IoT 기기의 안정적 에너지 공급을 위한 지형지물 정보를 활용한 UAV 배치 및 자원 할당에 관한 연구

김도엽, 이장원 (연세대학교)

{danny.doyup.kim, jangwon}@yonsei.ac.kr

A Study on UAV Deployment and Resource Allocation Using Topographic Information for Stable Energy Supply of IoT Devices

Do-Yup Kim, Jang-Won Lee (Yonsei Univ.)

요 약

본 논문에서는 고층 빌딩과 같은 지형지물이 다수 존재하는 지역에 특정 최소 전력 수확량을 요구하는 internet-of-things (IoT) 기기가 무수히 많이 배치된 환경에서, UAV의 소모 전력을 최소화하기 위해 UAV의 위치와 통신 자원을 공동으로 최적화하는 문제를 다룬다. 특히, 대다수 기존 연구에서 계산 편의를 위해 채택된 불확실성이 높은 확률적 line-of-sight (LoS) 채널 모델이 아닌 지형지물 정보를 이용한 확정적 LoS 채널 모델을 제시하고, 이에 기반하여 문제를 해결한다.

Ⅰ. 서 론

일반적으로 무인항공기(UAV: Unmanned aerial vehicle)는 높은 자유도의 이동성을 가질 뿐만 아니라, 지상 기지국 혹은 지상 에너지 비컨(beacon)에 비해 매우 높은 고도에 배치됨에 따라 높은 line-of-sight (LoS) 확보 가능성을 보장해준다[1]. 이러한 이점으로 인해 UAV를 무선통신 시스템에 접목하는 연구가 활발히 진행되고 있다[2,3]. 특히, UAV의 위치와 통신 자원을 공동으로 최적화하는 연구가 큰 주목을 받고 있다[4,5].

최근 들어, simultaneous localization and mapping (SLAM) 등의 최신 기술을 이용해 3차원 정밀 지도를 얻을 수 있는 시대에 도달했다. 따라서 이 같은 정보를 기반으로 UAV와 임의의 지상 internet-of-things (IoT) 기기 사이에 링크가 LoS인지 non-LoS (NLoS)인지를 확정적으로 판단할 수 있다. 하지만 기존의 대다수 연구에서는 지형지물에 대한 정보 등을 고려하지 않고, 임의의 링크가 LoS를 가질 확률을 단위 면적당 지형지물의 밀도와 UAV의 고도에 대한 함수로 근사하여 불확실성이 높은 확률적 LoS 기반의 채널 모델을 채택하였다. 본 연구팀은 [5]에서 지형지물 정보를 고려하여 링크의 LoS 여부를 확정적으로 판단함으로써 지상 노드들의 전송률에 대한 서비스 품질이 향상될 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 [5]에서와 마찬가지로 지형지물 정보를 이용하여 LoS 여부를 확정적으로 결정하는 확정적 LoS 기반의 채널 모델을 고려하여 링크의 LoS 여부에 대한 불확실성을 낮춘다. 반면, [5]과는 달리 UAV의 위치(고도)와 통신 자원(방사각, 송신 전력)을 공동으로 최적화하여, 모든 지상 IoT 기기가 특정 전력 수확량 이상을 보장하면서 UAV의 전력 소모량을 최소화하는 최적화 문제를 다룬다. 본 문제를 해결하기 위해 임의의 UAV 고도에 대한 최적의 방사각과 최적의 송신 전력을 최적화 이론에 입각하여 closed-form 식으로 도출하고, 이를 이용하여 최종적으로 최적해를 도출하는 기법을 제시한다.

Ⅱ. 시스템 모델 및 문제 형성

본 논문에서는 고층 빌딩과 같은 지물이 다수 존재하는 평지에 최소 $p_{\min}$의 전력 수확을 요구하는 IoT 기기가 무수히 많이 배치된 환경을 가정한다. 이때, 에너지 신호를 송신할 수 있는 UAV를 파견하여 IoT 기기에 무선으로 전력을 공급하는 시나리오를 고려한다. UAV는 p_U의 전력으로 그림 1과 같이 θ의 방사각을 갖는 에너지 신호를 지상을 향해 송신한다고 가정한다. 또한, 핵심 아이디어 전달의 편의를 위해 고도를 포함한 2차원(즉, xz-평면)을 고려하고,[1] 지물과 IoT 기기가 존재하는 평지의 구간을 $D_{ROI}=[-D, D]$로 가정하고, UAV는 해당 평지의 중심지로 파견된다고 가정한다. 즉, UAV의 위치는 $(0,h)$로 주어진다. 또한, 각 지물은 지상에 수직으로 직립해 있으며, 편의상 0의 폭을 갖는다고 가정하여, 각 지물 k를 (x_k,h_k)로 표현한다. 본 논문에서는 타깃 구간 D_{ROI} 위의 지물에 관한 정보가 주어질 때 UAV의 전력 소모를 최소화하기 위한 송신 전력 p_U, 고도 h, 방사각 θ를 구하고자 한다.

