

개별 노드의 위치 및 접속 가능성을 고려한 효율적 UAV 기지국 배치

박재형*, 백호기*, 최선주**, 임재성°, 이충희***, 박형원***

Power-Efficient UAV Base Station Placement Considering Position and Accessibility of Individual Nodes

Jaehyong Park*, Hoki Baek*, Seonjoo Choi**, Jaesung Lim°,
Choong-Hee Lee***, Hyung-Won Park***

요약

무인기 기지국(UAV-BS) 형태로 무선 셀룰러 네트워크를 제공하는 연구가 최근 많이 진행되고 있다. 본 논문은 각 노드의 위치와 접속 확률을 고려하여 전력 효율적인 UAV-BS 배치 방식을 제안한다. 본 논문의 목표는 각 노드가 네트워크에 접속할 확률이 다르므로 UAV-BS에서 각 노드까지의 네트워크 트래픽이 다른 것을 고려하여 UAV-BS를 배치하여 UAV-BS의 평균 전송 전력을 최소화하는 것이다. UAV-BS는 사용자에게 신뢰할 수 있는 통신을 제공하기 위한 가시선(LOS) 연결을 보장할 수 있을 만큼 충분히 높이 비행해야 한다. 반면, 또 다른 측면으로 무인기의 송신 전력을 절약하기 위해 낮게 비행해야 한다. 따라서 본 논문에서는 이 두 가지 제약조건을 고려하면서 Weber 문제로 공식화하고 거리와 가중치를 함수로 해결하는 3단계 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 본 논문의 제안 방식의 성능을 평가하며, 그 결과는 기존에 제안된 maximal coverage 알고리즘보다 낮은 평균 전송 전력을 소비한다는 것을 보여준다.

키워드 : 무인기, 기지국, 게이트웨이, 배치, 위치, Weber 문제

Key Words : Unmanned aerial vehicle (UAV), base station, gateway, placement, location, Weber problem

ABSTRACT

Recently, unmanned aerial vehicle base stations (UAV-BSs) have been widely studied as a means of providing wireless cellular networks. We propose an energy efficient UAV-BS placement scheme considering a position and an access probability of individual nodes. We consider different access probabilities of each node because the UAV-BS has different traffic for node. we aim to minimize the average transmit power of the UAV-BS considering the difference in access probability where there is different network traffic from the UAV-BS to a node. A UAV-BS should fly high enough to ensure a line-of-sight (LOS) link for providing reliable communication to users, whereas it should fly low to save energy. Therefore, in this paper, we

※ 본 연구는 LIG넥스원이 지원하는 “스마트 부대 구축을 위한 5G 기반 UAV-BS 지능형 토폴로지 관리 기술” 과제의 일환으로 수행되었습니다.(LIGNEX1-2020-0013(00))

* First Author : Republic of Korea Air Force, naminsense@ajou.ac.kr, 정회원

° Corresponding Author : Ajou University, Department of Military Digital Convergence, jaslim@ajou.ac.kr, 정교수, 중신회원

* Ajou University, Department of Military Digital Convergence, neloyou@ajou.ac.kr, 중신회원

** Ajou University, Department of Computer Engineering, csg1388@ajou.ac.kr, 학생회원

*** LIG Nex1, choonghee.lee@lignex1.com, 정회원; hyungwon.park@lignex1.com, 정회원

논문번호 : 202009-237-B-RU, Received September 25, 2020; Revised October 13, 2020; Accepted October 13, 2020

propose three step algorithm by formulation it as a Weber problem and solving a distance-and-weight function while considering these two constraints. We evaluate the performance through simulation and the results show that the proposed scheme provides lower average transmit power than the maximal coverage algorithm.

I. 서 론

최근에 무인기 기지국(UAV-BS: UAV base station)을 이용하여 셀룰러 네트워크를 제공하는 방법에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 무인기는 두 가지 특징을 가지는데 하나는 하늘을 자유롭게 날 수 있어 각종 비상상황에 신속하게 투입될 수 있다는 것이고 다른 하나는 하늘에서 지상의 사용자들에게 쉽게 가시선(LOS: Line-Of-Sight) 확보할 수 있다. 이 두 가지 장점 때문에 각종 재해나 전장에서 UAV-BS는 무선 네트워크 서비스를 제공하는 효과적인 방법으로 떠오르고 있다. 그러나 UAV는 UAV 비행시간을 제한하는 크기, 중량, 전력 제약조건인 SWaP(Size, Weight and Power) 제약조건을 가지므로, UAV-BS의 효과를 높이기 위해 이러한 제약조건에 대한 해결책을 찾는 것이 중요한 이슈로 다뤄지고 있다¹⁾.

