

무인 항공기 채널 모델링 및 분석 기술 동향 연구

노시찬*, 정태훈*, 김광순**, 채찬병^o, 음수빈***, 최증원***

UAV Channel Models: A Survey and Performance Evaluation

Sichan Noh*, Taehun Jung*, Kwang Soon Kim**, Chan-Byoung Chae^o,
Soo Bin Um***, Jeung Won Choi***

요약

무인 항공기의 가격 하락과 크기 감소는 무인 항공기 사용량을 전 세계적으로 크게 증가시키고 있다. 무인 항공기는 지상 시스템과 직접적으로 통신하는 교신 목적으로 사용되거나 단말과 기지국 사이의 연결 노드(Relay Node)로써 활용되기도 한다. 이에 따라, 무인 항공기 통신 채널에 대한 이해와 분석이 요구되었고, 여러 가지 채널 모델링 기법과 채널 특징 분석에 관한 연구들이 진행 중이다. 무인 항공기 통신 채널은 무인 항공기의 높은 비행 고도로 인해 강한 LoS (Line of Sight) 성분의 확보가 가능하고 3차원 상의 자유로운 움직임으로 급격한 채널 환경 변화를 겪는 등 기존의 셀룰러 통신채널과 다른 특징을 갖는다. 따라서 기존과는 다른 새로운 방식의 채널 모델링 및 분석 기법이 필요하다. 본 논문에서는 무인 항공기 채널 모델링 기법과 특징에 대한 선행 연구를 요약 및 분석한다. 또, 자체 제작한 강남 지형을 바탕으로 도심지역에서의 무인 항공기의 채널 모델링 및 분석결과를 고찰한다.

Key Words : UAV, UAV A2G channel, Ray-based channel model, GBSM, MPCs

ABSTRACT

The low cost and the miniaturization of unmanned aerial vehicles (UAVs) has greatly increased the use of UAVs worldwide. UAVs are used for a direct communication purpose with ground station, and also it served as a relay node between users and base station. Thus, it is desirable to understand the UAV communication channel. Many researchers have studied different channel modeling techniques and channel characterizations. The UAV channel has different characteristic compared to conventional cellular communication channels, such as strong LoS component due to the high altitude and rapidly varying channel from free 3-Dimensional movement of the device, etc. Therefore, new methods of channel modelling and analysis are required. This paper summarizes prior work on UAV channel modeling and analyzes the characteristics of the UAV channel. we also model and analyze the UAV channel in an urban area-Gangnam station that we have implemented.

* 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다. (UD160070BD)

** 본 논문에 실린 실험결과의 일부는 한국통신학회 동계종합학술발표회에서 발표된 바 있음[26]

• First Author : (ORCID:0000-0001-7907-0084)School of Integrated Technology, Yonsei University, scnoh@yonsei.ac.kr, 학생회원
^o Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-9561-3341)School of Integrated Technology, Yonsei University, cbchae@yonsei.ac.kr, 정회원

* (ORCID:0000-0001-5542-8520)School of Integrated Technology, Yonsei University, taehun.jung@yonsei.ac.kr, 학생회원

** (ORCID:0000-0002-5706-174X)School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, ks.kim@yonsei.ac.kr, 중신회원

*** (ORCID:0000-0002-1133-0027, ORCID:0000-0002-3642-2323)Agency for Defense Development, {sbum1989, jwchoi}@add.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2017-10-305, Received October 12, 2017; Revised February 1, 2018; Accepted February 1, 2018

1. 서 론

무인 항공기는 항공기 내에 조종사의 탑승 없이 지상에서의 원격 조종 또는 무인 항공기의 자체 조종으로 하늘을 날 수 있는 비행체이다. 과거 무인 항공기는 정찰과 감시 목적으로 주로 군용 통신에 사용되었다. 그러나 최근, 무인 항공기의 낮은 가격, 크기 감소, 다루기 쉬운 작동법 등으로 인해 촬영, 자연 재해, 구조, 야생 생물 관찰, 화물 운반, 정밀 농업 등의 민간 분야까지도 무인 항공기의 사용이 확장되고 있다¹⁾. 또한 다가오는 5세대 통신에서 사용자의 통신성능 향상 등의 다양한 시나리오의 어플리케이션에도 사용될 전망이다^{2,3)}.

다양한 분야에 사용되는 무인 항공기는 카메라, 센서, 음파 감지기 등의 부가적인 기기들을 부착하여 운용되거나 모바일 애드혹 네트워크(Ad Hoc Network)에서 단말과 기지국 사이의 통신 성능 향상을 위한 연결 노드로 사용될 수 있다⁴⁻⁶⁾. 전자의 경우, 지상 시스템의 명령으로 무인 항공기를 제어 및 통제하고 지상으로 데이터를 전송할 수 있는 교신 목적의 통신이 이루어져야 한다. 실시간으로 오차가 없는 정보를 전달하기 위해 무인 항공기에 빔포밍(Beamforming)을 적용하여 간섭을 제거하는 방법과 지상 시스템에 다중 안테나를 사용하여 통신의 효율을 높이는 등의 다양한 연구들이 제안되고 있다⁷⁾. 그러나 이러한 연구들을 제안하기에 앞서, 무인 항공기와 지상 시스템 사이의 채널을 모델링하고 분석하는 것이 무엇보다 중요하다. 무인 항공기 채널에 대한 이해를 바탕으로 정확한 알고리즘이 제안되어야 하고, 상황에 맞는 성능 평가가 이루어져야 하기 때문이다. 후자의 경우, 많은 양의 정보를 정확하게 전달할 수 있는 통신이 가능해야 한다. 이를 위해, 무인 항공기의 이동경로를 단말과 최적화 시켜 처리율(Throughput)을 증가 시키거나 여러 개의 무인 항공기를 이용하여 통신 범위(Coverage)를 넓히는 연구들이 제안되고 있다^{5,8)}. 정확한 시스템 디자인이 성능을 크게 좌우하는 이러한 연구 또한 무인 항공기 채널의 특징에 대한 이해와 분석이 먼저 이루어져야 한다.

