

UAM 지원을 위한 지상 기지국과 위성의 협력 스케줄링 방법

문형주, 채찬병

연세대학교

moonhj@yonsei.ac.kr, cbchae@yonsei.ac.kr

Cooperative Ground-Satellite Scheduling for Dense UAM Networks

Hyung-Joo Moon and Chan-Byoung Chae

Yonsei University

요약

본 논문은 비지상 네트워크(NTN)의 모빌리티를 고려한 자원 할당과 스케줄링에 관한 새로운 알고리즘을 소개한다. 밀집된 UAM(도심항공교통)이 존재하는 네트워크에서 지상 기지국은 UAM의 빠른 속도와 높은 고도에 대응하여 효과적으로 다운링크를 서비스해야 한다. 특히, UAM이 밀집되어 있을 경우 여러 UAM을 서비스하는 과정에서 발생하는 간섭을 통제해야 하며, 이는 3차원 공간에서의 비직교 자원 할당 문제로 연결된다. 본 연구는 위성과 지상 기지국이 협력하여 UAM 네트워크를 서비스 할 경우에 대한 유저 할당 알고리즘을 제안하며, 시뮬레이션을 통해 알고리즘의 성능을 분석한다.

I. 서론

비지상 네트워크(NTN)는 커버리지 확대와 동시 연결 가능 수 증대를 위해 6G에 도입될 가장 중요한 기술 영역 중 하나이다. 특히, 위성, 고고도 비행체, 그리고 저고도 비행체를 기존 지상망에 통합시키는 작업은 연속적이고 효율적인 통신 네트워크 구축을 위해 필수적인 연구 분야이다 [1-3]. 다수의 연구에서 수직적 네트워크 구조를 활용하여 효과적으로 지상 사용자들을 서비스하는 모델을 다루는 반면, 본 연구는 유저가 공중에 위치할 경우 지상 기지국과 위성을 이용해 사용자들을 서비스하는 전략을 소개한다. 해당 시스템 모델은 satellite-air-ground integrated network(SAGIN) 모델로, 수직적으로 위치한 세 개의 서로 다른 레이어의 협력이 전체 네트워크 측면에서 상당한 이득을 가져옴을 보일 수 있다.

II. 본론

그림 1과 같이 K개의 지상 기지국과 1개의 위성이 총 M개의 비행체를 지원하는 시스템 모델을 가정하자. 통신 대역폭의 사용을 최소화하고 cross-link interference(CLI)의 발생을 방지하기 위해 모든 지상 기지국이 동일한 주파수를 사용하며, 위성은 별도의 주파수를 사용한다. 이에 따라, 그림과 같이 지상 기지국과 두 개의 UAM이 동일 선상에 존재할 경우, 동일 기지국 내 빔간 간섭 또는 타 기지국으로부터의 간섭이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해, 우리는 지상 기지국으로부터 서비스 받기에 불리한 위치에 있는 UAM을 선별적으로 위성 유저로 분리하고, 남은 지상 유저들 또한 적절한 링크 평가를 통해 기지국-UAM 간 링크 할당을 해야 한다. 먼저, k번째 지상 유저의 위치를 다음과 같이 정의하자.

$$\mathbf{u}_k^G = [x_k^G, y_k^G, z_k^G]^T \quad (1)$$

또한, 유저들은 모두 무시할 수 없는 속도로 이동 중이며, 이는 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{\mathbf{u}}_m = [\dot{x}_m, \dot{y}_m, \dot{z}_m]^T \quad (2)$$

각 지상 기지국의 송신 신호는 아래와 같다.

$$\mathbf{y}_k = \sum_{m=1}^{M_{GS}} \mathbf{v}_{k,m} \sqrt{p_m^{(k)}} s_m \quad (3)$$

이 때, s_m 은 m번째 UAM에게 전송할 데이터 심볼, $p_m^{(k)}$ 은 k번째 기지국이 m번째 유저에게 송신하기 위해 할당된 파워, $\mathbf{v}_{k,m}$ 은 k번째 기지국과 m번

