

무인 항공기 기반 셀룰러 네트워크의 동향 연구: UAV 채널 모델링과 UAV 궤적 최적화

하 노 겐*, 안 지 혜*, 신 원 재^o

New Key Features of UAV-Enabled Cellular Networks: UAV Channel Modeling and Trajectory Optimization

Nohgyeom Ha*, Jihye An*, Wonjae Shin^o

요 약

UAV(Unmanned aerial vehicles)는 현재 많은 분야에서 관심을 받고 있으며 독특한 장점 덕분에 기존 무선 네트워크를 보조하기 위한 대안으로서 떠오르고 있다. UAV의 가장 큰 장점은 3차원 공간의 높은 자유도(Degree of freedom, DoF)를 적극적으로 활용할 수 있다는 점이다. 구체적으로, 3차원 공간에서 UAV의 높은 고도는 LoS(Line of sight)가 지배적인 환경을 형성하므로 무선 네트워크에 넓은 커버리지(Coverage)를 제공한다. 또한, 고정적인 배치나 한정적인 이동만이 가능한 기존 기지국이나 릴레이(Relay)와 달리 UAV는 수평이나 수직의 이동이 자유롭다. UAV의 3차원 공간 위에서 자유로운 궤적은 기존 셀룰러 네트워크의 성능을 위해 최적화되어 셀룰러 네트워크에 큰 이득을 제공한다. 본 논문에서는 위의 이점들을 살려 UAV를 기존 무선 네트워크와 결합하기 위한 연구들, 즉 UAV 채널 모델링과 UAV 궤적 최적화를 살펴보도록 한다. 첫 번째로, UAV 채널 모델링을 크게 대규모 페이딩(Large scale fading)과 소규모 페이딩(Small scale fading) 채널로 나누어 정리하고 세부적인 부분들로 현재 UAV 채널에 관한 연구 동향을 파악하도록 한다. 두 번째로, UAV의 3D에서 높은 자유도를 활용하기 위한 UAV 궤적 최적화 문제를 일반적인 수식으로 나타내본다. 더불어, UAV 궤적 최적화에 관한 최신 연구들로 일반적인 수식에 대한 구체적인 이해를 돕고 동시에 전반적인 연구 동향을 살펴본다. 마지막으로 UAV 기반 셀룰러 네트워크의 중요한 연구 주제들을 살펴보는 것으로 후속적으로 이루어질 연구를 논의하며 UAV 기반 네트워크의 잠재력을 짚어보며 마무리한다.

키워드 : UAV, 셀룰러 네트워크, 채널 모델, 궤적 최적화

Key Words : unmanned aerial vehicle (UAV), cellular network, channel model, trajectory optimization

ABSTRACT

UAV (Unmanned aerial vehicle) has been drawing attention as a wide range of applications in future cellular networks. Their mobility in the 3-D (3-dimensional) space makes UAV an attractive alternative to conventional applications, e.g. roof-top of pole-mounted BS or relay. Specifically, when the altitude of UAV is increased, the probability of having a dominant LoS (Line of sight) is increased and thus the dominant LoS

※ 이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1C1C10068 06).

• First Author : Pusan National University Department of Electrical and Electronic Engineering, keket113@gmail.com, 학생(석박통합), 학생회원

^o Corresponding Author : Pusan National University Department of Electronics Engineering, wjshin@pusan.ac.kr, 조교수, 종신회원

* Pusan National University Department of Electrical and Electronic Engineering, gp098gp@gmail.com, 학생(석박통합), 학생회원
논문번호 : 202006-116-A-RU, Received May 30, 2020; Revised June 15, 2020; Accepted June 15, 2020

link provides the existing cellular network with a wide coverage. Besides, by dynamically adjusting location or movement of UAVs in 3-D space, UAVs offer an additional a degree of freedom (DoF) for conventional cellular network. In this paper, we give an overview of the recent advances in UAV-enabled cellular network exploiting the above advantages. In this paper, two promising research are mainly investigated: UAV channel modeling and trajectory optimization. UAV channel modeling is first discussed on new propagation characteristic, which is crucial for the design of efficient UAV communication. Second, we provide a comprehensive survey focused on the UAV trajectory optimization problems, and discuss the general formulation subject to various performance criteria. In addition, several research challenges and open problems are tackled to figure out further research: interference management, 3D placement optimization, 3D channel modeling, and security/privacy.

I. 서 론

오랜 시간 동안 군사적인 목적으로 이용된 UAV가 이제 배달 서비스, 탐사 및 구조, 농업, 폐기물 관리 등의 다양한 서비스를 위한 매개로 활용되고 있다¹. 그리고 급속하게 증가하는 전 세계 모바일 데이터 트래픽을 대비하기 위해서 UAV(Unmanned aerial vehicle)는 획기적인 해결책으로도 조명을 받고 있다. 기존의 릴레이 및 기지국들은 한정된 위치만 배치되고 자유롭게 위치를 조정하는 것에 큰 제약이 따른다. 이와 달리 UAV는 자유로운 배치와 이동을 할 수 있다는 장점을 통해 기존 무선 네트워크로 해결할 수 없는 문제들을 풀어낼 수 있다. 기존 무선 네트워크와 UAV를 결합한 UAV 통신의 큰 세 가지 적용 시나리오를 다음과 같이 정리할 수 있다².

먼저, UAV는 새로운 형태의 사용자로서 고려될 수 있다. 사용자로서 UAV는 현재 네트워크에서 UAV의 가장 보편적인 적용 사례이다. 지금도 교통 관리, 배달 서비스, 비디오 스트리밍 등의 많은 영역에서 활용되고 있다. 원거리에서 관리할 수 있고 무인으로도 동작하는 UAV 특성상 사람이 개입하기 힘든 작업에서 기존 수동 장치나 사람을 대체할 것이라고 예상된다³.

다음으로, UAV를 지상이나 항공의 사용자를 지탱할 새로운 기지국(Base station, BS)으로 사용하는 것이다. 차세대 통신에서 사용되는 밀리미터파의 문제점인 낮은 커버리지(Coverage)를 해결하기 위해 무수히 많은 기지국이 필요하다. 기지국으로서 UAV는 도심과 교외의 무선 네트워크를 고려하여 적재적소에 배치되고 갑작스러운 셀룰러 네트워크(Cellular networks)의 변화에 대해 쉽게 위치를 바꿀 수 있어 넓은 커버리지를 제공할 수 있다⁴.

마지막으로, UAV를 A2G(Air-to-ground) 또는 A2A(Air-to-air)을 이어주는 새로운 릴레이 노드

(Relay node)로 도입하는 것이다. 보통 릴레이 노드의 경우 위치가 고정적이며 바뀐 네트워크 상황에 맞추어 위치를 바꾸기 위해 큰 비용이 발생한다. UAV는 기존 릴레이 노드와 달리 지형적인 요인에서 더욱 영향을 받지 않고 동작할 수 있어 차세대 통신에서 요구되는 초연결을 실현할 가능성을 열어준다⁵.

많은 이득을 제공하는 UAV를 기존 무선 네트워크와 결합하기 위해 넘어야 할 문제들 역시 존재한다. 첫 번째는 새로운 채널 환경의 구축이다. 지상과 지상 간 채널 환경과 달리 항공과 지상 혹은 항공과 항공을 잇는 채널 환경들은 LoS(Line of sight)가 지배적인 특징을 가진다. 따라서, 독특한 채널 특징을 고려하여 UAV 통신의 여러 상황에 적합한 채널 모델들이 구축되어야 한다. 현재 연구들은 UAV 채널을 대규모 페이딩(Large-scale fading) 채널에 관하여 A2A 채널과 A2G 채널로 나누고 있다. A2A 채널은 대부분 신호의 산란이나 방해물이 없는 자유 공간(Free space) 모델로 구현된다⁶. 따라서, 대다수 연구가 A2G 채널을 어떻게 모델링 할지 초점을 두고 있다. A2G 채널은 고도에 따른 경로손실(Path loss)을 고려한 모델^{8,9}과 양각(Elevation angle)에 고려한 확률적 경로손실 모델^{10,11}로 나누어져 연구되고 있다. 소규모 페이딩(Small-scale fading) 채널에 관하여는 UAV 채널에 대부분 LoS가 지배적인 특징에 따라 라이시안(Rician) 분포 모델을 활용한 연구¹²⁻¹⁷가 진행 중이다.

두 번째로 넓어진 간섭 영역의 관리이다. UAV 통신에서 강한 LoS 채널은 넓은 커버리지를 확보하게 도와주는 면에서 이점인 동시에 UAV가 넓은 간섭 영역에 포함되는 문제점이 된다¹⁸. 그러므로, 몇 개의 셀 내에서 간섭 관리를 하는 기존 기법^{19,20}과 달리 UAV 통신의 더욱 넓은 간섭 영역을 관리하기 위한 기법들이 필요하다. 심각한 간섭을 관리하고 넓은 간섭 영역을 다루기 위해 UAV의 신호 세기를 조정하거

나 UAV에 인지 라디오(Cognitive radio) 기술을 도입하는 연구가 진행되고 있다^{21,22)}. 단순히 간섭을 덜어주는 방식 이외에도 심각한 간섭은 순차적 간섭 제거(Successive interference cancellation, SIC)를 사용하여 제거할 수 있는 특징을 활용하여 UAV가 업링크(Uplink)할 때 비-직교 다중접속기술(Non-orthogonal multiple access, NOMA)을 적용하는 연구가 진행 중이다²³⁾.