무인 항공기 채널에 관한 연구는 셀룰러통신 채널과 차량 간 통신채널의 연구에 비해 그 수가 상당히 적다. 그 이유는 이전 통신 채널과는 다른 무인 항공기 채널만의 특별한 환경 때문이다. 예를 들어, 건물 등의 장애물 보다 높은 무인 항공기의 비행 고도는 일반적인 셀룰러통신과는 달리 강한 LoS성분의 확보를 가능하게 한다. 게다가, 무인 항공기의 장점인 3차원

공간상의 자유로운 움직임은 건물과 지형에 따라 속도잉과 반사파를 생기게 하고 결국 급격한 채널 변화를 야기하게 된다. 차량 보다 빠른 속도로 비행하는 무인 항공기가 매우 큰 도플러 주파수를 일으키는 것 또한 무인 항공기 채널의 특별한 성질이다.

기존 채널과는 다른 특별한 성질을 갖는 무인 항공기 채널은 무인 항공기 간의 데이터를 주고받는 A2A (Air-to-Air) 채널, 무인 항공기와 지상 간의 데이터를 주고받는 A2G (Air-to-Ground) 채널로 분류할 수 있다. 이러한 채널은 서로 다른 특징을 갖는다. 높은 비행고도에서 무인 항공기 간의 통신을 하는 A2A 채널은 지면 장애물의 영향을 적게 받아 A2G 채널보다 우세한 LoS 성분을 확보할 수 있다. 그러나 무인 항공기 간의 빠른 비행 속도로 인해 높은 도플러 주파수를 일으킨다⁹⁾. A2G 채널은 지면의 건물, 나무 등의 장애물로 인해 A2A 채널 보다 약한 LoS 성분을 갖는다. 낮은 고도로 비행하는 무인 항공기의 경우는 언덕 등의 영향으로 많은 양의 다중경로성분(Multipath Components, MPCs)이 발생된다.

다음 표 1은 기존의 무인 항공기 A2G 채널의 모델링 방법 및 특징을 요약한 것이다. 표를 통해 기존 연구들의 여러 가지 채널 모델링 방법과 채널 분석을 위한 실험 변수 그리고 그에 따른 결과를 알 수 있다. 그러나 기존의 채널 분석에 관한 연구들은 채널의 주변 환경을 자세하게 고려하지 않거나 안테나 패턴 등이 반영되지 않는 등 제한적인 상황에서 분석이 이루어졌다. 본 논문에서는 A2G 채널에 초점을 맞춘 여러 가지 채널 모델링 방법 및 특징에 대한 기존의 연구들을 요약 및 분석한다. 또한, 분석을 통해 도출한 기존의 채널 모델링 및 분석 방법의 장단점을 고려하여, 실제 환경을 반영하고 안테나 패턴과 무인 항공기 비행 고도를 고려한 무인 항공기와 지상간의 A2G 채널 모델링 및 특징을 분석한다.

본 논문의 순서는 다음과 같다. 2장에서는 무인 항공기 A2G 채널의 구조와 특징을 소개하고, 3장에서는 Ray-based 채널 모델, 기하학 기반 확률적 채널 모델(Geometry-based Stochastic Channel Model, GBSM), 실제 측정을 이용한 여러 가지 채널 모델링 방법 및 특징에 대한 선행 연구를 요약 및 분석한다. 4장에서는 자체 개발한 강남 지형에서 기존의 여러 가지 채널 모델링 방법을 고려하여 무인 항공기에 배치되는 안테나 종류와 비행 고도에 따른 수신 파워와 지면 확산 분포의 분석을 바탕으로 무인 항공기 A2G 채널 모델링 및 특징을 분석한다. 5장에서는 결론을 맺는다.

표 1. UAV A2G 채널 모델 비교
Table 1. Comparison of UAV A2G channel models

Model	Type	Parameters	Contribution/conclusion
Q. Feng <i>et al.</i> [13]	Ray-based	UAV height, elevation angle from mobile	Proposed statistical model; A2G channel has a much higher LoS components
W. Khawaja <i>et al.</i> [14]	Ray-based	UAV height and flight distance, environment, frequency	Compared received power, CDF of RMS-DS in mmWave A2G Channel; received power follows the Two-ray model
K. Daniel <i>et al.</i> [15]	Ray-based	UAV height and flight distance, BS height	Analyzed the applicability of existing channel models and show the coverage and connectivity depending on base station heights
Gao Xi jun <i>et al.</i> [17]	GBSM	UAV height and flight direction, multi-antenna layout, diffuser position	Simulated the UAV-MIMO channel capacity and condition number; reasonably arranging the antenna and flight distance of UAV improved transmission performance
L. Zeng <i>et al.</i> [18]	GBSM	UAV flight direction, elevation angel, multiantenna layout	Investigated the normalized temporal correlation and proposed a 3D cylinder GBSM model; obtain reliable MIMO performance, UAV have to move horizontally
N. Schneck enburger <i>et al.</i> [19]	GBSM	Delay and doppler frequency of all MPCs	Method to describe a GBSM model and this model can be adapted to wide range of parameters
Jordi Romeu <i>et al.</i> [20]	Practical	UAV height and flight distance, multi-antenna layout	Experimental set-up has been tested between an UAV and a ground segment; multiple directive antennas on the UAV provide robust channel
N. Schneck enburger <i>et al.</i> [21]	Practical	UAV height, ground surfaces, grazing angles, distance between Ground station and UAV	Analyzed LoS power variation in the A2G channel; A2G channel modeled very well using a two-ray model
Xuesong Cai <i>et al.</i> [22]	Practical	UAV height and flight distance	Conducted measurement campaign for the low altitude UAV A2G channel

II. 무인 항공기 A2G 채널 특징

무인 항공기 A2G 채널 모델 구조는 그림 1처럼 지상에 위치한 시스템과 지면으로부터 높이 위치해 있는 무인 항공기로 구성된다. 기존의 통신 채널과는 달리, 무인 항공기의 높은 비행 고도는 지상 장애물의 영향을 감소시킨다. 이에 따라, 무인 항공기 A2G 채널은 강한 LoS 성분으로 구성된다. 그러나 항상 LoS가 보장되는 것은 아니다. 무인 항공기 자체적인 움직임으로 인한 다중경로 변수, 건물에 의한 쉐도잉 등의 통신 성능을 저해시키는 요소가 발생되기 때문이다.