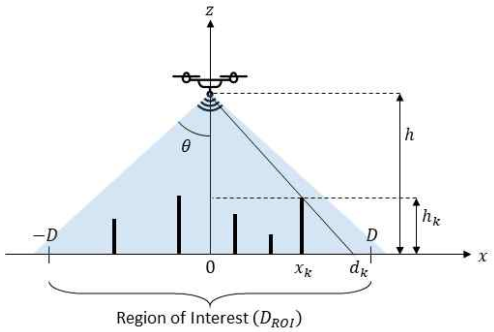

Fig 1. Illustration of the UAV network system considered in this paper

본 논문에서는 UAV와 $(x,0)$에 위치한 지상 IoT 기기와의 채널 전력 이득을 다음과 같이 모델링한다.

$$g(x,h,\theta)=\beta_i G\times\left(x^2+h^2\right)^{-\alpha_i/2},\ i\in\{\mathrm{LoS},\mathrm{NLoS}\}. \quad (1)$$

위 식에서 α_i와 β_i는 링크의 LoS/NLoS 상태에 따른 경로 손실 지수와 단위 거리에서의 경로 손실량을 나타내는 파라미터이고, G는 IoT 기기가 UAV의 방사각 내에 존재($\tan(\theta)\geq|x|/h$)하면 G_0/θ^2, 아닌 경우 0의 값을 갖는 안테나 전력 이득 파라미터이다[1,4]. 여기에서 G_0는 안테나 특성에 의해 정해지는 시스템 파라미터이다. 본 논문에서는 지물 정보를 이용할 수 있으므로, 기존 연구에서 계산 편의를 위해 많이 채택되고 있는 불확실성이 높은 확률적 LoS 기반 채널 모델이 아닌, LoS 여부를 지물 정보로부터 확정적으로 판단하는 확정적 LoS 기반 채널 모델을 고려한다.

1) 실제적인 3차원 시스템을 가정하지 않지만 2차원의 간단한 시스템을 통해 핵심 아이디어의 실제 시스템에 대한 직관적인 이해를 제공한다.

본 논문에서는 선형 에너지 수확 모델을 채택한다. 따라서 UAV가 고도 h에서 방사각 θ 및 전력 p_U로 에너지 신호를 송신할 때, $(x,0)$에 위치한 지상 IoT 기기의 전력 수확량 $P(x,h,\theta,p_U)$은 다음과 같이 정의된다.

$$P(x,h,\theta,p_U)=\eta\times g(x,h,\theta)\times p_U. \quad (2)$$

위 식에서 $\eta<1$는 에너지 수확 효율 파라미터이다.

앞서 정의한 시스템 모델과 전력 수확량 모델에 기반하여, UAV의 전력 소모 최소화를 위한 최적화 문제를 다음과 같이 세운다.

$$\underset{h,\theta,p_U}{\text{minimize}} \quad p_U \quad (3.1)$$

$$\text{subject to} \quad P(x,h,\theta,p_U)\geq p_{\min}, \ \forall x\in D_{ROI}, \quad (3.2)$$

$$h_{\min}\leq h\leq h_{\max}, \quad (3.3)$$

$$\theta_{\min}\leq\theta\leq\theta_{\max}. \quad (3.4)$$

위 문제에서 $h_{\min}$과 $h_{\max}$는 각각 UAV의 최소 고도 및 최대 고도를, $\theta_{\min}$ 과 $\theta_{\max}$는 각각 UAV의 최소 방사각 및 최대 가용 방사각을 나타내는 사전에 주어지는 시스템 파라미터이다. 또한, 본 논문에서는 D_{ROI} 내에 무수히 많은 IoT 기기가 분포된 환경을 고려하므로, 제약식 (3.2)를 만족시키기만 하면 모든 지상 IoT 기기의 전력 수확량은 $p_{\min}$ 이상이 된다.

Ⅲ. 문제 해결

이번 장에서는 문제 (3)을 해결하는 방법을 제시한다. 우선, 제약식 (3.2)가 만족하기 위해서는 식 (1)에 따라 모든 IoT 기기는 UAV의 방사각 내에 존재해야 한다. 또한, 식 (2)에 따라 IoT 기기의 전력 수확량은 방사각이 커짐에 따라 단조 감소한다. 따라서 UAV가 고도 $\tilde{h}$일 때의 최적의 방사각 $\theta^*(\tilde{h})$는 다음과 같이 주어진다.

$$\theta^*(\tilde{h})=\arctan(D/\tilde{h}). \quad (4)$$

참고로 제약식 (3.4)에 의해 UAV의 최적 고도 h^*는 $D/\tan(\theta_{\max})$와 $D/\tan(\theta_{\min})$ 사이에 존재하며, 이때의 최적 방사각 θ^*는 식 (4)에 기반하여 $\theta^*(h^*)$로 주어진다.