세 번째는 UAV의 궤적 최적화 문제(Trajectory optimization problem)를 푸는 것이다. 릴레이 혹은 기지국으로서 UAV가 이동하는 궤적과 UAV 통신의 성능은 매우 긴밀한 상관관계가 있다. 구체적으로, UAV가 비행을 느리게 하며 데이터 전송을 한다면 전체 사용자의 통신 측면에서 지연이 발생하는 반면에 비행을 빠르게 하는 것에 목적을 둔다면 전체 사용자가 UAV와 제대로 통신을 하지 못할 것이다. 따라서, UAV 통신의 성능을 극대화하기 위해 기존 무선 네트워크의 변수들과 함께 UAV의 궤적을 고려하여 최적화 문제를 설계하고 풀어야 한다. UAV가 사용자로서 이용되는 상황에서 궤적 최적화 문제는 주로 최단 거리를 고려하므로 외판원 문제(Traveling salesmen problem, TSP)의 풀이를 활용하여 문제를 풀어낸다²⁴⁾. 기지국이나 릴레이로 UAV가 활용될 때는 고려할 변수들의 집합이 두 가지 이상인 최적화 문제를 해결해야 한다. 따라서, 대부분의 연구는 복잡도를 낮추고 문제를 다룰 수 있도록 블록 좌표 하강(Block coordinate descent, BCD)²⁵⁾을 사용하여 각 집합의 변수들을 최적화한다. 더불어, non-convex 함수나 제약식이 있다면 연속 컨벡스 근사화(Successive convex approximation, SCA)²⁶⁾를 이용하여 convex 형태로 바꾸는 방식을 적용하였다^{4,27-33)}. 예를 들어 UAV 궤적 변수와 전력 할당 변수가 있는 경우 UAV 궤적 변수만을 고려하고 전력 할당은 고정된 상태에서 최적화 문제를 세우고 만약 해당 최적화 문제가 non-convex 형태의 목적함수나 제약식을 가지면 convex 형태로 바꾸어 SCA 알고리즘을 적용하여 풀어낸다. 그 다음 전력 할당만을 고려하고 UAV 궤적 변수는 앞서 구해진 결과로 고정된 뒤 최적화 문제를 세우고 풀어낸다. 이후 목적함수의 값이 수렴할 때까지 반복적으로 두 변수에 대해 최적화 문제를 풀어낸다⁵⁾.

본 논문에서는 UAV 통신의 새로운 특징 중에서 UAV 채널 모델을 구축하는 것과 UAV의 궤적 최적화 문제를 다룬 연구 사례들에 집중할 것이다. UAV 채널 모델을 다룬 연구들을 통해 주변 환경 조건을 표

현하기 위해 정의된 파라미터가 어떤 의미이고 해당 채널 모델링이 알려주는 정보가 무엇인지 알아본다. 그리고, UAV의 궤적 최적화 문제를 다룬 연구들을 토대로 일반적인 UAV의 궤적 최적화 문제의 목적함수와 제약식을 살펴본다. 이후 진행된 연구들을 통해 UAV 궤적 최적화 문제를 어떻게 세우고 해당 최적화 문제를 풀었는지에 대해 알아보도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 현재 연구들을 바탕으로 UAV와 지상 간 채널 모델링에 대해 살펴본다. 3장에서 일반적인 UAV의 궤적 최적화 문제에 대한 목적함수 및 제약 조건들을 다룬다. 4장에서 기지국 혹은 릴레이로 이용된 UAV의 궤적 최적화에 관해 진행되어온 연구들의 동향을 다루어본다. 5장에서 UAV 통신의 다양한 연구 분야들을 알아보고 정리한다. 6장에서 결론을 지으며 마무리한다.

II. 채널 모델링

기존에 지상 채널(Terrestrial channel) 모델링에 관한 연구는 많이 진행되어 있지만, UAV 채널은 기존의 지상 채널과 구별되는 독특한 특징을 가지므로 기존에 지상 통신에서 사용되던 채널 모델을 그대로 UAV 채널에 사용하는 것은 적합하지 못하다. 지상 채널과 비교했을 때 UAV 채널은 다음과 같은 특징을 가진다. 첫 번째, UAV는 주로 높은 고도에 위치하므로 LoS가 지배적일 확률이 높다. 두 번째로는 UAV의 위치 이동에 따라 채널은 민감하게 변화한다는 특징을 가진다. 마지막으로 통신이 이루어지는 환경 조건이 지상 통신과 다르다는 차이점이 존재한다. 따라서 이러한 특징을 반영하는 UAV 채널 모델링이 필요하다.

UAV 채널은 크게 A2A(Air-to-air) 채널과 A2G(Air-to-ground) 채널로 분류할 수 있다. A2A 채널은 항공에 있는 UAV 간의 통신 채널을 의미하며 높은 UAV의 고도와 LoS 확률로 인해 일반적으로 간단한 자유 공간(Free-space) 모델로 모델링 된다. 하지만 A2A 채널과 달리 A2G 채널은 UAV와 지상에 위치하는 통신 단말 간의 채널을 나타내며 UAV의 높이,仰각(Elevation angle), 통신환경에 따른 다양한 채널 특성을 가진다. 다음 장에서는 이러한 A2A 채널과 A2G 채널에서의 대표적인 경로손실(Path loss) 모델과 소규모 페이딩 모델에 대해서 살펴본다.

2.1 경로손실 모델

하늘에서 이루어지는 UAV 간의 통신(A2A)의 경우 두 UAV 사이에 방해물이 주로 존재하지 않기 때

문에, 대부분 LoS를 가진다. 따라서 A2A 채널 모델로 자유 공간 채널 모델이 주로 사용된다. A2G 채널의 경우 장애물, 신호의 산란(Scattering)이 거의 없는 시골(Rural) 지역에서나, UAV 고도가 매우 높아 지상 단말과 LoS가 거의 보장되어 있을 때 자유 공간 채널 모델이 A2G 채널로 사용된다. 이러한 자유 공간 채널 모델의 자세한 설명은 아래에서 살펴볼 수 있다.

2.1.1 자유 공간 채널 모델

자유 공간 채널 모델은 장애물과 이로 인해 발생하는 신호의 산란이 모두 존재하지 않는 이상적인 환경에서의 채널을 나타낸다. 이러한 환경에서 LoS가 매우 우세하기 때문에 섀도잉(Shadowing)의 영향은 무시 가능하다고 여겨진다. 자유 공간 채널 모델에서의 경로손실은

$$PL_{\text{FSPL}} = 20\log(d_{3D}) + 20\log(f) + 20\log\left(\frac{4\pi}{c}\right) \quad (1)$$

으로 나타내어진다. 여기서, log는 밑이 10인 상용로그이다. 이때 <그림 1>을 통해 확인 수 있듯이 변수 $d_{3D} = \sqrt{((h_{\text{UAV}} - h_G)^2 + d_{2D}^2)}$, d_{2D} 는 수신기와 송신기의 3차원과 2차원 거리를 의미하며, f 와 c 는 각각 신호의 송신 주파수, 빛의 속도에 해당한다. 이때 d_{UAV} 와 h_G 는 각각 UAV와 지상 단말의 높이이다. 이 모델을 사용할 경우 수신기와 송신기의 위치만 알고 있다면 간단하게 경로손실을 유도할 수 있다는 장점이 있다.

하지만 <그림 1>에서 볼 수 있듯이 A2G 통신의 경우 UAV의 높이가 낮거나, 높은 건물이 많은 환경에서는 신호의 산란, 회절(Diffraction), 반사(Reflection)로 인한 다중경로가 발생하게 된다. 이러

한 현상은 UAV 높이가 낮거나 건물과 장애물이 많은 도심에서 심화된다. 따라서 자유 공간 채널 모델은 다양한 환경에서의 A2G 채널을 대표하기에 적합하지 않다. A2G 채널은 주위 통신 환경(예를 들자면, 건물의 높이 및 분포 등)에 밀접하게 관련되어있을 뿐만 아니라 3차원 공간상에서의 UAV의 위치와도 연관되어 있다. 또한, 우세한 LoS가 존재할 확률이 매우 높은 A2A 채널과 비교했을 때 A2G 채널은 상대적으로 장애물에 의한 통신 성능 저하와 단절에 비교적 취약하다. 이러한 특징을 반영하기 위해서 UAV의 고도와 양각에 따른 좀 더 정밀한 채널 모델링이 이루어져야 한다. 이러한 점을 반영한 A2G 경로손실 모델로 UAV의 고도와 양각을 반영한 채널 모델이 대표적이며, 이러한 모델의 예를 아래에서 살펴본다.