그림 2는 사막 또는 바다 지형 등에서 무인 항공기 A2G 채널의 경로손실(Path Loss)을 나타내는 Two-ray 모델^[10]을 나타낸다. 이 모델은 LoS 성분과 지면에서 반사된 NLoS (None Line of Sight) 성분의 합으로 이루어진다. Two-ray 모델은 무인 항공기 채널

모델링을 위해 규범적으로 사용되어 왔다. 그러나 평평한 지면을 가정한 Two-ray 모델은 무인 항공기와 기지국 사이의 거리가 특정 거리 이상이 될 때 모델의 정확도가 떨어지게 되는 문제점이 있다. 무인 항공기가 건물 주변에서 낮은 고도로 비행할 경우 또한 정확도가 감소하게 된다. 그림 3은 이러한 Two-ray 모델의 단점을 보완하기 위해 제안되고 있는 CE2R (Curved-earth Two-ray) 모델을 나타낸다. CE2R 모델은 무인 항공기와 기지국 사이의 거리, 구형 파 간의 발산, 지면의 거친 정도, 전기적 특성인 유전율과 도전율을 모두 고려한 모델이다^[10].

무인 항공기 A2G 채널의 또 다른 특징 중 하나는 바로 다중경로 성분이다^[11]. 다중경로 성분은 무인 항공기 동체나 날개의 움직임과 지면의 장애물에 의해 발생한다. 지면에 의한 다중경로 성분에 비해 무인 항공기 자체로 발생하는 다중경로 성분은 그 값이 약하

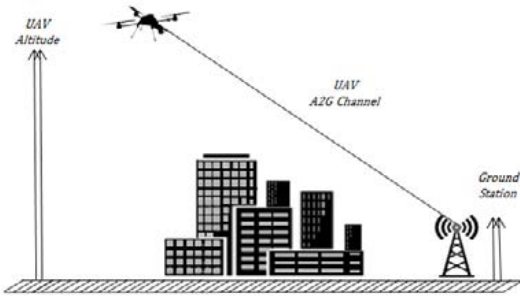


그림 1. 무인 항공기 채널 모델 환경
Fig. 1. UAV A2G channel environment model

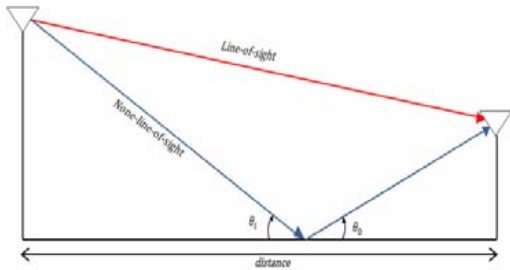


그림 2. Two-ray 모델
Fig. 2. Two-ray model

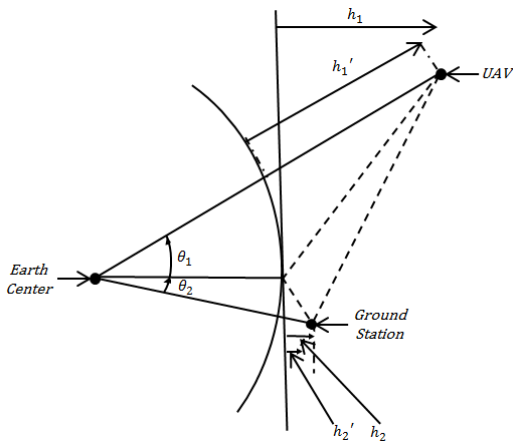


그림 3. CE2R 모델
Fig. 3. CE2R model (adapted from [23])

고 매우 양이 적다. 따라서 무인 항공기 A2G 채널의 다중경로 성분은 지상의 주변 환경 영향이 주원인이라고 봐도 무방하다.

이러한 다중경로 성분을 고려한 일반적인 무선 채널의 채널응답특성(Channel Impulse Response, CIR)은 다음과 같다.

$$h(t, \tau) = \sum_{k=0}^{N(t)-1} (\beta_k(t) \alpha_k(t) e^{j2\pi f_{Dk}(t)(\tau - \tau_k(t))} e^{-j2\pi f_c(t)\tau_k(t)} \delta(\tau - \tau_k(t))) \quad (1)$$

$$f_{D,k}(t) = v(t) f_c(t) \cos(\psi_k(t)) / c \quad (2)$$

식(1)은 기저대역 채널을 나타낸다. $N(t)$, $\alpha_k(t)$, $\beta_k(t)$ 는 다중경로 개수, k 번째 다중경로의 진폭, 다중경로 지속변수 (0,1)를 뜻한다. 식(2)의 $f_c(t)$, $f_{D,k}(t)$, $v(t)$, c 는 캐리어 주파수, k 번째 다중경로의 도플러 주파수, 송수신 시스템의 상대속도, 빛의 속도에 해당한다. $\psi_k(t)$ 는, k 번째 다중경로의 평균 AoA (Angles of Arrival)값을 의미한다. 무인 항공기 A2G 채널 분석은 기존의 식(1)을 통해 채널 특성을 결정지을 수 있는 경로손실, Rician K-factor, 도플러 주파수 등의 변수들을 도출하고 이러한 변수를 이용한 제곱근 지연 확산 분포(Root Mean Square Delay Spread, RMS-DS), 전력 프로파일(Power Delay Profile, PDP) 등의 변수 분포를 바탕으로 분석되어야 한다.

III. 무인 항공기 A2G 채널 모델 연구 동향

무인 항공기 A2G 채널의 모델링 및 특징 분석을 위해 ray-based 채널 모델, 기하학 기반 확률적 채널 모델, 실측 모델 같은 다양한 채널 모델 기법이 제안되고 있다. 본 논문에서는 무인 항공기 A2G 채널 모델링 방법과 채널을 특징짓는 여러 가지 변수를 정의하고, 해당 변수의 특성과 분포에 대하여 기존의 결과를 요약 및 분석한다.

3.1 ray-based 채널 모델

FDTD (Finite Difference Time Domain)방법^[12]과 Ray-based 방법^[13-15]을 포함한 여러 가지 deterministic 채널 모델링 방법이 무인 항공기 A2G 채널 모델링 및 분석에 적용되고 있다. 이러한 방법은 특정 환경에서 여러 가지 변수들을 바꿔가며 채널의 특징을 분석하는데 활용된다.

