

이종 통신 네트워크 기반 도심 항공 모빌리티 시스템의 통신 품질

박재영, 최완

서울대학교 전기정보공학부, 뉴미디어통신공동연구소

pjy362@snu.ac.kr, wanchoi@snu.ac.kr

Communication Link Quality of Urban Air Mobility in Heterogeneous Communication Networks

Jae Young Park, Wan Choi

Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

Institute of New Media Communications, Seoul National University

요약

본 논문은 도심 항공 모빌리티 서비스의 상용화를 위한 안정적인 통신 링크 확보의 가능성을 탐구한다. 지상망, 공중망, 저궤도 위성 통신망에 모두 접속가능한 UAM 시스템을 모델링하고, 적응적 통신 링크 선택 방법을 통해 임계치 이상의 통신 링크 품질을 확보할 수 있는 확률을 시뮬레이션을 통해 확인한다.

I. 서론

국내에서는 2026년 도심 항공 모빌리티(Urban Air Mobility: UAM)를 상용화를 위해 다양한 산업계가 협력하여 UAM 서비스를 개발하고 있다. UAM은 차세대 3차원 모빌리티 이동 수단으로, 탑승객의 안전과 운항 안정성을 유지하기 위해 출발 지점부터 도착 지점까지 안정적인 통신 링크를 확보해야 한다. 본 논문에서는 지상망, 공중망, 저궤도 위성 통신망을 통합하여 UAM을 서비스하는 시스템을 모델링하고, 이에 기반한 시뮬레이션을 통해 UAM의 통신 링크의 안정적 수신 성능 확보 가능성을 탐색한다.

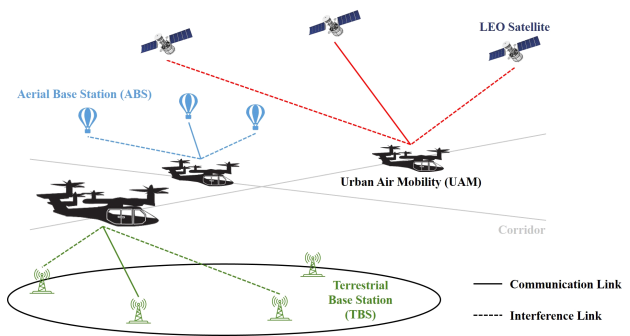


그림 1 UAM을 위한 이종 네트워크 시스템 모델

II. 본론

1) 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 지상망, 공중망, 저궤도 위성 통신망을 모두 활용하여 UAM을 서비스하는 적응적 통신 링크 할당을 고려한다[1], [2]. 일반적으로 UAM은 무작위로 이동하지 않으며, 일정한 비행경로를 따라 비행한다. 본 논문에서는 Cox Point Process를 활용하여 UAM의 비행경로를 확률적으로 모델링하고, 비행경로 내에서 UAM이 일정한 속도로 움직이는 경우를 고려한다.

지상망과 저궤도 위성 통신망은 현재 도심에서 서로 다른 주파수 대역을 통해 활용되고 있다. 따라서 본 논문은 서로 다른 이종 통신망 사이에서는 주파수 분할을 통해 상호 간섭이 없는 환경을 고려하고, 동일 통신망 내에서 송수신하는 신호들 사이에서는 서로에게 간섭이 존재하는 시스템을 고려한다.

본 논문은 두 이동 통신망의 신호 대 간섭·잡음 비(Signal to Interference and Noise Ratio: SINR) 크기를 비교하여, UAM이 SINR이 가장 큰 기지국으로부터 통신 서비스를 받는 방식을 활용한다. UAM이 비행경로를 따라 이동하면서 이종 통신망 중 가장 큰 수신 신호의 서비스를 제공하는 링크를 실시간으로 선택하여 매 순간 최적의 통신 서비스를 받는다. 이러한 통신 링크 할당 방법은 UAM이 안정적인 네트워크 환경에서 운행할 수 있도록 지원한다.

