

LEO 위성 네트워크의 라우팅에 관한 연구 조사

김주영, 이동현, 원동욱, 홍성훈, 최성진, 조성래
중앙대학교 컴퓨터공학과

{jykim, dhlee, dwwon, shhong, sjchoi}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

Recent Advances in Routing and Topology in LEO Satellite Networks

Juyoung Kim, Donghyun Lee, Dongwook Won,
Seonghun Hong, Seongjin Choi, and Sungrae Cho

Department of Computer Science and Engineering
Chung-Ang University

요약

최근 저궤도 위성 LEO (Low Earth Orbit)의 메가 컨스텔레이션과 위성 간 링크 ISL (Inter-Satellite Link)의 상용화를 통해, 위성 통신은 지구 전역을 커버하는 핵심 네트워크 인프라로 주목받고 있다. 이러한 대규모 위성망의 등장으로, 효율적이고 안정적인 네트워크 운영을 위한 라우팅 및 토폴로지 제어 기술의 중요성이 커지고 있다. 따라서 본 연구는 LEO 위성 네트워크의 라우팅과 토폴로지 제어 관련 최신 연구를 조사한다.

I. 서론

수백~수만 기의 저궤도 인공위성으로 지구 전역을 커버하는 대규모 위성군을 뜻하는 메가 컨스텔레이션과 레이저 기반 위성 간의 연결 링크 ISL (Inter-Satellite Link)의 상용화로 LEO (Low Earth Orbit) 위성 네트워크는 지구 전역을 커버하는 인프라로 부상하였다. 이러한 위성망은 해양, 사막, 산악, 극지 등 지상 통신 사각지대를 보완한다. 또한 LEO 위성 네트워크는 GEO (Geostationary Earth Orbit) 기반 위성통신에 비해 지연이 크게 낮고 특정 환경에서 유선보다 더 짧은 지연을 제공하는 사례도 확인된다 [1].

위성 간의 네트워크는 전통적인 고정형 라우팅과 달리 이동성이 강하고 시간에 따라 변하는 토폴로지를 가지며 ISL의 가시성, 전력 등의 제약에 의해 연결과 해제가 반복되고, 지상 게이트웨이 분포 변화에 따라 경로 비용이 달라진다. 따라서 단순한 정적 최단 경로나 링크 상태 라우팅만으로는 지연, 혼잡, 복원력 목표를 동시에 달성하기 어렵다.

이러한 위성 네트워크의 제약을 고려하여 궤도, 링크 스케줄을 활용한 예측 및 스케줄 기반의 라우팅, 실시간 동적 토폴로지 제어가 필수적이다. 또한 사용자 분포와 시간대별 트래픽, QoS (Quality of Service) 등의 제약도 동시에 고려되어야 한다.

따라서 이러한 제약을 만족하는 라우팅과 토폴로지 제어 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 LEO 위성 네트워크의 라우팅 및 토폴로지에 관한 최신 연구를 조사한다.

II. 본론

LEO 위성 네트워크의 라우팅에는 크게 시간 예측형, 반응형, 하이브리드 기법으로 구성되어 있다 [2].

먼저 시간 예측형 라우팅은 LEO 위성 네트워크가 링크 가시성과 위성 위치가 시간에 따라 변화하여 궤도, 가시성 스케줄을 이용해 지연, 혼잡, 가용성을 가중치로 하여 경로를 사전 계산한다 [3]. 대표적으로 CGR (Contact Graph Routing)은 계획, 경로 탐색, 포워딩의 3 단계로 구성된다 [4]. 이 기법은 궤도 및 가시성 확보를 기반으로 미래의 네트워크 상태를 예측해 그래프를 구성하고, 그 위에서 최적 경로를 사전 산출한다. 이는 전역 최적화된 경로를 확보할 수 있으나, 스케줄 오차나 링크 실패 이벤트가 즉시 반영되지 않는다는 한계가 있다.

다음으로 반응형 라우팅은 실시간 큐, 지연, 손실 측정과 단절, 혼잡 등에 즉각 반응하는 분산 라우팅으로 변동성이 높은 LEO에 유리하다. 로컬 가중치 조정, 빠른 우회 등을 통해 복원력을 확보하지만, 전역 일관성 저하와 제어 트래픽 증가는 정책 제약과 적응 범위 제한으로 보완한다. 최근 시뮬레이션 연구에서 고장 인지 범위에 따른 리라우팅 성능의 트레이드오프를 정량적으로 비교하였다 [5].

하이브리드 라우팅은 예측 라우팅과 반응형 라우팅을 결합한 기법이다. 일반적으로 예측을 통한 기본 경로를 배포하고 이벤트 발생 시 로컬 정책으로 가중치를 조정하여 우회를 허용하는 형태이다 [2]. 최근 DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient) 기반 강화학습이 네트워크 제어에 적용되며, 자율적 트래픽 분산 및 에너지 효율 향상 가능성을 보여주었다 [6].

LEO 메가 컨스텔레이션에서 토폴로지 제어란 가능한 ISL 후보들 중에서 어떤 링크를 어떤 조합으로 유지하거나 관리할지 결정하는 과정이다. 일반적으로 토폴로지 제어는 크게 고정형, 부분 가변형 등으로 나뉜다 [7].