참고문헌 [13]에서는 200MHz에서 5GHz사이 주파수 대역을 이용해 도심지역(Bristol UK)에서의 무인 항공기 A2G 채널의 통계적 모델을 제안하였다. 채널을 LoS, OLoS (Obstructed Line of Sight), NLoS 세 가지로 분류하여 양각(Elevation Angle)과 높이 변화에 따른 각각의 성분이 수신될 확률 값과 양각에 따른 수신 파워를 분석하였다. 분석 결과, 수신 확률 값은 무인 항공기의 비행 고도와는 무관했고 양각과 관계

가 있었다. 또, 수신 파워는 양각이 작아질수록 감소되었다. 그러나 이러한 실험은 무인 항공기가 건물보다 항상 높은 고도에서 비행한다는 가정을 바탕으로 이루어졌기 때문에 분석 결과에 제한이 있다. 건물보다 낮은 높이에서 비행하는 무인 항공기 등 여러 경우를 고려한 채널 모델링 및 분석이 필요하다.

참고문헌 [14]에서는 mmWave 대역인 28GHz, 60GHz 대역에서 Ray-based 방법에 기반한 무인 항공기 A2G 채널 특성을 분석했다. 실험을 통해 도심, 교외, 농촌, 바다 지형에서 무인 항공기의 비행 고도에 따른 수신 파워와 평균 제곱근 지연 확산 분포를 비교하였다. 그 결과 A2G 채널의 수신 신호 파워는 도심 지형을 제외한 나머지 지형에서 Two-ray 모델을 따른다는 것을 입증하였다. 반면, 평균 제곱근 지연 확산 분포는 도심 지형에서 가장 크게 나타났다. 그러나 모든 건물의 구성을 같은 물질로 모델링 한 [14]의 실험 환경은 직진성이 강하여 건물에 민감한 mmWave 대역의 실제 채널 특성을 잘 반영하지 못한다. 따라서 현실에 보다 가까운 채널 특성 분석을 위해 건물의 층마다 감쇄계수, 투과율이 다른 물질을 이용한 구체적인 지형 모델링이 필요하다.

독일의 교외지역인 TU Dortmund 대학 지형을 바탕으로 [15]에서는 Ray-based 방법을 이용하여 낮은 고도로 비행하는 초소형 무인 항공기의 채널 모델링 및 특성을 분석하였다. 실험을 통해 초소형 무인 항공기의 수평, 수직 방향의 움직임과 기지국의 높이에 따른 경로 손실을 비교하였다. 또한, 기존의 Winner, Cost Hata 등의 채널모델을 이용하여 무인 항공기의 움직임에 따라 변하는 신호 세기와 가장 유사한 변화를 갖는 채널을 정의하였다. 이러한 결과는 무인 항공기에 탑재 가능한 안테나 수 혹은 여러 가지 지형에 따라 달라질 수 있다. 이와 관련한 추가적인 연구가 필요하다.

3.2 기하학 기반 확률적 채널 모델

확률적 모델 접근방식 중 하나인 기하학 기반 확률적 채널 모델[16]은 기하학적으로 랜덤하게 분포되어 있는 실질적인 장애물과 산란체를 적용함으로써 채널의 특성을 분석하는 방법이다. 기하학 기반 확률적 채널 모델은 높은 정확도와 낮은 복잡도 때문에 셀룰러 통신 채널과 차량 통신 채널 모델링에 주로 쓰여 왔다. 최근, 무인 항공기 채널 모델링 및 분석에도 여러 가지 기하학 기반 확률적 채널 모델을 이용한 관련 연구들이 진행 중이다.^[17-19]

3차원 GBSBCM (Geometrically Based Double

Bounce Cylinder) 모델에 기반한 [17]에서는 무인 항공기와 지상 시스템이 다중안테나를 사용하는 UAV-MIMO (Multiple Input Multiple Output) 채널 모델링 및 특성을 분석했다. 무인 항공기 MIMO 채널은 공간-시간-주파수(Space-time-frequency) 채널 상관 함수, 채널 행렬 분해, 채널 계수 정규화를 이용해 제안되었다. 제안된 채널의 채널 용량과 채널 조건 숫자가 안테나 사이의 거리, 무인 항공기 높이, 비행 거리의 변수에 따라 비교 분석되었다. 위 실험은 통신 성능을 방해하는 여러 가지 요인과 장애물의 분포를 균등하다고 가정하고 진행되었다. GBSBCM 모델의 여러 가지 분포를 적용하여 실제 환경과 더욱 근접한 환경에서의 채널 모델링 및 분석에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌 [18]에서는 3차원 기하학 기반 확률적 채널 모델에 기반한 UAV-MIMO 채널 모델링 및 특성을 분석했다. LoS, NLoS 성분을 모두 고려한 [13]과는 다르게, 모든 성분이 전부 NLoS 라고 가정하여 채널을 분석하였다. AoA, AoD (Angles of Departure), 양각 등의 변수를 이용하여 채널응답특성을 제안했고, 공간-시간 상관 함수(Space-time Correlation Function, STCF)를 유도하였다. 이러한 공간-시간 상관 함수를 바탕으로 무인 항공기의 수직 방향, 수평 방향으로의 이동에 따른 정규화된 일시적 상관(Temporal Correlation)값을 분석하였다. 또한, 이론적인 결과와 측정 데이터의 정규화된 일시적 상관 값의 비교를 통해 제안한 모델의 유용함을 입증하였다. 그러나 위 실험은 무인 항공기 주변의 방해 요소는 고려하지 않고 기지국 주변의 방해 요소만 고려하여 채널을 분석하였다. 객관적인 무인 항공기 MIMO 채널 모델링 및 분석을 위해서 무인 항공기 주변의 방해요소까지 고려한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌 [19]에서는 기하학 기반 확률적 채널 모델을 이용하여 무인 항공기 A2G 채널 모델링 및 특성을 제안하였다. 특히 제안한 모델에 필요한 파라미터들과 그 변수들이 측정 데이터로부터 어떻게 유도가 되었는지에 집중하여 채널의 특성을 설명하였다. 또한, 제안한 모델의 객관성을 위해 예비 실험을 통하여 제안한 모델이 채널의 시변 특성을 나타낼 수 있음을 입증하였다. 그러나 [14]에서와 같이 완벽한 모델을 제시하기 위해 아직까지도 연구가 진행 중이기 때문에 다양한 채널 모델의 변수들의 분포를 모두 고려하지는 않았다. 더욱 많은 변수들의 분포를 적용한 추가적인 연구가 필요하다.