2.1.2 고도 의존 경로손실 모델(Altitude dependent path loss model)

UAV의 고도가 증가할수록 장애물에 의한 영향과 신호의 산란이 줄어들기 때문에 우세한 LoS를 가질 확률이 증가한다. 또한, UAV가 높아질수록 경로손실 지수가 줄어든다. 이러한 점을 반영하기 위해 논문 [7]에서는 고도에 의존하는 파라미터 값을 가지는 log-distance 경로손실 모델을 제안하였다. 경로손실과 각 파라미터의 값은 아래와 같이 모델링 된다.

$$PL = \alpha 10\log(d_{3D}) + X_0 + X_\sigma \quad (2)$$

$$\alpha = \max(p_{\alpha_1} + p_{\alpha_2} \log(h_{\text{UAV}}), 2) \quad (3)$$

$$X_0 = p_{\beta_1} + p_{\beta_2} \log(\min(h_{\text{UAV}}, h_{\text{FSPL}})) \quad (4)$$

$$\sigma = p_{\sigma_1} + p_{\sigma_2} \log(\min(h_{\text{UAV}}, h_{\text{FSPL}})) \quad (5)$$

이때 실제 채널 측정을 통해 얻은 파라미터들의 값은 $p_{\alpha_1} = 3.9$, $p_{\alpha_2} = 0.9$, $p_{\beta_1} = -8.5$, $p_{\beta_2} = 20.5$, $p_{\sigma_1} = 8.2$, $p_{\sigma_2} = -2.1$ 이고, h_{FSPL} 는 채널이 자유 공간 채널로 여겨지기 위해 요구되는 UAV의 높이를 의미한다. X_σ 는 평균이 0이고 표준 편차가 σ 인 무작위 변수(Random variable)이며 섀도잉 효과를 반영한다. 이 모델은 UAV의 고도가 낮을 때 ($1.5\text{m} \leq h_{\text{UAV}} \leq 120\text{m}$) 시골 지역의 셀룰러 네트워크(Cellular network)에서 적합한 모델로 제안되었다. 위의 모델을 통해 UAV의 높이가 증가함에 따라 표준 편차 σ 와 경로손실 지수 α 가 감소한다는 것을

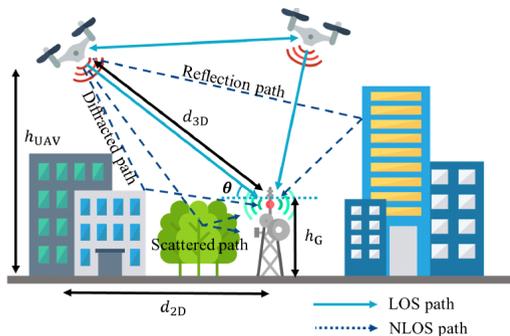


그림 1. UAV 기반의 무선 통신 환경
Fig. 1. UAV-based wireless communications environment

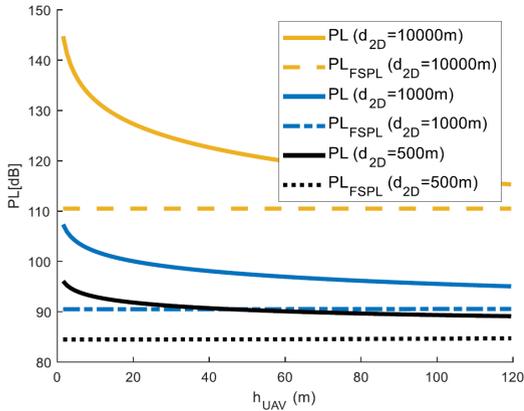


그림 2. 고도 의존 채널 모델의 경로손실
Fig. 2. Path loss of altitude dependent channel model

볼 수 있다. 이는 UAV가 높이 위치할수록 쇄도잉 효과와 거리에 따른 신호의 감쇠가 줄어든다는 것을 의미한다. 또한, 경로손실 지수의 경우 최종적으로 2로 수렴하게 되며 이는 자유 공간에서의 경로손실 지수와 동일하다. <그림 2>를 통해 경로손실은 충분히 높이가 높으면 2차원 거리와 상관없이 자유 공간에서의 경로손실 PL_{FSPL} 과 근접해진다는 것을 확인할 수 있다.

2.1.3 확률적 채널 모델(Probabilistic channel model)

A2G 채널에서는 주변의 환경에 따라서 UAV와 지상 단말 간에 LoS가 있을 수도 있고 없을 수도 있다. 따라서, 정확한 지상 단말의 위치, 장애물의 수와 같은 정확한 환경에 대한 정보가 존재하지 않을 때 LoS와 NLoS(Non-line-of-site)을 가질 확률이 모두 채널 모델링에 있어서 고려되어야 한다. 이러한 이유로 많은 연구에서 확률적 채널 모델 방식을 적용하여 채널을 나타내었다^{10,11}. 확률적 채널 모델 방식은 LoS와 NLoS가 존재할 확률을 사용하여 LoS에서의 경로손실과 NLoS에서의 경로손실을 결합한 것이다. 확률적 모델을 사용했을 때의 평균 경로손실은

$$PL_{avg} = P_{LoS} PL_{LoS} + P_{NLoS} PL_{NLoS} \quad (6)$$

이고, 이때 PL_{LoS} , PL_{NLoS} 는 LoS, NLoS에서의 경로손실을 의미하고, P_{LoS} , P_{NLoS} 는 LoS, NLoS를 가질 확률을 의미한다. 이때 P_{NLoS} 는 $1 - P_{LoS}$ 와 일치한다.

International telecommunication union(ITU)에서는 장애물이나 건물의 수, 밀도, 높이와 같은 환경에

특성에 따른 파라미터를 제공한다³⁴. 논문 [35]에서는 ITU에서 제공하는 파라미터를 사용하여 양각 의존 확률적 채널 모델이 제안되었다. 이 모델에서 LoS를 가질 확률은

$$P_{LoS} = \frac{1}{1 + a \exp(-b(\theta - a))} \quad (7)$$

로 주어지며, 이때 θ 는 지상 단말과 UAV 사이의 양각을 나타내고 단위는 도(1°)이다. 경로손실은 자유 공간 경로손실에 추가적인 경로손실 요소 η 를 결합하여 LoS와 NLoS에 따라서 각각

$$PL_{LoS} = PL_{FSPL} + \eta_{LoS} \quad (8)$$

$$PL_{NLoS} = PL_{FSPL} + \eta_{NLoS} \quad (9)$$

으로 모델링 된다. 위 모델의 파라미터 a , b , η_{LoS} , η_{NLoS} 은 urban, sub-urban, dense urban 등의 통신환경에 따라 값이 결정된다. 이때 NLoS에서 LoS에서보다 더 많은 전파 손실이 있으므로 η_{NLoS} 는 η_{LoS} 보다 더 큰 값을 가져야 한다.

<그림 3>는 urban 환경에서의 UAV의 높이에 따른 경로손실을 나타낸 것이다. urban 환경에서 앞서 언급했던 파라미터들은 $a = 9.61$, $b = 0.16$, $\eta_{LoS} = 1$, $\eta_{NLoS} = 20$ 의 값을 가진다. 2차원 거리 d_{2D} 가 고정되어 있을 경우 양각이 높아질수록 UAV의 높이는 높아진다. 따라서 <그림 3>에서의 h_{UAV} 의 증가는 양각 θ 의 증가를 의미하며 θ 가 증가할수록 LoS를 가질 확률

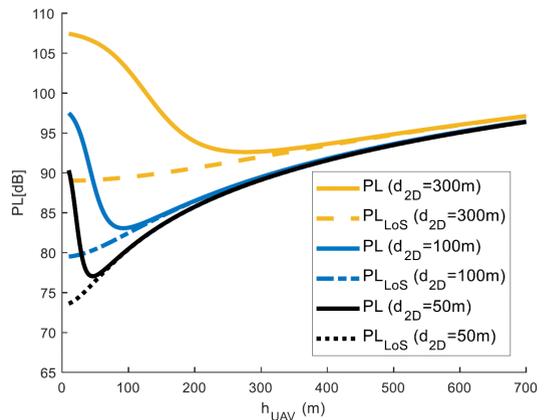


그림 3. 확률적 채널 모델의 경로 손실
Fig. 3. Path loss of probabilistic channel model

이 1에 수렴하게 되므로 경로손실 또한 LoS의 경로손실로 수렴하게 된다. 이때 UAV 높이가 같더라도 2차원 거리가 다를 경우 다른 양각을 가지게 되므로 LoS 손실로 수렴하는 데 필요한 UAV 높이는 2차원 거리에 따라 다르다.

2.2 소규모 페이딩 모델

소규모 페이딩 모델의 경우 기존에 지상 통신에서 사용되었던 모델들이 UAV 채널에서도 주로 사용된다. LoS가 우세할 경우 라이시안 분포 모델이 소규모 페이딩을 위해 주로 사용되며 이때 채널은

$$h = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} e^{j\theta_s} + \sqrt{\frac{1}{\kappa+1}} h_s \quad (10)$$

으로 모델링 되며, 이때 κ 는 라이시안 K-factor이다. 위의 식의 첫 번째 항은 θ_s 의 각도를 가지는 LoS와 관련 있고 두 번째 항은 다중경로와 관련되어있다. 이때 h_s 는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 랜덤 변수 $h_s \sim CN(0,1)$ 이다. 라이시안 K-factor는 LoS를 통해 수신되는 신호의 전력과 산란되어 다중경로를 통해 수신되는 신호의 전력의 비율을 나타낸다. 만약 라이시안 K-factor가 0의 값을 가진다면 우세한 경로가 존재하지 않음을 의미하고 라이시안 페이딩은 레일리 페이딩과 일치하게 된다.

