

비지상 광 무선 네트워크에서 커버리지-서비스 활성화시간 트레이드 오프 분석

신경철, 이지용, 전현채
인천대학교

hyunchae.chun@inu.ac.kr

Coverage and service-activation-time trade-off in non-terrestrial optical wireless network

Gyeong-cheol Shin, Ji-Yung Lee, and Hyunchae Chun*
Incheon National University

요 약

본 연구는 6G 대응을 위한 광섬유 테더 드론 및 OWC 기반의 적응형 네트워크를 제안하고, 스타, 링, 버스 토폴로지의 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 버스 구조는 커버리지 확장이 유리하나 초기 구성이 느린 반면, 스타와 링은 신속한 배치가 가능하나 커버리지가 제한적이라는 상충관계가 확인되었다. 이에 따라 통신 환경에 맞춰 최적의 토폴로지를 유연하게 선택하는 적응형 공중 광 네트워크의 필요성을 제시한다.

I. 서 론

현재 5G 네트워크가 광범위한 무선 연결을 제공하고 있으나, 2030 년 이후 예상되는 모바일 데이터 트래픽의 폭발적인 증가는 기존 네트워크의 수용 한계를 초과할 것으로 전망된다. [1] 이러한 폭발적인 수요에 대응하기 위해 차세대 6G 통신 기술에 대한 연구가 가속화되고 있다. 특히 무인 항공기(UAV)를 활용한 비지상 네트워크(NTN)는 지상 네트워크(TN)의 물리적 한계를 극복할 핵심 기술로 주목받고 있다. 드론 기반 NTN 은 고정된 인프라와 달리 유연한 통신 자원 할당이 가능하며, 인프라가 부족한 환경에서도 신속한 배치가 가능하여 농촌 지역이나 재해 복구 상황 등에서 효율적인 네트워크 서비스를 제공할 수 있다. 그러나 기존 UAV 시스템의 근본적인 난제는 배터리 용량의 한계로 인한 짧은 운용 시간이다. 이를 해결하기 위한 유망한 대안으로 광섬유 테더(Fiber-tethered) 드론이 대두되고 있다. 테더 시스템은 지상으로부터 지속적인 전력을 공급받아 채공 시간의 제약을 극복할 뿐만 아니라, 내장된 광섬유를 통해 대용량 통신 링크를 지원하는 이중 기능을 수행한다.[2] 한편, 기존의 무선 주파수(RF) 통신 시스템은 제한된 면허 대역으로 인해 대규모 연결 장치를 수용하는 데 한계를 보이고 있다. 이에 반해 광 무선 통신(OWC)은 스펙트럼 면허가 불필요하며, RF 시스템 대비 높은 전송 효율과 비용 효율적인 송수신기 구조를 가진다.[3] 따라서 본 연구에서는 테더드 UAV 의 안정적인 운용 능력과 OWC 의 초광대역 특성을 결합한 광섬유 테더 UAV

기반의 적응형 공중 광 네트워크 프레임워크를 위한 토폴로지 성능을 비교 분석한다. 이 시스템은 공중에서 유연한 광 링크를 형성함으로써, 6G 시대가 요구하는 초고속 대용량 데이터 전송을 위한 백 홀 및 프론트 홀 링크를 효과적으로 구성할 수 있다.

II. 본론

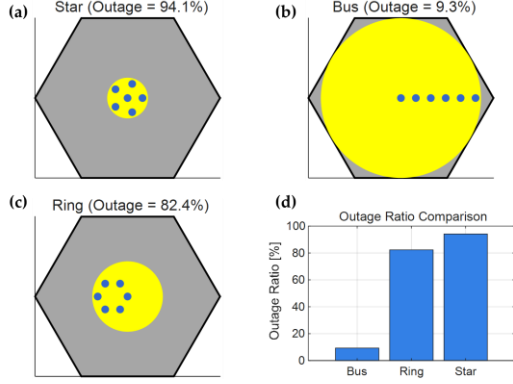
드론 간 통신의 구조는 지상 네트워크 시스템의 물리적 제약을 극복하고 UAV 네트워크의 서비스 반경을 확장하는 데 중추적인 역할을 수행한다. 드론을 이용한 네트워크 구조를 스타(Star), 링(Ring), 버스(Bus)의 세 가지 대표적인 토폴로지로 모델링했으며, 각 토폴로지의 중심 노드가 되는 드론은 광 선로 종단 장치(OLT)에 광섬유로 테더링되어 허브(Hub)역할을 수행한다. 각 구조의 효율성을 정량적으로 평가하기 위해, 특정 토폴로지 제약 조건 하에서 서비스가 제공되지 않는 영역의 비율을 의미하는 아웃티지 비율(Outage ratio, P_{outage})기반의 분석 프레임워크를 도입한다. 아웃티지 비율은 다음과 같이 정의된다.

