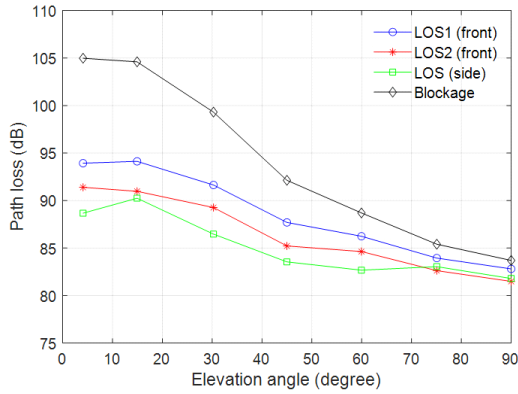


그림 14. 5 GHz 대역에서 고도각에 따른 경로 손실 변화
Fig. 14. Path loss variation according to the elevation angle in 5 GHz band.

감소폭이 13.2 dB, 5 GHz에서 18.2 dB로 경로 손실 감소폭이 5 GHz 대역에서 크게 증가하였다.

그림 15는 2.4 GHz 대역에서 $g = 14.0$ m, $h = 24.2$ m, $\theta = 60$ 도 일때 시간에 따른 경로손실 변화를 나타낸다. LOS1, LOS2의 경우 장애물 없이 수신기 정면에서 신호를 안정적으로 수신하므로 시간에 따른 경로 손실 변화가 작고, LOS(side)의 경우 순시적인 경로 손실 변화가 다소 증가하며, 장애물에 의해 신호 수신에 방해를 받는 Blockage의 경우 경로 손실 변동 폭이 매우 크다. 표 3은 주파수 대역 및 고도각 변화에 따른 경로 손실 표준편차를 나타낸다. 주파수 대역과 상관없이 표준편차는 유사하고, 고도각이 증가하면 경로 손실 표준편차가 점진적으로 감소하는 경향을 보인다. 다만, Blockage 환경에서는 비가시선 채널에서 가시선 채널로 전환되는 고도각 60도 ~ 75도 범위

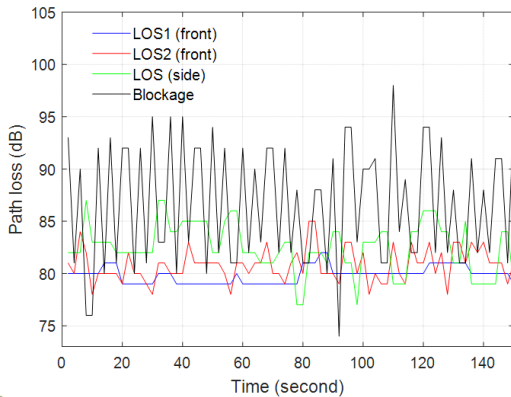


그림 15. 2.4 GHz 대역에서 고도각 60도 일때 시간에 따른 경로 손실 변화
Fig. 15. Path loss variation in 2.4 GHz band across time when the elevation angle is 60 degrees.

표 3. 주파수 대역 및 고도각에 따른 경로 손실 표준편차 (단위: dB)

Table 3. Standard deviation of path loss according to the frequency band and the elevation angle (Unit: dB).

Elevation angle	LOS1 (front)		LOS2 (front)		LOS (side)		Blockage	
	2.4G Hz	5GH z	2.4G Hz	5GH z	2.4G Hz	5GH z	2.4G Hz	5GH z
4 °	1.7	1.7	2.3	2.0	2.7	2.6	3.2	2.8
15 °	1.8	1.3	2.5	1.7	3.5	2.3	3.3	2.2
30 °	1.7	1.0	2.0	1.8	3.0	3.8	3.3	2.5
45 °	1.2	1.0	1.8	2.5	3.7	2.8	4.7	2.8
60 °	1.1	1.5	1.6	2.4	2.7	2.1	5.8	4.3
75 °	1.4	1.4	1.8	2.0	2.6	1.2	3.3	5.4
90 °	1.3	0.9	1.9	2.0	2.9	1.0	3.1	3.4

에서 표준편차가 증가하는 현상이 관찰된다.

