

무선 전력 전송을 통한 IoT 기기 에너지 공급을 위한 UAV Trajectory 및 Beamwidth 최적화

신종민*, 김도엽*, 이장원°

UAV Trajectory and Beamwidth Optimization for Energizing IoT Devices via Wireless Power Transfer

Jongmin Shin*, Do-Yup Kim*, Jang-Won Lee°

요약

본 논문에서는 다수의 임무 지역 내에 많은 Internet-of-Things (IoT) 기기가 배치되어 있고 자체 임무를 수행하기 위해 에너지가 필요한 환경에서, unmanned aerial vehicle (UAV)의 무선 전력 전송 기술을 통해 IoT 기기에 필요한 에너지를 공급하는 알고리즘을 개발한다. 확률적 line-of-sight (LoS) 기반 air-to-ground (A2G) 무선 채널 모델 하에서 모든 IoT 기기에 필요한 에너지를 공급하는데 필요한 총 소요 시간이 최소화될 수 있도록 UAV의 beamwidth와 비행경로 (trajectory)를 최적화하는 것을 목표로 한다. 이를 위해, 먼저 각 임무 지역에서의 에너지 공급을 위한 UAV의 최적의 에너지 공급 위치를 구하고, 이어서 이를 이용하여 최적의 UAV 비행경로를 찾는 dynamic programming (DP) 기반의 알고리즘을 제안한다.

키워드 : 무인항공기, 배치 문제, 경로 최적화, 빔폭 최적화, 순회 세일즈맨 문제

Key Words : Unmanned aerial vehicle (UAV), placement problem, trajectory optimizatino, beamwidth optimization, travelling salesman problem (TSP)

ABSTRACT

In this paper, we consider a scenario in which a lot of Internet-of-Things (IoT) devices are deployed within multiple mission areas and require energy for performing their own missions. In this scenario, we aim at developing an algorithm that dispatches an unmanned aerial vehicle (UAV) to supply the required energy to the IoT devices through the wireless power transfer (WPT) technology. We consider the stochastic line-of-sight (LoS)-based air-to-ground (A2G) wireless channel model, and focus on optimizing the beamwidth and the trajectory of the UAV so that the total time taken to energize all IoT devices is minimized. To this end, we first find the optimal energy transferring location for the UAV to supply energy to the IoT devices in each mission area, and then propose a dynamic programming (DP)-based algorithm that finds the optimal UAV trajectory for given the optimal energy transferring locations of all the mission areas.

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

• First Author : Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, tls0264@yonsei.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, jangwon@yonsei.ac.kr, 종신회원

* The Ohio State University, Department of Electrical and Computer Engineering, kim.8801@osu.edu, 학생회원

논문번호 : 202110-295-B-RN, Received October 22, 2021; Revised December 20, 2021; Accepted December 23, 2021

I. 서 론

Unmanned aerial vehicle (UAV)는 접근이 쉽지 않은 영역에서의 통신을 신속하게 지원해줄 수 있는 점과 UAV의 높은 고도에서의 지상으로 송신시 line-of-sight (LoS) 링크 형성에 매우 유리하다는 이점 때문에 최근 들어 UAV를 활용한 무선 시스템이 각광받고 있다^[1-3]. 특히, Internet-of-Things (IoT) 시스템에서 IoT 기기의 제한적인 배터리는 주기적인 충전을 요구하는데, 이는 IoT 시스템을 운용하는데 있어서 매우 큰 부담으로 여겨지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 UAV를 파견하여 IoT 기기에 무선으로 에너지를 공급하는 기술이 하나의 대안으로 떠오르고 있다^[4]. 하지만, UAV의 제한된 에너지로 인해 장시간 비행하는데 기술적 한계가 있기에, 이를 고려하여 빠른 시간 내에 주어진 임무를 수행할 수 있도록 UAV의 배치 및 비행경로 (trajectory)를 최적화하는 것은 매우 중요한 이슈이다.

초기의 많은 UAV 배치 및 비행경로 최적화에 관한 연구에서는 air-to-ground (A2G) 무선 통신 채널을 수학적 분석의 용이성과 함께 UAV의 잠재성을 가능하게 유리한 LoS 기반의 간단한 채널 모델을 주로 고려하였다^[5-7]. 이러한 초기 연구는 UAV 배치 및 비행경로 최적화가 네트워크 성능 향상에 긍정적 영향을 끼친다는 사실을 보여주었다. 최근에는 A2G 링크의 채널 모델이 더욱 정교화되어 A2G 링크가 비록 높은 확률로 LoS를 갖지만, 지상 구조물 등에 의해 여전히 non-LoS (NLoS)가 형성될 수 있다는 사실에 기인하여, 확률적 LoS 채널 모델이 고려되고 있는 추세이다^[8,9].

LoS 채널 모델만을 기반으로 한 A2G 링크를 고려한 UAV의 위치와 beamwidth를 최적화하는 연구가 활발히 진행되었다. [10]에서는 지상 기기의 UAV로의 상향링크 전력 소모를 최소화하기 위한 UAV의 배치 및 beamwidth 최적화 연구가 진행되었고, [11]에서는 2개의 지상 기기의 에너지 수확량의 합이 최대가 되기 위한 UAV의 배치 및 beamwidth 최적화 연구가 진행되었다.

NLoS 채널 모델 또한 무선 통신 채널에서 고려 대상이 되어야 하기에 확률적 LoS 채널 모델 기반의 A2G 링크를 고려한 UAV 배치 및 비행경로 최적화 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. [12]에서는 UAV 고도 및 beamwidth, coverage radius의 tradeoff 관계를 다루는 연구가 진행되었고, [13] 및 [14]에서는 최대한 많은 수의 지상 기기가 UAV로부터 에너지를 공

급받을 수 있도록 UAV의 고도를 최적화하는 연구가 진행되었다.

