

## 셀룰러 음영지역 연결을 위한 Relay UAV 배치 알고리즘에 관한 연구

최동락, 박세웅

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신연구소

drchoi@netlab.snu.ac.kr, sbahk@snu.ac.kr

## A Study on Relay UAV Placement Algorithm for Cellular Shadow Area Connection

Dongrak Choi, Saewoong Bahk

Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University

## 요약

본 논문은 셀룰러 음영지역에서 무인 항공기 (UAV)를 릴레이로 활용하여 기지국과 사용자를 연결하고자 한다. 하지만 UAV의 위치와 고도는 중단 간 처리량에 많은 영향을 주므로 릴레이 UAV의 배치가 중요하다. 이를 위해 실제 음영지역에서 실측한 데이터를 바탕으로 릴레이 UAV가 위치를 정하는 방법에 대해 탐구하고, 실제 음영지역에서 릴레이 성능이 어떻게 변화하는지 살펴본다.

## I. 서론

통신 기술의 발전에 따라 신속하고 안정적인 통신 인프라의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 특히 상용 통신망의 확장과 커버리지 향상은 현대 사회에서 원활한 정보 교환과 소통을 가능하게 하는 핵심 요소이다. 그럼에도 불구하고, 일부 지역에서는 여전히 통신 신호의 불안정성과 낮은 신뢰성이 문제로 남아 있다. [1]

본 연구에서는 이러한 셀룰러 음영지역에서 무인항공기 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)를 릴레이 (relay)로 활용함으로써 셀룰러 기지국 (base station, BS)과 사용자 (user equipment, UE)간의 연결성을 효율적으로 증대시키고자 한다. [2] 이를 위해서 실측 데이터를 바탕으로 relay UAV의 위치와 고도가 처리량 (throughput)에 미치는 영향을 분석하고, relay의 배치를 결정하는 UAV 배치 알고리즘을 제안한다.

## II. 본론

## 1) 채널 실측

실제 UAV를 활용하여 UE-UAV Wi-Fi 링크와 UAV-BS LTE 링크의 성능을 측정했다. UAV 실험은 실제 지형, 기지국 위치에 의한 음영지역에서 진행되었으며, 측정한 데이터는 처리량, 신호세기, GPS, 고도 등이 포함된다. 지상에서 음영지역이었던 곳에서 UAV를 비행시켜 iPerf3 [3]로 측정한 처리량은 그림 1과 같다. 히트맵은 각 프로토콜 및 고도별 UAV의 수평 위치별 처리량을 의미하며 통신은 UE-UAV-BS로의 업링크 시나리오로 진행되었다. UAV-BS LTE의 경우, 고도가 높을수록, 중앙에서 수평위치가 멀수록 더 좋은 처리량을 보이는 경향을 보인다. 특히, 높은 처리량을 보이는 위치가 밀집되어 있음을 유추할 수 있다. 이는 음영지역 근처에 위치한 기지국과 밀접하게 UAV가 접근했음을 시사한다. 반대로 UE-UAV Wi-Fi의 경우, 고도가 낮을수록, 수평 거리가 멀지 않을수록 처리량이 높는데 UE와 UAV 사이가 가까워야함을 의미한다. 따라서 두 링크는 사용자를 기준으로 UAV의 위치가 멀어지고, 가까워짐에 따라 처리량의 증감이 다르며 이는 trade-off 관계에 있다.