3.3 실측 모델

실제 무인 항공기를 이용하여 채널 모델링 및 분석을 하는 것은 많은 시간이 소요되고 비용이 많이 든다. 하지만 정확도와 객관성이 높은 채널 모델링을 제안함에 있어서는 가장 좋은 방법이다. 또한, 실측 모델은 실험에 근거한 모델의 정확도가 어느 정도인지 확인하기 위해 사용 된다. 이에 따라, 최근 무인 항공기 채널 모델링 및 특징을 분석하기 위한 실제 측정 실험에 관련한 연구가 진행되고 있다^[20-22].

무허가 5.8GHz 대역에서 소형 무인 항공기를 이용하여 안테나 종류와 배치에 따른 채널 모델링 및 특성을 분석하기 위해 [20]에서는 두 가지의 조건에서 실험이 진행되었다. 첫 번째 실험은 무인 항공기에 단일 안테나, 기지국에는 두 개의 모노폴(Monopole)안테나를 배치한 후 이루어졌다. 기지국에서 각 안테나의 수신 파워를 측정하였으며, 각 안테나의 정규화된 수신 파워의 CDF (Cumulative Probability Distribution Function)값도 측정하였다. 두 번째 실험은 무인 항공기 동체 위와 아래 각각 모노폴 안테나를 배치하였고, 기지국 또한 모노폴 안테나를 배치한 UAV-MIMO 상황에서의 실험이 이루어졌다. 첫 번째 실험과 동일하게 기지국의 각 안테나의 수신 파워와 그에 따른 수신 파워 CDF값이 측정되었다. 두 실험을 통해 다중안테나를 사용했을 때의 수신 파워가 증가한다는 결론이 입증되었다. UAV-MIMO 채널의 확장을 위해, 제약 조건이 있는 무인 항공기 크기에 알맞은 안테나 종류와, 안테나 배치를 고려한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌 [21]에서는 L-band (970MHz)대역에서 다중경로 변수에 의한 채널의 LoS 파워 값의 변화를 이론과 실제에 근거하여 비교 분석하였다. 두 결과 모두 다중경로 변수가 LoS 성분의 파워 값에 큰 영향을 미친다는 것을 밝혔다. 또한 LoS 파워 값의 변화가 본질적으로는 Two-path model을 따르지만 표면의 반사 계수, 안테나 이득 등 통신환경에 영향을 미치는 다른 변수들과 관련이 있음을 제안하였다. 구체적인 표면의 반사 계수와 안테나 이득 등을 고려하여 LoS 성분의 파워 값 측정에 관련한 추가적인 분석이 필요하다.

교외 지역인 Madrid에서 낮은 고도로 비행하는 무인 항공기와 USRP (Universal Software-defined Radio Prepheral)장비를 이용한 [22]에서는 5.76GHz의 협대역(Narrowband) 및 1.817GHz의 광대역(Broadband)에서 채널을 분석하였다. 특정 포인트를 지정해 놓고 무인 항공기 높이와 이동 방향을 변경해 가며 그에 따른 경로 손실, K-factor, 전력 지연 프로파일, 다중경로 성분, 평균 제공근 지연 확산 분포를

측정하였다. 또, 장애물이 fading과 다중경로 성분에 미치는 효과에 대하여 분석하였다. 이밖에도 근본적인 전파 환경의 물리적 성질을 정확히 이해하기 위해서 여러 가지 상황에 따른 더욱 많은 측정이 이루어져야 한다. 또한 안테나 방사패턴, 무인 항공기의 위치 등이 고려된 추가적인 연구가 필요하다.

IV. 강남 지형 채널 모델 실험 결과

정확한 무인 항공기 A2G 채널 모델링 및 분석을 위해서는 위에 언급한 기존의 채널 모델링 및 분석의 단점을 보완한 새로운 방법이 필요하다. 본 논문에서는 도심 지역의 강남 지형에서 ray-based 채널 모델, 기하학 기반 확률적 채널 모델, 실측 채널 모델을 모두 고려한 무인 항공기 A2G 채널 모델링 및 분석 방법을 제안한다. 또 수신 파워, 제공근 지연 확산 분포의 분석 결과를 통해 무인 항공기 A2G 채널의 특징을 분석한다.

오랜 시간이 소요되는 실제 측정 방법을 이용한 무인 항공기 A2G 채널 모델링 및 분석과 근접한 결과를 얻기 위해서는 실제와 비슷한 실험 환경이 필요하다. 본 논문에서는 자체 제작한 강남 지형에 기하학 기반 확률적 채널 모델을 적용하여 방해요소가 되는 주변의 여러 건물들을 실제와 가깝게 모사하였다. 또한, 건물마다 서로 다른 높이를 지정했고, 건물의 층

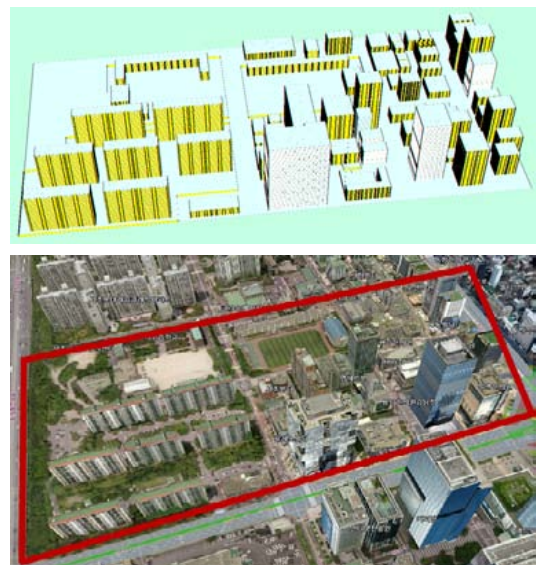


그림 4. 3차원 강남역 디지털 맵 (위); 강남역 실제 환경 (아래)
Fig. 4. (up) 3D Digital map of Gangnam Station;(down) a real environment, Gangnam Station (adapted from [24])

마다 구성 물질과 감쇠계수를 다르게 하여 실제 건물 내부 환경을 반영하였다. 그림 4는 자체 제작한 강남 지형의 디지털 맵과 실제 강남지형을 나타낸다.

