

도심 환경에서의 UAV 통신을 위한 차단 인지 채널 모델링 연구 동향

이가영, 조안나, 이수경

연세대학교

{gylee, annacho6, sklee}@yonsei.ac.kr

A Survey on Blockage-Aware Channel Modeling for UAV Communications in Urban Environments

Gayeong Lee, Anna Cho, Sukyoung Lee

Yonsei Univ.

요약

무인 항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)는 Line-of-Sight(LoS) 채널을 용이하게 형성할 수 있고 배치가 유연하다는 장점으로 인해 무선 통신 분야에서 주목받고 있다. 하지만 도심 환경에서는 건물과 같은 장애물이 UAV와 지상 사용자 간 링크를 차단하여 통신 성능을 저하시킨다. 기존의 고도각 기반 확률적 LoS 모델은 장애물의 실제 위치와 형상을 반영하지 못한다는 한계가 있다. 본 논문에서는 장애물의 기하학적 특성을 명시적으로 고려하는 차단 인지(blockage-aware) 채널 모델링 기법들을 UAV 운용 방식에 따라 분류하고 분석한다.

I. 서론

무인 항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)는 Line-of-Sight(LoS) 채널을 형성하기 용이하고 배치가 유연하다는 특성으로 인해 차세대 무선 네트워크의 핵심 기술로 주목받고 있다 [1]-[4]. 하지만 도심 환경에서는 건물과 같은 장애물이 UAV와 지상 사용자 간 링크를 차단하여 Non-Line-of-Sight(NLoS) 채널을 형성함으로써 통신 성능을 저하시킨다 [2],[3],[5].

기존 연구에서 널리 사용되는 확률적 LoS 모델은 UAV와 사용자 간 고도각만을 이용하여 LoS/NLoS 확률을 추정한다 [2],[3],[5]. 하지만 이러한 확률적 모델은 장애물의 실제 위치와 형상을 반영하지 못하여 정확한 LoS/NLoS 판단이 불가능하다는 한계가 있다 [4],[6]. 또한 UAV는 비행 중 장애물과의 충돌을 회피해야 하므로, 장애물 구조를 고려한 경로(trjectory) 최적화가 필수적이다 [4],[7]. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 장애물의 위치와 형상을 명시적으로 고려하여 LoS/NLoS 상태를 판단하는 차단 인지(blockage-aware) 채널 모델링 기법들을 종합적으로 분석한다.

II. 본론

본 논문에서는 blockage-aware 채널 모델링 기법들을 UAV 운용 방식에 따라 분류하여 분석한다. 구체적으로 UAV를 고정 위치에 배치하는 positioning 기반 연구와 연속적인 경로를 따라 이동하는 trajectory 기반 연구로 구분하여 살펴본다. [표 1]은 각 연구의 UAV 운용 방식, 최적화 목표, 장애물 모델, 충돌 회피 여부를 정리한 것이다.

2-1. UAV Positioning 최적화

Positioning 기반 연구들은 장애물의 기하학적 구조를 명시적으로 고려하여 최적 위치를 선정한다. 주요 연구들은 전송 성능 개선 및 커버리지 확

장을 목표로 수행되었다.

UAV 운용	최적화 목표	문헌	장애물 모델	장애물 충돌 회피
Positioning	전송 성능	[8]	Blocking plane	X
		[9]	다면체	X
	LoS 커버리지	[10]	다각기둥	X
		[11]	직육면체	X
Trajectory	전송 성능	[4]	직육면체	O
	임무 완료 시간	[6]	다면체	X
	에너지 효율	[7]	원기둥	O