특히, 최근 들어 UAV의 지상 노드들로의 에너지 공급에 관한 많은 연구들이 진행되었는데, UAV의 공급 에너지와 추진 에너지를 포함한 소비 에너지를 최소화하기 위한 UAV 비행경로 최적화 연구^[15,16], 에너지 수확량의 합을 최대화 하기 위한 UAV의 비행경로 최적화 연구^[17,18] 등 에너지 수확 상황을 고려한 UAV 배치 및 비행경로 문제가 연구되었다. 이처럼 UAV의 에너지 공급 상황에서 UAV 경로 최적화에 관한 연구^[15-18]들이 많이 진행되고 있지만, 대다수 연구에서는 지상 기기의 수확 에너지 최대화 혹은 UAV의 소비 에너지 최소화에 연구 초점이 맞추어져 있다. 다시 말해, 지상 기기의 원활한 임무 수행이 가능하도록 에너지를 공급하는 UAV의 운용 시간을 최소화하는 연구는 아직 미비한 실정이다.

본 논문에서는 다수의 임무 지역이 주어지고, 각 임무 지역에 해당 임무를 수행하기 위한 많은 수의 battery-limited IoT 기기들이 배치되어 있는 상황에서, radio frequency (RF) 신호를 통해 에너지 공급이 가능한 UAV를 이용해 IoT 기기가 주어진 임무를 원활하게 수행할 수 있도록 에너지를 공급하는 시나리오를 고려한다. 본 논문에서는 확률적 LoS 채널모형을 채택하고, 각 임무 지역 별 UAV의 최적의 에너지 공급을 위한 에너지 공급 위치 및 beamwidth, 그리고 임무 간 UAV 비행경로를 최적화하여 UAV 운용 시간을 최소화하는 문제를 해결한다. 이를 위해, 먼저 각 임무별 UAV의 최적의 에너지 공급 위치 및 beamwidth를 도출하고, 원 문제를 travelling salesman problem (TSP) 문제로 변형하여 dynamic programming (DP) 기반의 TSP 알고리즘을 통해 최적의 비행경로를 도출한다. 최종적으로 시뮬레이션을 통해 제안 알고리즘의 성능을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 시스템 모델과 해결하고자 하는 최적화 문제를 제시한다. 3장에서는 해당 문제를 해결하기 위한 알고리즘을 제시하고, 4장에서 시뮬레이션을 통해 제안 알고리즘의 성능을 검증한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델 및 문제 구성

본 논문에서는 N 개의 임무 지역에 배치되어있는 battery-limited IoT 기기의 원활한 임무 수행을 가능하게 하기 위해 하나의 UAV를 이용해 radio frequency (RF) 신호로 이들에게 에너지를 공급하는

시나리오를 고려한다. 임무 지역 집합을 $\mathcal{A} = \{M_1, M_2, \dots, M_N\}$ 로 표기하고, 각 임무 지역 M_i 는 (x_i^M, y_i^M) 를 중심으로 갖고 반경 r_i^M 을 갖는 원형으로 가정하며 해당 지상 영역을 $\Omega(M_i) \subset R^2$ 로 표기한다. 1) 실제 임무 지역이 원형이 아닌 경우 해당 임무 지역을 포함하는 가장 작은 원형 지역을 임무 지역으로 고려할 수 있으므로 원형 임무 지역을 고려한다. 각 임무 지역 내에는 많은 IoT 기기가 균등분포에 따라 배치되어 있으며, 임무 지역 M_i 내의 IoT 기기들은 원활한 임무 수행을 위해 E_i^{req} 의 에너지 수확을 요구한다고 가정한다.

UAV는 이동 중에 RF 에너지 신호를 송신할 수 없다고 가정하고, 이에 따라 UAV는 특정 임무 수행 지점 $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, H_i)$ 에서 호버링을 하면서 임무 지역 M_i 내의 IoT 기기에게 RF 에너지 신호를 송신한다고 고려한다. UAV의 최소 고도 및 최대 고도는 각각 H_{min} 와 H_{max} 로 주어져 $H_{min} \leq H_i \leq H_{max}$ 가 만족되어야 한다. 또한, UAV는 주어진 시작점 $\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0, H_0)$ 에서 출발하여 각 임무 지역에 배치되어 있는 모든 IoT 기기에 에너지를 전달하고, 최종적으로 주어진 도착점 $\mathbf{x}_{N+1} = (x_{N+1}, y_{N+1}, H_{N+1})$ 로 향한다고 가정한다. 이에 따라 에너지 신호를 송신하는 송신 phase와 다음 임무 지역으로 이동하는 비행 phase로 나누어 고려한다. 구체적으로, UAV는 시작점에서 도착점에 도착할 때까지 총 N 번의 송신 phase와 $N+1$ 번의 비행 phase를 가진다. 본 논문에서 i 번째 송신 phase에서의 UAV의 위치를 $\mathbf{x}_{(i)}$ 로 표기하고, i 번째 비행 phase에서 UAV는 $\mathbf{x}_{(i-1)}$ 에서 $\mathbf{x}_{(i)}$ 로 이동한다고 고려한다. 즉, $\mathbf{x}_{(i)} = \mathbf{x}_j$ 인 경우, UAV는 i 번째 송신 phase에서 임무 지역 M_j 내의 IoT 기기에게 에너지 신호를 송신한다. 이 때, i 번째 송신 phase에서 UAV의 소모 시간을 τ_i^s 로 나타내고, i 번째 비행 phase에서 UAV의 소모 시간을 τ_i^f 로 나타낸다. τ_i^s 는 해당 송신 phase에 할당된 임무 지역 내의 모든 IoT 기기가 최소 에너지 요구량 이상 공급받을 수 있도록 정해지며, UAV가 항상 목표 지점을 향해 일정 속도 V 로 직선 비행을 한다는 가정하에서 $\tau_i^f = \|\mathbf{x}_{(i)} - \mathbf{x}_{(i-1)}\| / V$ 로 정해진다. 따라서 τ_i^s 는 i 번째 송신 phase에서 UAV의 임무 지원 위치와 해당 임무

지역 내의 IoT 기기의 최소 에너지 요구량에 따라 달라지며, τ_i^f 는 $i-1$ 번째 송신 phase와 i 번째 송신 phase에서 UAV의 임무 지원 위치에 따라 달라진다.