신호의 산란으로 인해 다중경로가 많이 발생하여 주로 레일리 페이딩 모델이 사용되는 지상 채널과 달리 UAV 채널에서는 LoS를 가질 확률이 높으므로 라이시안 페이딩 모델이 주로 사용된다. 특히 몇몇 논문에서는 UAV의 고도의 함수로 라이시안 K-factor을 나타내어 A2G 채널을 모델링 하거나^[12] 라이시안 K-factor을 UAV의 고도의 함수로 모델링 하여 A2A 통신에서의 지상 환경에 의한 신호의 반사를 반영하기도 하였다^[15]. 그 외에 다른 모델로 Nakagami-m 모델이 소규모 페이딩 모델로 사용되기도 하였다. <표 1>에서는 이러한 소규모 페이딩 모델의 대표적인 예들을 살펴볼 수 있다.

III. UAV 궤적 최적화 문제의 일반화

앞서 언급한 바와 같이 UAV는 LoS가 지배적인 채널 환경을 이용할 수 있는 큰 장점이 있다. 또한, UAV의 이동과 배치가 자유롭다는 점을 활용하여 채널 환경을 조정할 수 있다. 하지만, UAV의 현실적인 적용을 위해서는 데이터 전송의 지연과 UAV가 지닌 한정된 에너지의 두 가지 요소가 치명적이다. 먼저, 데이터 전송 지연에 대해 살펴보면, 무선 네트워크의 전송률을 최대화하기 위해서 UAV가 통신할 대상의 주변을 아주 가깝게 비행하여 UAV와 통신할 대상 간의 거리를 줄여야 한다. 여기서, UAV가 오직 한 사용

표 1. UAV 채널에서의 소규모 페이딩 모델
Table 1. Small-scale fading model in the UAV channel

Scenario	Channel	Fading	Parameter	Reference
Suburban	A2G	Rician	Rician K-factor [dB] $= \begin{cases} 3.53 + 0.65h_{UAV}, & 0 < h_{UAV} \leq 10m \\ 29.6 - 17.4\log(h_{UAV}), & 16m \leq h_{UAV} \end{cases}$	[12]
Suburban Near urban	A2G	Rician	Rician K-factor [dB] Suburban: $\kappa = 14$ in L-band, $\kappa = 28.5$ in C-band Near urban: $\kappa = 12$ in L-band, $\kappa = 27.4$ in C-band	[13]
Hilly/Mountainous	A2G	Rician	Rician K-factor [dB] $= 12.8$ in L-band, 29.4 in C-band	[14]
Outdoor	A2A	Rician	Rician K-factor = $\frac{\rho^2}{2\sigma^2}$ $\rho = 6.469, \sigma = ah_{UAV}^b + c$ $a = 212.3, b = -2.221, c = 1.289$	[15]
Open field	A2G	Nakagami-m	Nakagami-m factor = 4.05	[16]
Suburban	A2G	Nakagami-m	Nakagami-m factor has a log-normal distribution with the mean η and standard derivation ξ $1.12 \leq \eta \leq 1.58, 1.471 \leq \xi \leq 2.705$	[17]

자의 통신에 중점을 두면 다른 사용자에게 정보를 전달할 때 상당한 지연을 초래할 수 있다. 다음으로, UAV의 물리적인 특성상 UAV가 쓸 수 있는 한정적인 에너지를 고려해야 한다. 주어진 배터리 내에서 동작하는 UAV는 항상 호버링(Hovering)하지 못하고 적정 속도에 따라 이동해야 하는 제약이 걸린다. 결과적으로 네트워크 성능과 에너지는 트레이드 오프(Trade-off)의 관계가 있다. 두 가지 요소의 트레이드 오프에 대한 적합한 해답을 찾기 위해서는 UAV가 가진 현실적 제약을 반영하여 UAV의 궤적을 최적화해야 한다.

UAV 궤적 최적화 문제를 살펴보기 전에 기존 무선 네트워크 시스템에 대한 최적화 문제의 일반적 형태를 짚어보도록 한다. 기존 무선 네트워크의 시스템들은 한정적인 자원을 이용하여 성능을 최대화하는 목표를 가지고 있다. 따라서, 우리는 한정된 무선 자원들로 효용함수(Utility function)를 최대화하는 문제를 다음과 같이 일반적인 최적화 문제 형태로 표현할 수 있다.

$$\max_{\mathbf{P}(t)} u(\mathbf{P}(t)) \quad (11.a)$$

$$s.t. f_i^{\text{com}}(\mathbf{P}(t)) \geq 0 \quad i = 1, \dots, I_{\text{com}} \quad (11.b)$$

여기서 $u(\mathbf{P}(t))$ 는 $P(t)$ 에 대한 효용함수이고 $\mathbf{P}(t) = [p_1(t), p_2(t), \dots, p_L(t)]^T \in \mathbb{R}^{L \times 1}$ 는 순시치 t 에 대한 전력과 같은 L 개의 무선 네트워크 자원들, 즉 $p_l(t)$, $l = 1, \dots, L$ 의 벡터이다. 그리고, f_i^{com} 는 무선 네트워크들에 대한 제약식들을 나타내며 I_{com} 는 해당 제약식들의 개수를 나타낸다. 또한, 위의 일반적인 최적화 문제에 대해서 비용함수를 최소화하는 문제도 $\min_{\mathbf{P}(t)} c(\mathbf{P}(t))$ 와 특정 제약식의 구성으로 나타낼 수 있다. 비용함수에 대해 $-c(\mathbf{P}(t))$ 인 경우 효용함수로 이해할 수 있으므로 본 논문 내에서는 효용함수로 기준으로 최적화 문제를 살펴볼 것이다.

기존 통신 시스템과 달리 UAV가 가진 자유도, 즉 자유로운 배치와 이동은 UAV 통신 시스템에 상당한 영향을 끼친다. 따라서 UAV의 궤적과 무선 네트워크의 자원들을 모두 고려한 최적화 문제를 설계 및 해결해야 한다. UAV의 궤적을 기존 문제에 반영한 최적화 문제를 일반적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\max_{\mathbf{Q}(t), \mathbf{P}(t)} u(\mathbf{Q}(t), \mathbf{P}(t)) \quad (12.a)$$

$$s.t. f_i^{\text{com}}(\mathbf{P}(t)) \geq 0, \quad i = 1, \dots, I_{\text{com}}, \quad (12.b)$$

$$h_j^{\text{UAV}}(\mathbf{Q}(t)) \geq 0, \quad j = 1, \dots, I_{\text{UAV}}, \quad (12.c)$$

$$g_p^{\text{joint}}(\mathbf{Q}(t), \mathbf{P}(t)) \geq 0, \quad p = 1, \dots, I_{\text{joint}}, \quad (12.d)$$

이때, 임의의 시간 t 에 대해 $\mathbf{Q}(t) = [\mathbf{q}_1(t), \mathbf{q}_2(t), \dots, \mathbf{q}_M(t)] \in \mathbb{R}^{3 \times M}$ 는 M 개 UAV들의 위치를 나타내는 행렬이다. 그리고 $\mathbf{q}_M(t) = (x(t), y(t), h(t)) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 는 M 번째 UAV의 위치를 $(x(t), y(t))$ 와 $h(t)$ 는 M 번째 UAV의 수평 위치 및 높이를 각기 의미한다. 제약식을 살펴보면 h_j^{UAV} 는 UAV 궤적에 관한 제약식이며 g_p^{joint} 는 UAV 궤적과 무선 네트워크 자원 모두를 고려한 제약식이다. 대부분 연구에서 시간을 이산화하여 UAV 위치를 일정 시간 내에 고정된 형태로 나타낸다. 전체 시간 T 에 대해 N 개의 시간 슬롯(Time-slot)으로 나눈다면 각 슬롯 n 의 길이는 $\delta_t = \frac{T}{N}$ 로 구해진다. 따라서, 특정 시간 슬롯 n 에 대해 UAV 궤적과 무선 네트워크 자원의 변 수 들 을 $\mathbf{Q}[n] = [\mathbf{q}_1[n], \mathbf{q}_2[n], \dots, \mathbf{q}_M[n]] \in \mathbb{R}^{3 \times M}$ 와 $\mathbf{P}[n] = [p_1[n], p_2[n], \dots, p_L[n]]^T \in \mathbb{R}^{L \times 1}$ 로 표현할 수 있다.

위의 복합적 최적화 문제를 구체적으로 이해하기 위해서 첫 번째로 무선 목적함수를 사용하여 UAV 통신의 성능을 최적화할지가 중요하며 두 번째로 UAV 통신에 한정된 자원이 무엇인지 파악하여 제약을 명확히 설정하는 것이 중요하다. 표와 설명을 통해 주로 사용되는 세부적인 목적함수 및 제약식을 알아보도록 한다. 먼저, 대부분 연구에서 활용되는 효용함수와 비용함수를 살펴본다.

첫째, 통신 데이터 전송률(Communication data rate)은 UAV와 지상의 사용자나 기지국 간의 링크로 획득할 수 있는 데이터 송수신의 양을 의미한다. UAV와 기지국 혹은 사용자 간의 전송되는 정보량이 증가할수록 통신 데이터 전송률 증가하기 때문에 해당 목적함수는 효용함수로 사용된다.

둘째, 보안 전송률(Secrecy rate)은 합법적 사용자에게 신뢰할 수 있으며 도청 받지 않는 정보를 전달하는 양을 의미한다. 보안 전송률이 높을수록 합법적 사용자가 전달받는 정보량이 커짐을 의미한다. 따라서, UAV를 보안에 이용하는 연구에서 해당 함수는 효용

함수로 사용된다.