다음 표 2는 무인 항공기 A2G 채널 모델링 및 분석의 실험 변수를 나타낸다. 실제 강남 지형을 반영한 디지털 맵에 한 개의 무인 항공기 (Tx)와 1m의 높이를 가지는 단말 (Rx) 2415개를 가정하였다. Tx 안테나는 등방성(Isotropic) 안테나와 지향성(Directional) 안테나를 두 번의 실험을 거쳐 사용하였고 Rx 안테나는 등방성 안테나를 사용하였다. 무인 항공기의 최대 출력값은 10W로 제한하였다. 이러한 초기 실험값 설정 후, 2.8GHz 대역에서 ray-based 채널 모델을 이용하여 무인 항공기의 위치는 고정된 상태에서 비행 고도 변화에 따른 A2G 채널을 분석하였다. 그림 5는 실험에 반영된 무인 항공기의 위치를 2차원 강남역 디지털 맵에 나타낸 그림이다.

무인 항공기 비행 고도에 따른 A2G 채널 분석은 Tx 안테나 종류에 따라 총 두 번 시행되었다. 그림 6은 Tx의 비행 고도가 50m, 100m, 150m일 때, 안테나의 종류에 따라 단말에 수신되는 파워를 나타낸 그림

표 2. ray-based 무인 항공기 A2G 채널 모델 실험 변수
Table 2. ray-based UAV A2G channel model parameter

Scenario	Ground station height	1m
Urban (Gangnam)	UAV height	50m, 100m, 150m
	frequency	2.8GHz
	Transmit power	10W
	Tx antenna	Isotropic / Directional
	Rx antenna	Isotropic

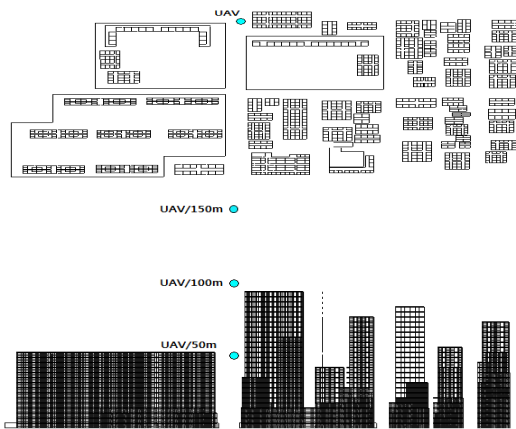


그림 5. 2차원 강남역 디지털 맵
Fig. 5. 2D Gangnam station digital map

이다. 그림 6의 (a), (c), (e)는 등방성 안테나를 적용했을 때의 수신파워, 그림 6의 (b), (d), (f)는 지향성 안테나를 적용했을 때의 수신 파워이다. 그림의 가로축과 세로축은 2차원 강남역 디지털 맵에서의 위치좌표를 나타낸다. 실험 결과, Tx로부터 멀리 떨어져 있는 단말의 수신 파워는 Tx 주변의 단말 수신 파워에 비해 더 많은 감쇄가 일어났다. 또한, 안테나 종류와는 무관하게, Tx 비행 고도가 높아짐에 따라 강한 수신 파워가 단말에 도달 하는 특징이 나타났다. 특히 그림의 왼쪽 하단의 지역에서 수신 파워값의 차이가 크게 두드러지는데, 이 지역에서는 높이에 따라 최대 50dB 만큼의 변화를 보였다. 이러한 결과는 무인 항공기의 비행 고도가 지면으로부터 높아질수록 건물 등의 장애물의 영향을 적게 받아 일반적으로 더욱 강한 LoS가 보장된다는 이론적인 사실에 부합한다. 안테나의 종류에 따라 단말에 도달하는 수신 파워값의 차이도 크게 나타났다. 본 논문에서는 지향성 안테나의 방위각(azimuth angle) 93°, 기울기(tilt)를 47°로 설정한 후 Tx에 배치하여 안테나가 남쪽방향에 더욱 강한 빔을 쏘도록 하였다. 이에 따라, 남쪽 방향에 위치한 단말

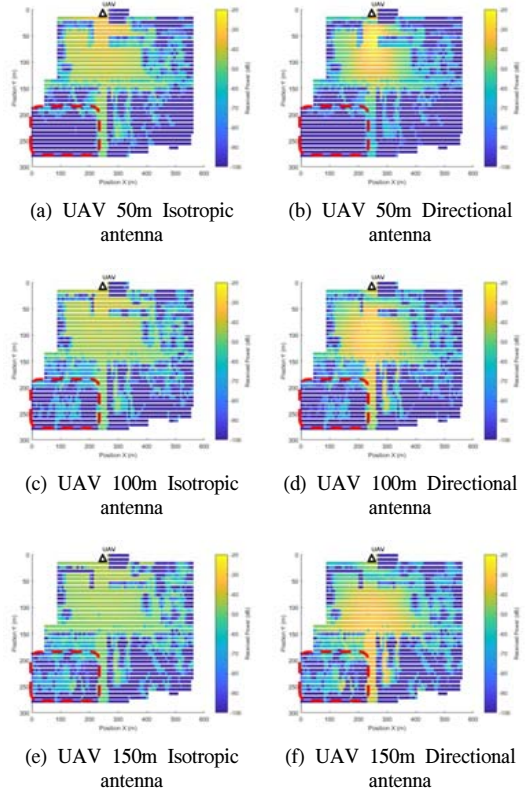


그림 6. 수신 파워
Fig. 6. Received power

들은 등방성 안테나를 사용했을 때와 더 큰 파워를 수신하였다. 이러한 차이는 Tx 높이가 증가할수록 더욱 크게 나타났다. 분석 결과를 통해 수신 파워는 거리에 따라 감소하지만 무인 항공기 비행 고도를 높게 하거나 무인 항공기에 지향성 안테나를 배치한다면 특정 방향에 있는 단말이 등방성 안테나를 사용할 때보다 강한 파워를 수신하는 사실을 입증하였다.