2) 이종 통신 네트워크 기반 UAM 통신 품질 시뮬레이션

UAM은 도심 속 지상 300~500m 상공에서 이동할 것으로 예상된다. 본 논문의 시뮬레이션에서 UAM 비행경로는 그림 2의 예시와 같이 20km 반경, 500m의 상공에 생성한다. 이때, UAM의 비행경로는 비행경로의 밀도(intensity)는 4π (개)와 비행경로 내 UAM의 개수 밀도는 $3 \times$ 비행경로의 길이(km)인 Cox Point Process에 따라 확률적으로 설정된다.

지상망은 그림 3과 같이 20km 반경 UAM 운항 지역의 지상에 배치한다. 기존 지상 서비스를 위해 도시에 반경 1km의 크기를 마이크로 셀을 설치한 것을 비교하여 [2], 상공 500m의 높이에 존재하는 UAM의 서비스 지역을 고려하면 지상 기준 반경 7~800m 이내로 더욱 촘촘하게 상공을 위한 지상망이 설치되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 기존의 4배에 해당하는 $4(\text{개}/\text{km}^2)$ 의 밀도의 Poisson Point Process(PPP)에 따라 확률적으로 배치하고 안테나의 방향이 공중으로 향하는 통신 구조를 고려하였다. 지상망은 7개의 직교 주파수를 임의로 나누어 활용하고, 상공을 향하는 구조를 고려하여 빔이 상공 수직 방향에서 20° 내에서만 빔 트래킹이 가능하도록 제한한다. 저궤도 위성 통신망은 그림 4와 같이 궤도의 밀도가 100(개), 궤도 당 저궤도 위성의 수 밀도가 20(개)인 Cox Point Process에 따라 배치하고[3], 위성들은 20개의 직교 주파수를 임의로 나누어 활용하고 빔 메인 로브의 폭을 20° 로 설정하여 간섭에 영향을 줄이는 빔포밍을 고려한다. 빔 메인 로브 영역은 G_{main} 의 이득을 얻고, 빔 사이드 로브 영역은 G_{sub} 의 이득을 얻는다. 본 시뮬레이션에

서 UAM의 수신전력은 자유공간 경로 손실 모델 $y = G \times P \times h^2 \times d^{-\eta}$ 을 바탕으로 얻는다. 시뮬레이션에서 활용한 변수들은 아래의 표와 같다.

본 논문의 시뮬레이션에서는 이중 통신망의 SINR을 비교하여 UAM과 연결할 통신망을 결정한다.

$$SINR_{BS} = \frac{G_{BS,i} \times P_{BS} \times h_{BS,i}^2 \times d_i^{-\eta_{BS}}}{\sum_{j=1, j \neq i}^{N_{BS, visible}} G_{BS,j} \times P_{BS} \times h_{BS,j}^2 \times d_j^{-\eta_{BS}} + \sigma^2}$$

$$G_{BS,i} \in \{G_{main}, G_{sub}\}, BS \in \{TBS, LEO\}$$

	지상망	저궤도 위성 통신망
h_{BS}	nakagami-m (10)	nakagami-m (10)
η_{BS}	4	2
G_{main} (dBi)	12	23.8
G_{sub} (dBi)	0	0

이때, UAM은 가장 큰 SINR을 제공하는 통신망과 UAM을 연결하는 적응적 단일 링크 할당 방법을 사용한다. 시뮬레이션을 통해 지상망, 저궤도 위성 통신망 중 단일 링크만을 활용할 수 있는 경우와 적응적 통신 링크 할당 방법을 사용하는 경우를 비교하여, 적응적 통신 링크 할당 방법이 제공하는 통신 링크의 품질이 일정 기준 넘기는 확률을 확인한다.

