

저궤도 위성 네트워크의 트래픽 분산을 위한 성층권 드론 기반 다중 경로 라우팅 기법 설계

양주원, 추헌우*, 김재현

아주대학교 전자공학과, *아주대학교 AI융합네트워크학과

{caos0730, back1ho, jkim}@ajou.ac.kr

Delay Analysis of LEO Satellite Networks with HAPS-Based Multipath Transmission in Congested Traffic Environments

Juwon Yang, Heonwoo Chu*, Jae-Hyun Kim

Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

*Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University

요 약

본 논문은 저궤도 위성 통신의 트래픽 과부하 문제를 해결하기 위해 성층권 드론(High Altitude Platform Station, HAPS)을 활용한 다중 경로 라우팅 기법을 제안한다. 대도시에서 집중된 서비스 수요는 트래픽 밀도를 증가시켜, 위성 링크에 큐잉 지연을 유발한다. 본 논문에서는 저궤도 위성 네트워크 환경에서 트래픽 수요가 높은 지역은 성층권 드론으로 지연에 민감한 트래픽의 QoS를 보장하고, 다중 경로를 제공하여 위성 네트워크의 부하를 분산시키는 방안을 제안한다. 분석 결과 성층권 드론을 활용한 경로가 위성만을 활용한 경로보다 중단 간 지연 시간이 약 15.93% 감소한다.

I. 서론

저궤도 위성 통신은 지상 인프라가 부족한 지역에 인터넷을 제공하고 낮은 지연 시간으로 통신 서비스를 제공할 수 있어 차세대 통신 기술로 활발히 연구되고 있다. 고해상도 실시간 스트리밍, 자율주행 그리고 IoT 서비스의 확산으로 대도시 중심 네트워크 트래픽 밀도가 급격히 증가하고 있다. 이는 특정 지역에 대한 트래픽을 증가시켜, 과부하로 인한 지연 시간 증가를 초래한다 [1]. 그러나 대부분의 저궤도 위성은 균일 배치 기반으로 운영되며, 특정 지역에 집중되는 트래픽 수요에 대응할 수 있는 방안이 제한적이다. 이에 따라 트래픽 밀집 지역의 과부하를 완화하기 위한 보완적 계층 및 라우팅 전략이 필요하다.

성층권 드론은 약 20km 상공의 성층권에 위치하며, 정지된 위치에서 저궤도 위성과의 통신을 중계할 수 있다 [2]. 본 논문은 성층권 드론을 중계 노드로 포함하는 다계층 네트워크 구조를 설계하고, 이를 통해 지연을 최소화하여 QoS 요구사항을 충족시키는 방안을 제안한다. 지연에 대한 우선순위가 낮은 트래픽은 트래픽이 집중된 위성을 통해 목적지로 전송되고, 우선순위가 높은 트래픽은 트래픽이 집중된 위성 링크를 우회하여 성층권 드론을 통해 전송되어 QoS가 보장된다. 본 논문에서는 성층권 드론 기반 다계층 라우팅 구조를 제안하고, 시뮬레이션을 통해 라우팅 경로에 따른 중단 간 지연 시간 및 트래픽 전달에 사용하는 위성 홉 수를 비교 및 분석한다.

II. 본론

시스템 모델 및 시뮬레이션

본 논문에서는 Walker-Star model을 기반으로 한 OneWeb의 저궤도 위성 구조를 고려한다. 총 12개의 궤도를 사용하며, 각 궤도에는 49개의 위성이 균등하게 배치된다. 각 위성은 동일 궤도의 인접 위성 2개 및 인접 궤도의 인접 위성 2개와 통신할 수 있다. 서울에서 위성 및 성층권 드론