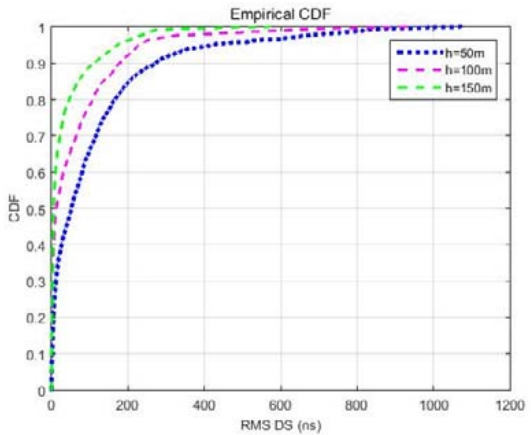
그림 7은 무인 항공기 통신으로 인해 발생하는 다중경로 성분들의 지연 확산치값을 무인 항공기 고도 따라 CDF 그래프로 산출한 그림이다. 본 실험에 서는 지연 확산치의 구간을 나누어 특정 구간에 포함되는 각 단말마다의 지연 확산치의 값을 모두 적용하였다. 그림 7의 (a)는 등방성 안테나를 사용했을 때의 지연 확산치의 CDF 그래프, 그림 7의 (b)는 지향성 안테나를 사용했을 때의 지연 확산치의 CDF 그래프를 나타

낸다. 실험 결과, 안테나의 종류와는 무관하게 무인 항공기 비행 고도가 낮을수록 지연 확산치값이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이러 한 결과는 무인 항공기 비행 고도와 건물 등의 장애물로 인해 발생하는 다중경로 성분이 서로 밀접한 관계가 있음을 의미한다. 분석을 통해 무인 항공기의 비행 고도가 높을수록 단말 주변의 장애물의 영향을 적게 받게 되고, 이에 따라 다중 경로 변수들이 감소하게 되어 LoS성분의 확보가 가능해진다는 이론적인 사실을 직접 확인할 수 있었다. 또, 등방성 안테나와 지향성 안테나를 사용한 각각의 경우, 무인 항공기 고도에 따른 지연 확산치의 CDF 그래프 결과가 두드러질 만큼 큰 차이는 없었지만 지향성 안테나를 사용했을 때 지연 확산치값이 미세하게나마 조금 더 작은 것을 확인할 수 있었다. 즉 기존의 무인 항공기 A2G 채널 모델링 및 분석 방법을 고려하여 실측 채널 모델과 유사한 결과를 얻기 위해 실제 환경을 반영하고, 기하학 기반 확률적 채널모델에서 고려하는 산란체를 실제 환경에서 방해가 되는 건물 등으로 직접 모사한 디지털 맵에 ray-based 방법을 적용시킨다면 이론에 가깝게 더욱 효율적인 방법으로 무인 항공기 채널 모델링 및 분석이 가능함을 알 수 있었다.

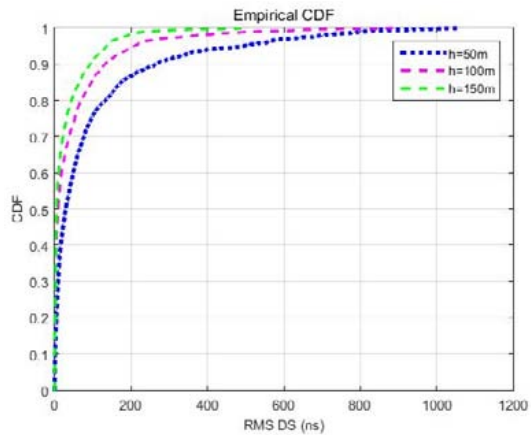
V. 결 론

본 논문에서는 무인 항공기 A2G 채널에 관련된 여러 가지 선행 연구들의 내용을 요약 및 분석하여 기존의 여러 가지 무인 항공기 A2G 채널 모델을 고려한 무인 항공기 A2G 채널 모델링 및 특징을 분석하였다. 또한, 기존의 무인 항공기 A2G 채널 모델링 및 특징의 장단점을 고려하여 자체 제작한 강남 지형에서의 무인 항공기 A2G 채널 모델링 방법 및 채널의 특징을 제시하였다. 기하학 기반 확률적 채널 모델을 바탕으로 실제 환경을 고려한 지형에서 ray-based 방법을 이용한 채널 모델링 및 분석은 특정 지형의 환경만 반영한다면 실제 측정보다 빠른 결

과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한, 여러 가지 변수에 대하여 쉽게 조작이 가능 하므로 많은 상황에서의 채널 특징을 신속하게 분석할 수 있다. 추후, 강남 지형을 바탕으로 여러 지형에서의 무인 항공기 A2G 채널 모델링 및 분석과 무인 항공기 A2A 채널 등 새로운 무인 항공기 채널 모델 및 제한적 채널 정보를 활용^[25] 무인 항공기 다중안테나 통신 기법에 대한 연구를 진행할 예정이다.