본 논문에서는 최단 시간 내에 UAV가 모든 임무 지역에 방문하여 IoT 기기들의 요구 에너지를 전달하는 것을 목표로 한다. 이에 따라, 각 임무 지역에서 에너지 송신에 소모되는 송신 phase 시간을 최소화하기 위한 최적의 에너지 공급 위치 집합 $\{\mathbf{x}_i^*\}_{i=1}^N$ 를 찾고, 추가로 임무 지역 간 이동에 소모되는 비행 phase 시간을 최소화하기 위한 최적의 경로를 찾고자 한다. 즉, $\{\mathbf{x}_{(i)}\}_{i=1}^N$ 와 $\{\mathbf{x}_i^*\}_{i=1}^N$ 의 일대일 매핑을 찾고자 한다. 그림 1은 4개의 임무 지역에 대한 최적의 에너지 공급 위치 $\{\mathbf{x}_i^*\}_{i=1}^4$ 가 주어져 있을 때, $\mathbf{x}_{(1)} = \mathbf{x}_2^*$, $\mathbf{x}_{(2)} = \mathbf{x}_3^*$, $\mathbf{x}_{(3)} = \mathbf{x}_1^*$, $\mathbf{x}_{(4)} = \mathbf{x}_4^*$ 가 최적의 경로인 상황에 대한 예시를 보여준다.

이어서 UAV와 임의의 한 지상 IoT 기기 사이의 A2G 무선 통신 채널을 모델링한다. 일반적으로 A2G 채널은 지상의 지형지물 등 주어진 환경에 영향을 받아, LoS 링크 혹은 NLoS 링크를 갖는다. 본 논문에서는 UAV 관련 문헌에서 널리 사용되고 있는 확률 기반의 A2G 채널 모델^[14,19]을 채택하여, $\mathbf{x} = (x, y, H)$ 에 위치한 UAV와 $\mathbf{p} = (\bar{x}, \bar{y}, 0)$ 에 위치한 지상 IoT 기기 사이에 LoS 링크가 형성 될 확률을 다음과 같이 정의한다.

$$P_{LoS}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \frac{1}{1 + a \exp(-b(\theta(\mathbf{x}, \mathbf{p}) - a))}. \quad (1)$$

위 식에서 a 와 b 는 환경에 따라 주어지는 파라미터

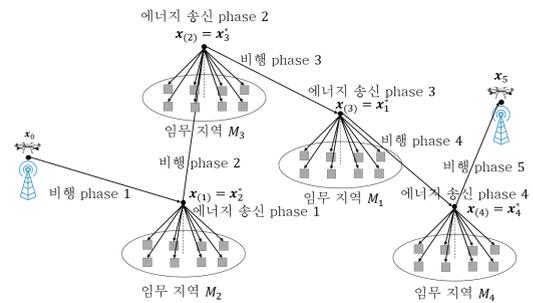


그림 1. 임무별 최적화된 좌표 $\{\mathbf{x}_i^*\}_{i=1}^N$ 가 주어질 때의 최적의 UAV 경로 예시
Fig. 1. The example that shows the optimal UAV trajectory for given optimal coordinates $\{\mathbf{x}_i^*\}_{i=1}^N$ for missions.

1) 임무 지역 분할에 관한 연구는 본 연구의 범위를 벗어나며 향후 연구 과제로 남긴다.

이고, $\theta(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ 는 지상 IoT와 UAV 사이의 고도각으로 다음과 같이 정의된다.

$$\theta(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \frac{180}{\pi} \times \tan^{-1} \frac{H}{d(\mathbf{x}_{proj}, \mathbf{p})}. \quad (2)$$

위 식에서 $\mathbf{x}_{proj} = (x, y, 0)$ 는 $H=0$ 인 평면에 정사영한 UAV의 horizontal 좌표를 나타내고, $d(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ 는 \mathbf{x} 와 \mathbf{p} 사이의 직선거리를 나타내는 함수이다. LoS 이벤트와 NLoS 이벤트는 서로 상보관계이므로, 식 (1)에 기반하여 A2G 링크가 NLoS일 확률 $P_{NLoS}(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$P_{NLoS}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = 1 - P_{LoS}(\mathbf{x}, \mathbf{p}). \quad (3)$$

이어서 A2G 무선 링크가 LoS일 때의 경로 손실 $PL_{LoS}(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ 와 NLoS일 때의 경로 손실 $PL_{NLoS}(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.^[13,14]

$$PL_{\xi}(\mathbf{x}, \mathbf{p})[dB] = 20 \log \left(\frac{4\pi f d(\mathbf{x}, \mathbf{p})}{c} \right) + \eta_{\xi} \quad (4)$$

$$\forall \xi \in \{LoS, NLoS\}.$$

위 식에서 ξ 는 링크의 LoS 여부를 나타내는 인덱스를, f 는 RF 신호의 중심 주파수, c 는 빛의 속도를, η_{ξ} 는 링크의 LoS 여부에 따른 추가 경로 손실량의 평균 수치를 나타낸다.

최종적으로 A2G 채널이 LoS 링크를 가질 확률 (1), NLoS 링크를 가질 확률 (3), 그에 따른 경로 손실 (4)에 의거하여, \mathbf{x} 에 위치한 UAV와 \mathbf{p} 에 위치한 지상 IoT 기기 사이의 평균 경로 손실을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$PL(\mathbf{x}, \mathbf{p})[dB] = \sum_{\xi \in \{LoS, NLoS\}} P_{\xi}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \times PL_{\xi}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \quad (5)$$

$$= \frac{\eta_{LoS} - \eta_{NLoS}}{1 + a \exp(-b(\theta(\mathbf{x}, \mathbf{p}) - a))} + PL_{NLoS}(\mathbf{x}, \mathbf{p}).$$

