

저궤도 위성 군집 네트워크에서의 에너지 효율적인 라우팅 연구동향

한수빈, 김태윤, 류동균, 백상현

고려대학교

{subin993, kimtyoun123, rdk0610, shpack}@korea.ac.kr

Energy-Efficient Routing in Low-Earth Orbit Satellite Constellations: A Survey of Recent Trends

Subin Han, Taeyun Kim, Dongkyun Ryoo, Sangheon Pack

Korea University

요약

저궤도 위성 군집 기반의 위성 통신은 기존의 위성 통신 대비 상대적으로 낮은 궤도로 인해 지상국과의 통신 지연이 짧다는 장점으로 각광받고 있다. 그러나 이러한 이점에도 불구하고, 소형화된 위성으로 인한 배터리 한계 문제는 저궤도 위성 네트워크 운영에서 중대한 도전 과제로 남아있다. 이에 따라 저궤도 위성 네트워크는 장기적인 운영을 위해 지연시간, 신뢰성과 같은 네트워크 지표뿐만이 아닌 위성의 한정된 에너지 자원을 효율적으로 관리하며 데이터의 라우팅을 수행해야 한다. 이에, 본 연구에서는 저궤도 위성 군집 네트워크에서의 에너지 효율적인 라우팅 연구들에 대해 소개한다.

I. 서론

위성 네트워크 기술의 급속한 발전은 전 지구적인 연결성의 새로운 지평을 열고 있다. 특히 저궤도 위성 (Low Earth Orbit) 네트워크의 확장은 Starlink, OneWeb 등의 기업을 중심으로 진행되고 있으며, 이러한 저궤도 군집은 기존의 정지궤도 (Geostationary Earth Orbit) 및 중궤도 (Medium-Earth Orbit) 위성 시스템에 비해 낮은 고도를 활용함으로써 장거리 통신의 지연 시간을 현저히 줄이는 장점을 제공한다 [1]. 이러한 장점을 바탕으로 저궤도 위성 네트워크는 국제 통신 네트워크뿐만 아니라 원격 교육, 재난 관리, 환경 모니터링 등 다양한 분야에서 활용되고 있으나, 동시에 새로운 도전 과제를 안고 있다. 저궤도 위성 군집은 수백에서 수천 개의 위성으로 구성되어 있으며, 각각의 위성은 다른 위성들과 지속적으로 데이터를 주고받아야 한다. 이 과정에서 발생하는 라우팅 문제는 전체 네트워크의 효율성과 성능에 직접적인 영향을 미치게 된다. 저궤도 위성 네트워크의 경우, 저대역폭과 높은 동적 변화를 고려할 때, 데이터 라우팅의 최적화는 네트워크 혼잡을 방지하고 통신 품질을 유지하기 위해 필수적이다.

저궤도 위성들의 작은 크기와 제한된 에너지 용량은 또다른 고려사항으로, 대부분의 저궤도 위성은 태양 전지판을 이용하여 에너지를 공급받지만, 이는

궤도상의 위치나 태양의 조건에 따라 변동이 크다. 이에 따라, 위성의 에너지 관리는 위성의 운영 수명을 최대화하고 지속 가능한 네트워크 운영을 보장하는 데 중요한 역할을 하며, 이는 에너지 소비를 줄이면서도 네트워크 성능을 최적화하는 라우팅 알고리즘 개발의 필요성을 제기한다.

이러한 배경에서 본 논문은 최신의 저궤도 위성 군집 네트워크를 위한 에너지 효율적인 라우팅 기법들에 대한 연구 동향을 소개하고자 한다. 최근 연구들은 다양한 라우팅 알고리즘과 프로토콜을 통해 위성 간의 통신과 에너지 소비를 최적화하는 방안을 모색하고 있으며, 이는 위성 군집 네트워크의 효율성을 극대화하고, 위성 운영의 경제성을 높이는 데 기여할 수 있다. 특히, 인공지능 기반의 최적화 기법, 동적 라우팅 프로토콜, 그리고 위성 배터리 수명을 고려한 에너지 관리 전략 등이 주요 연구 주제로 부각되고 있다. 이러한 기법들은 위성의 배터리 수명을 연장하고, 통신 지연을 최소화하며, 네트워크 용량을 최적화하는 데 중요한 역할을 한다.

II. 저궤도 위성 군집 네트워크에서의 에너지 효율적인 라우팅 연구동향

연구 [2]는 저궤도 위성 네트워크의 효율적인 에너지 관리를 위해 위성의 에너지 상태를 기반으로

서비스 유형별로 최적화된 라우팅 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 위성의 에너지 상태를 중요한 라우팅 결정 요소로 활용하며, 각 위성의 에너지 상태에 따라 다르게 데이터의 라우팅 우선순위를 설정한다. 에너지 레벨이 높은 위성은 더 많은 데이터를 처리할 수 있도록 하고, 반면에 에너지 레벨이 낮은 위성은 네트워크 부하를 경감시키기 위해 트래픽을 회피하도록 설계된다. 서비스 유형은 저지연, 고신뢰성 필요, 일반 데이터 전송 등으로 세분화되어 각각의 요구사항에 맞는 라우팅 경로가 선택된다. 이 방식은 네트워크의 전체 에너지 소비를 최적화하고 각 위성의 수명을 연장하는 동시에, 위성의 위치와 에너지 변화를 동적으로 반영하여 네트워크의 적응성을 향상시킨다. 시뮬레이션 결과, 이 라우팅 알고리즘은 네트워크의 에너지 효율성을 높이고, 패킷 손실률을 줄이며, 전반적인 데이터 전송 성능을 향상시키는 것으로 나타났다. 이는 특히 에너지가 제한적인 상황에서도 높은 수준의 서비스 품질을 유지할 수 있음을 보여주며, 저궤도 위성 네트워크의 안정적이고 효율적인 운영에 기여한다.