고정형 토폴로지의 경우 상시 유지할 ISL 집합을 미리 정해두고 일정 기간동안 유지하는 방식이다. ISL은 링크 성립과 정렬 자체에 많은 지연이 발생하기 때문에 라우팅 계산과 운용 안정성을 위해 사전에 정적 네트워크를 구성하는 경우가 많다. 이러한 백본 구조는 단순하고 예

측이 용이하다는 장점이 있다. 다만 트래픽 집중이나 링크 장애 시에는 우회 경로가 제한되어 유연성이 낮다는 단점이 존재한다.

이와 달리 부분 가변형 토플로지의 경우 핵심 백본 링크는 고정하고 일부 링크만 상황에 따라 교체해 혼잡, 지연 핫스팟이나 장애에 선택적으로 적응하는 절충형 방안이다. [8]에서 제안한 “3 + 1” 전략은 위성당 3 개 고정 링크를 유지해 구조적 안정성을 확보하고 1 개의 동적 링크를 수요에 맞춰 선택 및 전환한다. 이와 유사하게 다중 에이전트 강화학습 MARL (Multi-Agent Reinforcement Learning)을 이용한 자율 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)네트워크 제어 연구에서는 협력형 의사결정으로 연결 신뢰성과 에너지 효율을 개선할 수 있었다 [9]. 이러한 접근은 LEO 위성 간의 ISL 선택 및 전환에도 응용 할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 LEO 위성 네트워크에서 하이브리드형 라우팅과 부분 가변형 토플로지 제어를 결합하는 설계가 시간 변화형 링크, 가시성 조건 하에서도 지연, 혼잡, 복원력을 균형 있게 달성하는 가장 실용적인 접근이라는 것을 알 수 있었다.

이는 궤도, 가시성 정보를 통해 전역 경로의 사전 계획으로 기본 성능을 안정화하고 혼잡, 단절과 같은 이벤트에 대한 신속한 보정으로 예측 오차를 줄인다. 토플로지의 경우 고정 백본이 운용 단순성과 예측 가능성으로 보장하고, 제한적 동적 전환을 통해 지연과 병목을 효과적으로 낮추면서도 오버헤드를 관리하는 효과적인 접근이다.

향후 과제로는 대규모 메가 컨스텔레이션에서 제한된 연산 자원으로 부담 없이 실시간으로 작동 가능한 경량형 하이브리드 알고리즘의 정립이 있다. 또한 궤도 정보, 트래픽, 실시간 링크 상태를 반영해 스스로 라우팅 정책과 ISL 스케줄을 재구성할 수 있는 지능형 자율 제어 체계의 확립이 향후 핵심 연구 방향이 될 것으로 보인다.

특히 최근 제안된 양자 기반 다중 에이전트 강화학습 Q-MARL (Quantum Multi-Agent Reinforcement Learning) 접근은 LEO-CubeSat 통합 네트워크에서 글로벌 접근 제어 및 자율 협력 구조를 실현하는 가능성을 제시한다 [10]. 이는 향후 LEO 라우팅과 토플로지 제어에 새로운 패러다임을 제공할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획 평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2025-RS-2022-00156353, 50%)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2023-00209125)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] N. Mohan, A. Fergusson, H. Cech, R. Bose, P. R. Renatin, M. K. Marina and J. Ott, "A Multifaceted Look at Starlink Performance," in *Proceedings of the ACM Web Conference (WWW)*, Singapore, May 2024, pp. 1- 12.
- [2] C. Westphal, L. Han and R. Li, "LEO Satellite Networking Relaunched: Survey and Current Research Challenges," *arXiv preprint*, arXiv:2310.07646, 2023.
- [3] D. Ron, F. A. Yusufzai, S. Kwakye, S. Roy, N. Sastry and V. K. Shah, "Time-Dependent Network Topology Optimization for LEO Satellite Constellations," in *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, pp. 1- 10, 2025.
- [4] J. A. Fraire, O. De Jonckère and S. C. Burleigh, "Routing in the Space Internet: A Contact Graph Routing Tutorial," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 174, 2021, Art. no. 102884.
- [5] L. Yanev, P. Ronchetti, J. Smailes and M. Strohmeier, "Secure and Scalable Rerouting in LEO Satellite Networks," *arXiv preprint*, arXiv:2509.10173, 2025.
- [6] M. C. Ho, A.-T. Tran, D. Lee, J. Paek, W. Noh and S. Cho, "A DDPG-Based Energy Efficient Federated Learning Algorithm with SWIPT and MC-NOMA," *ICT Express*, vol. 10, no. 3, pp. 600- 607, Jun. 2024.
- [7] A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroglu, "Laser Intersatellite Links in a Starlink Constellation: A Classification and Analysis," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 16, no. 2, pp. 48- 56, June 2021.
- [8] Y. Li, J. Wu, G. Kang, L. Chen, Y. Qiu and W. Zhou, "A Flexible Topology Control Strategy for Mega-Constellations via Inter-Satellite Links Based on Dynamic Link Optimization," *Aerospace*, vol. 11, no. 7, p. 510, July 2024.
- [9] W. J. Yun, S. Park, J. Kim, M. Shin, S. Jung, D. A. Mohaisen and J.-H. Kim, "Cooperative Multiagent Deep Reinforcement Learning for Reliable Surveillance via Autonomous Multi-UAV Control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 10, pp. 7086- 7096, Oct. 2022.
- [10] S. Park, G. S. Kim, Z. Han and J. Kim, "Quantum Multi-Agent Reinforcement Learning is All You Need: Coordinated Global Access in Integrated TN/NTN Cube-Satellite Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 62, no. 10, pp. 86- 92, Oct. 2024.