

무인 항공기 기지국의 전력 소모를 최소화하는 저복잡도 클러스터링 알고리즘

전 흥 배*, 정 태 훈*, 채 찬 병^o

Energy-Efficient Clustering Algorithm for UAV-BSs with Low-Complexity

Hong-Bae Jeon*, Taehun-Jung*,
Chan-Byoung Chae^o

요 약

본 논문에서는 이동하는 지상의 단말들을 효율적으로 지원할 수 있는 여러 대의 무인 항공기 기지국들의 저복잡도 동적 클러스터링 및 3차원 배치 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 이전 시간 단위에서의 클러스터에서 벗어난 단말들만을 고려하여 이들만의 정보를 토대로 새로운 클러스터를 귀납적으로 갱신한다. 본 논문에서는 제안한 알고리즘이 기존의 알고리즘에 비해 낮은 복잡도를 가짐을 보였으며, 역시 기존의 방식에 비해 낮은 전체 송신 전력으로 지상의 단말들을 지원할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

Key Words : UAV, Energy Efficiency, Low Complexity, Channel Model, Clustering.

ABSTRACT

In this paper, we propose a low-complexity dynamic clustering and 3-D placement algorithm of multiple unmanned aerial vehicle base stations (UAV-BSs) to efficiently service ground users with

mobility in real-time. The proposed algorithm inductively updates the cluster based on the users deviated from the previous clusters. We show that our proposed algorithm has lower complexity and leads to the lower total power consumption of UAV-BSs compared to conventional algorithms by simulation.

I. 서 론

최근 무인 항공기 (UAV)의 높은 이동성을 이용하여 무인 항공기에 기지국을 장착하는 기술이 주목받고 있다. 이는 일시적으로 지상의 기지국이 역할을 할 수 없는 재난 상황 등 다양한 환경에서 빠르고 유연한 대응이 가능하며, 무인 항공기의 높은 고도 확보를 통한 충분한 가시선 (Line-of-Sight, LoS) 링크 역시 보장할 수 있다는 장점을 갖는다. 기존의 연구에서는 주로 고정된 단말들에 대하여 하나¹⁾ 또는 여러 대의²⁾ 무인 항공기 기지국을 사용했을 때의 단말들을 최소 송신 전력으로 간섭 없이 지원하는 방법을 제안하였다. 본 논문에서는 단말이 이동성을 가진 상황에서 여러 대의 무인 항공기 기지국을 전력 소모를 최소화하면서 지원하는 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 또한 이전 시간 단위의 무인 항공기의 클러스터 영역에서 벗어난 단말들의 정보만 사용하므로 낮은 복잡도를 갖는다. 그리고 본 알고리즘이 시간에 따라 클러스터를 갱신하지 않는 방식과 k -평균 알고리즘으로 매 순간 클러스터를 갱신하는 방식에 비해 보다 낮은 전체 송신 전력으로 단말들을 지원함을 시뮬레이션을 통해 보였다.

II. 문제 정의

2.1 문제의 구성

본 논문에서는 UAV 기지국들이 대응하는 단말들을 지원하는 하향 링크 (Downlink)를 가정한다. 이를 위하여 제한된 영역 $\mathcal{J} \subset \mathbb{R}^2$ 에 배치된 이동성을 가진 단말들과 UAV들의 인덱스의 집합을 각각

* 본 연구는 방위사업청과 국방 과학 연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다. (UD160070BD)

• First Author : (ORCID:0000-0001-7522-8745)School of Integrated Technology, Yonsei University, hongbae08@yonsei.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-9561-3341)School of Integrated Technology, Yonsei University, cbchae@yonsei.ac.kr, 정회원

* (ORCID:0000-0001-5542-8520)School of Integrated Technology, Yonsei University, taehun.jung@yonsei.ac.kr, 학생회원
논문번호 : 201908-144-A-LU, Received August 1, 2019; Revised August 9, 2019; Accepted August 9, 2019

$\mathbb{N} = \{1, \dots, N\}$, $\mathbb{M} = \{1, \dots, M\}$ 과 같이 정의한다. 단말 n 의 시간 단위 t 에서의 좌표는 $\mathbf{s}_n(t) \in \mathbb{R}^2$ 와 같이 주어지며 t 는 0 이상의 정수로 가정한다. 그리고 시간에 따른 단말의 이동을 평균이 0인 2차원 확률변수 Δ 를 사용하여 $\mathbf{s}_n(t+1) = \mathbf{s}_n(t) + \Delta$ 와 같이 표현할 수 있다. 또한 각 UAV들은 방위 (Azimuth)와 고도 (Elevation) 방향으로의 반전력 빔폭 (Half-Power Beamwidth, HPBW)을 조절할 수 있는 지향성 안테나가 장착되었으며, 단말들은 안테나 이득이 없는 무지향성 안테나를 가정한다.