이어서 UAV가 고도 $\tilde{h}$와 방사각 $\theta^*(\tilde{h})$를 가질 때, 제약식 (3.2)를 x에 관한 수식으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}|x| &\leq \sqrt{\left(\frac{\eta\beta_i G_0 p_U}{\theta^*(\tilde{h})^2 p_{\min}}\right)^{2/\alpha_i}-\tilde{h}^2} \\ &= d_i^{\max}(p_U), \ i\in\{\text{LoS},\text{NLoS}\}.\end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 $d_{\text{LoS}}^{\max}(p_U)$와 $d_{\text{NLoS}}^{\max}(p_U)$는 각각 링크가 LoS 및 NLoS 일 때에 $p_{\min}$ 이상의 전력 수확량을 제공해 줄 수 있는 최대 거리를 나타낸다. 이어서 임의의 지물 (x_k,h_k)에 의해 발생하는 NLoS 영역 중 원점과 가장 먼 지점의 x축에서의 좌표는 d_k로 다음과 같이 주어진다 (그림 1 참고).

$$d_k=\frac{\tilde{h}}{\tilde{h}-h_k}\cdot x_k. \quad (6)$$

최종적으로 식 (5)와 식 (6)을 이용하면, 다음의 두 조건이 만족할 때 제약식 (3.2)가 만족함을 알 수 있다.

$$d_{\text{NLoS}}^{\max}(p_U)\geq \min\{x_{\text{NLoS}},D\}, \quad (7)$$

$$d_{\text{LoS}}^{\max}(p_U)\geq D. \quad (8)$$

위 식에서 $x_{\text{NLoS}}=\max_k|d_k|$이다. 위 두 조건에서 $d_{\text{LoS}}^{\max}(p_U)$와 $d_{\text{NLoS}}^{\max}(p_U)$는 p_U에 대하여 단조 증가하므로, UAV가 고도 $\tilde{h}$와 방사각 $\theta^*(\tilde{h})$를 가질 때 최적의 송신 전력 $p_U^*(\tilde{h})$는 식 (7)과 (8)이 만족하는 최솟값으로 손쉽게 계산될 수 있다.

이제까지 UAV가 임의의 고도 $\tilde{h}$를 가질 때의 최적의 방사각 $\theta^*(\tilde{h})$와 최적의 송신 전력 $p_U^*(\tilde{h})$를 각각 식 (4)와 식 (8)과 같이 closed-form 식으로 도출하였다. 이에 기반해 문제 (3)을 다음과 같이 재구성할 수 있다.

$$\underset{h}{\text{minimize}} \quad p_U^*(h) \quad (9.1)$$

$$\text{subject to}$$

$$\max\left\{h_{\min},\frac{D}{\tan(\theta_{\max})}\right\}\leq h\leq\min\left\{h_{\max},\frac{D}{\tan(\theta_{\min})}\right\}. \quad (9.2)$$

위 문제에서 $P^*(x,h)=P\left(x,h,\theta^*(h),p_U^*(h)\right)$이다. 문제 (9)는 h에 대한 단일 변수 최적화 문제이다. 따라서 다양한 단일 변수 최적화 알고리즘을 이용하여 최적의 고도 h^*를 손쉽게 구할 수 있다. 예를 들어, simulated anealing, particle swarm optimization 등의 metaheuristic 기법을 활용하여 문제 (9)를 해결하여 최적의 UAV 고도 h^*를 도출하고, 그에 따라 최적의 UAV 방사각과 최적의 UAV 송신 전력을 각각 $\theta^*=\theta^*(h^*)$와 $p_U^*=p_U^*(h^*)$로 도출할 수 있다.

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 지상 IoT 기기의 최소 전력 수확량 요건을 보장하면서 UAV의 전력 소모량을 최소화 하기 위한 UAV의 고도, 방사각, 송신 전력 최적화에 관한 연구를 수행하였다. 특히, 기존 연구에서 많이 채택되어 사용되고 있는 불확실성이 높은 확률적 LoS 기반의 채널 모델이 아닌, 지형지물의 정보를 기반으로 LoS 여부를 확정적으로 판단하는 확정적 LoS 기반의 채널 모델을 고려함으로써, 링크의 LoS 여부에 대한 불확실성을 낮추어 일반적으로 성능 향상을 기대할 수 있다. 본 논문에서의 연구는 향후 실제적인 3차원 시스템으로의 확장연구에 대한 토대가 될 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체원천기술개발사업단의 지원을 받아 무인이동체원천기술개발사업을 통해 수행되었음.(NRF-2020M3C1C1A02086427)

참 고 문 헌

[1] 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.

[2] D.-Y. Kim and J.-W. Lee, "Integrated topology management in flying ad hoc networks: Topology construction and adjustment," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 61196-61211, Oct. 2018.

[3] D.-Y. Kim and J.-W. Lee, "Joint mission assignment and topology management in the mission-critical FANET," *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 3, pp. 2368-2385, Mar. 2020.

[4] H. He, S. Zhang, Y. Zeng, and R. Zhang, "Joint Altitude and Beamwidth Optimization for UAV-Enabled Multiuser Communications," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 2, pp. 344-347, Feb. 2018.

[5] 김도엽, 이장원, "지형지물 정보를 고려한 UAV-BS 배치 및 자원 할당에 관한 연구," *한국통신학회 학술대회논문집*, Feb. 2021, pp. 42-43.