

지상-위성 통합망에서의 SDN 기반 링크 모델 분석 및 라우팅 기법 설계

류현호^{1*}, 이상훈¹, 이동형¹, 박경준¹

대구경북과학기술원¹

SDN-Based Link Model Analysis and Routing Algorithm for Integrated Satellite Terrestrial Networks

Hyunho Ryu^{*}, Sanghoon Lee¹, Donghyung Lee¹, Kyung-Joon Park¹

Key Words : Software Defined Networking(소프트웨어 정의 네트워크), Graph Neural Network(그래프 구조 인공 신경망), Integrated Satellite Terrestrial Network(지상-위성 통합 네트워크)

서 론

현대 전장에서는 유무인 노드를 활용한 복합 임무를 수행하는 방식이 확대되고 있다. 군 환경에서 안정적인 유무인 복합체계 운용을 위해서는 지상, 공중 및 우주 영역의 네트워크를 통합하여 하나의 네트워크처럼 운용할 수 있어야 한다⁽¹⁾. 지상망 통신은 지형적인 한계점이 존재하며 특히, 전쟁시에 지상국 관리에 대한 문제가 발생할 수 있다. 또한 전장과 같은 환경에서 네트워크의 패킷 손실은 치명적인 결과를 초래할 수 있다⁽²⁾. 데이터를 적시에 전송하기 위해서는 지상-위성 통합 네트워크가 필수적이다.

지형적인 한계 등으로 인해 통신망이 원활하지 못한 환경에서 위성 통신의 활용은 넓은 커버리지 영역으로 범위의 제약이 적고, 비교적 균등한 통신 서비스를 제공한다. 지상국과는 달리 별도의 관리 인프라가 충분하지 않은 상황에서도 비행기, 선박, 차량 등 다양한 환경에 적용 가능하다.

본 논문에서는 위성의 동적인 특성을 반영한 통합 네트워크의 노드에 대한 링크 모델을 제시한다. 위성의 동적인 특성을 효과적으로 반영하기 위해 SDN 기법을 적용한다⁽³⁾. 이를 기반으로 낮은 패킷 손실율과 저지연 통신을 달성하기 위해 GNN 모델을 활용하기 위한 접근 방안을 제시한다.

본 론

지상-위성 통합 네트워크 구축을 위해 위성 및 지상국과의 통신을 확인하고, 이들 간의 데이터 전송을 위한 링크를 모델링해야 한다. 실시간으로 토폴로지와 링크 상태가 변화하는 네트워크 환경을 시뮬레이션 하고, 최적의 노드를 선택하기 위해 GNN을 활용한다. GNN의 적용으로 토폴로지와 링크 상태 정보를 학습하여 데이터 전송의 적시성을 보장하고자 한다.

링크 모델

저궤도 위성은 지상으로부터 500~1500km 상공에 분포하고 있다. 정지궤도 위성과 비교할 때, 저궤도 위성은 전파 지연과 신호 감쇠가 적어 통신에 활용하기에 용이하다. 시뮬레이션을 통한 링크 모델을 적용하기 위해 위성 constellation을 정리하고 분석하였다.

Table 1. Types of satellite constellations

위성군	운영 주체	고도	주요 목적
Iridium	Iridium Communication	LEO (780km)	음성, 데이터 이동 통신 서비스
Starlink	Space X	LEO (550km)	광대역 인터넷 서비스
OneWeb	OneWeb	LEO (1,200km)	광대역 인터넷 서비스
Kuiper	Amazon	LEO (600km)	광대역 인터넷 서비스

본 연구에서는 전 세계적으로 광범위하게 음성 및 데이터 이동 통신 서비스를 제공하고 있는 Iridium Constellation을 활용하여 시뮬레이션을 설계한다. Iridium constellation은 66개의 위성을 활용하고 있으며, 약 780km 상공에서 100분의 위성 주기를 가지고 있다⁽⁴⁾.

저궤도 위성-지상 링크 모델링

위성을 활용한 안정적인 통신을 위해 지상국은 위성과의 링크 단절을 고려해야 하며, 이때 다른 위성으로 링크 전환을 수행해야 한다. 저궤도 위성의 빠른 이동성으로 링크 전환이 평균적으로 약 10분 주기로 발생한다. 저궤도 위성을 S_N 으로 표현하여 지상국의 커버리지 범위 내에 위치하는 시간 구간을 표현하기 위해 수식 (1)과 같이 위성 테이블을 정의하였다.

$$SATtable_i = \begin{bmatrix} S_1 & t_{in1} & t_{out1} \\ S_2 & t_{in2} & t_{out2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_N & t_{inN} & t_{outN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

테이블의 세가지 열은 각각 위성의 인덱스, 위성이 커버리지 영역에 들어오는 시간과 커버리지 영역을 이탈하는 시간을 나타낸다.