$$P_{\text{outage}} = 1 - \frac{A_{\text{cov}}}{A_{\text{macro}}},$$

여기서 A_{cov} 는 해당 토폴로지의 유효 커버리지 영역을 나타내며, A_{macro} 는 목표로 하는 육각형 매크로 셀의 전체 면적을 의미한다. 각 토폴로지 간의 일관된 성능 비교를 위해 매크로 셀의 면적은 버스 구조에서 도출된 최대 이론적 네트워크 범위를 사용하여 다음과 같이 표준화된다.

$$A_{\text{hex}} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \left(\frac{1}{\sin(60^\circ)} \times ((N-1)L_{\text{max}}) + R_{\text{coverage}} \right)^2.$$

여기서 N 은 토폴로지를 구성하는 드론의 총 개수, L_{max} 는 드론 간 연결 가능한 최대 링크 거리, R_{coverage} 는 단일 드론이 커버할 수 있는 서비스 영역의 반지름을 의미한다.



. [그림 1] 토폴로지 별 Outage ratio 비교

[그림 1]-(a) 스타 토폴로지는 단일 허브 제약으로 인해 드론의 위치가 허브 근처로 제한되므로 가장 제한적인 커버리지를 보여준다. 이에 따른 아웃티지 비율은 다음과 같다.

$$P_{\text{star}} = 1 - \frac{\pi(L_{\text{max}} + R_{\text{coverage}})^2}{A_{\text{hex}}}.$$

반대로, [그림 1]-(b) 버스 토폴로지는 선형적 구조를 통해 공간적 도달 범위를 극대화함으로써 커버리지를 N 홉까지 확장하고, 결과적으로 최소한의 아웃티지 비율을 보인다.

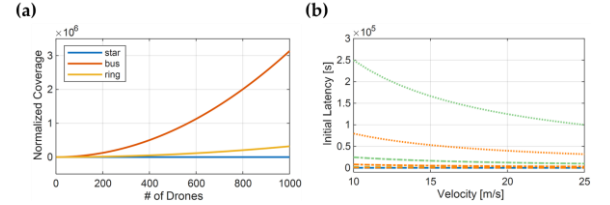
$$P_{\text{bus}} = 1 - \frac{\pi((N-1)L_{\text{max}} + R_{\text{coverage}})^2}{A_{\text{hex}}}.$$

마지막으로, [그림 1]-(c) 링 토폴로지는 드론들이 정다각형을 형성해야 하는 기하학적 제약을 도입한다. 유효 커버리지 영역은 드론들로 형성된 외접원의 지름에 의해 결정되며, 결과는 다음과 같다.

$$P_{\text{ring}} = 1 - \frac{\pi \left(2 \times \left(\frac{L_{\text{max}}/2}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{N}\right)} \right) + R_{\text{coverage}} \right)^2}{A_{\text{hex}}}.$$

[그림 1]-(d)를 통해 비교해보면 버스 토폴로지가 넓은 지역을 효율적으로 커버 가능한 반면, 링 및 스타 토폴로지는 구조적 제약에 의해 더 높은 아웃티지

패널티를 발생시킨다는 것을 보여준다. [그림 2]-(a)에서 드론 수가 증가함에 따라 버스 토폴로지는 커버리지 영역이 급격하게 증가하는 반면, 스타 토폴로지는 커버리지 이득이 없음을 볼 수 있다. 반면 [그림 2]-(b)을 통해 초기 네트워크 형성 시간 측면에서 스타 토폴로지가 유리하며 버스 토폴로지는 많은 시간이 요구된다.



[그림 2] (a): 드론 수에 따른 정규화 된 커버리지 비율

(b): 드론 속도에 따른 토폴로지 형성에 걸리는 시간

III. 결론

본 연구는 OWC 기반 테더 드론 네트워크의 3 가지 토폴로지 성능을 아웃티지 비율과 초기 형성 시간 관점에서 분석했다. 시뮬레이션 결과, 버스 구조는 커버리지 확장에 유리하나 초기 구성이 느리고 스타와 링은 신속한 배치가 가능하나 커버리지가 제한적이라는 상충관계가 확인되었다. 따라서 향후 연구에서는 환경 변수를 고려하여 최적의 토폴로지를 유연하게 변경하는 적응형 알고리즘을 설계하고자 한다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by MSIT (No.RS-2023-00253346). Also, this research was supported by the MSIT, Korea, under the ITRC support program (IITP-2025-RS-2023-00259061) supervised by the IITP.

참 고 문 헌

- [1] M. S. Akbar et al., "On challenges of sixth-generation (6G) wireless networks: A comprehensive survey," J. Netw. Comput. Appl., 2025.
- [2] N. Shindo et al., "Optically powered and controlled drones using optical fibers for airborne base stations," Photonics, 2022.
- [3] L. E. M. Matheus et al., "Visible light communication: Concepts, applications and challenges," IEEE Commun. Surv. Tutor., 2019.