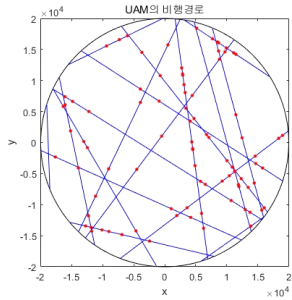


그림 2 UAM의 비행경로

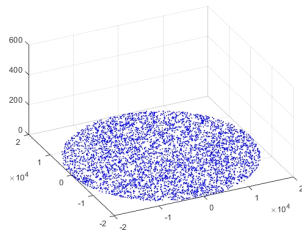


그림 3 지상망의 배치

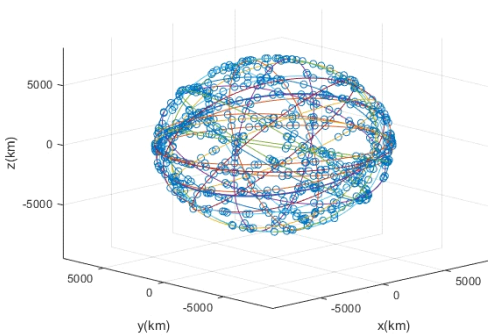


그림 4 저궤도 위성 통신망 배치

본 논문의 시뮬레이션에 따르면, UAM이 지상망과 저궤도 위성 통신망을 단일로 활용하는 경우, 5dB 임계값 이상의 통신 링크를 지상망은 84%, 저궤도 위성 통신망은 85%의 확률로 확보할 수 있다. 하지만 이중 통신망을 적응적 단일 링크 연결 방법으로 연결하는 경우, 5dB 임계값 이상의 통신 링크 품질을 97.5% 확률로 확보할 수 있어 안정적인 통신망 운용이 보장된다.

3) 공중망 추가 도입 시뮬레이션

새로운 보조 통신망으로 공중망이 추가로 도입될 경우, 그림 6과 같이 통신 성능을 더 확보할 수 있다. 예상되는 공중망의 경우, 20km 반경 700m 상공에 10개의 밀도의 PPP로 배치하였고, Rician 페이딩 채널 모델과 3개의 직교 주파수 사용을 고려하였다. 이 경우, 5dB 임계값 이상의 통신 링크 품질을 98.9% 확률로 확보할 수 있어 더욱 안정적인 통신망 운용이 보장된다.

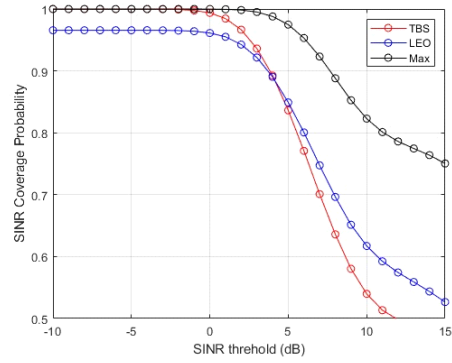


그림 5 UAM의 적응적 단일 링크 할당 시뮬레이션 결과

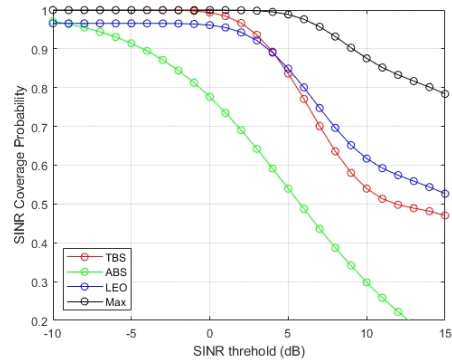


그림 6 공중망이 보조 통신망으로 추가될 경우, 예상되는 통신 링크 성능

III. 결론

UAM의 상용화와 안정적인 통신망 운용을 위해 지상망과 저궤도 위성 통신망을 함께 활용하는 네트워크 환경이 고려되고 있다. 본 논문은 지상망과 저궤도 위성 통신망을 통합해서 활용하는 UAM 시스템 모델링 방법을 제시하고, 이를 기반으로 SINR 기반 적응적 단일 링크 선택 방법의 안정적 통신 링크 성능 확보 가능성을 시뮬레이션으로 확인했다. 더 안정적인 통신 링크 확보를 위한 새로운 보조 통신망으로 공중망을 고려할 경우, 통신 링크 성능을 더욱 안정적으로 확보할 수 있음을 보였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학CT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2024-2021-0-02048)

참고 문헌

- [1] J. Xu, M. A. Kishk and M. -S. Alouini, "Space-Air-Ground-Sea Integrated Networks: Modeling and Coverage Analysis," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 22, no. 9, pp. 6298-6313, Sept. 2023
- [2] J. Park, W. Choi, "A Study on the Link Assignment in Heterogeneous Network for Urban Air Mobility", The Korean Institute of Communication and Information Sciences Summer Conference (2023)
- [3] C.-S. Choi, "Modeling and Analysis of Downlink Communications in a Heterogeneous LEO Satellite Network," in IEEE Transactions on Wireless Communications (Early Access)