위성 S_N 와 지상국 GS_N 간의 링크 연결은 시간에 따라 변화하므로 특정 시간 시점 t 에서 링크 연결 가능 여부를 정의하는 것은 중요하다. 이를 위해 아래의 수식 (2)의 형태로 링크 연결 상태 함수를 정의하였다. 이는 실제 저궤도 위성과 지상국 간의 통신에서 가시권 진입이 시간에 따라 변하는 특성을 반영한다.

$$GSL_N(i, j, t) = \lambda_{ij}^t, \begin{cases} \lambda_{ij}^t > 0, & t_{inN} < t < t_{outN} \\ \lambda_{ij}^t = 0, & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

여기서 i 는 i -번째 지상국이며 j 는 j -번째 저궤도 위성을 의미한다. t 는 시간 시점을 나타낸다. λ_{ij}^t 가 0이면 저궤도 위성이 커버리지 영역에 없는 것을 의미한다. 이를 통해 특정 시간 t 마다 링크 존재 여부를 판단하여 동적으로 네트워크를 모델링할 수 있다.

위성간 링크 모델링

저궤도 위성은 궤도를 따라 일정한 주기로 이동하기에, 위성군 내 모든 위성의 상대적인 위치를 파악할 수 있다. 이러한 특성을 활용하여 위성들은 인접한 궤도면 (Orbital Plane)에 위치한 위성과 링크를 형성한다. 특히 궤도의 이동 방향에 따라 상승 위성과 하강 위성으로 구분되며 동일 방향의 궤도면에 속한 위성들과 링크가 형성된다⁽⁵⁾.

일반적으로 저궤도 위성간 링크는 동일 궤도면 내 링크 (Intra-OP Laser Link)와 서로 다른 인접한 궤도면 간 링크 (Inter-OP Laser Link)로 구분된다. Intra-OP 링크는 동일 궤도면 상에서 인접한 위성 간에 형성되는 링크를 의미하며, 하나의 궤도면에 총 2개의 인접한 위성과 연결된다. Inter-OP 링크는 인접한 다른 궤도면에 속한 일정 범위 이내의 위성과 연결된다. 이러한 형태로 위성의 위성간 링크는 총 4개의 인접 위성과 영구적으로 연결된다.

앞서 제시한 링크 모델을 기반으로 링크 상태 정보에 기반한 라우팅 알고리즘을 설계한다. SDN 환경에서 수집된 네트워크 토폴로지 정보를 입력으로 활용하며, 이때 링크의 상태 정보 등을 포함한다. 수집된 정보를 바탕으로 최적의 노드 및 경로 탐색을 위해 GNN 모델을 적용한다. GNN은 그래프 구조 데이터를 처리하도록 설계된 인공 신경망이며, 노드 간 인접성으로 그래프의 기본 위상을 유지한다는 특성이 있다. 이를 통해 동일 모델을 다른 토폴로지에 적용하더라도 재훈련 과정을 최소화할 수 있어 토폴로지가 동적으로 변화하는 환경에서 용이하게 활용할 수 있다.

본 논문에서는 저궤도 위성 네트워크의 시변성을 고려한 링크 모델과 이를 활용한 라우팅 방안을 제안하였다. 저궤도 위성의 빈번한 이동성으로 인해 변화하는 지상국-위성 간 링크를 시간 주기에 따라 모델링하고, Intra-OP와 Inter-OP 링크 분석을 통한 위성 간 링크 구조를 정리하였다. 또한 SDN을 통해 수집되는 링크 상태 및 토폴로지를 라우팅을 위한 정보로 활용하였다. GNN 모델의 MPNN 구조를 도입하여 지상-위성 통합망 환경의 동적으로 변화하는 토폴로지에 유연하게 대응할 수 있도록 설계하였다. 이를 통해 링크 단절이 빈번하게 일어나는 이종 네트워크 환경에서도 저지연 통신이 가능하다. 향후 더욱 신뢰성 있는 네트워크 구축을 위해 링크 상태에 따른 가중치에 변화를 주는 다양한 변수들을 분석할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRIT-CT-22-040, 이종 위성군 우주 감시정찰 기술 특화연구센터)

참고문헌

- 1) Kim, D., "Operational Concept of an Integrated Military Network Centered on Low Earth Orbit Satellite Communication and Analysis of Its Operational Effectiveness," Journal of Korea Multimedia Society, Vol. 26, No. 4, 2023, pp. 550-556.
- 2) Lee, S., Park, H. S., and Park, K. J., "A Routing Protocol for Wireless SDN in Mission-critical Unmanned Systems," Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 47, No. 1, 2022, pp. 21-27.
- 3) Park, H. S., Lee, S., and Park, K. J., "Wireless SDN self-recovery for unmanned swarm cyber-physical systems," 2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE, 2021, pp. 87-90.
- 4) Liu, J., Zhang, T., and Ma, J., "SDN-Based In-band Network Telemetry for Low-Orbit Satellite Networks," 2023 11th International Conference on Intelligent Computing and Wireless Optical Communications (ICWOC). IEEE, 2023, pp. 86-90.
- 5) Su, Y., Liu, Y., Zhou, Y., Yuan, J., Cao, H., and Shi, J., "Broadband LEO satellite communications: Architectures and key technologies," IEEE Wireless Communications, Vol. 26, No. 2, 2019, pp. 55-61