

도심 UAV 기지국의 3차원 공간-빔 최적화를 통한 커버리지 향상 방법에 관한 연구

권보규, 주유민, 이지욱, 김도엽*

인천대학교

{skdiqhrb, 22joomin}@inu.ac.kr, applemango1159@naver.com, *doyup@inu.ac.kr

A Study on the 3D Spatial-Beam Optimization of an Urban UAV-BS for Coverage Enhancement

Bogyu Kwon, Yumin Joo, Jiwook Lee, Do-Yup Kim*

Incheon National Univ.

요약

본 연구는 도심 환경에서 무인항공기(UAV)의 3차원 배치뿐만 아니라, 빔의 조준 각과 수평/수직 빔폭을 동시에 최적화하여 지상 사용자들의 통신 커버리지를 향상시키는 문제를 다룬다. 특히 고층 건물이 존재하는 도심 환경을 고려하여, 가시선(LoS) 및 비가시선(NLoS) 기반의 공대지(A2G) 채널 모델과 빔폭 제한이 있는 지향성 안테나 모델을 기반으로 최적화 문제를 구성한다. 이 문제는 일반적으로 복잡하지만 기하학적 분석과 수식 정리를 통해 메타휴리스틱 기법이 적용 가능케 유도한다.

I. 서론

최근 무인항공기(UAV)의 기술 발전과 함께 이를 공중기지국으로 활용하여 지상 네트워크의 통신 품질을 향상시키려는 시도가 활발히 진행되고 있다. 특히 UAV는 높은 고도에 배치될 수 있어 지상 단말과의 가시선(LoS) 경로 확보 가능성이 높으며, 이를 통해 보다 안정적인 무선 전파 환경을 제공할 수 있다. 이러한 특성은 도시 지역이나 재난 지역 등에서 기존의 고정형 지상 기지국(GBS)에 비해 큰 장점을 가진다^[1].

상당수의 기존 연구는 수학적 분석의 편의를 위해 등방성 빔(isotropic beam)을 가정하고, 지형지물을 고려하지 않은 단순한 공대지(A2G) 채널 모델 또는 확률적 평균값에 기반한 A2G 채널 모델을 사용한 채로 UAV 기반 통신 시스템의 배치 최적화 문제에 집중하고 있다^[2]. 그러나 이러한 접근은 고층 건물이나 다양한 장애물이 존재하는 현실적인 도심 환경에서는 정확한 성능 예측과 적용에 한계가 있다^[3].

이에 본 연구는 도심지와 같이 고층 지형지물이 밀집한 환경을 고려하여, UAV의 3차원 배치뿐만 아니라 안테나의 빔 조준 각 및 수평/수직 빔폭을 동시에 최적화함으로써 지상 단말들의 통신 커버리지를 향상시키는 최적화 문제를 다룬다. 이를 위해 빔폭 제한이 있는 지향성 빔포밍 모델과, LoS 영역과 비가시선(NLoS) 영역에 따라 상이한 A2G 채널 모델을 통합한 수식 모델을 구성한다. 또한 기하학적 분석에 기반한 수식 정리를 통해 지상 커버리지 면적을 준 단형 형태로 표현하고, 이를 통해 통상적인 메타휴리스틱 기법이 적용 가능한 구조로 문제를 재구성하며, 실질적인 해법을 도출할 수 있는 최적화 접근 방안을 제시한다^[4].

본 논문에서는 dB 스케일 값의 경우 $(\cdot)^{dB}$ 와 같이 윗첨자를 붙여 구분하며, 해당 표기가 없을 경우 선형 스케일로 고려한다. 또한, 수식 표현의 간결성을 위해, 함수의 입력이 명확하거나 고정되어 혼동의 여지가 없는 경우, 해당 인자를 생략하여 간결한 표기법을 적용한다.

II. 본론

본 연구에서는 UAV 기반 공중기지국이 도시 환경 내 고정된 고도에서

정지 비행하며, 방향성 안테나를 통해 지상의 사용자에게 무선 서비스를 제공하는 시나리오를 고려한다. 이때 UAV의 3차원 위치 \mathbf{x}_B , 빔의 조준 각(고도각 θ , 방위각 ϕ), 그리고 빔의 폭(수직 빔폭 ω_θ , 수평 빔폭 ω_ϕ)을 동시에 최적화하여 통신 커버리지를 향상시키고자 한다. 편의상 이들 모든 최적화 변수를 $\mathbf{z} = \{\mathbf{x}_B, \theta, \phi, \omega_\theta, \omega_\phi\}$ 로 정의하며, 그림 1은 각 변수의 의미와 역할을 시각적으로 보여준다.