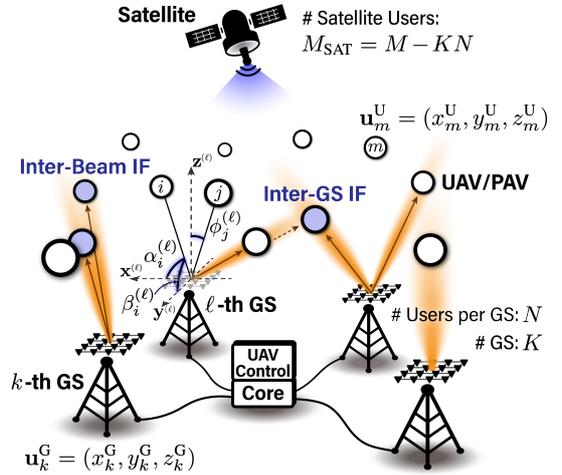


그림 1 비행체에 대한 지상 기지국과 위성의 협력 빔포밍 모델

제 UAM의 상대적 위치를 고려한 3D 빔포밍 벡터, M_{GS} 는 지상 기지국에 할당된 총 유저 수이다. 신호 모델 (3)을 통해, 우리는 k번째 UAM의 수신 신호를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_m = \sum_{k=1}^K \sqrt{g_m^{(k)}} \mathbf{h}_{k,m}^T \mathbf{y}_k + z_m \quad (4)$$

이 때, $g_m^{(k)}$ 은 k번째 기지국과 m번째 UAM의 위치를 고려한 전파 손실, $h_{k,m}$ 은 k번째 기지국에서 m번째 기지국으로의 LoS(line-of-sight) 채널 벡터, z_m 은 AWGN(additive white Gaussian noise)이다. 이후 우리는 SINR(signal-to-interference-plus-noise ratio)을 통해 링크를 평가하고, greedy algorithm과 그래프 치환을 통한 min-cost max-flow(MCMF) 문제를 해결하여 유저를 위성 또는 각 기지국에 효율적으로 할당한다. 총 7개의 지상 기지국과 50개의 UAM에 대해 실험하였으며, 이 중 8개의 UAM을 위성 링크로 서비스할 경우 그림 2와 같은 스케줄링 결과를 얻을 수 있다.

III. 결론

본 연구는 향후 UAM의 상용화와 6G NTN의 지상망 통합 이후 직면할 UAM 네트워크의 다운링크 서비스에 대한 정수 문제(integer problem)를

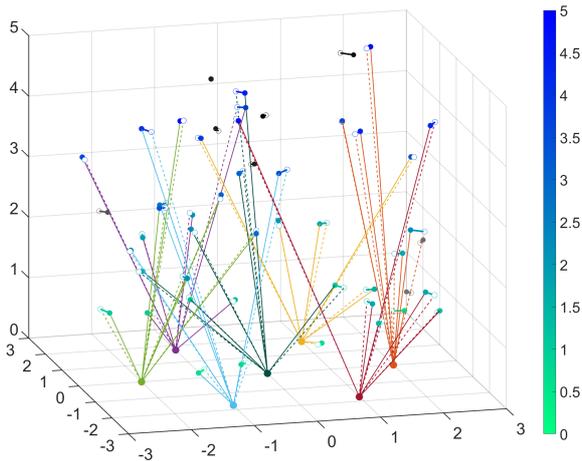


그림 2 제안된 알고리즘을 통한 밀집된 UAM 링크 할당 결과

정의하고 해결한다. 3D 네트워크의 신호 전송 모델을 통해 서비스 성능을 예측하고, 이를 바탕으로 효과적으로 기지국-유저 링크 혹은 위성-유저 링크를 할당 할 수 있음을 보였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 두뇌한국21사업(4단계 BK21 사업)에 의하여 지원되었음. (School of Integrated Technology / BK21 Graduate Program in IST) 또한, 이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.2022-0-00704)

참 고 문 헌

- [1] H.-J. Moon, C.-B. Chae, and M.-S. Alouini, "Performance analysis of passive retro-reflector based tracking in free-space optical communications with pointing errors," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 8, pp. 10982-10987, Aug. 2023.
- [2] H.-J. Moon, H.-B. Jeon, and C.-B. Chae, "RF lens antenna array-based one-shot coarse pointing for hybrid RF/FSO communications," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 240-244, Feb. 2022.
- [3] H.-J. Moon, C.-B. Chae, K.-K. Wong, and M.-S. Alouini, "Pointing-and-acquisition for optical wireless in 6G: From algorithms to performance evaluation," *IEEE Commun. Mag.*, Early Access.