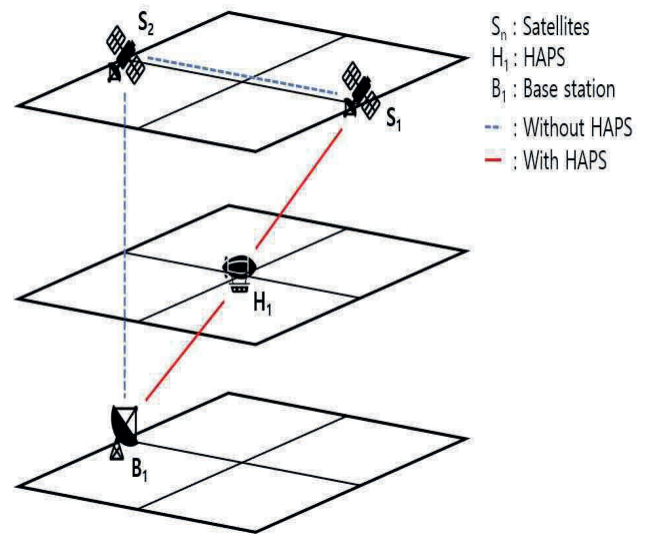


그림 1 제안하는 네트워크 구조 및 다중 경로 라우팅

네트워크를 통해 뉴욕으로 통신하는 상황을 가정한다. 성층권 드론은 지상국 및 위성과의 직접 통신이 가능하며, 뉴욕 상공에서 중계 노드로써 사용된다. 위성 및 지상국과 성층권 드론의 위치를 결정하는 기준 파라미터는 표 1과 같다. 지연 시간은 트래픽 부하에 의한 지연과 경로에 의한 지연만을 고려하기 위해 큐잉 지연과 전파 지연만을 고려한다. 각 저궤도 위성 및 성층권 드론에서의 큐잉 지연은 평균 1 ms로, 트래픽 과부하가 발생한 위성의 경우 평균 6.7 ms의 큐잉 지연을 갖는 가우시안 분포를 따른다고 가정한다 [3], [4].

표 1 위성 및 지상국과 성층권 드론의 위치 파라미터

Parameter	Value
궤도 수	12
궤도 당 위성 수	49
위성 고도	1200 km
이심률	0°
기울기	86.4°
성층권 드론 고도	20km
서울 지상국 위도, 경도	37.53°, 127.02°
뉴욕 지상국 위도, 경도	40.74°, -73.95°

제안하는 구조 및 라우팅 기법

본 논문에서는 그림 1과 같이 저궤도 위성과 성층권 드론을 포함한 네트워크 구조 및 다중 경로 라우팅 기법을 제안한다. 제안하는 네트워크 구조 및 기법은 트래픽이 집중되는 지상국(B1)과 연결된 위성(S2)의 부하를 줄이고, 지연에 민감한 트래픽의 QoS 요구를 충족시키기 위해 성층권 드론(H1)을 B1 상공에 배치하여 우회 경로를 추가한다. H1은 S2보다 고도가 낮아서 B1과 가까이 위치하여, 기존 S2를 통한 라우팅 경로보다 전파 지연이 감소한다. 또한, 제안된 구조에서는 트래픽의 QoS 요구사항에 따라 라우팅 경로를 선택하며, 지연에 민감한 트래픽은 H1을 통해 전송하여 지연을 최소화하고, 지연 허용이 높은 트래픽은 S2를 통해 B1에 전송된다. 라우팅 경로에서 S2 및 H1과 연결된 위성(S1)은 S2와 H1의 트래픽 부하를 비교하고, 트래픽의 QoS 요구사항에 따라 S2를 통한 라우팅 경로와 H1을 통한 라우팅 경로 중 트래픽의 라우팅 경로를 선택한다. 이를 통해 트래픽이 집중되는 S2의 트래픽 부하를 줄이고, 트래픽의 지연 QoS를 만족시킨다.

제안하는 네트워크 구조 및 라우팅 기법은 S2와 H1의 트래픽 부하 및 트래픽의 QoS 요구사항에 따라 동작한다. 저궤도 위성 및 성층권 드론은 링크를 통해 서로 연결되며, 연결된 위성 및 성층권 드론은 hello packet을 통해 트래픽 부하 상태를 공유한다 [5]. 따라서, 제안하는 라우팅 기법은 추가적인 송수신 과정 및 연산 과정 없이 라우팅 테이블 갱신만으로 구현할 수 있으며, 실제 저궤도 위성 네트워크 운용 시스템에 효과적으로 적용될 수 있다.

시뮬레이션 결과 및 분석

제안하는 네트워크 구조 및 다중 경로 라우팅 기법의 성능을 검증하기 위해, 서울에서 뉴욕까지의 통신 서비스 상황을 분석한다. 제안하는 기법을 활용하여 다중 경로로 전송을 수행하고, 두 경로의 중단 간 지연 시간 및 트래픽 전달에 사용되는 위성 홉 수를 분석하여 경로에 따른 성능 차이를 확인한다.