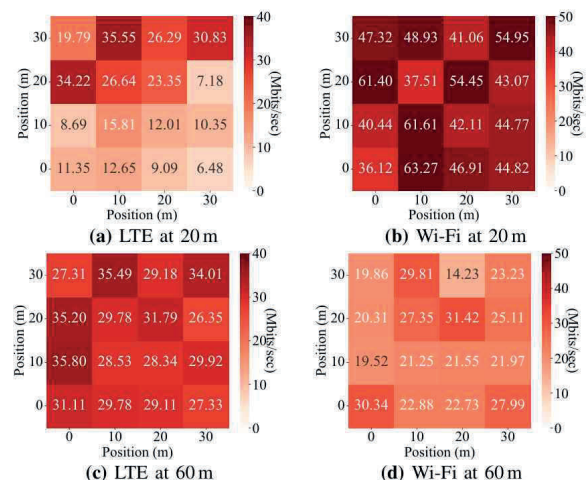


그림 1 고도 및 위치별 처리량 히트맵

## 2) UAV 배치 알고리즘 제안

Relay UAV의 배치를 결정하기 위한 알고리즘을 위해 몇 가지 설정을 진행하면 다음과 같다. 먼저 UE는 지상에서의 음영지역에 위치해 있고, relay UAV는 UE-UAV와 UAV-BS 링크 중 어디가 병목을 겪고 있는지 알고 있다. UAV는 up, down, left, right, forward, backward, hover 7 가지 방향으로 움직일 수 있다. UAV는 10m 간격으로 나누어진 3차원 격자점에서 움직이며, 새로 도착한 위치에서  $T_q$  초만큼 머물며 평균 처리량을 측정한다.

먼저, hovering을 지속할지 여부는 그림 2처럼 결정된다. 미리 중단 간 처리량 기준들을 설정한 뒤, 어느 기준도 만족하지 못한다면 호버링하지 않는다. 그림 2에서는 미리 3 가지의 기준을 설정하였으며 이는 Youtube 스트리밍 권장 상위 3 가지의 bitrate이다. [4] 만약 만족한 기준이 있다면 UAV가 hovering한다. 하지만 채널은 시변성을 지니고 있기 때문에 처음 기준을 만족한다고 해도 이후에 만족한다는 보장이 없다. 따라서 만약 채널 여건이 악화되면 다른 위치로 이동해야한다. 반대로 채널 상황이 더 좋아져 호버링을 더 지속해야할 수도 있다. 이를 위해 특정 기간동안 평균 처리량이 아무 기준을 만족시키지 못한다면 하위 state로, 더 높은 기준을

만족시킨다면 상위 state로 이동하며 변하는 채널 상태를 반영하여 hovering을 결정한다.

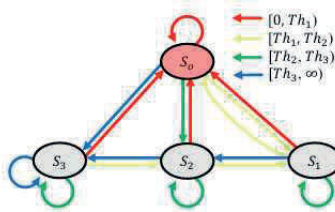


Fig. 4: State diagram of hovering determination module.

Threshold	Resolution	Frame Rate	Recommended Bitrate
$Th_3$	4K / 2160p	60fps	35 Mbits/sec
$Th_2$	4K / 2160p	30fps	30 Mbits/sec
$Th_1$	2K / 1440p	60fps	24 Mbits/sec

그림 2 Hovering 결정 state diagram

#### Algorithm 1 MOVING POLICY

**Input:**  $Th_{e2e}$ ,  $Th_w$  and  $Th_{pc}$   
**Output:**  $P(x, y, z)$   
**Procedure:**  
 1: **if**  $mean(Th_{e2e}) \geq Th_1$  **then**  
 2:   Follow Hovering Determination  
 3: **end if**  
 4: **if**  $mean(Th_{e2e}) < Th_1$  **or**  $c_1 \geq ceil(T_q/T_s)$  at  $S_1$  **then**  
 5:   **if**  $mean(Th_{pc}) < mean(Th_w)$  **then**  
 6:     Move to improve LTE (further from UE)  
 7:   **end if**  
 8:   **if**  $mean(Th_{pc}) \geq mean(Th_w)$  **then**  
 9:     Update  $d_{max}$  for Space Pruning  
 10:    Move to improve Wi-Fi (toward UE)  
 11:   **end if**  
 12: **end if**

그림 3 Moving policy 알고리즘

UAV가 움직여야 한다면 그림 3의 moving policy 알고리즘을 따른다. UAV는 UE - UAV와 UAV - BS 링크 중 병목 링크를 알기 때문에 해당 링크를 개선하는 방향으로 움직인다. 반대로, UE - UAV Wi-Fi 링크가 병목이라면 UE에 가까운 방향으로 UAV가 움직이고, UAV - BS LTE 링크가 병목이라면 UE에서 먼 방향으로 BS를 찾기 위해 움직인다.