따라서 UAV-BS에서 지상 노드로 전송되는 다운링크의 전송 전력 소비를 최소화하기 위한 UAV-BS 배치에 관한 여러 연구가 진행되었다²⁻⁴⁾. [2]의 저자는 UAV-BS가 서비스해야 하는 지역인 커버리지를 기반으로 최적의 UAV-BS 고도를 결정하는 알고리즘을 제시한다. 또한 UAV로부터 지상까지 전파 경로 손실 모델을 개발해 환경에 따라 달라지는 LOS 확률을 고려하여 LOS 통신을 위한 최적 고도각을 찾았다. [3]의 저자들은 수송이론을 이용하여 효과적으로 구역을 나누고 다중 UAV-BS의 평균 전송 전력의 감소를 입증하였다. [4]의 저자들은 커버리지 면적을 최소화면서 서비스할 수 있는 사용자 수를 최대화하기 위해 사용자들의 정확한 위치를 이용하여, 사용자에게 최소로 요구되는 송신 전력 구하여 최대 커버리지 알고리즘을 제안했다. [5]에서는 모든 노드들의 위치를 고려하여 무게중심 지점을 찾아서 전력 효율을 개선했다. 앞선 [2-5]와 같은 논문들은 모든 노드가 네트워크에 동일한 접속 확률을 가지고 있다고 가정했다. 즉, 모든 노드는 UAV-BS로부터 수신할 데이터 패킷의 수가 동일하다. 따라서 앞선 논문들은 UAV의 에너지 효율을 위한 UAV-BS의 위치를 결정하면서 각 노드의 접속 확률을 고려할 필요가 없었다. 그러나 실제로는 다른 노드보다 접근 확률이 높은 게이트웨이와 같은 특수 노드가 있을 수 있다. 이 경우 UAV-BS의 위치

를 결정할 때 전력 효율적인 UAV-BS 배치를 위해 게이트웨이를 포함한 지상 노드들의 개별 접속 확률을 고려해야 한다⁶⁾.

본 논문에서는 노드의 전송을 위한 채널 접속 확률을 고려하여 UAV-BS의 평균 송신 전력을 감소시키는 UAV-BS 배치 방식을 제안한다. UAV-BS는 사용자들보다 게이트웨이로 전송할 데이터 패킷이 더 많은 경우가 대부분이므로, UAV-BS 배치에서는 UAV-BS의 평균 전송 전력을 줄이기 위해 게이트웨이와 사용자들의 네트워크 트래픽을 고려하는 것이 효과적이다. 본 논문에서 이러한 문제를 해결하기 위한 기법으로 3단계로 구성된 기법을 제시한다. 1단계에서는 UAV-BS가 위치할 수 있는 최소고도 지점을 구한다. 2단계에서는 UAV-BS 위치할 수 있는 최대고도 지점을 구하고 각 노드들의 가중치를 고려한다. 1단계는 고도가 낮아서 효과적이고 2단계는 가중치를 고려하여 효과적이므로 두 지점의 절충점을 3단계에서 찾는다. 마지막 단계는 Weber 문제로 모델링⁷⁾하여 앞서 언급한 두 제약조건 사이를 선으로 잇고 선위에서 전력 효율적인 지점을 결정한다. 가중치와 거리 함수로 구성된 문제를 볼록함수(convex function)로 보여줌으로써 해결한다. 단순성을 위해 잘 알려진 경로손실 모델 대신 자유 공간 경로 손실(Free Space Path Loss) 모델을 기반으로 3단계 기법을 제안한다. 실험 결과, 본 논문이 제안한 기법은 잘 알려진 정확한 경로손실 모델이 아니라 단순성을 위해서 FSPL 모델을 사용했다. 기존의 경로손실 모델은 LOS 확률을 고려하여 경로손실 모델을 구성했다. 하지만 본 논문에서 제안하는 기법은 잘 알려진 경로손실 모델을 활용했음에도 불구하고 기존에 maximal coverage 알고리즘에 비해 UAV-BS의 전송 전력이 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 각 노드들의 가중치와 LOS를 고려했기 때문이다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 자연재해나 긴급 작전으로 인한 지상 인프라의 부재 때문에 2차원 평면의 사용자들의 무선 네트워크 서비스를 위해 UAV-BS를 배치한다. 이 때, UAV-BS는 지상 게이트웨이와 모든 사용자들

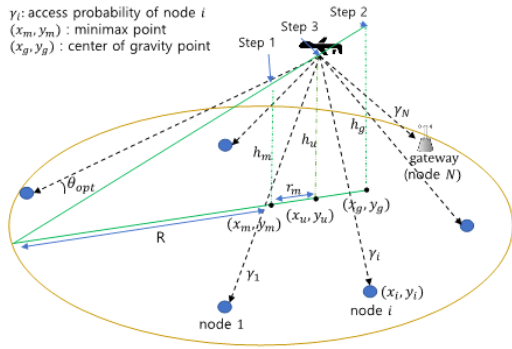


그림 1. UAV-BS 배치 시스템 모델
Fig. 1. System model of UAV-BS placement

중계를 통해 연결해주는 역할을 한다. 본 논문에서는 기존 연구와 동일한 범주로 UAV-BS 다운링크의 전력 효율성만 고려한다.