그리고 UAV m 에서 단말 n 으로의 링크가 각각 가시선, 비가시선일 확률 $P_{n,LoS}^{(m)}$, $P_{n,NLoS}^{(m)}$ 에 대하여 그 평균 경로 손실 $\overline{PL}_n^{(m)}$ 은 아래와 같이 주어진다.

$$\overline{PL}_n^{(m)} = 10^{\frac{FSPL_n^{(m)} - G_m}{10}} \left(P_{n,LoS}^{(m)} 10^{\frac{E_{LoS}}{10}} + P_{n,NLoS}^{(m)} 10^{\frac{E_{NLoS}}{10}} \right) \quad (2)$$

(2)에서 $FSPL_n^{(m)}$ 은 UAV m 에서 이에 속한 단말 n 으로의 자유 공간 경로 손실 (Free-Space Path Loss)이며, G_m 은 UAV m 의 안테나 이득이다. 그리고 E_{LoS} , E_{NLoS} 는 각각 가시선과 비가시선 상황에서의 추가 경로 손실이며 주어진 환경 (개활지, 도심)에 따라 달라진다. 여기서 $P_{n,LoS}^{(m)}$, $P_{n,NLoS}^{(m)}$, 그리고 $FSPL_n^{(m)}$ 이 모두 UAV m 의 높이 h_m 과 UAV m 과 단말 n 사이의 수평 거리 $r_n^{(m)}$ 의 함수이므로^[1] $\overline{PL}_n^{(m)}$ 역시 이 두 변수에 관한 함수가 된다.

2.2 최적화 문제와 최적의 3차원 UAV 배치

본 논문에서는 매 시간 어떤 두 클러스터도 같은 단말을 포함하지 않는다고 가정하였다. 위 상황에서 매 시간 에너지 효율을 최대화하면서 각 단말들이 매 시간 서비스의 질 (Quality-of-Service, QoS)를 보장받도록 하는 최적화 문제는 아래와 같다.

(3)에서 σ^2 은 잡음 (Noise)의 세기이며, $P_{r,n}^{(m)}(t)$ 는

시간 t 에서 단말 n 이 UAV m 으로 받은 수신 전력이고 이는 시간 t 에서의 UAV m 의 송신 전력 $P_{t,m}(t)$ 와 UAV m 에서 단말 n 으로의 평균 경로 손실 $\overline{PL}_n^{(m)}(t)$ 에 대하여 $P_{r,n}^{(m)}(t) = \frac{P_{t,m}(t)}{\overline{PL}_n^{(m)}(t)}$ 와 같이 나타낼 수 있다.

그리고 $C_m(t) \subset \mathbb{N}$ 와 $\rho_m(t) \in \mathbb{R}^3$ 는 각각 시간 t 에서 각각 UAV m 에 대응된 단말들의 인덱스의 집합과 UAV m 의 3차원 위치이다. (3)은 첫 번째와 두 번째 제약 조건으로 인하여 NP-난해 문제이다. 따라서 본 논문에서는 시간 t 의 대응 결과로부터 다음 시간 $t+1$ 의 대응 결과를 귀납적으로 도출하는 휴리스틱을 제안한다.