A2G 통신 모델은 최근 많이 고려되고 있는 directional 안테나 배열을 갖는 UAV를 고려하여, 그림 2와 같이 UAV가 2θ 의 beamwidth를 갖고 지상에 수직 방향으로 신호를 송신한다고 가정한다. Directional 안테나 배열의 구현가능한 최소 및 최대 beamwidth를 각각 θ_{min} 와 θ_{max} 로 나타내고, 이 때

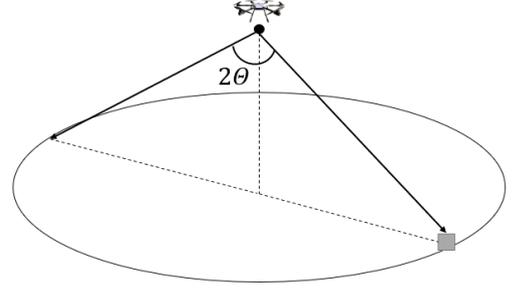


그림 2. 2θ 의 beamwidth로 지상에 에너지 신호를 송신하는 UAV
Fig. 2. The UAV transfers the energy signals to the ground with the beamwidth of 2θ .

의 UAV 안테나 이득은 다음과 같이 정의된다.^[10,20]

$$G(\theta) = \begin{cases} \frac{G_0}{\theta^2}, & \text{if } \frac{\pi}{2} - \theta \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

위 식에서 $G_0 \approx 2.2846$ 이며,^[10] 와 고도각 θ 를 갖는 임의의 지상 IoT가 UAV beamwidth 범위 내에 위치될 경우 G_0/θ^2 , 아닐 경우 0의 안테나 이득을 가짐을 나타낸다.

앞서 구한 평균 경로 손실 (5)와 안테나 이득 (6)으로부터 \mathbf{p} 에 위치한 IoT 기기에서 \mathbf{x} 에 위치한 UAV로부터의 수신 파워는 다음과 같이 정의된다.

$$P_r(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \theta) = P_t G(\theta) 10^{-\frac{PL(\mathbf{x}, \mathbf{p})}{10}}. \quad (7)$$

위 식에서 P_t 는 UAV의 송신 파워이다. IoT 기기의 에너지 수확 모델은 관련 문헌에서 널리 채택되고 있는 다음의 선형 모델을 사용한다.^[15]

$$E^{har}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \theta) = \zeta P_r(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \theta) t^h. \quad (8)$$

위 식에서 ζ 는 $0 < \zeta < 1$ 인 에너지 수확 효율성을 나타내고, t^h 는 UAV가 IoT 기기에게 에너지 신호를 송신하는 시간을 나타낸다.

각 phase에서 UAV가 어느 임무 지역을 지원하는지를 효과적으로 표현하기 위해서 UAV가 j 번째 송신 phase에서 임무 지역 M_i 를 지원하는 경우에 1의 값을 갖고, 그렇지 않은 경우 0의 값을 갖는 indicator 변수 $a_{i,j}$ 를 도입한다. 즉, $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$ 에 대하여

$a_{i,j}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if } \mathbf{x}_{(j)} = \mathbf{x}_i^*, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

앞서 제시한 시스템 모델에 기반하여, 최소의 시간으로 모든 임무 지역 내의 IoT 기기에 원활한 에너지 지원을 위한 최적의 UAV 에너지 공급 위치와 그에 따른 beamwidth, 그리고 최적의 UAV 비행경로, 즉, 각 phase별 임무 할당 지역을 모두 구하고자 한다. 이에 따라, 다음의 최적화 문제를 해결하고자 한다.

$$\underset{\Theta_i, \mathbf{x}_i, a_{i,j}}{\text{minimize}} \quad T = \sum_{j=1}^N \tau_j^h + \sum_{j=1}^{N+1} \tau_j^f \quad (10a)$$

$\forall i, j \in \{1, \dots, N\}$

subject to

$$E^{har}(\mathbf{x}_{(j)}, \mathbf{p}) \geq E_i^{re}, \quad \forall \mathbf{p} \in \Omega(M_i), \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (10b)$$

$$H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (10c)$$

$$\Theta_{\min} \leq \Theta_i \leq \Theta_{\max}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (10d)$$

$$a_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (10e)$$

$$\sum_{i=1, i \neq j}^N a_{i,j} = 1, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (10f)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^N a_{i,j} = 1, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (10g)$$

$$\mathbf{x}_{(j)} = \sum_{i=1}^N a_{i,j} \mathbf{x}_i, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (10h)$$

$$\mathbf{x}_{(0)} = \mathbf{x}_0, \quad \mathbf{x}_{(N+1)} = \mathbf{x}_{N+1}. \quad (10i)$$

위 문제에서 목적식 (10a)는 UAV가 모든 임무 지역에 방문하여 지상 IoT 기기에 에너지를 공급하는데 필요한 총 시간을 나타내고, 제약식 (10b)는 임무 지역 M_i 내의 모든 지상 IoT 기기가 E_i^{re} 이상의 에너지를 받아야 함을 나타내고, 제약식 (10c)와 (10d)는 각각 UAV의 높이와 beamwidth의 가용범위를 나타내고, 제약식 (10e)-(10g)는 UAV가 매 phase마다 서로 다른 하나의 임무 지역을 담당함을 나타내고, 제약식 (10h)는 j 번째 송신 phase에서의 UAV 위치를 나타내며, 제약식 (10i)는 각각 UAV의 시작점과 도착점

이 \mathbf{x}_0 와 \mathbf{x}_{N+1} 로 설정되어 있다는 것을 나타낸다.

III. 문제 해결 알고리즘

본 장에서는 문제 (10)을 해결하기 위한 알고리즘을 개발한다. 먼저, 문제 (10)은 mixed-integer 최적화 문제로 모든 연속 및 이산 변수를 한 번에 최적화하는 것은 사실상 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 송신 phase에서의 에너지 송신 시간 최소화를 위해, 각 임무 지역 M_i 에 대한 최적의 에너지 공급 위치 \mathbf{x}_i^* 및 그에 따른 최적의 beamwidth Θ_i^* 를 먼저 구하고, 이어서 비행 phase에서의 비행시간 최소화를 위한 각 phase별 최적의 UAV의 임무 할당 변수 $a_{i,j}^*$, $i, j \in \{1, \dots, N\}$ 를 구한다.