그림 1과 같이 사용자가 무작위로 분포하는 지리적 영역을 고려한다. N 은 서비스가 필요한 총사용자 수를 나타내고, (x_i, y_i) 는 각 사용자의 좌표가 되며, 여기서 색인 i 는 각 사용자 i 에 해당하며, (x_u, y_u, h_u) 는 UAV-BS의 좌표를 나타낸다. 그리고 N 번째 노드는 게이트웨이를 나타낸다. 또한 h_u 는 네트워크 커버리지를 보장할 수 있는 최소한의 고도를 나타내며, h_g 는 UAV-BS의 최대 고도를 나타낸다.

UAV-BS가 공중에 배치돼 있어서 지상에서는 UAV-BS와 사용자 간 LOS 연결이 쉽다. 따라서 UAV에 대한 많은 경로손실 모델이 제안되었지만, 교외 지역(suburban) 및 도시(urban) 환경에서 잘 알려진 AtG(Air-to-Ground 경로손실) 모델을 사용하였다^[2]. 그리고 AtG 모델은 블록함수가 아니므로 단순성을 위해 FSPL 모델을 기반으로 본 논문은 기법을 제안한다. 그리고 본 논문은 실험을 통해 제안한 기법이 평균 전송 전력을 감소시키고 제안한 기법과 함께 두 경로손실 모델의 결과 간 차이가 작다는 것을 나타냈다.

FSPL으로 UAV와 노드 i 사이에 경로 손실 모델을 적용하면 FSPL의 경로 손실은 다음과 같다.

$$PL(d_i) = \left(\frac{4\pi d_i f}{c} \right)^2 \quad (1)$$

여기서 PL 은 경로 손실 방정식, f 는 반송파 주파수, c 는 빛의 속도, d_i 는 $d_i = \sqrt{r_i^2 + h_u^2}$ 로 주어진 UAV-BS와 노드 i 사이의 거리다. r_i 는 UAV-BS의

지상 위치와 노드 i 사이의 수평 거리로 $r_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2}$ 로 나타낼 수 있다. $P_{t,i}$ 를 UAV-BS에서 노드 i 로 전송하는 전력으로 하고 P_r 를 신뢰할 수 있는 통신을 위해 수신기의 최소 요구 전력으로 한다. 우리는 UAV-BS의 전송 전력을 최소화하기 위해 UAV-BS의 전송 전력이 수신기의 최소 요구 전력과 일치한다고 가정한다. 노드 i 의 수신전력은 경로손실에 따라 다르기 때문에, UAV-BS와 노드 i 사이의 다운링크 전송전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{t,i} = P_r \cdot PL(d_i). \quad (2)$$

UAV-BS는 모든 노드와의 LOS 연결을 보장하기 위해 충분한 고도각을 유지하면서 비행해야 한다. 교외 또는 도시 환경에 따라 달라지는 신뢰할 수 있는 통신을 위한 최적의 고도각이 주어진다고 가정한다^[2]. 이를 최적 고도각 θ_{opt} 라고 표기한다. 전쟁터에서나 자연재해 중에, 모든 사용자의 수명은 네트워크에 접속하는 능력에 따라 달라질 수 있다. 모든 노드와 UAV-BS 사이의 LOS 연결을 보장하기 위해, 모든 노드가 UAV-BS와 충분한 고도각을 가지고 있는 고도에서 UAV-BS가 운용되어야 한다. 따라서 우리는 UAV-BS가 모든 노드 i 에 대해 최적의 고도각보다 낮은 고도각이 나오는 높이의 고도에서 비행할 수 없다고 가정한다. 이 고도 제한은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_u \geq \tan(\theta_{opt}) \cdot \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2}. \quad (3)$$

본 논문은 UAV-BS에서 가장 멀리 떨어진 노드의 좌표가 (x_L, y_L) 라고 가정한다. UAV-BS는 모든 노드 i 가 최적 고도각이 보장되도록 충분한 고도에서 비행하면서 전력을 절약하기 위해 최대한 낮게 비행해야 한다. 그렇다면 h_u 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_u = \tan(\theta_{opt}) \cdot \sqrt{(x_L - x_u)^2 + (y_L - y_u)^2}. \quad (4)$$

UAV-BS 다운링크의 트래픽은 1개의 게이트웨이와 $(N-1)$ 개의 노드들이 모두 다르다. 게이트웨이는 UAV-BS를 통하여 그림 1과 같이 표시된 $(N-1)$ 명의 사용자들인 노드들한테 셀룰러 네트워크