UAV가 방사하는 빔 영역은 3차원 공간상에서 지면과 교차하며, \mathbf{z} 에 따라 타원형 또는 원형의 영역 $\Omega(\mathbf{z})$ 을 형성한다. 본 논문에서는 이 영역을 간단히 Ω_B 로 표기하며, 빔 커버리지 영역이라 부른다. 물리적으로 Ω_B 밖에 위치한 지상 단말과는 통신이 원활하지 않을 것이기 때문에 해당 영역 내에 위치한 단말만이 통신 서비스를 받을 여지가 있게 된다. 이를 표현하기 위해 UAV의 안테나 이득을 다음과 같이 정의한다.

$$G_B = \begin{cases} \frac{G_0}{\eta(\omega_\theta, \omega_\phi)}, & \text{if } x \in \Omega_B \\ 0, & \text{if } x \notin \Omega_B \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 $\eta(\omega_\theta, \omega_\phi)$ 는 ω_θ 와 ω_ϕ 에 대한 증감함수로, 빔폭이 커질수록 안테나 이득이 작아짐을 나타낸다^[5].

이어서 도심 환경을 모델링한다. 정사각기둥 형태의 건물이 총 ℓ 개 있다고 가정하며, i 번째 건물을 벡터 $\mathbf{f}_i = (x_i, y_i, w_i, h_i)$ 로 나타낸다. 여기서 (x_i, y_i) 는 건물 바닥 중심 좌표, w_i 는 바닥면 폭, h_i 는 높이이다. 전체 건물 집합은 $\mathbf{F} = \{\mathbf{f}_i\}_{i=1}^\ell$ 로 나타낸다.

UAV와 지상 건물 간의 기하학적 관계를 분석함으로써, 지상의 임의의 한 지점에 대해 UAV로부터의 전파 경로가 LoS인지 또는 NLoS인지를 판별할 수 있다. 이러한 판별을 기반으로 각 지점에서 적용되는 채널 모델이 결정되며, 이를 통해 해당 지점이 통신 커버리지 조건을 만족하는지 여부를 평가할 수 있다. 본 연구에서는 UAV로부터 LoS 링크가 형성될 수 있는 지상 영역을 Ω_L , NLoS 링크가 형성되는 영역을 Ω_N 으로 정의하며, 이를 구하는 방법에 대한 상세는 페이지 제한으로 인해 [4]을 참조한다.

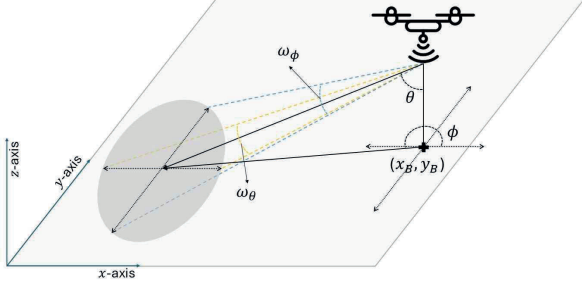


그림 1. UAV 기반 공중기지국 시스템 모델

지상의 임의의 지점 \mathbf{x} 와 UAV 간 거리 $d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_B) = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_B\|$ 에 따라 경로 손실은 다음과 같이 모델링된다.

$$L_j^{\text{dB}} = a_j + b_j \log_{10} d + \xi_j, \quad j = \begin{cases} L, & \text{if } \mathbf{x} \in \Omega_L \\ N, & \text{if } \mathbf{x} \in \Omega_N \end{cases} \quad (2)$$

위 식에서 j 는 링크 상태를 나타내는 인덱스로 LoS이면 L , NLoS이면 N 의 값을 갖고, a_j 와 b_j 는 환경에 의해 결정되는 경로 손실에 관련 파라미터이고, $\xi_j \sim N(0, \sigma_j^2)$ 는 쉐도우 페이딩을 나타내는 확률 변수이다.

이제, \mathbf{x} 에서의 수신 신호대잡음비(SNR)를 구한다. UAV와의 무선 링크 상태가 $j \in \{L, N\}$ 일 때, SNR은 다음과 같이 정의된다.

$$I_j^{\text{dB}} = P_B^{\text{dB}} + G_B^{\text{dB}} - L_j^{\text{dB}} - P_N^{\text{dB}}. \quad (3)$$

위 식에서 P_B^{dB} 와 P_N^{dB} 는 각각 UAV의 송신 및 잡음 전력을 나타낸다. 앞서 구한 수신 SNR이 주어진 임계값 I_0^{dB} 이상일 확률을 커버리지 확률로 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_j &= \Pr\{I_j^{\text{dB}} \geq I_0^{\text{dB}}\} \\ &= \Pr\{P_B^{\text{dB}} + G_B^{\text{dB}} - a_j - b_j \log_{10} d_{\mathbf{x}, \mathbf{x}_B} - \xi_j - P_N^{\text{dB}} \geq I_0^{\text{dB}}\} \\ &= \Pr\{\xi_j \leq P_B^{\text{dB}} + G_B^{\text{dB}} - a_j - b_j \log_{10} d_{\mathbf{x}, \mathbf{x}_B} - P_N^{\text{dB}} - I_0^{\text{dB}}\} \\ &= \Pr\{\xi_j \geq -P_B^{\text{dB}} - G_B^{\text{dB}} + a_j + b_j \log_{10} d_{\mathbf{x}, \mathbf{x}_B} + P_N^{\text{dB}} + I_0^{\text{dB}}\} \\ &= Q\left(\frac{-P_B^{\text{dB}} - G_B^{\text{dB}} + a_j + b_j \log_{10} d_{\mathbf{x}, \mathbf{x}_B} + P_N^{\text{dB}} + I_0^{\text{dB}}}{\sigma_j}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