저궤도 위성 군집 네트워크는 일반적으로 큰 네트워크 환경이기 때문에 정밀하게 모델링하게 될 경우 계산 복잡도가 커져 운용에 어려움이 있다. 또한, 빠른 이동성으로 인해 네트워크 토폴로지가 시시각각으로 변화하여 보편적으로 잘 동작하는 라우팅 알고리즘이 필요하다. 연구 [3]은 해당 사항들을 고려하기 위해 Deep Reinforcement Learning (DRL)을 기반으로 한 라우팅 알고리즘을 제안하여 저궤도 위성의 에너지 효율성과 패킷의 지연시간을 최적화하고자 하였다. 해당 연구는 저궤도 위성의 주요 특성 중 하나인 수리와 유지보수의 어려움을 강조하면서, 이를 위해 위성의 배터리 수명을 최대한 연장시켜 장기간에 걸쳐 안정적인 서비스를 제공해야 한다고 언급하였다. 이를 위해 배터리의 충전 레벨이 얼마나 감소하였는지를 나타내는 지표인 Depth of Discharge (DoD)와 배터리 수명 간의 관계를 모델링하였다. 이를 기반으로 각 위성의 DoD와 패킷의 지연시간을 동시에 최적화하기 위해, 해당 연구에서는 각 위성의 배터리 상태, 각 패킷의 지연된 시간, 위성 간의 거리 등을 학습하여 어떤 위성으로의 송신을 수행해야 하는지를 결정하였다. 시뮬레이션 결과는 해당 알고리즘이 에너지 소비와 패킷 손실률을 현저히 줄이면서 지연 시간 경계를 만족시키는 것을 보여주었다.

연구 [4]는 다양한 Quality of Service (QoS) 요구사항을 충족하기 위해 가용 에너지 활용도를 최적화하는 데 중점을 두고 저궤도 위성 네트워크에 맞춘 에너지 효율적인 라우팅 알고리즘을 제안한다. 해당 알고리즘은 잔여 배터리 상태만을 고려하는 것이 아니라, 위성의 이동성을 예측하여 태양 에너지로 충전이 가능한 시간을 고려한 가용 에너지를 정의하였다. 가용 에너지는 QoS 요구사항과 함께 라우팅 과정에 고려되며 에너지 가용성이 높은 기간 동안 에너지 집약적인 작업을 예약하고 상대적으로 중요도가 떨어지는 작업은 에너지 레벨을 고려하여 연기하는 형태로 동작한다. 해당 방식은 네트워크 간의 에너지 소비 균형을 유지하여 단일 위성의 에너지 고갈 위험을 줄이고 전반적인 네트워크 성능과 신뢰성을 향상시키는 데 도움을 준다. 시뮬레이션 결과를 통해 해당 알고리즘이 저궤도 위성 네트워크 전반에 걸쳐 에너지 소비를 줄이고 서비스 품질을 향상시킴을 보여준다.

III. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성 군집 네트워크에서의 에너지 효율적인 라우팅 연구들에 대해 알아보았다. 위성의 수명, 끊임 없는 서비스를 위해 에너지 효율적인 라우팅은 필수적이며, 이를 위해 여러 연구들에서 위성 네트워크의 특성을 고려한 에너지 효율적인 라우팅 알고리즘에 대해 제안하였다. 향후에는 네트워크 지표와 에너지를 동시에 고려하는 위성-지상 네트워크 (satellite-terrestrial integrated network)를 조사하고, 이에 대한 연구를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부) (No. RS-2024-00405128)의 지원과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2024-RS-2022-00156353)

참고 문헌

- [1] M. Centenaro, C.E. Costa, F. Granelli, C. Saachi, and L. Vangelista, "A Survey on Technologies, Standards and Open Challenges in Satellite IoT," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1693-1720, Thirdquarter 2021.
- [2] L. Hao, P. Ren, and Q. Du, "Satellite QoS Routing Algorithm Based on Energy Aware and Load Balancing," in *Proc. International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP) 2020*, Nanjing, China, October 2022.
- [3] J. Liu, B. Zhao, Q. Xin, J. Su, and W. Ou, "DRL-ER: An intelligent energy-aware routing protocol with guaranteed delay bounds in satellite mega-constellations," *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 2872-2884, October-December 2021.
- [4] L. Yang, H. Zhang, Y. Qi, and Q. Huang, "Available Energy Routing Algorithm considering QoS Requirements for LEO Satellite Network," *Computer Communications*, vol. 217, pp. 87-96, March 2024.