크를 제공하기 때문에, 각 노드들로부터 온 데이터를 게이트웨이로 전송하게 됨으로, 다운링크 입장에서는 게이트웨이로 향하는 트래픽이 많아질 수밖에 없는 구조이다. 이에 우리는 UAV-BS에서 게이트웨이에 이르는 네트워크 트래픽의 비율을 게이트웨이 접속 확률 γ 로 정의한다. 일반적으로 UAV-BS에서 게이트웨이로 보낼 패킷이 많고, 사용자에게 보낼 패킷이 적기 때문에 γ 를 큰 값으로 고려한다. 만약 γ 가 작다면, UAV-BS에서 게이트웨이로 보낼 패킷이 적고 사용자에게 보낼 패킷이 많다는 뜻이다. 따라서 모든 사용자 접근 확률의 합을 게이트웨이 접속확률을 뺀 $(1-\gamma)$ 값으로 나타낼 수 있다. UAV-BS의 모든 사용자 액세스 확률 γ_e 는 랜덤이라고 가정한다. 따라서 $(1-\gamma)$ 는 모든 γ_e 를 더한 값과 같다. 접근 가능성을 고려하여 UAV-BS의 평균 송신 전력 $P_{t,u}$ 에 대한 방정식을 다음과 같이 작성할 수 있다.

$$P_{t,u} = \gamma \cdot P_{t,g} + \sum_{e=1}^{N-1} \gamma_e \cdot P_{t,e} \left((1-\gamma) = \sum_{e=1}^{N-1} \gamma_e \right). \quad (5)$$

여기서 $P_{t,g}$ 및 $P_{t,e}$ 는 UAV-BS에서 게이트웨이 및 사용자로 전송되는 전력이다. $P_{t,u}$ 를 각각 γ 와 γ_e 로 표시된 게이트웨이와 사용자의 액세스 확률을 고려하여 P_t 를 최소화하기 위해, $P_{t,u}$ 를 최소화하는 것이 웨버 문제^[8]와 같은 기능을 공식화한다.

$$\begin{aligned} \min P_{t,u} &= \min \sum_{i=1}^N P_{t,i} \cdot w_i = \min \sum_{i=1}^N P_r \cdot PL(d_i) \cdot w_i \\ &= \min \left[k \sum_{i=1}^N d_i^2 \cdot w_i \right], \left(k = P_r \left(\frac{4\pi f}{c} \right)^2 \right). \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 식에서 k 값이 상수이기 때문에 $\sum(P_{t,i} \cdot w_i)$ 을 최소화하는 것은 $\sum(d_i^2 \cdot w_i)$ 을 최소화하는 것과 동일하다. 또한 $\sum(d_i^2 \cdot w_i)$ 을 최소화하는 것은 다음과 같이 두 가지로 공식을 나눌 수 있다.

$$\min \sum_{i=1}^N d_i^2 \cdot w_i = \min \sum_{i=1}^N r_i^2 \cdot w_i + \min \sum_{i=1}^N h_u^2 \cdot w_i \quad (7)$$

따라서 (7)식을 최소화 하는 것은 (6)식을 최소화 하는 것이므로 (7)의 $\sum(r_i^2 \cdot w_i)$ 과 $\sum(h_u^2 \cdot w_i)$

Algorithm 1 UAV-BS placement algorithm

- Input:** $(x_i, y_i), \theta_{opt}, P_r, w_i$
Output: (x^*, y^*, h^*)
- 1: **Step 1** : find minimax point (x_m, y_m, h_m)
 - 2: Obtain (x_m, y_m) by solving problem (8)
 - 3: Obtain h_u by solving (9)
 - 4: **Step 2** : find center of gravity point (x_g, y_g, h_g)
 - 5: Obtain (x_g, y_g) with center of gravity as in (10)
 - 6: Obtain h_g by solving (11)
 - 7: **Step 3** : find (x^*, y^*, h^*) on the line between the points from the two previous steps.
 - 8: Obtain (x^*, y^*) by solving the problem (12)
 - 9: Obtain h_u by solving (14)

그림 2. UAV-BS 배치 알고리즘
 Fig. 2. UAV-BS placement algorithm

을 최소화 하는 방법을 구하면 (6) 식을 구할 수 있다. 본 논문의 제안기법에서는 이 두 문제를 각각 해결하여 (6)식을 해결한다. 각각의 식은 각 최소 및 최대 고도 제약을 해결하는 문제와 동일하게 된다.

III. 제안기법

제안하는 기법은 3단계로 구성된다. 첫 번째 단계로, 고도가 최소가 되는 지점을 minimax location 문제를 해결하는 방법을 이용하여 UAV-BS의 배치 지점을 찾는다. 이 단계에서는 (7)식의 $\sum(h_u^2 \cdot w_i)$ 를 최소화한다. 두 번째 단계로, UAV-BS의 배치 지점을 무게중심법을 이용하여 찾는다. 이 지점은 (7)식의 $\sum(r_i^2 \cdot w_i)$ 가 최소화되는 지점이다. 하지만, LOS 연결을 위한 고도각 제한 때문에 앞서 언급한 두 단계의 목표는 단순하게 분리되어 풀 수 없다. 따라서 세 번째 단계는 이전 단계에서 구한 지점들 사이에 선에서 효과적인 지점을 구하려고 한다. 제안기법 마지막에 3단계 기법을 그림 2의 UAV-BS 배치 알고리즘과 같이 요약하여 나타냈다.