셋째, 사용자와 기지국 간의 채널 링크는 확률적으로 나타나기 때문에 신호 대비 잡음비(Signal-to-noise, SNR)는 일정한 비율로 유지되기 힘들다. 따라서, 사용자의 신호 대비 잡음비가 문턱 신호 대비 잡음비 아래로 내려가는 상황이 발생하고 이 확률을 정전 확률(Outage probability)이라고 부른다. 정전 확률이 낮을수록 사용자와 기지국 간의 채널 링크의 QoS(Quality of service)가 좋으므로 정전 확률은 비용함수로써 이용된다.

넷째, 임무 완수 시간은 UAV가 부여된 임무를 수행하기까지 걸리는 시간을 의미한다. UAV가 가진 최소한의 통신목적을 수행하며 최단시간으로 목적지에 도착하는 것이 목적일 때 사용된다. 다른 목적함수들의 경우 기존 무선 네트워크에서도 사용되었지만 이러한 비용함수는 UAV가 도입되며 나타난 새로운 함수이다.

<표 2>에서 연속적인 시간과 이산적인 시간의 경우로 나누어 위 목적함수들을 구체적인 수식으로 표현하였다.

다음으로, UAV가 도입되며 주의해야 할 제약식들을 중심으로 살펴본다. 쉬운 설명을 위해 각 제약식에서 단일 UAV 위치 변수만을 고려하도록 한다.

첫째, UAV의 출발지와 도착지는 UAV에게 부여된 임무로 인해 이미 결정되어 있어 다음과 같은 제약식으로 나타난다.

$$\mathbf{q}_m(0) = \mathbf{q}_{\text{initial}}, \quad \mathbf{q}_m(T) = \mathbf{q}_{\text{final}}, \quad (13)$$

위 식에서 $\mathbf{q}_{\text{initial}}$ 와 $\mathbf{q}_{\text{final}}$ 는 각기 주어진 출발지와

도착지를 의미한다.

둘째, UAV의 설계적 한계들, 예를 들자면 UAV의 무게나 크기 등의 피할 수 없는 제약식들이 존재한다. 그중에서 가장 신경 써야 할 최소/최대 속도 제약식은 다음과 같이 세워진다.

$$V_{\min} \leq \mathbf{v}(t) \leq V_{\max}, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (14)$$

여기서 $\mathbf{v}(t)$ 는 UAV 속도를 의미한다.

셋째, 다수 UAV를 사용하는 상황에 있어 UAV 간 충돌 회피 제약식은 필수적이다. 다수 UAV가 있다고 가정한다면 그 제약식은 다음과 같이 주어지게 된다.

$$d_{\min}^2 \leq \|\mathbf{q}_m(t) - \mathbf{q}_l(t)\|^2, \quad l \neq m, \quad \forall l, m \quad (15)$$

이때, d_{\min} 은 m 번째 UAV와 l 번째 UAV 간의 유지할 최소 거리를 의미한다. <표 3>에서는 UAV 궤적을 포함한 경우에 대해 UAV에 관한 제약식과 기존 무선 네트워크 문제에서 사용되는 제약식들을 요약하였다.

지금까지 UAV 궤적과 무선 네트워크 자원이 결합하여 최적화하는 문제에서 쓰이는 효용함수 및 제약식에 대해서 다루었다. 다음 장에서는 기지국 혹은 릴레이로 이용되는 UAV의 통신을 다룬 연구들의 동향을 살펴보도록 한다.

표 2. 통신 자원과 UAV 궤적의 결합 최적화를 위한 목적함수들
Table 2. Objective functions for joint optimization of UAV trajectory and communication resource

	Communication throughput [4],[27-31]	Secrecy rate [32-33]	Outage probability [36]	Mission complete time [24],[37]
continuous time	$u(\mathbf{Q}(t), \mathbf{P}(t)) = \int_0^T \mathbb{E}[\log_2(1 + \gamma_m(\mathbf{Q}(t), \mathbf{P}(t)))] dt$ γ_m : m -th user/UAV's SNR	$u(\mathbf{Q}(t), \mathbf{P}(t)) = \int_0^T \mathbb{E}[\log_2(1 + \gamma_{\text{bob}}(\mathbf{Q}(t), \mathbf{P}(t))) - \log_2(1 + \gamma_{\text{eve}}(\mathbf{Q}(t), \mathbf{P}(t)))]^+ dt$ γ_{bob} : legitimate user's SNR γ_{eve} : eavesdropper's SNR	$c(\mathbf{Q}(t), \mathbf{P}(t)) = P_{\text{out},k} = \Pr(\gamma_m(\mathbf{Q}(t), \mathbf{P}(t)) < \gamma_{\text{th}})$ γ_{th} : SNR threshold	$c(\mathbf{Q}(t)) = T$
discrete time	$u(\mathbf{Q}[n], \mathbf{P}[n]) = \sum_{n=1}^N \log_2(1 + \gamma_m(\mathbf{Q}[n], \mathbf{P}[n]))$	$u(\mathbf{Q}[n], \mathbf{P}[n]) = \sum_{n=1}^N \mathbb{E}[\log_2(1 + \gamma_{\text{bob}}(\mathbf{Q}(t), \mathbf{P}(t))) - \log_2(1 + \gamma_{\text{eve}}(\mathbf{Q}(t), \mathbf{P}(t)))]^+$	$c(\mathbf{Q}[n], \mathbf{P}[n]) = P_{\text{out},k} = \Pr(\gamma_m(\mathbf{Q}[n], \mathbf{P}[n]) < \gamma_{\text{th}})$	$c(\mathbf{Q}[n]) = T$

표 3. 통신 자원과 UAV 궤적을 고려한 제약식들
Table 3. Constraint functions for the UAV trajectory and communication resource

UAV trajectory constraints, h_j^{UAV}	Communication resource constraints, f_i^{comm}	Jointly trajectory and communication constraints, g_p^{joint}
<p>▶ Initial/final UAV's locations $\mathbf{q}_m[1] = \mathbf{q}_{m,initial}$, $\mathbf{q}_m[N] = \mathbf{q}_{m,final}$</p> <p>▶ Maximum speed $V_{min} \leq \mathbf{v}[n] \leq V_{max}$</p> <p>▶ Collision avoidance constraints $d_{min}^2 \leq \ \mathbf{q}_m[n] - \mathbf{q}_l[n]\ ^2, \quad l \neq m$</p> <p>▶ Obstacle Avoidance constraints $\ \mathbf{q}_m[n] - \mathbf{r}\ \geq d_{min}$ \mathbf{r}: a location of the obstacle</p> <p>▶ Altitude constraints $H_{min} \leq h_m[n] \leq H_{max}$</p>	<p>▶ average/minimum/maximum power constraints $0 \leq p_m[n] \leq P_{max}$ $p_m[n]$: a transmit power of m-th UAV</p> <p>▶ User scheduling and association constraints $\sum_{m=1}^K \alpha_{k,m}[n] \leq 1, \quad \forall m, n$ $\sum_{k=1}^M \alpha_{k,m}[n] \leq 1, \quad \forall k, n$ $\alpha_{k,m}[n] \in \{0, 1\}, \quad \forall k, n, m$ $\alpha_{k,m}[n] \in \{0, 1\}$: a user association indicator, i.e. $\alpha_{k,m}[n] = 1$ if user k is associated with UAV m at time n and $\alpha_{k,m}[n] = 0$, otherwise</p> <p>▶ QoS constraints $\ \mathbf{q}(t) - \mathbf{g}\ \leq \bar{d}$ \mathbf{g}: a location of a ground base station d: a coverage radius of a ground base station</p>	<p>▶ Information-causality constraints $\sum_{i=2}^n \log_2(1 + p_r[i] \gamma_{rd}[i]) \leq \sum_{i=1}^{n-1} \log_2(1 + p_s[i] \gamma_{sr}[i])$ $p_r[n], p_s[n]$: the transmit powers of the relay and source, respectively $\gamma_{rd}[n], \gamma_{sr}[n]$: the effective SINR from relay to destination and from source to relay, respectively</p> <p>▶ Minimum SINR constraints $\gamma_m(\mathbf{q}_m[n], p_m[n]) = \frac{S(\mathbf{q}_m[n], p_m[n])}{I_{ground} + I_{aerial}(\overline{\mathbf{q}_m[n]}, \overline{p_m[n]}) + \sigma^2} \geq \Gamma$ I_{ground}: the interference power from existing ground transmitters, $I_{aerial}(\overline{\mathbf{q}_m[n]}, \overline{p_m[n]})$: the interference power from other UAVs Γ: SINR threshold associated with quality-of-service (QoS)</p>

IV. UAV 역할에 따른 UAV 궤적 최적화

UAV 기지국이나 릴레이로 이용되는 UAV의 경우 무선 네트워크의 성능을 극대화하려는 목적으로 쓰인다. 따라서, 기존 지상 기지국이 관리하지 못하는 영역을 보완하고 무선 네트워크의 전체적인 성능을 최대화하기 위해 UAV의 궤적과 기존 자원들을 최적화하는 연구가 주를 이룬다. 다음 절들에서는 위의 기지국/릴레이로 활용되는 UAV의 각 경우에서 진행된 연구를 다루어보도록 한다.