V. 거리 및 고도에 공중-지상 채널 경로 손실 측정

5.1 수평거리 및 고도에 따른 경로 손실 측정

송수신기 사이의 수평거리와 드론에 탑재된 송신기의 고도를 변경하면서 공중-지상 채널 경로 손실 변화를 측정한다. 그림 16 및 그림 17에서와 같이 실험에는 총 5대의 노트북 수신기를 사용했고, 내장 무선랜 카드와 외장 무선랜카드를 적용한 실험을 각각 진행했다. 수신기는 드론 정면 방향 가시선 환경 (LOS1), 무선랜 라우터 동작 모니터링 (LOS2), 차량 트렁크

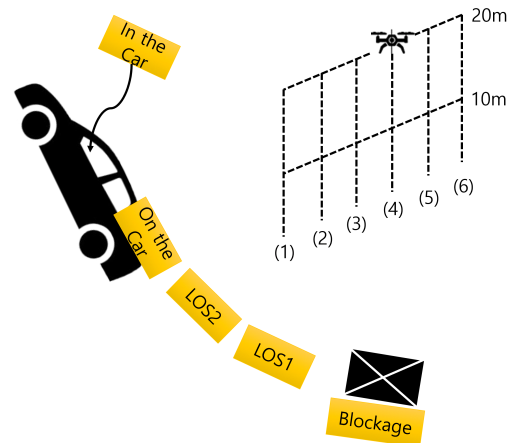


그림 16. 수평거리 및 고도에 따른 경로 손실 측정을 위한 개념도

Fig. 16. Path loss measurement setup for various ground distances and altitudes.



그림 17. 수평거리 및 고도에 따른 경로 손실 측정을 위한 수신기 배치
 Fig. 17. Placement of Wi-Fi receivers for path loss measurement according to the ground distance and altitude.

위 (On the car), 차량안 운전석 뒷좌석 (Inside car), 장애물 뒤(Blockage)에 각각 배치했다. 이 중에서 LOS2를 제외한 4대를 실제 경로 손실 측정에 사용하였다.

2.4 GHz 대역에서는 채널 9번, 5 GHz 대역에서는 채널 40번을 사용했고, 고도는 10 m, 20 m 두가지로 설정했다. 수평거리는 2.4 GHz 대역의 경우 10 m ~ 45 m 범위에서 변경했고, 5 GHz 대역의 경우 경로 손실 증가를 고려하여 7 m ~ 35 m 범위에서 단계적으로 변화시켰다. 수신 신호 전력은 2초 간격으로 기록하고, (1)을 이용해서 경로 손실을 계산하였다.

5.2 공중-지상 채널 경로 손실 측정 결과

그림 18과 그림 19는 각각 2.4 GHz 대역과 5 GHz 대역에서 내장 랜카드를 사용해서 수평거리 및 드론 고도에 따른 평균 경로 손실을 측정된 결과를 나타낸다. 차량 위(On the car)의 경우 송신기에서 직접 수신된 신호와 차량에 의해 반사된 신호가 동시에 수신되므로 2.4 GHz 대역과 5 GHz 대역 모두 LOS 대비 차량 위에서 측정된 경로 손실이 낮게 나타난다. 특히 주파수가 높아질수록 반사파의 전력이 낮아지므로 차량 위와 LOS의 경로 손실 차이가 2.4 GHz 대역에서 높게 관측되고 5 GHz 대역에서 감소한다. 차량안에서 측정할 경우 차체가 일종의 도파관으로 작용하여 2.4 GHz 대역의 경우 LOS 대비 차량안의 경로 손실이 최대 4.9 dB 감소하고, 5 GHz에서 고도 10 m ($h = 10\text{ m}$)인 경우 경로 손실이 최대 3.5 dB 감소한다. 5 GHz 대역에서 고도 20 m ($h = 20\text{ m}$)인 경우 수평거리 30 m 이하에서는 고도각이 커서 차량 지붕에 의한 감쇄가 크게 작용하므로 LOS 대비 차량안의

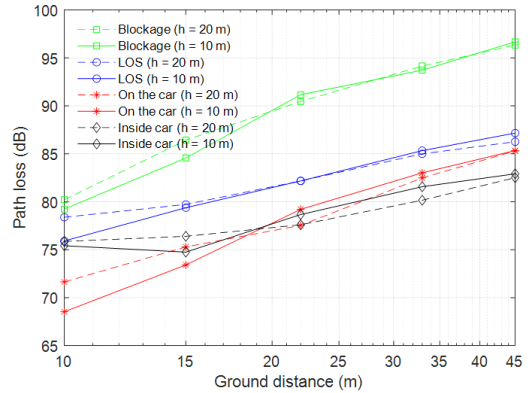


그림 18. 내장 무선랜카드 사용시 2.4 GHz 대역에서 수평거리 및 고도에 따른 경로 손실
 Fig. 18. Path loss according to the ground distance and altitude when built-in LAN cards are used in 2.4 GHz band.