3.1 1단계 : 최소 고도인 minimax 지점 탐색

모든 사용자와 LOS 연결을 보장하려면 UAV-BS에서 가장 멀리 있는 사용자의 고도각이 최적 고도각보다 크거나 같아야 한다. 식 (4)에 의해서, (x_L, y_L) 와 (x_u, y_u) 사이의 거리를 최소화하여 전력 효율을 높이기 위해 h_u 를 최소화해야 한다. 즉, UAV-BS와 가장 먼 사용자와 사이의 거리가 최소화되도록 UAV-BS를 배치해야 한다. 이 문제를 해결하는 방법은 연구^[6]에서 제시되며 minimax location 문제를 해결하는 방법과 maximal coverage 알고리즘^[4]을 제안

하는 연구에서 smallest enclosing circle 문제를 해결하는 방법과 동일하다. 커버리지의 반경을 그림1처럼 R 이라 하면, 이 문제는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\min_{x_w, y_w} \max_{1 \leq i \leq N} r_i \quad (8)$$

minimax location 문제를 푸는 방법을 통하여 우리는 고도가 최소화된 UAV_BS 위치를 구할 수 있다. 이 지점을 minimax 지점이라고 하고 (x_m, y_m) 라고 표기한다. UAV-BS가 (x_m, y_m) 에 있다면, 그것은 UAV-BS가 위치할 수 있는 가장 낮은 고도 h_m 에 있고 h_m 은 다음과 같이 표현된다.

$$h_m = \tan(\theta_{opt}) \cdot R. \quad (9)$$

3.2 2단계 : 최대 고도인 무게중심 지점 탐색

이 단계에서는 식 (7)의 $\sum(r_i^2 \cdot w_i)$ 를 최소화하는 것이 목적이다. $\sum(r_i^2 \cdot w_i)$ 를 최소화하는 것은 Weber 문제에서 유클리드 거리의 지수가 2인, 즉 유클리드 거리의 제곱을 최소화하는 것과 같다. 이 문제는 무게중심법^[9]으로 간단하게 구할 수 있다. 이 무게중심 지점을 (x_g, y_g) 라고 표기한다. (x_g, y_g) 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$x_g = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i}, y_g = \frac{\sum w_i y_i}{\sum w_i}. \quad (10)$$

무게중심 지점에서 UAV-BS가 LOS 연결이 보장되는 최소 높이를 h_g 라고 표기한다. h_g 가 최소가 되는 값은 무게중심 지점과 가장 멀리 떨어진 사용자의 위치 사이 거리에 $\tan(\theta_{opt})$ 를 곱하여 구할 수 있다. 충분한 숫자의 노드가 존재하면 그림1과 같이 h_g 를 계산할 수 있다.

$$h_g = \tan(\theta_{opt}) \cdot \{R + \sqrt{(x_m - x_g)^2 + (y_m - y_g)^2}\}. \quad (11)$$

무게중심 지점은 UAV-BS가 위치할 수 있는 지점 중에서 식(7)에서 $\sum(r_i^2 \cdot w_i)$ 값이 가장 최솟값이므로 h_g 보다 높은 고도 위치하는 3차원 공간은 어떤 지점도 무게중심 지점보다 식(7)에서 나온 결과를 산출

하는 지점은 없다. 따라서 UAV-BS는 h_g 보다 높이 올라가지 않으므로 h_g 는 UAV-BS가 위치할 수 있는 최대 고도다.

3.3 3단계 : minimax 지점과 무게중심 지점 사이의 선에서 효율적인 지점 탐색

1단계에서 $\sum(h_u^2 \cdot w_i)$ 를 최소화하는 UAV-BS가 위치할 수 있는 최소 고도를 구한다. 다음으로, 2단계에서는 $\sum(r_i^2 \cdot w_i)$ 를 최소화하는 무게중심 지점을 구한다. 하지만 UAV-BS의 특성상 고도를 상승시켜 모든 노드와의 LOS를 보장해야한다. 3단계에서는 이러한 절충 지점을 탐색하기 위해서 1단계와 2단계에서 구한 minimax 지점과 무게중심 지점 사이에 선에서 식(7)의 결과가 최소가 되는 지점을 구한다. 이 문제는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \underset{x_w, y_w}{\text{minimize}} \quad \sum_{i=1}^N (d_i^2 \cdot w_i) \\ & \text{subject to} \quad h_m \leq h_u \leq h_g \\ & \quad \quad \quad \frac{x_u - x_m}{x_g - x_m} = \frac{y_u - y_m}{y_g - y_m} = \frac{h_u - h_m}{h_g - h_m} \end{aligned} \quad (12)$$