각 임무 지역에 대한 최적의 UAV 에너지 공급 위치 및 beamwidth를 구하는 방법은 동일하므로, 대표적으로 임무 지역 M_i 에 대한 최적의 UAV 에너지 공급 위치 $\mathbf{x}_i^* = (x_i^*, y_i^*, H_i^*)$ 와 그에 따른 최적의 beamwidth Θ_i^* 를 구한다. 우선, 식 (7)과 (8)에 따르면 단위 시간당 에너지 수확량은 UAV와 지상 IoT 기기 사이의 거리가 작을수록 증가하며, 단위 시간당 에너지 수확량이 증가할수록 IoT 기기의 에너지 수확 요구량인 E_i^{re} 를 만족시켜주기 위한 UAV의 에너지 송신 시간은 감소한다. 따라서 최적의 UAV horizontal 좌표는 IoT 기기와의 최장 거리를 최소화할 수 있는 원형 임무 지역 M_i 의 중심인 (x_i^M, y_i^M) 이다. 즉, $(x_i^*, y_i^*) = (x_i^M, y_i^M)$ 이다. 결국, 가장자리에 위치한 IoT 기기가 E_i^{re} 의 에너지를 공급받기만 하면, UAV와의 거리가 더 짧은 임무 지역 M_i 내의 다른 모든 IoT 기기는 E_i^{re} 이상의 에너지를 공급받는다. 이는 사실에 기반하여, UAV가 임무 지역 M_i 내의 모든 IoT 기기에 E_i^{re} 이상의 에너지를 공급하는데 필요한 최소시간을 다음의 함수로 정의할 수 있다.

$$f_i(H_i, \Theta_i) = \frac{E_i^{re}}{\zeta P_r(\hat{\mathbf{x}}_i, \mathbf{p}_i^{edge}, \Theta_i)}. \quad (11)$$

위 식에서 $\hat{\mathbf{x}}_i = (x_i^M, y_i^M, H_i)$ 를 나타내고, \mathbf{p}_i^{edge} 는 임무 지역 M_i 의 가장자리에 위치한 임의의 한 IoT 기기의 위치를 나타낸다. 참고로 j 번째 송신 phase에서 UAV가 임무 지역 M_i 를 지원한다면 UAV의 에너지

공급 위치는 $\mathbf{x}_{(j)} = \hat{\mathbf{x}}_i$ 로 주어지며, 이에 따른 에너지 공급 시간 τ_j^i 는 식 (11)에 따라 $\tau_j^i = f_i(H_i, \theta_i)$ 로 주어진다.

이어서 식 (11)을 이용하여 UAV의 최적의 beamwidth θ_i^* 와 이에 따른 비행 고도 H_i^* 를 구한다. 식 (5)에 따라 H_i 가 작을수록 평균 경로 손실이 작아지고, 식 (7)에 따라 $P_r(\hat{\mathbf{x}}_i, \mathbf{p}_i^{edge}, \theta_i)$ 는 증가한다. 따라서 임무 지역 M_i 를 위한 UAV의 에너지 공급 시간 $f_i(H_i, \theta_i)$ 를 최소화하기 위해서는 H_i 는 가능한 한 작아야 한다. 한편, 그림 2에서 볼 수 있듯이 임무 지역 M_i 내의 모든 IoT 기기가 에너지를 공급받을 수 있으려면 UAV의 고도 H_i 는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$H_i \geq \frac{r_i^M}{\tan \theta_i}. \quad (12)$$

따라서 UAV의 beamwidth가 θ_i 로 주어질 때 $f_i(H_i, \theta_i)$ 를 최소화하는 UAV의 고도 $H_i^*(\theta_i)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$H_i^*(\theta_i) = \frac{r_i^M}{\tan \theta_i}. \quad (13)$$

식 (13)을 식 (11)에 대입하여, 식 (11)을 다음의 θ_i 에 대한 일변수 함수로 표현할 수 있다.

$$\hat{f}_i(\theta_i) = f_i(r_i^M / \tan \theta_i, \theta_i). \quad (14)$$

식 (14)를 최소화하는 최적의 UAV beamwidth θ_i^* 를 구하기에 앞서, θ_i 의 feasible 범위를 먼저 살펴본다. 식 (13)과 UAV 고도에 대한 제약식 (10c)로부터 UAV의 고도 θ_i 는 $\arctan(r_i^M / H_{\max})$ 보다는 크거나 같고, $\arctan(r_i^M / H_{\min})$ 보다는 작거나 같아야 함을 알 수 있다. 추가로 UAV beamwidth에 대한 제약식 (10d)에 의해, UAV의 beamwidth θ_i 의 범위는 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{\theta}_{i,\min} \leq \theta_i \leq \hat{\theta}_{i,\max}. \quad (15)$$

위 식에서 $\hat{\theta}_{i,\min}$ 과 $\hat{\theta}_{i,\max}$ 는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_{i,\min} = \max \left\{ \arctan \frac{r_i^M}{H_{\max}}, \theta_{\min} \right\}, \quad (16)$$

$$\hat{\theta}_{i,\max} = \min \left\{ \arctan \frac{r_i^M}{H_{\min}}, \theta_{\max} \right\}. \quad (17)$$

최종적으로 $\hat{f}_i(\theta_i)$ 는 식 (14)와 같이 θ_i 에 대한 일변수 함수이므로, 식 (15)의 범위에서 $\hat{f}_i(\theta_i)$ 를 최소화하는 최적의 beamwidth θ_i^* 를 손쉽게 구할 수 있다. 예를 들어, Matlab solver fminbnd 등을 이용할 수 있다.