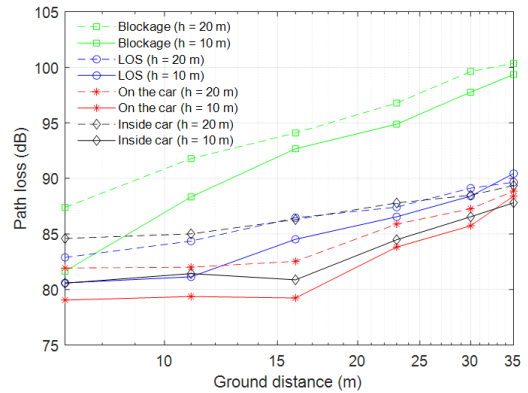


그림 19. 내장 무선랜카드 사용시 5 GHz 대역에서 수평거리 및 고도에 따른 경로 손실
 Fig. 19. Path loss according to the ground distance and altitude when built-in LAN cards are used in 5 GHz band.

경로 손실이 크게 나타나고, 수평거리가 30 m를 초과하면 도파관 현상에 의해 LOS 대비 차량안의 경로 손실이 작게 측정된다. 2.4 GHz 및 5 GHz 대역 모두 수신기가 장애물 뒤에 위치한 경우 LOS 대비 현저한 경로 손실 증가를 보인다. 두 대역 모두 수평거리가 먼 경우 고도각이 낮으므로 LOS 대비 추가 경로 손실이 크게 나타나고, 수평거리가 감소하면 고도각이 증가해서 장애물에 의한 영향이 약해지므로 추가 경로 손실이 감소한다.

그림 20은 2.4 GHz 대역, 고도 10 m에서 내장 및 외장 랜카드의 경로 손실을 나타내고, 그림 21은 2.4 GHz 대역, 고도 20 m에서 내장 및 외장 랜카드의 경로 손실을 비교해서 보여준다. 두 경우 모두 전체적으로 외장 랜카드를 사용할 경우 내장 랜카드 대비 경로

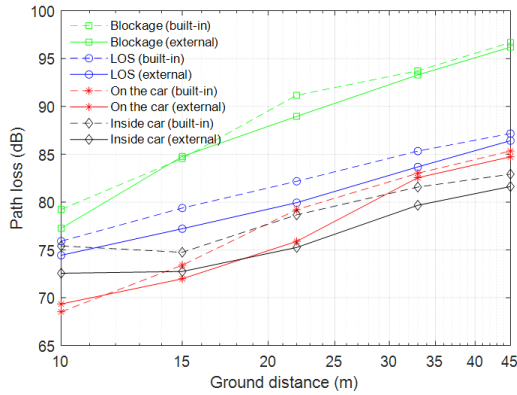


그림 20. 2.4 GHz 대역, 고도 10 m에서 내장 및 외장 무선랜카드 경로 손실 비교
Fig. 20. Path loss comparison between built-in and external LAN cards when the altitude is 10 m in 2.4 GHz band.

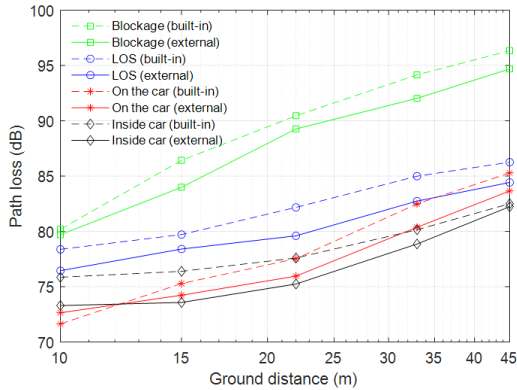


그림 21. 2.4 GHz 대역, 고도 20 m에서 내장 및 외장 무선랜카드 경로 손실 비교
Fig. 21. Path loss comparison between built-in and external LAN cards when the altitude is 20 m in 2.4 GHz band.

손실이 감소하는 경향을 보인다. 내장 랜카드와 외장 랜카드로 측정된 경로 손실의 차이는 최대 3 dB 이내 이고, 수신기의 RF 특성에 의한 편차로 판단된다.