(a) Isotropic antenna



(b) Directional antenna

그림 7. RMS-DS 누적분포함수
Fig. 7. RMS-DS CDF

References

- [1] D. W. Matolak and R. Sun, "Unmanned aircraft systems: Air-ground channel characterization for applications," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 10, no. 2, pp. 79-85, Jun. 2015.
- [2] NTT DOCOMO Inc. and Ericsson, *New SID on Study on enhanced LTE Support for Aerial Vehicles*(2017), Retrieved Sep., 24, 2017, from <http://www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg--RP-75--31939.htm>
- [3] Qualcomm, *Qualcomm Technologies releases LTE drone trial results*, Technical Report(2017), Retrieved Oct. 11, 2017, from <https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/05/03/qualcomm-technologies-releases-lte-drone-trial-results>
- [4] P. Zhan, K. Yu, and A. L. Swindlehurst, "Wireless relay communications with unmanned aerial vehicles: performance and optimization," *IEEE Trans. Aero. Elec. Sys.*, vol. 47, no. 3, pp. 2068-2085, Jul. 2011.
- [5] F. Jiang and A. L. Swindlehurst, "Optimization of UAV heading for the ground-to-air uplink," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 30, no. 5, pp. 993-1005, Jun. 2012.
- [6] Z. Han, A. L. Swindlehurst, and K. J. R. Liu, "Optimization of MANET connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 7, pp. 3533-3546, Sept. 2009.
- [7] S.-H. Kim, B.-H. Jung, and D.-K. Sung, "Adaptive beamforming antenna scheme to minimize the interference in a unmanned aerial vehicle (UAV) MANET," in *Proc IEEE PIMRC*, pp. 813-817, Tokyo, Japan, Sept. 2009.
- [8] R. Palat, A. Annamalau, and J. Reed, "Cooperative relaying for ad-hoc ground networks using swarm UAVs," in *Proc. IEEE MILCOM*, pp. 1588-1594, New Jersey, USA, Oct. 2005.
- [9] 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.
- [10] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, 2nd Ed., Wiley Press, 2000.
- [11] C. H. Hwang, J. S. Kim, and Y. J. Ryu, "Performance of channel estimation and frequency-domain equalization for UAV command and control links," *KICS Inf. and Commun. Mag.*, vol. 42, no. 7, pp. 1316-1324, Jul. 2017.
- [12] Z. Shi, P. Xia, Z. Gao, L. Huang, and C. Chen, "Modeling of wireless channel between UAV and vessel using the ftd method," in *Proc. WiCOM*, pp. 100-104, Beijing, China, Sept. 2014.
- [13] Q. Feng, J. McGeehan, E. K. Tameh, and R. R. Nix, "Path loss models for air-to-ground radio channels in urban environments," in *Proc. IEEE VTC*, pp. 2901-2905, Melbourne, Australia, May 2006.
- [14] W. Khawaja, O. Ozdemir, and I. Guv enc, "UAV air-to-ground channel characterization for mmwave system" Accepted for *IEEE VTC Workshop: 5G Millimeter-Wave Channel Measurement, Models, and Systems*, Toronto, Canada, 2017.
- [15] K. Daniel, M. Putzke, B. Dusza, and C. Wietfeld, "Three dimensional channel characterization for low altitude aerial vehicles," in *Proc. ISWCS*, pp. 756-760, York, United Kingdom, Sept. 2010.
- [16] X. Yin and X. Cheng, *Propagation Channel Characterization, Parameter Estimation, and Modeling for Wireless Communications*, Wiley-IEEE Press, 2016.
- [17] X. J. Gao, Z. L. Chen, and Y. J. Hu, "Characteristic analysis on UAV-MIMO channel based on normalized correlation matrix," *The Scientific World J.*, vol. 2014, Article ID 206185, p. 10, Apr. 2014.
- [18] L. Zeng, X. Cheng, C. X. Wang, and X. Yin, "A 3d geometry-based stochastic channel model for UAV-MIMO channels," in *Proc.*

IEEE WCNC, San Francisco, USA, Mar. 2017.

- [19] N. Scheneckenburger, T. Jost, U. C. Fiebig, G. D. Galdo, H. Jamal, D. Mato lak, and R. Sun, "Modeling the air-ground multipath channel," in *Proc. Eu CAP*, Paris, France, Mar. 2017.
- [20] J. Romeu and A. Aguiasca, "Small UAV radio communication channel characterization," in *Proc. EuCAP*, pp. 1-5, Barcelona, Spain, Jul. 2010.
- [21] N. Schneckeburger, T. Jost, D. Shu tin, and U.-C. Fiebig, "Line of sight power variation in the air to ground channel," in *Proc. EuCAP*, pp.1-5, Davos, Switzerland, Apr. 2016.
- [22] X. Cai, G. P. Ana, D. Alonso, L. Zhang, C. B. Rodriguez, A. P. Yuste, and X. Yin "Low altitude propagation channel modelling," in *Proc. EuCAP*, Paris, France, Mar. 2017.
- [23] E. C. Jordan and K. G. Balmain, *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*, 2nd Ed., Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1968.
- [24] Y. G. Lim, T. H. Jung, K. S. Kim, and C.-B. Chae, "Waveform multiplexing for 5G: A concept and 3D evaluation," in *Proc. EuCNC*, Oulu, Finland, Jun. 2017.
- [25] M. S. Sim, J. Park, C.-B. Chae, and R. W. Heath, Jr., "Compressed channel feedback for correlated massive MIMO systems," *J. Commun. Networks (JCN)*, vol. 18, no. 1, pp. 95-104, Feb. 2016.
- [26] S. C. Noh, T. H. Jung, K. S. Kim, C.-B. Chae, and S. B. Um, "UAV channel characteristic and analysis using 3-D ray tracing simulation," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 503-504, Gangwon-do, Korea, Jan. 2018.

노 시 찬 (Sichan Noh)



2016년 : 경희대학교 전자전파 공학과 공학사
 2016년~현재 : 연세대학교 글로벌융합공학과 석박사통합과정
 <관심분야> 5G 통신시스템, UAV 통신

정 태 훈 (Tachun Jung)



2015년 : 연세대학교 글로벌융합 공학과 공학사
 2015년~현재 : 연세대학교 글로벌융합공학과 석박사통합과정
 <관심분야> 5G 통신시스템, UAV 통신

김 광 순 (Kwang Soon Kim)



1990년~1999년 : 한국과학기술원 공학사 학사 및 석/박사 졸업
 1990년~2000년 : Dept. ECE, UUC San Diego, 박사 후 연구원
 2000년~2004년 : 한국전자통신연구원 선임연구원

2004년~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 교수
 2016년 : 한국통신학회 부호 및 정보이론 연구회 위원장
 2017년 : 한국통신학회 이동통신연구회 위원장
 <관심분야> 신호처리, 통신이론, 정보이론, 확률기하이론, Massive MIMO, 이기종 셀룰러네트워크, 차세대 무선랜, 5G 무선접속기술

채 찬 병 (Chan-Byoung Chae)



2008년 : 미국 텍사스오스틴 전
기컴퓨터공학과 박사
2008년~2009년 : 하버드 대학
박사 후 연구원
2009년~2011년 : 미국 벨 연구
소 책임연구원
2011년~현재 : 연세대학교 언더
우드 특훈교수

<관심분야> 무선 네트워크

최 증 원 (Jeung Won Choi) (사진 교체해주세요)



1989년 : 충남대학교 이학사
1993년 : 충남대학교 이학석사
1997년 : 충남대학교 이학박사
1997년~현재 : 국방과학연구소
수석연구원/팀장
2013년~현재 : UST 부교수
<관심분야> 전술통신체계, 인
지무선통신, 위성통신, 데이터링크, 정보융합

음 수 빈 (Soo Bin Um)



2012년 : 한양대학교 공학사
2012년 : 한국과학기술원 공학
석사
2014년~현재 : 국방과학연구소
연구원
<관심분야> 통신이론, 정보이
론, 부호이론, 인지무선통신,
전술 통신체계, 데이터링크