앞의 과정에 의해 구해진 최적의 UAV beamwidth θ_i^* 로부터 식 (13)에 의거하여 최적의 UAV 고도 H_i^* 는 $r_i^M / \tan \theta_i^*$ 로 얻어진다. 따라서 임무 지역 M_i 를 지원하기 위한 최적의 UAV 좌표 \mathbf{x}_i^* 는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{x}_i^* = \left(x_i^M, y_i^M, \frac{r_i^M}{\tan \theta_i^*} \right) \quad (18)$$

위 식에 의거하여 모든 임무 지역 M_i 에 대한 \mathbf{x}_i^* 및 θ_i^* 를 구할 수 있다.

이제 비행경로 최적화를 위한 임무 지역 할당 변수를 구하고자 한다. 문제 (10)에서 \mathbf{x}_i^* 및 θ_i^* 가 주어진다면 문제 (10)은 다음과 같이 재구성될 수 있다.

$$\underset{a_{i,j}, \forall i,j \in \{1, \dots, N\}}{\text{minimize}} \quad \sum_{j=1}^{N+1} \frac{\|\mathbf{x}_{(j)} - \mathbf{x}_{(j-1)}\|}{V} \quad (19a)$$

subject to

$$a_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (19b)$$

$$\sum_{i=1, i \neq j}^N a_{i,j} = 1, \forall j \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (19c)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^N a_{i,j} = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (19d)$$

$$\mathbf{x}_{(j)} = \sum_{i=1}^N a_{i,j} \mathbf{x}_i^*, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (19e)$$

$$\mathbf{x}_{(0)} = \mathbf{x}_0, \quad \mathbf{x}_{(N+1)} = \mathbf{x}_{N+1}. \quad (19f)$$

표 1. 문제 (10) 해결을 위한 pseudocode
Table 1. Pseudocode for solving Problem (10).

<ol style="list-style-type: none"> 1. Set $(x_i, y_i) = (x_i^M, y_i^M)$. 2. Obtain $\hat{f}_i(\theta_i) = f_i(H_i, \theta_i)$ by plugging (13) into (11). 3. Obtain θ_i^* to minimize $\hat{f}_i(\theta_i)$ 4. Obtain H_i^* from θ_i^* using (13). Then, \mathbf{x}_i^* is accordingly achieved according to (18). 5. Repeat step 1-4 for all the mission areas. Then, \mathbf{x}_i^* and θ_i^*, $\forall i \in \{1, 2, \dots, N\}$, are obtained. 6. Using the well-known DP-based TSP algorithm, obtain an optimal solution to Problem (19). Then $a_{i,j}$, $\forall i, j \in \{1, \dots, N\}$ are obtained.
--

위 문제는 \mathbf{x}_0 에서 출발을 해서 N 개의 주어진 지점 $\{\mathbf{x}_1^*, \mathbf{x}_2^*, \dots, \mathbf{x}_N^*\}$ 를 중복 없이 지나쳐서 최종적으로 \mathbf{x}_{N+1} 에 도착하는 TSP 임을 알 수 있다. 따라서 각 임무 지역을 하나의 노드로 설정하고, 임의의 노드 i 와 j 사이의 edge cost를 $\|\mathbf{x}_i^* - \mathbf{x}_j^*\| / V$ 로 설정하고, 대표적인 TSP 문제 해결 기법중 하나인 DP 기반 알고리즘^[21,22]을 이용하여 문제 (19)의 최적해를 구할 수 있다. 최종적으로 문제 (10)을 해결하기 위한 pseudocode를 표 1에 제공한다. 본 제안 기법은 각 임무 지역별 UAV의 beamwidth와 에너지 공급 위치를 먼저 구하고, 이에 기반하여 UAV의 경로를 탐색하는 방법론을 따른다. 이에 따라, 본 제안 기법이 제공하는 솔루션은 에너지 공급 위치와 비행 경로 사이의 상호의존성을 갖는 문제 (10)의 global optimality를 보장하지는 않는다. 하지만 각 임무 지역별 최적의 UAV의 beamwidth와 에너지 공급 위치를 제공하며, 이에 대한 최적의 경로를 제공함에 따라 높은 성능을 제공한다.^[22]

IV. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 앞서 제시한 알고리즘의 성능 평가를 위한 모의 실험을 진행한다. 중심좌표가 (500,300), (800,700), (100,500), (200,900), (500,1200), (500,1700), (900,1000), (1000,500)인 총 8개의 임무 지역을 가정하고, UAV의 시작점과 도착점은 모두 (0,0,0)이라 가정한다. 즉, $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_{N+1} = (0,0,0)$. 각

좌표의 단위는 meter로 고려한다. UAV의 속도는 $V = 10$ m/s로 설정하고, 에너지 수확 효율성은 $\zeta = 0.9$ 로 설정하고, 송신 파워는 $P_t = 46$ dBm으로 설정하며, 요구 에너지는 $E_i^{re} = 10$ mJ로 설정한다. UAV의 beamwidth 및 고도의 범위는 각각 $\theta_{\min} = 20^\circ$, $\theta_{\max} = 70^\circ$, $H_{\min} = 10$ m, $H_{\max} = 70$ m와 같이 설정한다. 또한, 모든 임무 지역의 반경은 r_i 로 같다고 가정한다. 이어서 본 시뮬레이션에서는 반송파 중심 주파수는 모두 $f = 2$ GHz로 설정하고, 밀집된 도심 지역에서의 A2G 채널 모델을 고려하여 $\eta_{LoS} = 1.6$, $\eta_{NLoS} = 23$, $a = 12.0810$, $b = 0.1139$ 로 설정한다.^[14]

우선 임의의 한 임무 지역에 대해서 UAV의 고도가 에너지 전송 시간에 미치는 영향을 알아본다. 그림 3은 임의의 한 임무 지역의 반경이 12 m로 주어질 때, 해당 임무 지역의 IoT 기기에 에너지를 전송하는데 걸리는 시간과 UAV 고도와의 관계를 보여준다. 단순히 지상 IoT 기기와 짧은 전파 거리를 갖도록 만들기 위해 UAV의 고도를 10 m로 설정하거나, 안테나 이득을 높이기 위해 고도를 70 m로 설정할 때에 비해 최적의 고도에 UAV가 배치될 때 각각 약 6배 및 약 4배만큼의 에너지 전송 시간이 줄어들음을 확인할 수 있다. 이는 UAV의 최적의 에너지 공급 위치를 구하는 본 제안 기법이 에너지 전송 시간을 크게 줄일 수 있음을 보여준다.