기존 공중-지상 채널 특성 측정 연구에서 거리에 따른 경로 손실 변화를 계산하기 위해 로그-거리 경로 손실 예측 모델이 널리 사용된다. 본 연구에서 수행한 비면허대역 공중-지상 채널 경로 손실 측정 결과에 다음과 같이 로그-거리 경로 손실 예측 모델을 적용한다.

$$PL(\text{dB}) = 10\alpha \log_{10} \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2} + \beta + X_\sigma \quad (2)$$

이때 α 는 경로 손실 지수이고, d 는 송수신기 사이의 수평거리이며, h_t 와 h_r 은 지상에서 송신기 및 수신

기의 고도 및 높이를 나타낸다. h_t 의 경우 드론 센서에서 측정된 고도를 적용했고, h_r 은 측정 위치에 따라 LOS 1.2 m, 차량안 1.0 m, 차량 위 1.5 m, 장애물 뒤 1.3 m로 설정하였다. 또한, β 는 $r = \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2} = 1$ m 일 때 경로 손실 상수를 나타내고, X_σ 는 로그 정규분포를 따르는 랜덤 변수로 평균 0, 표준편차 σ 를 갖는다.

그림 22와 23은 내장 무선랜카드를 사용해서 2.4 GHz 및 5 GHz 대역에서 실측한 경로 손실 데이터와 (2)에서 정의한 로그-거리 모델에서 예측한 경로 손실을 비교해서 나타낸다. 경로 손실 예측값은 로그-거리

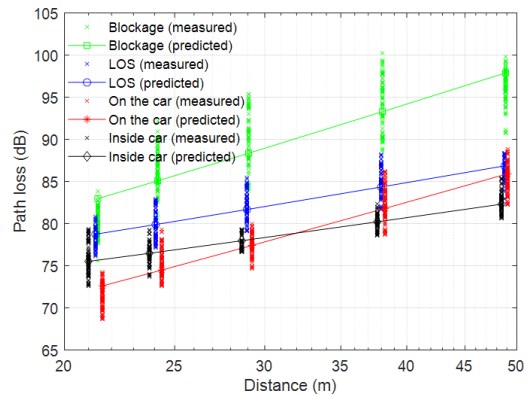


그림 22. 내장 무선랜카드 사용시 2.4 GHz 대역에서 송수신기 거리에 따른 경로 손실 실측값과 예측값 비교
Fig. 22. Path loss comparison between measurement and prediction according to the distance between the transmitter and receivers when built-in LAN cards are used in 2.4 GHz band.

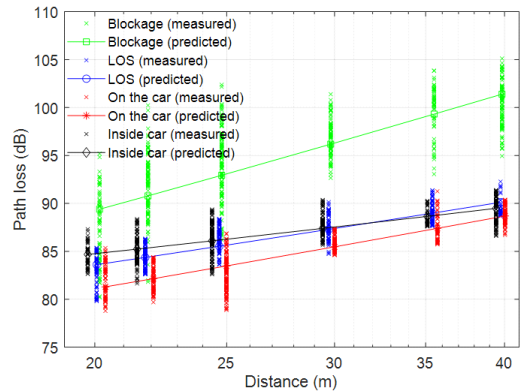


그림 23. 내장 무선랜카드 사용시 5 GHz 대역에서 송수신기 거리에 따른 경로 손실 실측값과 예측값 비교
Fig. 23. Path loss comparison between measurement and prediction according to the distance between the transmitter and receivers when built-in LAN cards are used in 5 GHz band.

모델에 실측 데이터를 적용하여 최소 자승 오차 기준으로 계수 α 와 β 를 정한 후 계산하였다. 실측 데이터 ('x'로 표시)와 경로 손실 모델에서 예측한 값(실선으로 표시)이 2.4 GHz와 5 GHz 대역 모두 대체로 일치함을 확인할 수 있다. 다만, 드론 기체와 수신기 주변 물체 등에 의한 반사 및 산란에 의한 다중 경로 페이딩, 장애물에 의한 가리움 효과 (Shadowing) 등에 의해 예측값과 실측값 사이에 오차가 발생한다.