4.1 릴레이로 이용되는 UAV

UAV를 릴레이로 활용하는 무선 네트워크는 기지국이 없는 교외나 시골 지역까지 관리할 수 있으며 특정 지형적 장애물에 대한 구애를 받지 않는다. UAV는 높은 자유도를 바탕으로 기존 릴레이 노드들이 불가능한 기능들을 수행할 수 있어 고유한 특징이 드러나는 역할이다.

UAV를 릴레이로 사용한 연구로는 단일 UAV가 적용된 단일-홉 릴레이가 가장 앞서 연구되었다^[5]. 논

문 [5]에서 UAV가 릴레이 노드로 운영되고 소스(Source) 노드와 목적지(Destination) 노드가 특정 위치에 놓인 릴레이 시스템을 가정한다. UAV가 움직이는 궤적에 따라 UAV와 소스 및 목적지 노드 간의 채널 환경이 변화하며 릴레이 시스템의 종단 간 처리량(End-to-end throughput)이 변화한다. 따라서, 소스 노드와 릴레이 노드에서 전송 전력과 UAV 궤적을 모두 고려하여야 종단 간 처리량을 극대화할 수 있다. 논문 [5]는 이러한 UAV 궤적의 영향을 반영하여 종단 간 처리량을 최대화하기 위한 UAV 궤적 및 전송 전력 최적화 문제를 세웠다. 해당 최적화 문제는 UAV 궤적과 전송 전력에 관한 non-convex 문제이기 때문에 BCD 알고리즘 및 SCA 알고리즘을 결합한 방식을 통해 non-convex 문제를 풀어냈다. 또한, 논문 [5]는 시뮬레이션 결과를 통해 UAV가 일정 궤적에 따라 움직일 때 기존 고정식 릴레이보다 높은 종단 간 처리량을 얻을 수 있음을 보여주었다.

다음으로, 단일 UAV가 아닌 다중 UAV로 높은 종단 간 처리량을 추구하는 다중-홉 시스템이 연구되었다^[38]. 기존 단일 UAV 단일-홉 릴레이 시스템의 최적

화 문제에서 다중 UAV를 고려한 UAV 간 충돌 방지 제약식이 들어간 점이 특징이다. 다중 UAV를 고려한 만큼 복잡한 non-convex 문제가 된다. 논문 [38]에서는 이를 해결하기 위해 BCD 알고리즘과 SCA 알고리즘을 결합한 알고리즘을 제안한다. 다중 UAV가 포함된 경우도 BCD 알고리즘과 SCA 알고리즘을 결합하여 최적화 문제를 풀 수 있음을 볼 수 있다. 다중 UAV를 이용한 궤적 최적화와 단일 UAV 이용한 궤적 최적화와 비교하여 가시적인 성능을 끌어낸 부분은 논문 [38]의 성취로 꼽을 수 있다.

UAV를 릴레이 노드로 활용하는 방식은 여러 가지 방향으로 연구되고 있다^{31,33}. 논문 [31]에서는 지연이 발생하는 복호 후 전송 방식보다 실시간 처리에 적합한 증폭 후 전송 방식(Amplify-and-forward)을 고려한 시스템에서 종단 간 처리량을 최대화하기 위해서 UAV 궤적과 전송 전력을 최적화하는 방향을 제안하였다. 물리계층 보안 측면에서 논문 [33]는 캐싱(Caching)을 두지 않은 사용자의 보안 전송률을 최대화하도록 UAV 궤적을 최적화하는 문제를 세우고 풀어내어 UAV 궤적의 통제로 보안을 보장할 수 있음을 밝혔다.

이와 같은 연구물들을 살펴볼 때 UAV를 릴레이로 활용하는 것으로 기존 고정식 릴레이 노드나 기지국이 낼 수 없는 성능을 끌어낼 수 있어 차세대 통신의 요구를 만족하는 것에 도움이 될 것이다.

4.2 기지국으로 이용되는 UAV

UAV가 기지국으로 사용될 경우 배치의 자유도만을 고려하여 셀룰러 네트워크의 성능을 최적화하기 위해 특정 위치를 고수하도록 설정하는 것이 가능하다. 하지만, 일정 영역을 선회하는 방식과 같이 UAV 궤적을 염두에 두면 약간의 복잡도를 감수하여 네트워크의 전반적인 효율을 높일 수 있다. UAV 배치만 고려한 논문들³⁹⁻⁴⁰과 달리 현재 UAV 궤적을 고려하는 연구들이 활발히 진행되고 있다^{4,28,29,37}.

기지국으로 UAV가 적용된 대표적인 논문 [4]에서 다중 UAV를 기지국으로 사용하는 방송 채널 환경을 고려하여 UAV 궤적이 무선 네트워크에 어떠한 영향을 주는지에 대해서 다루었다. 논문 [4]는 다중 UAV가 사용자에게 신호를 전송할 경우 신호의 중첩을 피하고자 UAV와 사용자 간 스케줄링을 고려한다. 논문 [4]는 UAV 궤적과 무선 네트워크 자원인 전송 전력 및 스케줄링의 변수들을 함께 최적화하여 UAV들과 사용자들 간 전송률의 평균치를 최대화하는 문제를 세웠다. UAV 궤적, 전송 전력, 그리고 스케줄링 변수

를 모두 고려할 때 해당 최적화 문제는 integer non-convex 문제로 보편적인 최적화 방식으로 풀기에는 매우 어렵다. 그러므로, 논문 [4]에서는 BCD 알고리즘과 SCA 알고리즘을 결합하여 문제를 효과적으로 풀어내도록 접근한다. 시뮬레이션 결과로 고정적인 지상 기지국과 비교하면 UAV의 특정 궤적에 따라 강한 LoS 채널 환경을 활용하여 더욱 높은 성능을 얻을 수 있다는 것을 보여주었다. 더불어, 성능 측면에서 UAV가 복잡한 궤적을 그리기보다 단순한 원형 궤적을 그리는 것이 더욱 적합함을 보여주었다.

다음으로, 논문 [37]에서는 일정한 높이를 비행하는 단일 UAV가 다수의 지상 터미널에게 멀티캐스팅하는 시스템을 고려하였다. 논문 [37]는 UAV가 오로지 무선 네트워크망을 위해 쓰이는 것을 고려한 연구들^{4,40-41}과 다르게 주어진 임무에 중심적인 목적을 두고 부가적으로 기지국의 역할을 맡기 때문에 무선 네트워크망의 총 전송률이 아닌 임무 수행 시간에 중점을 둔다. 이를 반영하여, 논문 [37]에서는 최소 패킷 전송률을 만족하며 제한된 속도 내에서 임무 수행 시간을 최소화하는 문제를 고려한다. 최소 패킷 전송률을 만족할 시 해당 UAV 궤적 최적화 문제는 UAV의 최소 이동 경로를 찾는 문제가 된다. 논문 [37]는 외판원 문제(Traveling salesmen problem, TSP)의 풀이 방식을 변형하여 최적 경로를 찾는다. 위 방식들은 이후 기지국으로 UAV를 이용할 때 UAV의 임무 시간을 목적함수로 고려하는 연구들에 매우 유용할 것이라 예상된다.

이외에도, 다양한 무선 네트워크 환경을 고려하여 기지국으로 UAV가 통신 시스템에 적용될 때 UAV 궤적을 최적화하는 연구가 진행되고 있다. 논문 [28]은 1차 사용자가 업링크를 할 때, 스펙트럼 공유(Spectrum sharing scenario) 네트워크에서 UAV가 2차 사용자(Secondary user)를 보조하기 위한 목적으로 활용된다. 지상의 통신망에 연결된 1차 사용자(Primary user)가 2차 사용자(Secondary user)와 같은 주파수 대역을 사용할 때, UAV의 궤적 및 전력을 조정하여 1차 사용자에 대한 UAV의 신호 간섭 크기를 제한하는 제약식을 두고 2차 사용자의 주파수 효율(Spectral efficiency)을 최대화하는 문제를 풀어내었다. 다중 사용자 접속(Multiple access) 기술 측면에서 논문 [29]가 기지국 UAV의 움직임에 의한 사용자와 기지국 UAV 간 채널의 주기적 변화가 발생하는 점을 활용하여 새로운 다중 접속기술을 고안하였다. 구체적으로, 기지국 UAV과 사용자 간의 채널의 주기적 변화가 각 사용자의 전송률의 주기적 변화를 발생시키

므로 각 사용자의 전송률을 최대화할 수 있는 최적 시간 할당을 찾을 수 있음을 활용하였다. 물리계층 보안 측면에서 논문 [32]은 기지국 UAV와 지상 사용자 간의 강한 LoS 채널로 인해 신호가 탈취당하기 쉬워지는 상황을 추가된 보조 UAV가 재밍(Jamming)을 형성하여 도청자가 정보에 대한 탈취를 막을 수 있도록 설계하고 보안 전송률(Secrecy rate)을 최대화하였다. 마지막으로, 논문 [41]에서는 기존의 접속 비-직교 다중 접속 기술을 사용하는 기지국을 보조하는 역할로 UAV를 활용하여 총합 전송률을 높이는 기법을 제안하여 기지국 UAV를 통해 급격하게 증가하는 데이터 트래픽을 관리할 가능성을 보여주었다.