이어서 시작점에서 출발하여 모든 임무 지역을 방문하고 도착점에 도착하기까지의 UAV의 비행경로가 총 비행시간에 미치는 영향을 알아본다. 그림 4는 최적의 비행경로를 제공하는 제안 알고리즘과 greedy

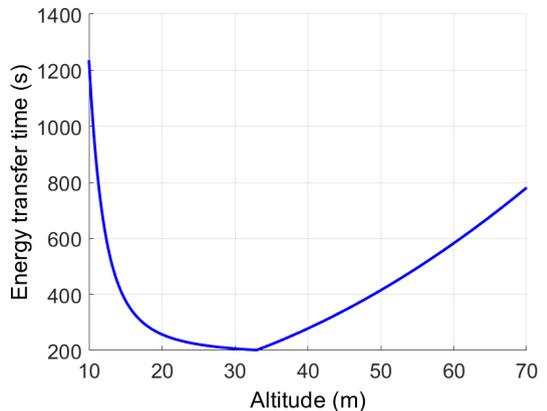


그림 3. UAV의 고도에 따른 UAV의 총 에너지 전송 시간
Fig. 3. Energy transfer time varying the UAV's altitude.

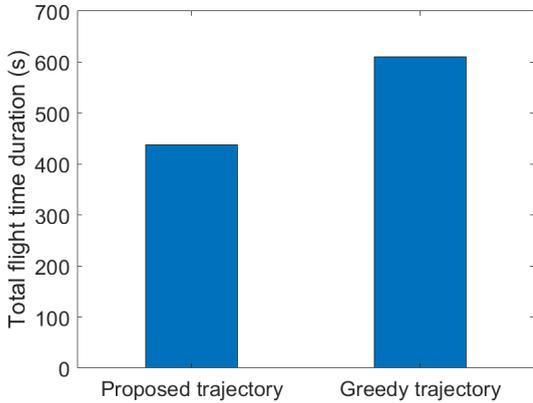


그림 4. UAV가 모든 임무 지역을 방문하는데 걸린 총 비행시간
Fig. 4. Total flight time to visit all missions.

알고리즘과의 비행시간 성능의 차이를 나타낸다. Greedy 알고리즘은 본 연구에서 제안한 기법에 따라 각 임무 지역별 최적의 에너지 공급 위치를 구하고, greedy 방법에 의거하여 현재 UAV 위치로부터 가장 가까운 에너지 공급 위치로 이동하는 기법이다. Greedy 알고리즘은 문제 (19)의 준최적해를 제공하는데 반해, DP를 기반으로 한 TSP 알고리즘은 문제 (19)의 최적해를 제공하기 때문에 본 논문에서 제시한 알고리즘이 greedy 알고리즘보다 더 짧은 UAV의 비행경로를 갖게 된다. 결국 UAV의 비행시간이 greedy 알고리즘보다 작음을 확인할 수 있다. 이는 UAV의 최적의 비행경로를 구하는 본 제안 기법이 비행시간을 크게 줄일 수 있음을 보여준다.

그림 5는 임무 지역의 반경이 6 m 부터 12 m 까

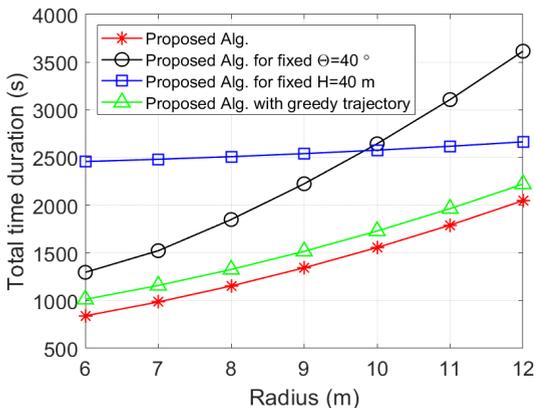


그림 5. 임무 지역 반경에 따른 UAV의 총 임무 수행 시간 (총 에너지 전송 시간 및 총 비행시간의 합)
Fig. 5. Total mission execution time (sum of the total energy transfer time and the total flight time) varying mission areas' radius.

지 증가함에 따라 UAV가 모든 임무 지역의 IoT 기기에 에너지를 전달하고 도착점으로 돌아오기까지 소요되는 총 시간을 보여준다. 본 제안 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 (1) UAV의 beamwidth가 40° 로 고정된 경우에 대해 제안 기법을 사용하여 UAV의 최적의 에너지 공급 위치와 최적의 경로를 결정하는 알고리즘, (2) UAV의 고도가 40 m로 고정된 경우에 대해 제안 기법을 사용하여 UAV의 최적의 에너지 공급 위치, 최적의 beamwidth와 최적의 경로를 결정하는 알고리즘, (3) 제안 기법을 사용하여 UAV의 최적의 에너지 공급 위치 및 beamwidth를 구하고, 그림 4에서 제시한 greedy 알고리즘을 이용하여 비행경로를 구하는 알고리즘과 비교한다. 모든 기법에서 공통적으로 임무 지역의 반경이 증가함에 따라 임무 수행 시간이 증가하지만, 본 논문에서 제안한 기법이 다른 기법들과 달리 UAV의 최적의 beamwidth, 최적의 에너지 공급 위치, 최적의 경로를 나타내어 IoT 기기의 수신 파워가 최대가 되고 가장 짧은 비행경로를 제시하기에 가장 좋은 성능을 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 다수의 임무 지역에 배치된 모든 IoT 기기들이 주어진 임무를 원활하게 수행할 수 있도록 UAV가 에너지를 공급하는 시나리오에서 UAV의 운용 시간을 최소화하는, 각 임무 지역 별 UAV의 최적의 에너지 공급 위치 및 beamwidth, 그리고 임무 지역 간 UAV의 최적의 비행경로를 구하였다. 본 논문에서 시행한 모의 실험 결과는 본 논문에서 제시한 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 UAV의 에너지 전송 시간과 비행 시간을 감소시켜 월등히 뛰어난 성능을 나타냄을 보였다. 마지막으로 본 연구에서 임무 지역 분할에 관한 문제는 논의되지 않았다. UAV의 고도 및 beamwidth에 따라 임무 지역의 경계가 달라질 수 있는 점을 고려할 때, 본 연구는 향후 임무 지역 분할을 추가적으로 다루는 보다 일반화된 시스템으로 확장되는데 있어서 기초 연구가 될 것으로 기대된다. 또한 본 연구는 UAV의 에너지 전송에 초점을 맞추었으나 IoT 기기들의 데이터 수집 또한 중요한 연구 과제이다. 본 연구를 초석 삼아 UAV의 IoT 기기들에 대한 데이터 수집 역할을 추가하여, 에너지 전송 및 데이터 수집을 동시에 하는 연구로 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