다시 말해, (x_m, y_m, h_m) 점과 (x_g, y_g, h_g) 점을 지나는 선 위에서 움직이며 최소 고도와 최대 고도 사이에 식(7)을 최소화하는 지점을 구한다. 3단계에서는 식(12)는 3차원에서 한 지점을 탐색하는 문제이므로 식(12)를 2차원에서 한 지점을 탐색하는 방식으로 변환하여 복잡성을 낮춰서 문제를 해결한다. 그림1과 같이 r_m 은 2차원 평면 위에 minimax 지점과 UAV-BS 위치 사이의 거리를 나타낸다. 이를 다시 표현한다면 r_m 은 다음과 같이 $r_m = \sqrt{(x_m - x_u)^2 + (y_m - y_u)^2}$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 UAV-BS의 고도 h_u 는 $\tan(\theta_{opt}) \cdot (R + r_m)$ 와 같이 나타낼 수 있으며 이는 그림1에서도 확인할 수 있다. 결론적으로 식(7)에서 $\sum(d_i^2 \cdot w_i)$ 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^N d_i^2 w_i = \sum_{i=1}^N r_i^2 w_i + \sum_{i=1}^N w_i (\tan \theta_{opt})^2 (R + r_m)^2. \quad (13)$$

식(13)은 유클리드 거리의 지수가 1과 2이 이므로 Weber 문제로 모델링^[7]하여 최적 지점을 풀어낼 수 있다. 식(13)에서 유클리드 지수가 1보다 크거나 같으

므로 convex 함수이며 Weiszfeld 알고리즘^[1]으로 풀 어낼 수 있다. 식 (12)는 식(13)을 해결하여 풀어낼 수 있으며 (x^*, y^*) 은 식 (12)의 결과값이다. h^* 는 식(11)과 같은 방법을 활용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h^* = \tan(\theta_{opt}) \cdot \{R + \sqrt{(x_m - x^*)^2 + (y_m - y^*)^2}\}. \tag{14}$$

따라서 본 논문은 3단계 기법을 제안하여 UAV-BS가 전력 효율적인 위치인 (x^*, y^*, h^*) 지점을 탐색한다.

IV. 실험

본 논문은 비교를 위해 본 논문에서 제안한 기법으로 구한 지점과 maximal coverage 알고리즘을 활용하여 얻은 지점에서 평균 송신 전력을 평가하였다. 실험 매개 변수는 표 1에서 확인할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 기법을 2가지 다른 환경에서 평가했다. 모든 실험은 유저들이 반지름 500m인 원형 안에서 무작위로 분포하는 환경을 고려하였다. 2가지 다른 환경에서의 실험 결과는 그림 3과 그림 4와 같이 각각 그래프로 나타냈다.

그림 3의 그래프는 UAV-BS의 평균 송신 전력 $P_{t,u}$ 를 게이트웨이 접속 확률 γ 에 따라서 나타냈다. 이 실험에서는 게이트웨이가 지역의 중심으로부터 가장 먼 500m 떨어진 지역에 위치한다고 가정한다. 그리고 도시(urban) 환경과 교외(suburban) 환경을 고려하였다.

최적 고도 작은 연구^[4]에 구한 각도를 이용한다. 도시 환경의 최적 고도 각 θ_{opt} 은 20° 그리고 교외 환경의 최적 고도 각 θ_{opt} 은 40°이다. 그림 3의 실험에서

표 1. 모의실험 매개 변수
Table 1. Simulation parameter

| Parameter | Value |
|--|---------------------|
| Number of users (N) | 100 |
| Frequency (f) | 2GHz |
| Minimum required power (P_r) | -70dBm |
| Radius of the area (m) | 500m |
| Suburban environment ($\eta_{LOS}, \eta_{NLOS}, a, b$) | 0.1, 21, 4.88, 0.43 |
| Urban environment ($\eta_{LOS}, \eta_{NLOS}, a, b$) | 1, 20, 9.61, 0.16 |

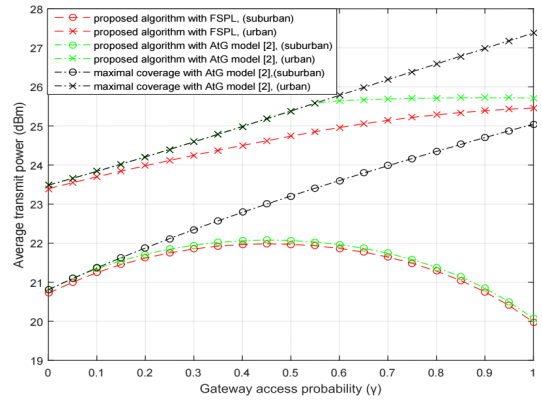


그림 3. 게이트웨이 접속 확률에 따른 평균 전송 전력
Fig. 3. Average transmit power according to gateway access probability