이렇듯, 기지국으로서 UAV는 주 기지국 역할을 취하거나 기존 통신망의 지상 기지국들을 보조하는 방식으로 사용될 수 있다. 차후에는 UAV 3차원 이동 등 더욱 복잡한 상황이 적용 및 연구될 것이라 예상된다.

V. 향후 연구 이슈 및 분야

UAV가 이용 가능한 무선 네트워크들은 넓은 커버리지 그리고 향상된 정보 처리량 등 수 많은 이점을 얻는다. 하지만, 이점들을 충분히 살리기 위해 연구가 되어야 하는 과제들이 분명 남아 있다.

5.1 간섭 관리

기존 무선 네트워크, 2D 네트워크에서 간섭 관리는 중요한 연구 주제 중 하나였다. UAV가 이용 가능한 무선 네트워크에서는 UAV의 고도가 높아짐에 따라 더욱 강해지는 LoS 채널로 인해 3D 네트워크의 다운링크(Downlink) 및 업링크(Uplink)에서 간섭 현상은 더욱 심화한다. 또한, 높은 고도는 셀 간 간섭을 강화할 뿐만 아니라 간섭을 받는 사용자의 수도 더욱 증가시킨다. 예를 들자면, UAV의 높이가 1.5m이면 간섭을 받는 사용자의 평균적인 수는 5명이지만 UAV 높이가 120m가 되면 간섭을 받는 사용자의 수가 17명으로 증가하게 된다⁷⁾. 이처럼 심각한 간섭 현상을 다루기 위해서 UAV의 통신에 대한 특징을 파악하고 가정하는 환경이 실제와 괴리가 없는 연구가 추진되어야 한다. 예를 들자면, 한 사용자의 링크가 NLoS인 반면 다른 사용자의 링크가 LoS일 때 한 수신기는 강한 간섭에 영향을 받고 나머지 수신기들은 약한 간섭을 겪는다는 편향적 간섭 채널을 UAV 통신에서 고려할 수 있다⁴²⁾. 그리고, UAV와 사용자 간의 강한 LoS 채널과 긴 거리 때문에 대칭 채널⁴³⁾과 같이 정보 이

론 모델들 역시 UAV 통신에서 사용될 수 있다. 이러한 UAV 채널에 적용 가능한 모델들을 사용하여 협력-통신(Coordinated Multipoint, CoMP) 등의 실용적인 방법들이 UAV 통신에 적용되고 있다. 논문 [27]는 전체 사용자들의 전송률을 향상하기 위해서 UAV의 위치 및 이동성을 최적화하고 동시에 UAV에 수신된 신호를 모두 중앙 처리기가 받아 결합 복호화(Joint decoding)를 시행하는 것을 제안한다. 협력-빔포밍(Coordinated beamforming)⁴⁴⁾과 같은 협력통신 방법 역시 간섭 완화에 있어 매우 유용하다. 기존 협력-통신 기법을 이용하여 간섭 완화는 데 있어 가장 큰 난관은 간섭을 받는 셀들이 너무 많은 경우 셀 간 협력이 너무 많은 수의 셀들에 요구된다는 점이다.

5.2 3D 위치 최적화

UAV들의 3D 배치는 UAV가 이용 가능한 네트워크에서 다루고 있는 주요 연구 과제 중의 하나이다. UAV의 3D 배치는 2D보다 넓은 공간을 활용하여 시스템의 높은 자유도를 산출할 수 있어 많은 문헌에서 상당한 관심을 받고 있다. 하지만 3D 배치에 따라 고려해야 할 환경들, UAV와 지상 간의 채널, 그리고 지상과 항공의 사용자들에 대한 위치 등의 다양한 변수로 인해 3D 배치는 매우 도전적인 문제이다. 더욱이, 다중 UAV의 3D 배치를 동시적으로 고려한다면 이는 셀 간 간섭을 고려해야 하므로 더욱 해결하기 어려운 문제로 여겨진다. 3D 배치를 고려한 커버리지 최대화³⁵⁾, IoT 장치로부터 자료수집(Data collection)의 에너지 효율성 향상⁴⁵⁾, 그리고 UAV의 커버리지 내의 지상 사용자 수 최대화⁴⁶⁾ 등의 관점에서 연구들이 진행되고 있으나 UAV의 3D 배치와 그에 대한 최적 배치를 이해하기 위해 더욱 포괄적인 연구가 필요하다.

5.3 3D 채널 모델링

앞서 언급한 바와 같이 지상과 항공 간 채널 특징들은 기존 평면 네트워크에서 사용되던 채널들의 특징들과 매우 다르다. 또한, UAV가 이용 가능한 네트워크의 성능에 직접적인 영향을 주기 때문에 채널 모델링은 UAV 통신에 있어 중요한 관심사 중 하나이다. 셀룰러 시스템에서 실용적인 UAV의 배치에 따른 지상과 항공 간 채널을 정확히 구체화하는 것이 첫 번째 단계이다. 무수한 연구들이 이 문제를 파악하고 각자 채널 모델링을 제안하였으나 이와 같은 채널 모델들에 대한 추가적인 이해와 정확도가 추후 검증되어야 한다^{7),10,69)}.

5.4 보안과 프라이버시

현재 IoT 장비들이 그러하듯 UAV들은 서비스 부인 공격이나 스푸핑(Spoofing) 등의 사이버 위협에 매우 취약하다. 또한, UAV들은 의도하지 않은 목적에 대해 방해받거나 빼앗길 수도 있다⁴². 데이터 통신의 관점에서 통신의 보안과 사용자의 사생활은 무선 통신 시스템과 타협될 수 있다. 그러나, UAV를 무선 네트워크에 통합시키며 LoS가 지배적인 채널 상황과 UAV의 높은 자유도는 물리계층에서 새로운 보안에 관한 도전적인 문제를 가져온다. 예를 들면, 도청자는 합법적인 사용자와 기지국 간의 더욱 강해진 채널로 인해 도청자의 채널 역시 큰 감쇠가 없는 위치에 있을 수도 있다. 이러한 경우에 합법적인 채널이 다른 채널 보다 좋게 만들어줄 대책이 없다면, 정보-이론적 보안 전송률은 0에 가까워진다⁴⁷. 흥미롭게도 인공적인 잡음을 바탕으로 한 기술들은 도청자의 채널이 열화되도록 만들 수 있다⁴⁸. 특히, 도청자의 채널 상태를 정보를 기지국에서 사용하지 못한다면, 인공적인 잡음 기술들은 더욱 중요하다. 그러나, 주요 채널에 대해 직교 방향으로 주입된 인공적인 잡음은 UAV의 네트워크의 다른 합법적인 사용자들에게 악영향을 발생시킨다. 더욱이, UAV의 이동성 때문에 합법적인 사용자와 불법적인 사용자 간의 식별이 매우 어려워진다. 따라서, 복합적인 문제를 해결하기 위해 물리계층 보안 접근들은 머신러닝을 사용한다^{49,50}. 이 기술들은 기존보다 더욱 좋은 성능을 보여주고 있어 미래의 연구에 대해 전망 있는 방향을 제시하고 있다.

VI. 결론

본 논문은 UAV 통신의 새로운 특징들인 UAV 채널과 궤적 최적화에 관한 연구들을 토대로 향후 연구를 위한 정리 및 발전 방향을 제시하였다. UAV 채널에서는 기존 지상 채널과 다르게 통신환경 혹은 UAV의 위치 등의 다양한 요소에 영향을 받기 때문에 각 상황에 따른 여러 채널 모델을 정리하였다. 이를 통해 UAV 통신에 있어서 상황에 따른 적합한 채널 모델을 선택하는 것이 중요함을 파악하였다. UAV 궤적 최적화에서는 다양한 연구에서 다룬 최적화 문제들을 엮어 일반적인 형태의 궤적 최적화 문제를 수식으로 나타내었다. 한편으로 UAV의 활용 방식에 따라 UAV 궤적 최적화의 문제에 대한 최적화 방식 또는 연구물들을 정리하여 추후 UAV 궤적 최적화의 연구 방향성을 제시하였다. 마지막으로, 도전적인 연구 주제들을 정리하여 미래의 연구로서 가치 있는 분야와 방향을

알아보았다.

References

- [1] K. Valavanis and G. J. Vachtsevanos, *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Amsterdam, The Netherlands: Springer, 2014.
- [2] A. Fotouhi, H. Qiang, M. Ding, M. Hassan, L. G. Giordano, A. Garcia-Rodriguez, and J. Yuan, "Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 4, pp. 3417-3442, Fourth Quarter, 2019.
- [3] R. Austin, *Unmanned Aircraft Systems: UAVs Design, Development and Deployment*, Hoboken, Wiley, NJ, USA, 2011.
- [4] Q. Wu, Y. Zeng, and R. Zhang, "Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 2109-2121, Mar. 2018.
- [5] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 12, pp. 4983-4996, Dec. 2016.
- [6] A. A. Khuwaja, Y. Chen, N. Zhao, M.-S. Alouini, and P. Dobbins, "A survey of channel modeling for UAV communications," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 2804-2821, Fourth quarter, 2018.
- [7] R. Amorim, H. Nguyen, P. Mogensen, I. Z. Kovács, J. Wigard, and T. B. Sørensen, "Radio channel modeling for UAV communication over cellular networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 6, no. 4, pp. 514-517, Aug. 2017.
- [9] M. M. Azari, F. Rosas, K.-C. Chen, and S. Pollin, "Ultra reliable UAV communication using altitude and cooperation diversity," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 1, pp. 330-344, Jan. 2018.
- [10] D. Athukoralage, I. Guvenc, W. Saad, and M.