그리고 위 (3)에서 $\{C_m(t)\}_{m=1}^M$ 을 정했다고 가정했을 때, 이로부터 송신 전력을 최소화하기 위한 최적의 UAV의 3차원 위치 $\rho_m(t)$ 를 결정해야 한다. 이를 위하여 먼저 각 UAV별로 $C_m(t)$ 들을 포함하는 가장 작은 넓이의 타원

$$E_m(t) = \{x \in \mathbb{R}^2 : \|A_m(t)x - b_m(t)\|_2 \leq 1\}$$

$$(A_m(t) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}, b_m(t) \in \mathbb{R}^2, A \text{는 Positive Definite})$$

을 아래 컨벡스 문제를 통하여 찾아낸다.

$$\min_{A_m(t), b_m(t)} \log \det\{A_m(t)\}^{-1}$$

$$\text{s.t. } \|A_m(t)\mathbf{s}_n(t) - b_m(t)\|_2 \leq 1 \quad (\forall n \in C_m(t)) \quad (4)$$

그 다음 UAV들을 (4)에서 구한 타원들의 중심에 위치시킴으로써 UAV의 수평 위치를 확정한다. 그리고 UAV의 고정된 높이에 대하여 UAV와 단말의 수평 거리가 멀어질수록 경로 손실이 커지므로^[1], 타원의 중심으로부터 가장 거리가 먼 가장자리 단말의 QoS를 보장 ((3)의 3번째 제약 조건)하는 쪽으로 UAV의 높이를 결정해야 한다. [1]에 의하여 그러한 높이가 존재하므로 이 높이로 UAV를 위치시키면 주어진 $\{C_m(t)\}_{m=1}^M$ 에 대하여 송신 전력을 최소로 하는 M 개의 UAV들의 3차원 배치를 얻을 수 있다.

$$\min_{C_m(t), \rho_m(t)} \sum_{m=1}^M P_{t,m}(t) \quad (m \in \mathbb{M})$$

$$\text{s.t. } C_m(t) \cap C_{m'}(t) = \emptyset \quad (m \neq m', m, m' \in \mathbb{M})$$

$$\sum_{m=1}^M |C_m(t)| = N, \quad \frac{P_{r,n}^{(m)}(t)}{\sigma^2} \geq \zeta_{th} \quad (\forall m \in \mathbb{M}, \forall n \in C_m(t))$$
(3)

III. 제안한 알고리즘

3.1 저복잡도 동적 타원 클러스터링 알고리즘

제안한 알고리즘에서는 귀납적으로 시간 t 에서의 대응 결과 $\{C_m(t)\}_{m=1}^M$ 와 최소 타원 $\{E_m(t)\}_{m=1}^M$ 이 주어져 있다고 가정한다. 여기서 $t=0$ 인 경우 [2]에서 제안한 타원 클러스터링 알고리즘을 통하여 주어진 단말들을 어떠한 두 클러스터도 같은 단말들을 포함시키지 않도록 클러스터링한다.

이제 시간이 $t+1$ 이 되었을 때 전체 N 개의 단말들 중 $r \in (0, 1]$ 만큼의 비율의 단말들이 Δ 만큼 움직였다고 가정한다. 그러면 움직인 총 Nr 개의 단말들 중 원래 타원 $\{E_m(t)\}_{m=1}^M$ 에서 벗어난 단말들을 찾아내고, 이들에 대하여 각 타원들의 중심으로부터의 거리가 가장 작은 타원을 선택하여 이에 대응하는 UAV에 벗어난 단말을 편입시킴으로써 새롭게 $\{C_m(t+1)\}_{m=1}^M$ 을 얻을 수 있다. 그리고 II-2.2를 통하여 시간 $t+1$ 에서의 이들에 대응하는 타원, UAV의 3차원 배치, 그리고 최소 송신 전력을 얻을 수 있다. 지금까지의 흐름을 알고리즘 1과 같이 정리할 수 있다.

이와 같이 가까운 UAV에 벗어난 단말을 대응시키는 본 알고리즘은 클러스터 간 간섭 발생 확률을 줄이면서 UAV의 송신 전력 역시 최소화시킬 수 있는 장

```

알고리즘 1. 동적 타원 클러스터링 알고리즘
Initialize  $t \leftarrow 0$ 
While (장비가 이동하는 동안)
    If  $t=0$ 
        1) 초기 UAV와 단말들의 대응 관계를 타원 클러스터링 알고리즘 [2]을 통하여 생성
        2) 각 UAV의 클러스터에 대응하는 최소 타원을 (4)를 통하여 형성
    end
    전체 단말들 중  $r$ 만큼의 비율이 움직임
    for  $k=1 : \lfloor Nr \rfloor$  (벗어난 단말들의 집합) ( $\leq Nr$ )
        1) 벗어난 단말  $k$ 에서 각각의 타원들의 중심까지의 거리를 측정하면서 그 값이 가장 작은 타원 (UAV  $m_k$ )을 선택
        2) UAV  $m_k$ 에  $k$ 를 편입
    end
    새로운 최소 타원들을 (4)를 통하여 찾아냄
     $t \leftarrow t+1$ 
end
    
```