표 1. Blockage-aware 모델을 사용한 UAV 연구 분류

[8]은 각 장애물에 대해 사용자와 visible outer edge로 정의된 blocking plane을 구성하고, UAV가 모든 blocking plane의 바깥쪽에 있으면 LoS로, 어떤 장애물의 blocking plane 안쪽에 있으면 NLoS로 판단하였다. 이를 기반으로 최소 전송률을 최대화하기 위해 UAV 3차원 위치, 전력 할당, 사용자 association을 공동 최적화하였다. [9]는 다수 UAV 기지국이 Orthogonal Frequency-Division Multiple Access(OFDMA) 방식으로 지상 사용자에게 데이터를 전송하는 하향링크 시스템을 다루었다. 각 장애물의 blocked region을 hyperplane 집합으로 정의된 다면체로 모델링하였으며, UAV 위치가 모든 장애물의 blocked region 밖에 있을 때 LoS로, 하나 이상의 blocked region 내에 있을 때 NLoS로 판단하였다. 이를 sigmoid 함수를 통해 연속 함수로 근사하여, 공정성 보장을 위해 사용자 간 최소 전송률을 최대화하도록 UAV 3차원 위치, 전력 할당, 사용자 association, 부반송과 할당(subcarrier allocation)을 공동 최적화하였다.

[10]은 다각기둥 형태의 장애물을 삼각기둥 단위로 분할하여 모델링하고, 지상 사용자와 UAV를 잇는 링크가 각 삼각기둥과 교차하는지를 기하학적으로 판별하였다. 이를 통해 각 사용자-UAV 링크가 LoS인지 NLoS

인지 판단한 뒤, 입자 군집 최적화(particle swarm optimization, PSO) 기반 알고리즘을 사용하여 LoS 링크를 갖는 사용자 수를 최대화하는 UAV의 3차원 위치를 최적화하였다. [11]은 장애물을 직육면체 형태의 3차원 블록으로 모델링하고, UAV와 지상 사용자를 연결하는 3차원 공간 벡터가 장애물의 측면과 기하학적으로 교차하는지 판단하여 LoS/NLoS 상태를 결정하였다. 각 장애물의 회전 좌표계를 정의하고 좌표 변환을 통해 임의 형태의 장애물 배치에 대응하였으며, 원기둥 및 다각기둥으로의 확장을 통해 다양한 장애물 형상을 표현하였다. 이를 기반으로 메타휴리스틱 기법을 적용하여 LoS 커버리지 비율을 최대화하는 UAV 위치를 탐색하였다.

2-2. UAV Trajectory 최적화

Trajectory 기반 연구들은 시간에 따른 위치 변화와 장애물 회피를 동시에 고려한다. 주요 연구들은 통신 품질 개선, 임무 완료 시간 단축, 에너지 효율 향상 등 다양한 목표에 대해 수행되었다.

[4]는 장애물을 너비, 길이, 높이로 정의된 직육면체 형태로 모델링하고, UAV와 지상 사용자를 연결하는 선분이 장애물과 기하학적으로 교차하는지 판단하여 LoS/NLoS 상태를 결정하였다. 신호 채널에 대해서는 NLoS 상태를 정확히 판단하여 채널 이득의 하한을, 간섭 채널에 대해서는 LoS 상태를 판단하여 채널 이득의 상한을 각각 도출함으로써 장애물 차단을 활용한 interference coordination이 가능하도록 하였다. 또한 각 time slot의 이산 지점뿐만 아니라 연속적인 trajectory 전체에서 UAV가 장애물과 충돌하지 않도록 장애물 회피 제약을 적용하였다. 이를 통해 신호 채널은 LoS로, 간섭 채널은 NLoS로 형성하도록 trajectory 및 자원을 최적화함으로써 최소 spectral efficiency를 최대화하였다.

[6]은 다수 UAV가 지상 사용자로부터 데이터를 수집하는 상향링크 시스템을 다루었다. 각 장애물의 blocked region을 다면체로 모델링하고 sigmoid 함수로 연속 근사하였다. 임무 완료 시간을 최소화하기 위해 가변 time slot 길이를 포함한 UAV 3차원 trajectory, 사용자 스케줄링, 부반송과 할당을 공동 최적화하였다.