는 본 논문에서 제안한 기법과 maximal coverage 알고리즘으로 구한 지점에서 $P_{t,u}$ 를 잘 알려진 AtG 경로손실모델^[2]을 활용하여 계산하고 또한 본 논문에서 제안한 기법으로 구한 지점에서 FSPL을 적용하여 비교하였다. 본 논문에서 제안한 기법은 FSPL 모델과 AtG 모델을 적용하여 계산한 결과의 차이가 도시 환경과 교외 환경 두 환경에서 매우 작은 것을 그림 3에서 확인할 수 있다. 본 논문에서 제안한 기법은 γ 값이 증가하면 UAV-BS가 전력효율을 위해 게이트웨이 쪽으로 이동하기 때문에 본 논문에서 제안한 기법의 $P_{t,u}$ 가 maximal coverage 알고리즘보다 감소하는 것을 확인할 수 있다. 최적 고도각이 낮으면 UAV-BS는 γ 값이 증가할 때 더 많은 거리를 이동할 수 있다. 따

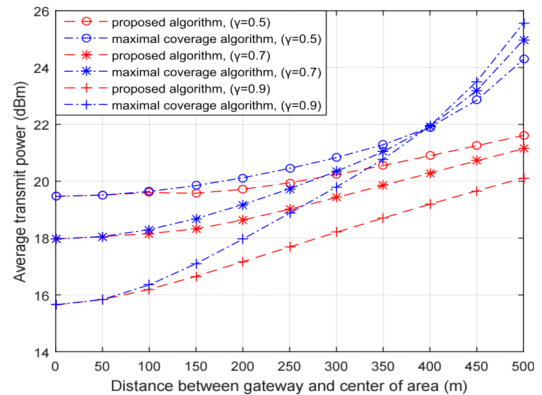


그림 4. 교외환경에서 AtG 경로손실 모델을 적용한 게이트웨이의 위치에 따른 평균 송신 전력
Fig. 4. Average transmit power according to location of the gateway with the AtG model[2] in a suburban environment

라서 최적 고도각이 낮은 교외 환경이 도시 환경보다 제안한 기법의 효과가 더 좋다. 본 논문에서는 FSPL 모델을 기반으로 기법을 제안했지만 AtG 모델을 활용하여 평균 송신 전력을 계산할 때 본 논문에서 제안한 기법이 maximal coverage 알고리즘 보다 더 좋은 성능을 나타내거나 같다.

그림 4의 실험은 중심지역으로부터 게이트웨이의 거리에 따라서 평균송신전력 $P_{t,u}$ 를 교외(suburban) 환경에서 계산했다. γ 가 0.5, 0.7, 그리고 0.9 때 3가지 실험 환경에 결과를 그림 4에 나타냈다. 게이트웨이와 중심 사이 거리는 0에서 500m까지 변화시키면서 결과를 그림 4에 나타냈다. AtG 모델을 적용하여 계산했으며 최적 고도각은 20° 이다.

최적 고도 각은 연구^[4]에 구한 각도를 이용한다. 이 실험에서는 게이트웨이의 위치에 따라서 본 논문에서 제안한 기법이 maximal coverage 알고리즘과 차이가 달라진다. 게이트웨이가 중심으로부터 거리가 멀어지면 멀어질수록 제안한 기법의 효과성이 상대적으로 커지는 것을 확인할 수 있다. 게이트웨이 접속 확률 γ 이 커지면 커질수록 상대적 효과성이 커져서 차이가 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 기법은 게이트웨이 접속확률 γ 이 커질수록 중심으로부터 거리가 멀어질수록 maximal coverage 알고리즘보다 성능이 높거나 같은 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 게이트웨이와 사용자 모두를 고려한 단일 UAV-BS 배치 방식을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 방식은 사용자들마다 가중치를 다르게 적용하여 사용자들의 각각의 위치와 요구사항을 고려하여 UAV-BS가 위치해야하는 효과적인 지점을 계산한다. 특히 사용자와 게이트웨이의 접속 확률을 고려하여 UAV-BS의 배치 지점을 탐색하는 실험을 진행했다. 또한 3단계 기법을 제안하여 전력효율이 높은 배치지역 구하는 기법을 나타냈다. maximal coverage 알고리즘과 비교하여 본 논문의 우수성을 실험 결과로 보여줬다. 실험 결과는 게이트웨이 접속확률이 높아서 가중치가 한쪽에 치우칠 경우 성능이 더 우수하다. 또한, 중심 지역으로부터 게이트웨이가 멀수록 성능이 더 우수하다. 최적 고도각이 낮을수록 maximal coverage 알고리즘보다 우수한 성능을 보여준다. 따라서 실험 결과는 제안된 기법이 평균 전송 전력을 현저히 감소시킨다는 것을 보여주었다. 본 논문은 개개인

