

저궤도 위성에서의 최적 라우팅 기술 동향

이현수¹, 김규선^{2*}, 김종현^{1*}
고려대학교, *인하대학교¹hyunsoo@korea.ac.kr, ^{2*}kingdom0545@inha.edu, ^{1*}joongheon@korea.ac.kr

Trends in Optimal Routing Technologies for Low Earth Orbit Satellite

Hyunsoo Lee¹, Gyu Seon Kim^{2*}, Joongheon Kim^{1*}¹Korea Univ., ²Inha Univ.

요 약

저궤도 인공위성을 통한 네트워크 시스템은 향후 6G 시스템에서 널리 활용될 가능성이 높은 기술이다. 이에 본 논문에서는 저궤도 위성에서의 라우팅 문제를 풀기 위한 다양한 방법론에 대해 소개한다. 위성의 라우팅 시나리오에서 load balancing, low latency, 최소한의 hop 수 등을 고려하여 접근하였다. 특히 최근 다양한 산업 분야에서 활용되고 있는 강화학습을 이용하여 저궤도 위성 라우팅 문제를 푼 사례를 포함한 최신 기술 동향을 분석하고, 향후 연구 방향에 대해 논의한다.

I. 서 론

저궤도 위성 (Low Earth orbit satellite)은 지구 표면 160 - 2000km 고도에서 궤도를 도는 위성이다. 저궤도 위성은 일반적으로 통신, 내비게이션, 원격 감지 (Remote sensing), 지구 관측과 같은 광범위한 응용 분야에 활용된다. 저궤도 위성은 정지궤도 위성에 비해 지구에 훨씬 더 가깝기 때문에 통신 지연 시간이 더 짧고, 지상국과의 통신에 더 낮은 전력을 소모한다. 또한 높은 대역폭 통신을 제공하여 비디오 스트리밍이나 가상 현실과 같은 애플리케이션에 통신 활용이 가능하고, 다수를 동시에 배치할 경우 넓은 커버리지를 제공할 수 있다. SpaceX社에서 개발한 로켓 재사용 기술을 통해, 저궤도 위성의 발사 비용을 30% 이상 줄일 수 있었다. SpaceX社는 이를 통해 저궤도 위성 3600 여 개를 발사하였고, 이를 기반으로 위성 인터넷망 Starlink를 선보였다 [1]. 또한 OneWeb, Kuiper, Globalstar 등 다양한 사업자들이 위성인터넷 망을 구축하여 서비스를 제공하고 있거나 개발 중에 있다.

특히 향후 6G의 핵심 기술이 될 저궤도 위성 기술에서, 초장거리 통신에 있어서 다중 홉 라우팅을 수행하기 위해 여러 개의 위성을 중계기로 사용한다. 따라서 대기 시간을 최소화하는 라우팅 문제를 해결하는 것은 현 시점에서 중요한 연구 분야이다. 기존의 평면 라우팅과 달리, 위성은 구에 분포하며, 위성간의 연결은 지구로 인해 제한된다. 또한 위성의 수와 위치가 계속 변하기 때문에 기존의 정적인 토폴로지보다 시변 토폴로지에서 라우팅을 구현하는 것은 훨씬 어려운 문제이다. LEO 위성의 경우 크기가 매우 작기 때문에 컴퓨팅 및 저장 용량이 모두 제한되기 때문에 빈번한 위치 변경은 높은 연산 비용으로 이어지게 된다. 이렇듯 복잡한 문제 제안 상황에서도 최대한 짧은 지연 시간을 보장하기 위해 위성간의 거리, 네트워크의 혼잡도, 전력 소비량, 경로의 가용성 등 다양한 지표들을 고려하여 위성의 라우팅 문제를 정의하였다. 위성의 배치 (Constellation)을 시변 그래프 형태로 모델링하여 각 노드마다 queue backlog를 고려하여 어떤 노드로 라우팅할지 결정할 수 있다. 특히 최근 다양한 산업 및 연구에 적용되고 있는 심층강화학습 방법을 통해 위성 라우팅 문제를 해결하기도 했다. 본 논문에서는 기존의 최적화 방법을 통해 라우팅 문제를 다룬 경우와,

강화학습 방식으로 라우팅 문제를 다룬 경우로 분류하여 기술 동향을 분석하였다.