[7]은 장애물을 중심 좌표, 반지름, 높이로 정의된 원기둥 모델로 표현하고, UAV와 지상 사용자 간 통신 경로가 원기둥 장애물에 의해 차단되는지를 기하학적으로 판단하여 LoS/NLoS 상태를 결정하였다. 장애물에 의한 trajectory 제한과 통신 링크 차단을 동시에 고려하여, 장애물 회피 제약 하에서 3차원 trajectory를 최적화함으로써 에너지 효율을 최대화하였다.

III. 결론

본 논문에서는 도심 환경에서 UAV 통신 시스템의 성능 향상을 위한 blockage-aware 채널 모델링 기법들을 분석하였다. 확률적 LoS 모델은 장애물의 실제 위치와 형상을 반영하지 못한다는 한계가 있으나, blockage-aware 모델은 장애물의 기하학적 특성을 명시적으로 고려하여 정확한 LoS/NLoS 판단과 장애물 회피를 동시에 달성할 수 있다. 향후 연구에서는 실시간 환경 정보 획득 및 동적 최적화 기법 개발을 통해 변화하는 도심 환경에 적응 가능한 UAV 통신 시스템 구현이 요구된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 중견연구(No. RS-2025-00573388)의 지원을 받아 수행된 연구임

- [1] N. Ha, J. Ahn, and W. Shin, "A survey on UAV-based cellular networks: UAV channel modeling and UAV trajectory optimization," *J. Korean Inst. Commun. Inf. Sci. (KICS)*, vol. 45, no. 9, pp. 1493-1507, Sep. 2020.
- [2] L. Wang, Q. Zhou, and Y. Shen, "Computation efficiency maximization for UAV-assisted relaying and MEC networks in urban environment," *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 7, no. 2, pp. 565-578, Jun. 2023.
- [3] J. Zhou, M. Wang, D. Tian, K. Qu, G. Qu, X. Duan, and X. Shen, "Reliability-optimal UAV-assisted mobile edge computing: Joint resource allocation, data transmission scheduling and motion control," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 24, no. 5, pp. 4217-4234, May 2025.
- [4] K. Heo, G. Park, and K. Lee, "Building blockage-aided interference coordination for multi-UAV-enabled wireless networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 25, pp. 8148-8163, Dec. 2026.
- [5] Y. Liu, X. Fang, M. Xiao, F. Song, Y. Cui, Q. Xue, and C. Tang, "Latency optimization for multi-UAV-assisted task offloading in air-ground integrated millimeter-wave networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 10, pp. 13359-13376, Oct. 2024.
- [6] P. Yi, L. Zhu, Z. Xiao, R. Zhang, Z. Han, and X.-G. Xia, "Trajectory design and resource allocation for multi-UAV communications under blockage-aware channel model," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 72, no. 4, pp. 2324-2338, Apr. 2024.
- [7] X. Zuo, Z. Yang, Y. Fan, R. Yao, J. Xu, and L. Li, "3D trajectory optimization for energy-efficient UAV communication with obstacle constraints," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, pp. 1-12, Aug. 2025.
- [8] Q. Wang, Z. Yao, W. Cheng, and X. Zheng, "Post-disaster max-min rate optimization for multi-UAV RSMA network in obstacle environments," arXiv preprint arXiv:2509.23908, Sep. 2025.
- [9] P. Yi, L. Zhu, Z. Xiao, R. Zhang, Z. Han, and X.-G. Xia, "3-D positioning and resource allocation for multi-UAV base stations under blockage-aware channel model," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 3, pp. 2453-2468, Mar. 2024.
- [10] Y. Cho, J. Won, D.-Y. Kim, and J.-W. Lee, "Optimal placement of aerial base station utilizing topographic features," *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 12, pp. 19882-19900, Dec. 2025.
- [11] M. T. Dabiri, M. Hasna, S. Althunibat, and K. Qaraqe, "LoS coverage analysis for UAV-based THz communication networks: Toward 3-D visualization of wireless networks," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 60, no. 6, pp. 8726-8743, Dec. 2024.