트래픽 부하가 높은 위성을 통한 라우팅 경로에서는 중단 간 지연이 약 95.13 ms로 나타났다. 반면, 부하가 낮은 성층권 드론을 통한 라우팅 경로에서는 중단 간 지연이 약 79.98 ms로 나타나며 약 15.93% 단축되었다. 또한, 트래픽 부하가 높은 위성을 통한 라우팅 경로에서 트래픽 전달에 사용하는 위성 홉 수가 평균 약 15.93회로 나타났지만, 성층권 드론을 통한 라우팅 경로에서는 트래픽 전달에 사용하는 위성 홉 수가 평균 약 15.22회로 나타나며 약 0.7회 감소하였다.

이는 지연에 민감한 트래픽을 성층권 드론을 통해 전달함으로써 큐잉 지연이 감소하고, 경로상 거리를 줄여 전파 지연도 감소했기 때문이다. 또한, 성층권 드론을 활용하는 경우 트래픽 전송 과정에서 위성 홉 수를 줄일

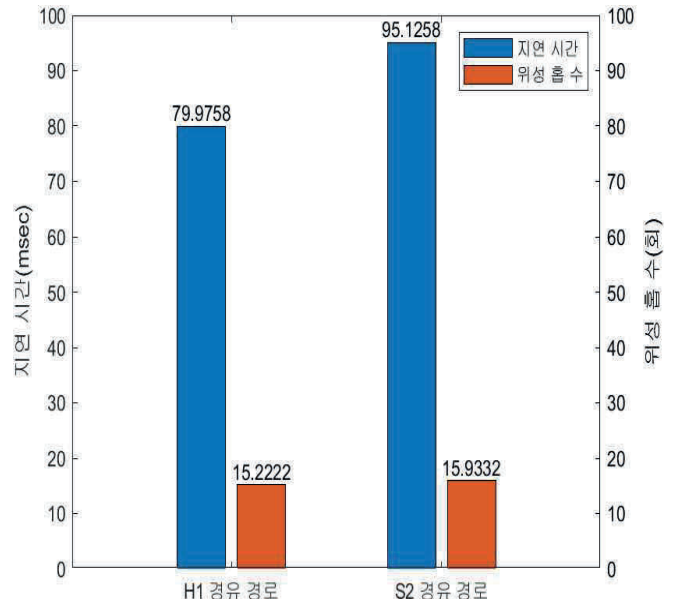


그림 2 각 경로에 따른 지연 시간과 위성 홉 수

수 있어, 제한된 위성 네트워크 자원을 효율적으로 관리할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 성층권 드론을 통해 위성 네트워크의 트래픽 부하를 분산시키기 위한 네트워크 구조를 제안하고, 다중 경로를 활용하여 지연에 관한 트래픽의 QoS를 보장하기 위한 라우팅 기법을 제안한다. 제안된 구조 기법은 성층권 드론을 통해 추가 경로를 제공하여, 지상국까지의 라우팅 경로를 분할 한다. 제안하는 라우팅 기법은 트래픽의 지연에 관한 QoS에 따라 경로를 선택한다. 추가된 성층권 드론을 통한 라우팅 경로는 위성만을 활용한 경로보다 중단 간 지연 시간이 15.93% 감소하였으며, 트래픽 전달을 위한 위성 홉 수가 약 0.7회 감소하였다.

추후 연구에서는 본 논문에서 제안한 구조에 기계학습 기반의 트래픽 예측 알고리즘을 결합하여 실시간으로 변화하는 트래픽 양상과 네트워크 상태에 따라 라우팅 경로를 동적으로 재구성하는 지능형 위성 네트워크를 연구할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] IoT Analytics, "State of IoT 2024: Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion globally," *IoT Analytics GmbH*, Hamburg, Germany, Sep. 4, 2024.
- [2] G. K. Kurt et al., "A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 729–779, Mar. 2021.
- [3] G. Stock, J. A. Fraire, S. Henn, H. Hermanns, and A. Schmidt, "A Stability-first Approach to Running TCP over Starlink," in *Proc. IEEE International Conference on Communications Workshops*, Jun. 2024.
- [4] G. Huston, "A transport protocol's view of Starlink," *Asia Pacific Network Information Centre*, May 17, 2024.
- [5] Z. Liu, Z. Liu, L. Wang and W. Li "Traffic-Predictive Routing Strategy for Satellite Networks," *Electronics*, vol. 13, no. 1, pp. 6, 2023.