표 4는 각 측정 환경 및 수신기 위치에서 측정된 경로 손실 데이터에 최소 자승 오차 기반 선형 회귀법을 이용해서 구한 α , β , RMSD(Root Mean Square Deviation)를 나타낸다. 이때 (2)에서 제시한 경로 손실 예측 모델이 unbiased 조건을 만족하는 경우 RMSD는 σ 와 동일하다. LOS 환경에서 경로 손실 지

수는 자유 공간 경로 손실 지수에 근접하고, 2.09 ~ 2.37 범위의 값을 갖는다. 차량 위의 경우 LOS 대비 경로 손실 지수가 다소 증가해서 2.4 GHz 대역의 경우 3.17 ~ 3.88, 5 GHz 대역의 경우 2.02 ~ 2.64 범위의 값을 갖는다. 장애물 뒤에 위치한 경우 경로 손실 지수는 3.33 ~ 4.35로 가장 크게 나타난다. 차량안의 경우 도파관 현상으로 인해 2.4 GHz, $h=20\text{m}$, 외장 랜카드로 측정된 경우를 제외한 모든 환경에서 경로 손실 지수가 2 보다 작게 나타난다. RMSD의 경우 LOS, 차량 위, 차량안에서는 유사한 값을 가지고 장애물 뒤에서 측정시 급격히 증가한다. 또한, 내장 랜카드에 비해 외장 랜카드에서 RMSD가 증가하는 경향을 보인다.

VI. 결 론

본 논문에서는 드론, 휴대용 무선랜 라우터, 내장 및 외장 무선랜카드를 이용해서 비면허대역 공중-지상 채널 경로 손실을 측정하였다. 실측을 통해 개방 상태 대비 드론에 장착한 무선랜 라우터의 방사패턴 편차가 증가함을 확인했고, 송수신기 사이의 거리가 동일할 때 고도각 증가에 따라 경로 손실이 감소함을 보였다. 또한, 주파수 대역, 수평거리, 송신기 고도, 수신기가 위치한 환경을 반영한 경로 손실 예측 파라미터를 제시하였다. 본 논문에서 제시한 경로 손실 모델은 도심 항공 모빌리티를 위한 지상 기지국 배치, 드론 기지국 및 배송용 드론 등을 위한 이동 경로 설정 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, May 2016. (<https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470933>)

[2] B. Li, Z. Fei, and Y. Zhang, "UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 2241-2263, Apr. 2019. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2887086>)

[3] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and Y.-H. Nam, "A tutorial on UAVs for wireless

표 4. 공중-지상 채널을 위한 경로 손실 예측 모델 파라미터 Table 4. Parameters for the path loss prediction model in air-to-ground channels.

Type	Location	Path loss exponent (α)	Path loss constant (β)	RMSD (dB)
2.4 GHz h = 10 m Built-in	LOS (front)	2.16	51.8	2.09
	On the car	3.28	32.1	5.31
	Blockage	3.33	42.5	12.10
	Inside car	1.69	55.1	3.64
2.4 GHz h = 20 m Built-in	LOS (front)	2.37	46.8	2.35
	On the car	3.88	20.2	2.99
	Blockage	4.35	24.2	9.44
	Inside car	1.98	48.8	1.37
5 GHz h = 10 m Built-in	LOS (front)	2.09	57.4	1.60
	On the car	2.02	55.7	2.64
	Blockage	3.41	47.1	11.36
	Inside car	1.59	62.5	4.13
5 GHz h = 20 m Built-in	LOS (front)	2.33	52.8	1.73
	On the car	2.64	46.2	2.05
	Blockage	4.30	32.4	10.06
	Inside car	1.72	61.9	1.59
2.4 GHz h = 10 m External	LOS (front)	2.32	47.8	5.63
	On the car	3.17	32.5	7.09
	Blockage	3.50	39.1	12.1
	Inside car	1.94	49.3	8.08
2.4 GHz h = 20 m External	LOS (front)	2.30	45.9	5.04
	On the car	3.24	28.7	7.36
	Blockage	4.17	25.5	16.2
	Inside car	2.71	36.0	8.20