점을 갖는다. 또한 이로 인하여 본 알고리즘의 고정된 시간 t 에서의 클러스터링 갱신 과정의 복잡도는 최악의 경우 Nr 개의 단말들이 모두 대응하는 타원을 벗어난 경우에 대하여 M 개의 타원까지의 거리의 최솟값을 찾아야 하므로 $O(Nr) \times O(M) = O(NrM)$ 보다 작게 주어진다. 이는 대표적으로 클러스터링 갱신 시 매 순간 모든 단말들의 배치를 고려하는 k -평균 알고리즘의 복잡도인 $O(\infty M)$ (단, K 는 알고리즘 반복횟수)보다 더 작음을 알 수 있다.

IV. 성능 평가

4.1 시험 환경

본 논문에서는 [1]의 도시 지형을 가정하고 경로 손실을 모델링하였으며 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 크기의 영역에 $\lambda = 90$ 인 Poisson Point Process (PPP)를 사용하여 독립적으로 500개의 단말 분포를 생성하였다. 그리고 주어진 분포들에 대하여 전체 UAV의 송신 전력의 평균값을 조사하였다. 또한 비교를 위하여 k -평균 알고리즘을 매 시간 모든 단말들의 분포에 대하여 적용하는 경우와 시간 단위가 바뀌어도 UAV-단말의 대응 관계를 갱신하지 않는 경우를 가정하였다.

4.2 성능 비교시험

그림 1은 움직인 단말들의 비율에 따른 전체 UAV의 송신 전력을 나타낸 그래프이다. 이로부터 제안한 알고리즘을 사용하였을 때 그렇지 않은 경우에 비하여 전체 송신 전력을 30~40%정도 절감할 수 있었고, 기존의 k -평균 알고리즘에 비해서도 전체적으로 좋은 성능을 가짐을 알 수 있다.

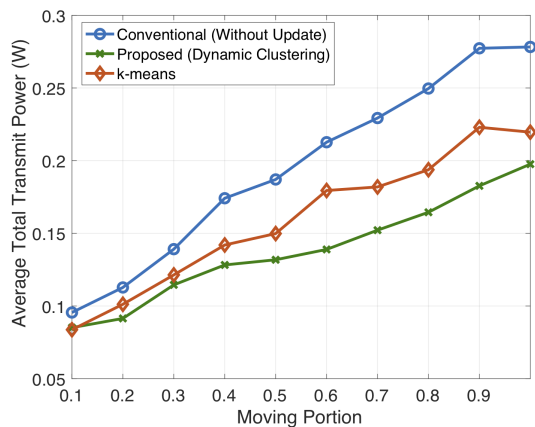


그림 1. 움직인 단말들의 비율에 따른 전체 송신 전력
Fig. 1. Total transmit power according to the portion of moved terminals

V. 결 론

본 논문의 알고리즘은 이동성을 가진 단말들을 클러스터 간 간섭을 최소화하면서 클러스터링한다. 그리고 매 시간 송신 전력을 최소화하는 UAV의 3차원 배치 역시 결정한다. 이는 기존의 k -평균 알고리즘을 사용한 경우와 UAV-단말의 대응 관계를 갱신하지 않는 경우에 비하여 전체 송신 전력의 관점에서 더 나은 성능을 가지며 복잡도 역시 낮음을 확인하였다.

References

- [1] L. Wang, B. Hu, and S. Chen, "Energy efficient placement of a drone base station for minimum required transmit power," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, Feb. 2018.
- [2] H.-B. Jeon, T. Jung, and C.-B. Chae, "Energy-efficient ellipse clustering algorithm for 3D UAV placement," in *Proc. Symp. KICS*, vol. 2019, no. 1, pp. 369-370, 2019.