최종적으로 커버리지 확률이 ϵ 이상인 지점의 경우 안정적인 통신 서비스를 받는다고 볼 수 있기 때문에, 타깃 영역 $A \subset \mathbb{R}^2$ 에 대하여 목적함수는 빔 커버리지 영역 내에서 안정적인 통신 서비스를 받는 영역의 면적으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$f_{\text{obj}}(\mathbf{z}) = \iint_{\mathbf{x} \in A} \mathbf{1}_{\mathbf{x} \in \Omega_B} \cdot \left[\sum_{j \in \{L, N\}} \mathbf{1}_{[\mathbf{x} \in \Omega_j]} \mathbf{1}_{[C_j \geq \epsilon]} \right] d\mathbf{x}. \quad (5)$$

이어서 각 최적화 변수의 정의역을 명시한 제약 조건을 포함하여, 최적화 문제는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{cases} \max & f_{\text{obj}}(\mathbf{z}) \\ \text{s.t.} & \mathbf{x}_B \in \mathbb{R}^3, \quad \theta \in [0, \frac{\pi}{2}], \quad \phi \in [0, 2\pi], \\ & \omega_\theta \in [\omega_\theta^{\text{m}}, \omega_\theta^{\text{M}}], \quad \omega_\phi \in [\omega_\phi^{\text{m}}, \omega_\phi^{\text{M}}]. \end{cases} \quad (6)$$

위 최적화 문제는 정의상 이중 적분 형태의 목적 함수를 포함하고 있을 뿐만 아니라, 임의의 지형지물 구조가 주어진 상황에서 일반화된 해법을 해석적으로 도출하기는 매우 어렵다. 특히 UAV 배치 문제는 그 자체로 NP-hard 문제로 잘 알려져 있다^[6]. 그러나 [4]에 제시된 방법론을 활용하면, 임의의 결정 변수 집합 후보 해 \mathbf{z}^\dagger 에 상응하는 목적 함수값 $f_{\text{obj}}(\mathbf{z}^\dagger)$ 을 단순 합산 형태로 근사적으로 계산할 수 있다. 이에 따라 후보 해에 대한 목적 함수값을 연속적인 수치 연산 없이도 효율적으로 평가할 수 있으며, 입자군집최적화(PSO) 등 다양한 메타휴리스틱 기법을 적용하여 실질적인 근사 최적해(near-optimal solution) \mathbf{z}^* 를 도출할 수 있다^[7].

III. 결론

본 논문에서는 도심 환경에서 UAV 기반 공중기지국의 3차원 배치, 빔 조준 각, 수직 및 수평 빔폭을 동시에 최적화하여 지상 단말의 무선 통신 커버리지를 극대화하는 문제를 다루었다. 고층 지형지물이 밀집한 환경을 고려하여, LoS와 NLoS 영역 분류 기반의 A2G 채널 모델과 빔폭 제한이 있는 지향성 안테나 모델을 통합한 수식 모델을 구성하였으며, 이를 통해 현실적인 도심 환경에 적합한 커버리지 예측이 가능하도록 하였다. 또한, 기하학적 분석 기반의 수식 정리를 통해 목적 함수 계산을 단순 합산 형태로 근사화함으로써, PSO와 같은 메타휴리스틱 기법을 손쉽게 적용할 수 있는 구조로 문제를 정식화할 수 있음을 제시하였다. 향후, 다양한 도심 환경에 대한 시뮬레이션과 실제 UAV 운용 조건을 반영한 실험을 통해 제안된 접근법의 실효성을 추가적으로 검증할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] M. Shi, K. Yang, D. Niyato, H. Yuan, H. Zhou, and Z. Xu, "The meta distribution of SINR in UAV-assisted cellular networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 71, no. 2, pp. 1193 - 1206, Feb. 2023.
- [2] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 8, pp. 1647 - 1650, Aug. 2016.
- [3] 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.
- [4] D.-Y. Kim, W. Saad, and J.-W. Lee, "On the use of high-rise topographic features for optimal aerial base station placement," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 3, pp. 1868 - 1884, Mar. 2023.
- [5] M. Rawat, M. Giordani, B. Lall, A. Chaoub, and M. Zorzi, "On the optimal beamwidth of UAV-assisted networks operating at millimeter waves," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 3, pp. 1234 - 1245, Mar. 2023.
- [6] 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.
- [7] H. Shakhathreh, A. Khreishah, A. Alsarhan, I. Khalil, A. Sawalmeh, and N. S. Othman, "Efficient 3D placement of a UAV using particle swarm optimization," in *Proc. ICICS*, Irbid, Jordan, Apr. 2017, pp. 258 - 263.