II. 기존 최적화 방식 기반 LEO 위성 라우팅

Stochastic geometry는 임의의 기하학적 구성을 모델링하고 분석하는 데 사용되는 수학적 프레임워크로, 위성 네트워크에서 위성 및 지상국의 임의의 위치를 모델링할 수 있기 때문에 LEO 위성 라우팅 문제의 솔루션에 적용되었다 [2]. 다중 홉 링크의 홉 수와, 각 홉에서의 중계 위성의 위치를 결정하기 위해 최근접 이웃 탐색 알고리즘을 제안하였다. stochastic geometry를 통한 분석으로 알고리즘이 linear complexity를 달성하고, 유한한 step에서 iteration을 완료할 수 있음을 보였다. 또한 알고리즘은 이상적인 시나리오의 최소 대기 시간에 가까운 성능을 보였고, Starlink constellation의 경우 전체 구형 영역의 0.066%만 탐색하고도 최소 대기 시간을 분석할 수 있었다. Backpressure routing [4] 방식을 위성 라우팅에 적용하면 새로운 거리 기반의 평가 지표를 기반으로 링크 가중치를 계산하여 목적지까지 혼잡하지 않은 경로를 선택하면서 낮은 지연 시간으로 트래픽을 분산시킬 수 있다. 제한된 리소스와 긴 전파 지연, 동적 토폴로지 등 복합적인 요인으로 인해 전체 네트워크의 congestion 정보를 수집하지 않고 분산적으로 정보를 획득한다. 이를 통해 특히 큐 리소스가 제한된 경우에 상대적으로 더 높은 처리량과 더 낮은 지연을 달성할 수 있다.

III. 강화학습 기반 기반 LEO 위성 라우팅

강화학습 (Reinforcement Learning, 이하 RL)은 보상 신호를 최대화하는 방식으로 환경 내에서 결정을 내리도록 교육하는 데 중점을 둔 기계학습 방식의 하나이다. RL 알고리즘은 연속적인 action을 학습하여 그들이 시간 내에서 누적 보상을 최적화하는 방향으로 behavior를 정한다. 위성 라우팅 문제에서, RL은 네트워크의 현재 상태를 기반으로 서로 다른 라우팅 경로에 대한 보상을 기반으로 에이전트가 라우팅 결정을 내리도록 구성될 수 있다. 심층강화학습을 기반으로 지능형 라우팅 알고리즘을 고안하기 위해, 주변 위성 노드에 대해 공간 위치 (Spatial position), 상대 위치 (Mutual distance), 큐잉 지연 (Queueing delay), 그리고

가능한 대역폭에 대한 정보를 관찰하여, 최대 주변 4 개의 위성 노드에 대한 정보를 획득한다 [5]. 그리고 전송 전력 등, 데이터를 보내기 위해 필요한 정보를 Deep Q-Network (DQN) 알고리즘 기반으로 예측한다. 예측한 정보를 바탕으로 매핑을 수행하고, 선택한 노드에 데이터를 전송한다. 상태정보로 각 노드의 SNR, 대역폭, 큐잉 지연, 목적지까지 남은 거리, 그리고 목적지인지 여부를 사용하고, 행동공간에는 인접한 노드들이 포함된다. 보상함수는 전송 지연을 최소화하는 방향으로 설계된다. 그리고, multi-commodity flow 라우팅 알고리즘을 다루기 위해서도 심층강화학습을 적용되었다. 위성 라우팅 문제를 NP-hard 인 binary integer programming 최적화 문제로 모델링하였다 [6]. 상태공간에서는 위성 네트워크 내 모든 노드의 위치와 요청의 크기를, 행동 공간은 모든 유저의 요청을 고려하여 다음 홉 노드에 대한 결정을 포함한다. 이를 기반으로, 정해진 시간 슬롯 내에서 각 요청에 대한 지연, 인접 위성 및 목적지까지의 거리를 고려하여 보상함수를 디자인한다. 제안하는 라우팅 알고리즘은 위성의 개수가 많을 때나 지상에서의 사용자가 여러 명인 경우에도 낮은 지연 시간을 보장하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성에서의 라우팅 문제를 해결하기 위한 최신 기술 동향에 대해 논의하였다. 향후 6G 의 주요 기술 중 하나인 위성 라우팅 문제를 풀기 위해 stochastic geometry, backpressure algorithm 등의 최적화 방식 및 최신 강화학습 기술을 적용한 방식을 확인할 수 있었다. 추후 다중 에이전트 강화학습을 통해 동시에 여러 노드에서 라우팅을 수행하는 연구가 진행될 가능성이 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 2023 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2022R1A2C2004869). 본 논문의 교신 저자는 김중현임.

참 고 문 헌

- [1] Starlink, [Online]. Available: <https://www.starlink.com/>
- [2] R. Wang, M. A. Kishk and M. -S. Alouini, "Stochastic Geometry-Based Low Latency Routing in Massive LEO Satellite Networks," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 5, pp. 3881-3894, Oct. 2022
- [3] M. J. Neely, E. Modiano, and C. E. Rohrs, "Dynamic power allocation and routing for time-varying wireless networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 1, pp. 89-103, Jan. 2005.
- [4] X. Deng, L. Chang, S. Zeng, L. Cai and J. Pan, "Distance-Based Back-Pressure Routing for Load-Balancing LEO Satellite Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 1, pp. 1240-1253, Jan. 2023
- [5] P. Zuo, C. Wang, Z. Yao, S. Hou and H. Jiang, "An Intelligent Routing Algorithm for LEO Satellites Based on Deep Reinforcement Learning," in *Proc. IEEE*

Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), Norman, OK, USA, Sep. 2021

- [6] K. -C. Tsai, L. Fan, L. -C. Wang, R. Lent and Z. Han, "Multi-Commodity Flow Routing for Large-Scale LEO Satellite Networks Using Deep Reinforcement Learning," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Austin, TX, USA, Apr. 2022