UAV의 임무 수행 지역을 줄이기 위해 그림 3의 9번째 줄에 space pruning 기법도 추가하였다. 만약 UE - UAV Wi-Fi가 병목 링크인데 중단 간 처리량이 아무 기준을 충족시키지 못하였다면 UAV는 해당 위치에서 UE 사이의 거리보다 더 먼 위치로 이동할 필요가 없다. 이 시나리오에서는 하나의 UAV가 하나의 UE를 담당하고 있으므로 거리가 처리량 감소의 주된 요인이기 때문이다.

#### 3) 실험 결과

실측 데이터를 바탕으로 Python 기반으로 trace-driven 실험을 진행하였다. 총 실험은 10분 동안 진행되었으며, 그림 4의 UPS가 본 논문에서 제안된 스킴을 의미한다. 그 외 비교 스킴에 대한 설명은 다음과 같다. Naive는 그림 3의 moving policy로만 동작하는 경우이며, Prophet은 현재 UAV의 위치에 바로 인접한 격자점에서의 다음 시간 처리량을 미리 아는 경우이다. Oracle은 UAV가 쿼터점프를 하며 해당 시각에서 가장 높은 중단 간 처리량을 보이는 위치로 이동하는 동작을 진행한다. Random은 7 가지 방향으로 랜덤하게 움직이는 비교 스킴이다. Prophet과 Oracle은 현실에서 구현이 불가능한 스킴이다.

실험 결과, 제안된 스킴이 Oracle을 제외한 다른 모든 방식보다 높은 처리량을 보여주며, 그림 2의 제일 높은 기준 (4K 60fps 전송)에 충분한 성능 수준을 달성했다. Prophet은 UPS의 처리량에 도달했지만, 상당히 늦은 시점에 도달한다. 한 그리드 포인트 떨어진 곳에서 달성 가능한 처리량을

알고 있더라도, 가장 높은 기준을 충족하는 UAV를 신속하게 찾기에는 충분하지 않기 때문이다. Naive는 처리량을 향상시켰지만, UPS보다 낮은 수준을 유지하며, 예상대로 Random은 정보에 기반한 의사 결정이 부족하여 최악의 성능을 보인다.

#### III. 결론

본 논문에서는 실제 음영 지역에서의 실제 비행 실험을 통해 3D 공역에서 UE UAV Wi-Fi 링크와 UAV-BS LTE 링크 간의 처리량 추세와 병목 현상을 파악한다. 이러한 관찰 결과를 바탕으로, 셀룰러 음영 지역의 지상 사용자에게 높은 처리량 통신 중계를 가능하게 하는 UAV 배치 방식인 UPS를 제안한다. 평가 결과, UPS는 다른 유사 방식보다 더 빠른 수렴 속도로 장시간 동안 고품질 라이브 비디오 스트리밍의 중단 간 처리량 요구 사항을 충족하는 것으로 나타났다.

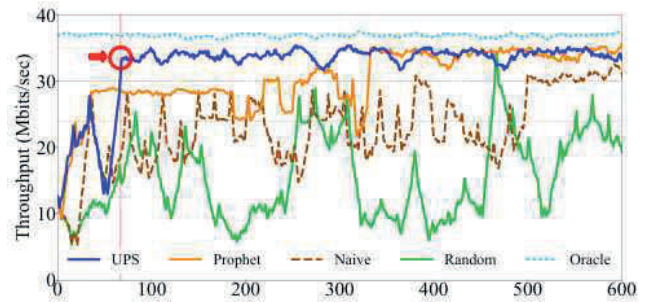


그림 4 Trace-driven 실험 결과

#### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2025-2021-0-02048)

#### 참 고 문 헌

- [1] 최동락, 유용재, 박세웅, "UAV를 활용한 음영지역 주변 상공 통신 성능 실측 및 분석에 관한 연구," 한국통신학회 동계종합학술발표회 2024, Jan.31-Feb.02, 2024.
- [2] H. Asano, H. Okada, C. B. Naila, and M. Katayama, "Flight Model Using Voronoi Tessellation for a Delay-Tolerant Wireless Relay Network Using Drones," IEEE Access, vol. 9, pp. 13064 - 13075, 2021.
- [3] iPerf3, Open Source, URL: <https://iperf.fr/>
- [4] Google Youtube, "Youtube Live Encoder Settings, Bitrates, and Resolutions," 2024. [Online]. Available: <https://support.google.com/youtube/answer/2853702>