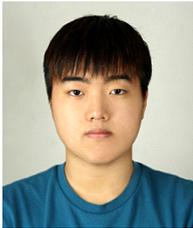
References

- [1] D.-Y. Kim and J.-W. Lee, "A study on UAV deployment and resource allocation using topographic information for stable energy supply of IoT devices," in *Proc. KICS Summer Conf.*, pp. 786-787, Jeju, South Korea, Jun. 2021.
- [2] D.-Y. Kim and J.-W. Lee, "Survey on topology management techniques in unmanned aerial vehicle networks," *J. KICS*, vol. 43, no. 2, pp. 333-343, Feb. 2018.
- [3] D.-Y. Kim and J.-W. Lee, "FANET topology reconfiguration adaptive to environmental changes," *J. KICS*, vol. 44, no. 1, pp. 117-120, Jan. 2019.
- [4] I. Yoon, "Aggregation nodes management using wireless power transfer for energy-harvesting wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 44, no. 7, pp. 1327-1335, Jul. 2019.
- [5] 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, Sep. 2009.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] C. You and R. Zhang, "Hybrid offline-online design for UAV-enabled data harvesting in probabilistic LoS channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 6, pp. 3753-3768, Jun. 2020.
- [9] B. Duo, Q. Wu, X. Yuan, and R. Zhang, "Anti-jamming 3D trajectory design for UAV-enabled wireless sensor networks under probabilistic LoS channel," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 12, pp. 16288-16293, Dec. 2020.
- [10] Z. Yang, et al., "Joint altitude, beamwidth, location, and bandwidth optimization for UAV-enabled communications," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 8, pp. 1716-1719, Aug. 2018.
- [11] Y. Wu, L. Qiu, and J. Xu, "UAV-enabled wireless power transfer with directional antenna: A two-user case," in *Proc. IEEE ISWCS*, pp. 1-6, Lisbon, Portugal, Aug. 2018.
- [12] H. N. Qureshi and A. Imran, "On the tradeoffs between coverage radius, altitude, and beamwidth for practical UAV deployments," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 55, no. 6, pp. 2805-2821, Dec. 2019.
- [13] M. Alzenad, A. El-keyi, F. Lagum, and H. Yanikomeroglu, "3D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy-efficient maximal coverage," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 6, no. 4, pp. 434-437, Aug. 2017.
- [14] 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.
- [15] Z. Yang, W. Xu, and M. Shikh-Bahaei, "Energy efficient UAV communication with energy harvesting," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 2, pp. 1913-1927, Feb. 2020.
- [16] Z. Wang, M. Wen, S. Dang, L. Yu, and Y. Wang, "Trajectory design and resource allocation for UAV energy minimization in a rotary-wing UAV-enabled WPCN," *Alexandria Eng. J.*, vol. 60, no. 1, pp. 1787-1796, Feb. 2021.
- [17] J. Xu, Y. Zeng, and R. Zhang, "UAV-enabled wireless power transfer: Trajectory design and energy region characterization," in *Proc. IEEE GC Wkshps*, pp. 1-7, Singapore, Dec. 2017.
- [18] W. Feng, N. Zhao, S. Ao, J. Tang, X. Zhang, Y. Fu, D. K. C. So, and K.-K. Wong, "Joint 3D trajectory design and time allocation for UAV-enabled wireless power transfer

networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 9, pp. 9265-9278, Sep. 2020.

- [19] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, “Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments,” in *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 2898-2904, Austin, TX, USA, Dec. 2014.
- [20] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th Ed., New York, NY, USA: Wiley, 2016.
- [21] D. P. Bertsekas, *Abstract Dynamic Programming*, 2nd Ed., Belmont, MA, USA: Athena Sci., 2018.
- [22] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein, *Introduction to Algorithms*, 3rd Ed., MIT Press, 2009.

신 종 민 (Jongmin Shin)



2022년 2월 : 연세대학교 전기전자공학부 학사
 2022년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합과정
 <관심분야> 무선통신네트워크
 [ORCID:0000-0003-1447-7371]

김 도 업 (Do-Yup Kim)



2016년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 학사
 2022년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 박사
 2021년 7월~2022년 3월 : Dept. of ECE at Virginia Tech 방문연구원

2022년 3월~현재 : Dept. of ECE at The Ohio State University 박사 후 연구원

<관심분야> 통신망 자원 할당, 통신망 최적화, 통신망 성능 분석

[ORCID:0000-0002-4165-1323]

이 장 원 (Jang-Won Lee)



1994년 2월 : 연세대학교 전자공학과 학사
 1996년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
 2004년 8월 : Dept. of ECE Purdue University 박사
 2004년 9월~2005년 8월 : Dept.

of EE Princeton University 박사 후 연구원
 2005년 9월~2010년 8월 : 연세대학교 전기전자공학부 조교수

2010년 9월~2015년 8월 : 연세대학교 전기전자공학부 부교수

2015년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 교수
 <관심분야> 통신망 자원 할당, 통신망 최적화, 통신망 성능 분석

[ORCID:0000-0002-5627-5914]