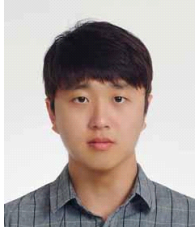
지상 노드를 개별적으로 고려하는 기법을 제안했고 이를 게이트웨이 접속확률의 차이에 따른 효과성을 나타냈지만, 전장환경과같이 각각의 통신 참여자 중요도가 다른 환경에서 가중치를 설정하여 UAV-BS가 전력 효율적인 배치 지점을 구할 수 있다. 본 실험 환경에서는 단일 UAV-BS만 배치하여 다수의 UAV-BS를 활용할 때 보다 coverage 한계와 LOS 제약이 크다. 따라서 추후에 다수의 UAV-BS를 활용하여 효과적인 배치지점을 찾는 추후 연구가 진행될 수 있다.

References

- [1] S. Bi, C. K. Ho, and R. Zhang, "Wireless powered communication: opportunities and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 4, pp. 117-125, Apr. 2015.
- [2] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, "Optimal LAP altitude for maximum coverage," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 6, pp. 569-572, Jun. 2014.
- [3] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Optimal transport theory for power-efficient deployment of unmanned aerial vehicles," in *Proc IEEE ICC*, pp. 1-6, 2016.
- [4] M. Alzenad, A. El-Keyi, F. Lagum, and H. Yanikomeroglu, "3-D 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, Apr. 2017.
- [5] J. Park, H. Baek, K. Chang, and J. Lim, "A UAV placement scheme based on centroid method considering all locations of nodes," in *Proc. 2018 KIMST*, pp. 1709-1710, Jun. 2018.
- [6] J. Elzinga and D. W. Hearn, "Geometrical solutions for some minimax location problems," *Transp. Sci.*, vol. 6, no. 4, pp. 379-394, 1972.
- [7] L. Cooper, "An extension of the generalized weber problem," *J. Regional Sci.*, vol. 8, no. 2, pp. 181-197, 1968.
- [8] R. Z. Farahani and M. Hekmatfar, "Facility location: concepts, models, algorithms and case studies," *Springer*, 2009.

[9] E. Kalantari, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroğlu, and A. Yongacoglu, "Backhaul-aware robust 3D drone placement in 5G+ wireless networks," in *Proc. IEEE ICCW*, Paris, France, May 2017.

박 재 형 (Jaehyong Park)



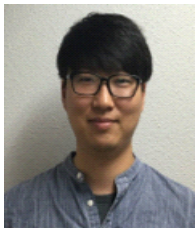
2019년 2월 : 아주대학교 국방
디지털융합학과 학사
2019년 6월~현재 : 대한민국 공
군
<관심분야> UAV, UAV 통신
네트워크, 전술데이터링크,

백 호 기 (Hoki Baek)



2006년 2월 : 아주대학교 정보
컴퓨터공학 학사
2008년 2월 : 아주대학교 정보
통신공학 석사
2014년 2월 : 아주대학교 컴퓨
터공학 박사
2014년 3월~2015년 2월 : 아주
대학교 장위국방연구소 전임연구원
2015년 3월~현재 : 아주대학교 국방디지털융합학과
강의교수
<관심분야> 5G/6G 통신네트워크, UAV 통신네트워
크, IoT, 국방전술통신, 시간동기, 위치인식

최 선 주 (Seonjoo Choi)



2016년 2월 : 아주대학교 컴퓨
터공학 학사
2018년 2월 : 아주대학교 컴퓨
터공학 석사
2018년 3월~현재 : 아주대학교
컴퓨터공학과 박사과정
<관심분야> 전술데이터링크, 무
장데이터링크네트워크, 주파수 도약 알고리즘

임 재 성 (Jaesung Lim)



1983년 2월 : 아주대학교 전자
공학 학사
1985년 2월 : KAIST 영상통신
석사
1994년 2월 : KAIST 디지털통
신 박사
1998년 3월~현재 : 아주대학교
국방디지털융합학과 정교수
2004년 3월~현재 : 아주대학교 국방전술네트워크 연
구센터장
<관심분야> 이동 및 위성통신, 무선네트워크, 국방
전술통신

이 충 희 (Choong-Hee Lee)



1999년~2006년 아주대학교 전
자공학과 공학사
2006년~2008년 아주대학교 전
자공학과 공학석사
2008년~2015년 아주대학교 전
자공학과 공학박사
2015년~현재 LIG넥스원 C4I
연구소 선임연구원
<관심분야> 전술통신, 이동통신, QoS, QoE

박 형 원 (Hyung-Won Park)



1999년~2003년 아주대학교 정
보 및 컴퓨터공학과 공학사
2003~2005년 아주대학교 정보
통신공학과 공학석사
2005년~2009년 아주대학교 정
보 통신공학과 공학박사
2009년 9월~현재 LIG넥스원
C4I연구소 5팀 팀장
<관심분야> 전술데이터링크, 군 위성통신, 이동통신