- networks: Applications, challenges, and open problems,” *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2334-2360, 3rd Quart. 2019. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>)
- [4] G. Geraci, A. Garcia-Rodriguez, L. G. Giordano, D. Lopez-Perez, and E. Bjoernson, “Supporting UAV cellular communications through massive MIMO,” *IEEE Int. Conf. Commun. (ICC) Wkshps.*, pp. 1-6, Jul. 2018. (<https://doi.org/10.1109/ICCW.2018.8403630>)
- [5] Y. Zeng, J. Lyu, and R. Zhang, “Cellular-connected UAV: Potential, challenges, and promising technologies,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 1, pp. 120-127, Feb. 2019. (<https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1800023>)
- [6] X. Cai, et al., “Low altitude UAV propagation channel modelling,” *EUCAP*, pp. 1443-1447, Mar. 2017. (<https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928479>)
- [7] J. Rodríguez-Piñeiro, et al., “Air-to-ground channel characterization for low-height UAVs in realistic network deployments,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 2, pp. 992-1006, Feb. 2021. (<https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3016164>)
- [8] X. Cai, et al., “Empirical low-altitude air-to-ground spatial channel characterization for cellular networks connectivity,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 10, pp. 2975-2991, Oct. 2021. (<https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3088715>)
- [9] L. Kong, L. Ye, F. Wu, M. Tao, G. Chen, and A. V. Vasilakos, “Autonomous relay for millimeter-wave wireless communications,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 35, no. 9, pp. 2127-2136, Sep. 2017. (<https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2720518>)
- [10] W. Khawaja, O. Ozdemir, and I. Guvenc, “UAV air-to-ground channel characterization for mmWave systems,” *IEEE VTC-Fall*, pp. 1-5, Sep. 2017. (<https://doi.org/10.1109/VTCFall.2017.8288376>)
- [11] J. Zhao, F. Gao, L. Kuang, Q. Wu, and W. Jia, “Channel tracking with flight control system for UAV mmWave MIMO communications,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 6, pp. 1224-1227, Jun. 2018. (<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2824800>)
- [12] V. Semkin, et al., “Lightweight UAV-based measurement system for air-to-ground channels at 28 GHz,” *IEEE Annu. Int. Symp. PIMRC*, pp. 848-853, Sep. 2021. (<https://doi.org/10.1109/PIMRC50174.2021.9569561>)
- [13] R. Amorim, et al., “Radio channel modeling for UAV communication over cellular networks,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 6, no. 4, Aug. 2017. (<https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2710045>)
- [14] A. Al-Hourani and K. Gomez, “Modeling cellular-to-UAV path-loss for suburban environments,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 82-85, Feb. 2018. (<https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2755643>)
- [15] X. Cai, et al., “An empirical air-to-ground channel model based on passive measurements in LTE,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 2, pp. 1140-1154, Feb. 2019. (<https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2886961>)
- [16] M. Gharib, S. Nandadapu, and F. Afghah, “An exhaustive study of using commercial LTE network for UAV communication in rural areas,” *IEEE Int. Conf. Commun. (ICC) Wkshps.*, pp. 1-6, Jun. 2021. (<https://doi.org/10.1109/ICCWshops50388.2021.9473547>)
- [17] K. Kim, et al., “Field measurement campaign on ground-to-air channels in LTE networks,” *ICEIC*, pp. 1-3, Jan. 2021.
- [18] S. Moon, H. Kim, and I. Hwang, “3GPP based UAV channel modelling and performance analysis,” *IEIE Summer Conf.*, pp. 724-725, Aug. 2020.
- [19] Y. S. Meng and Y. H. Lee, “Measurements and characterizations of air-to-ground channel over sea surface at C-band with low airborne altitudes,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 4, pp. 1943-1948, May 2011.

(<https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2136364>)

- [20] K. Kim, et al., "Path loss measurement of air-to-ground channels in unlicensed bands," in *Proc. KICS Fall Conf.*, pp. 1-2, Nov. 2019.
- [21] D. He, et al., "The design and applications of high-performance ray-tracing simulation platform for 5G and beyond wireless communications: A tutorial," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 21, no. 1, 1st Quart. 2019. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2865724>)

이 헌 제 (Hun Je Lee)



2017년 3월~현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 학사과정 재학 중
<관심분야> 이동통신, 무인기 통신, 통신신호처리
[ORCID:0000-0002-5454-7031]

한 수 정 (Su Jeong Han)



2019년 3월~현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 학사과정 재학 중
<관심분야> 이동통신, 무인기 통신, 통신신호처리
[ORCID:0000-0001-9172-2356]

변 정 일 (Jung-II Byeon)



2017년 3월~현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 학석사통합과정 재학 중
<관심분야> 레이더 신호처리, 이동통신, 무인기 통신
[ORCID:0000-0002-6396-1453]

최 지 훈 (Jihoon Choi)



1997년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 학사
1999년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 석사
2003년 2월 : KAIST 전자전산학과 박사
2003년 3월~2004년 2월 : Univ. of Texas, Austin 방문연구원
2004년 4월~2008년 8월 : 삼성전자 통신연구소 책임연구원
2008년 9월~현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 교수
<관심분야> 이동통신, 무인기 통신, 레이더 신호처리, 무선 전력 전송, 이동통신, 통신신호처리
[ORCID:0000-0002-5433-2241]