- Bennis, "Regret based learning for UAV assisted LTE-U/WiFi public safety networks," in *Proc. IEEE Globecom*, Washington, DC, USA, Dec. 2016.
- [11] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient Internet of Things communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 11, pp. 7574-7589, 2017.
- [12] X. Ye, X. Cai, X. Yin, J. Rodriguez-Pineiro, L. Tian, and J. Dou, "Air-to-ground big-data-assisted channel modeling based on passive sounding in LTE networks," in *Proc. IEEE GC Wkshps*, Singapore, Singapore, Dec. 2017.
- [13] D. W. Matolak and R. Sun, "Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems-part III: The suburban and near-urban environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 8, pp. 6607-6618, Aug. 2017.
- [14] R. Sun and D. W. Matolak, "Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems part II: Hilly and mountainous settings," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 3, pp. 1913-1925, Mar. 2017.
- [15] N. Goddemeier and C. Wietfeld, "Investigation of air-to-air channel characteristics and a UAV specific extension to the rice model," in *Proc. IEEE GC Wkshps*, pp. 1-5, San Diego, CA, USA, Dec. 2015.
- [16] E. Yanmaz, R. Kuschnig, and C. Bettstetter, "Achieving air-ground communications in 802.11 networks with three-dimensional aerial mobility," in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 120-124, Turin, Italy, Apr. 2013.
- [17] W. Khawaja, I. Guvenc, and D. Matolak, "UWB channel sounding and modeling for UAV air-to-ground propagation channels," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, Washington, DC, USA, Dec. 2016.
- [18] V. Yajnanarayana, Y.-P. E. Wang, S. Gao, S. Muruganathan, and X. Lin, "Interference mitigation methods for unmanned aerial vehicles served by cellular networks," in *IEEE 5GWF*, Dresden, Germany, Jul. 2018.
- [19] W. Shin, N. Lee, J.-B. Lim, C. Shin, and K. Jang, "On the design of interference alignment scheme for two-cell MIMO interfering broadcast channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 2, pp. 437-442, Feb. 2011.
- [20] W. Shin, M. Vaezi, B. Lee, D. J. Love, J. Lee, and H. V. Poor, "Non-orthogonal multiple access in multi-cell networks: Theory, performance, and practical challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 10, pp. 176-183, Oct. 2017.
- [21] W. Mei, Q. Wu, and R. Zhang, "Cellular-connected UAV: Uplink association, power control and interference coordination," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 11, pp. 5380-5393, Nov. 2019.
- [22] W. Mei, Q. Wu, and R. Zhang, *UAV-sensing-assisted cellular interference coordination: A cognitive radio approach* (2020) Retrieved May 22, 2020, from <https://arxiv.org/abs/2001.01253>.
- [23] W. Mei and R. Zhang, "Uplink cooperative NOMA for cellular-connected UAV," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 13, no. 3, pp. 644-656, Jun. 2019.
- [24] S. Zhang, Y. Zeng, and R. Zhang, "Cellular-enabled UAV communication: A connectivity constrained trajectory optimization perspective," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 3, pp. 2580-2604, Mar. 2018.
- [25] P. Tseng, "Convergence of a block coordinate descent method for nondifferentiable minimization," *J. Optim. Theory A*, vol. 109, no. 3, pp. 475-494, Jun. 2001.
- [26] M. Razaviyayn, "Successive convex approximation: Analysis and applications," Ph.D. dissertation, Univ. of Minnesota, 2014.
- [27] L. Liu, S. Zhang, and R. Zhang, "CoMP in the sky: UAV placement and movement optimization for multi-user communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 8, pp. 5645-5658, Aug. 2019.

- [28] Y. Huang, W. Mei, J. Xu, L. Qiu, and R. Zhang, "Cognitive UAV communication via joint maneuver and power control," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 11, pp. 7872-7888, Nov. 2019.
- [29] J. Lyu, Y. Zeng, and R. Zhang, "Cyclical multiple access in UAV-aided communications: A throughput-delay tradeoff," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 5, no. 6, pp. 600-603, Dec. 2016.
- [30] N. Zhao, X. Pang, Z. Li, Y. Chen, F. Li, Z. Ding, and M.-S. Alouini, "Joint trajectory and precoding optimization for UAV-assisted NOMA networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 5, pp. 3723-3735, May 2019.
- [31] X. Jiang, Z. Wu, Z. Yin, and Z. Yang, "Power and trajectory optimization for UAV-enabled amplify-and-forward relay networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 48688-48696, 2018.
- [32] Y. Cai, F. Cui, Q. Shi, M. Zhao, and G. Y. Li, "Dual-UAV-enabled secure communications: Joint trajectory design and user scheduling," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 9, pp. 1972-1985, Sep. 2018.
- [33] F. Cheng, G. Gui, N. Zhao, Y. Chen, J. Tang, and H. Sari, "UAV-relaying-assisted secure transmission with caching," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 5, pp. 3140-3153, May 2019.
- [34] ITU, "Propagation data and prediction methods for the design of terrestrial broadband millimetric radio access systems," Rec. ITU-R. P. 1410-2, 2003.
- [35] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, "Optimal LAP altitude for maximum coverage," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 3, no. 6, pp. 569-572, Dec. 2014.
- [36] S. Zhang, H. Zhang, Q. He, K. Bian, and L. Song, "Joint trajectory and power optimization for UAV relay networks," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 22, no. 1, pp. 161-164, Jan. 2017.
- [37] Y. Zeng, X. Xu, and R. Zhang, "Trajectory design for completion time minimization in UAV-enabled multicasting," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 2233-2246, Apr. 2018.
- [38] G. Zhang, H. Yan, Y. Zeng, M. Cui, and Y. Liu, "Trajectory optimization and power allocation for multi-hop UAV relaying communications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 48566-48576, Aug. 2018.
- [39] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: Performance and tradeoffs," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 6, pp. 3949-3963, Jun. 2016.
- [40] J. Lyu, Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Placement optimization of UAV-mounted mobile base stations," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 3, pp. 604-607, Mar. 2017.
- [41] N. Zhao, X. Pang, Z. Li, Y. Chen, F. Li, Z. Ding, and M.-S. Alouini, "Joint trajectory and precoding optimization for UAV assisted NOMA networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 5, pp. 3723-3735, May 2019.
- [42] M. Vaezi and H. V. Poor, "Simplified Han-Kobayashi region for one-sided and mixed Gaussian interference channels," in *Proc. IEEE ICC*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016.
- [43] O. Ordentlich, U. Erez, and B. Nazer, "The approximate sum capacity of the symmetric Gaussian K-user interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 60, no. 6, pp. 3450-3482, Jun. 2014.
- [44] W. Shin, M. Vaezi, B. Lee, D. J. Love, J. Lee, and H. V. Poor, "Coordinated beamforming for multi-cell MIMO-NOMA," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 21, no. 1, pp. 84-87, Jan. 2017.
- [45] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient Internet of Things communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 11, pp. 7574-7589, Nov. 2017.
- [46] I. Bor-Yaliniz and H. Yanikomeroglu, "The new frontier in RAN heterogeneity:

Multi-tierdrone-cells,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 54, no. 11, pp. 48-55, Nov. 2016.

- [47] A. D. Wyner, “The wire-tap channel,” *Bell Syst. Technical J.*, vol. 54, no. 8, pp. 1355-1387, 1975.
- [48] S. Goel and R. Negi, “Guaranteeing secrecy using artificial noise,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 6, Jun. 2008.
- [49] S. Yun, J.-M. Kang, I.-M. Kim, and J. Ha, “Deep artificial noise: Deep learning-based precoding optimization for artificial noise scheme,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 3, Mar. 2020.
- [50] D. Lee, S. Han, and J. Ha, “Decoding linear block code using machine learning,” in *Proc. KICS Summer Conf.*, vol. 69, no. 1, pp. 929-930, JeJu island, Korea, Jun. 2019.

하 노 겸 (Nohgyeom Ha)



2019년 8월 : 부산대학교 전자공학과 학사
 2019년 9월~현재 : 부산대학교 전기전자공학과 석박통합과정 <관심분야> 통신공학, 머신러닝 응용
 [ORCID:0000-0003-4827-6877]

안 지 혜 (Jihye An)



2019년 8월 : 부산대학교 전자공학과 학사
 2019년 9월~현재 : 부산대학교 전기전자공학과 석박통합과정 <관심분야> 통신공학, 최적화 이론
 [ORCID:0000-0003-4024-2613]

신 원 재 (Wonjae Shin)



2005년 2월 : 한국과학기술원 전자공학 학사
 2007년 8월 : 한국과학기술원 전자공학 석사
 2007년 8월~2013년 10월 : 삼성전자 종합기술원 전문연구원
 2013년 11월~2014년 2월 : 삼성전자 DMC연구소 책임연구원
 2017년 8월 : 서울대학교 전기·정보공학부 공학박사
 2017년 9월~2018년 2월 : Princeton 대학교 박사후연구원
 2018년 3월~현재 : 부산대학교 전자공학과 조교수 <관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 머신러닝 및 빅데이터 신호처리
 [ORCID:0000-0001-6513-1237]