

다중 저궤도 위성 환경 통신 성능 최적화를 위한 심층 강화학습 기반 링크 선정 알고리즘

진유경, 윤재영, 이호원
아주대학교

{ygjin, dbswo0617, howon}@ajou.ac.kr

Link Selection Algorithm for QoS Optimization in Multi-LEO Satellite Environments

YooGyung Jin, Jae-young Yun, Howon Lee
Ajou University

요약

본 논문에서는 다중 저궤도 위성 환경에서 트래픽 수요 예측, 링크 품질, 경로 지연 등을 통합 고려한 다변수 최적화 문제를 해결하기 위해 심층 강화학습 기반 링크 선택 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션 결과, 제안한 방안은 Exhaustive Search가 도출한 최대 보상 값에 근접하는 성능을 달성하여 알고리즘의 학습 효과를 입증하였다.

I. 서론

다중 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성이 운용되는 6G 시대의 비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN) 환경에서는, 위성-사용자 간 서비스 링크와 위성-게이트웨이 간 피더링크 선택이 통신 품질을 좌우한다. 하지만 단순히 거리 및 Signal-to-Noise Ratio(SINR) 기반 선택은 트래픽 집중, 서비스 불균형, 빈번한 링크 재구성 등으로 인해 성능 저하를 유발할 수 있다 [1]. 이에 본 연구는 링크 선택 문제를 단일 요소가 아닌 트래픽 수요 예측, 채널 상태, 링크 용량, 경로 지연 등 복합적인 요소가 얹힌 다변수 최적화 문제로 인식하고, 이를 효과적으로 해결하기 위해 심층 강화학습(Deep Reinforcement Learning, DRL) 기반의 지능형 링크 선택 알고리즘을 제안한다.

II. 시스템 모델 및 제안 알고리즘



그림 1. System Model

본 논문에서는 다중 저궤도 위성이 지상 셀이 위치한 사용자 단말 및 게이트웨이와 데이터를 송수신하는 시나리오를 다룬다. 시스템 모델은 NTN Deployment Scenario D4(Non-GEO, Ka band, Earth Fixed beams)를 기반으로 설계되었으며, 그림 1과 같이 L 개의 위성이 각각 M 개의 빔을 이용하여 N 개의 지상 셀에 서비스를 제공하는 환경을 가정하였다 [2], [3]. 각 셀의 시계열 트래픽 수요는 Long-Short Term Memory(LSTM) 기반의 예측 모델을 통해 생성되며, 위성의 위치는 Two-Line Elements set(TLE) 데이터를 기반으로 타임스텝 t 에 따른 궤도 위치로 정의하였다 [4].

특정 위성이 게이트웨이와 직접 피더링크를 형성할 수 있는 경우라도, 링크 품질 저하나 트래픽 집중 상황에서는 인접 위성을 경유하는 Inter-Satellite Link(ISL) 기반 멀티 홉 경로가 오히려 전송 지연 감소, 부하 분산, 간섭 완화 측면에서 더 우수할 수 있다. 이를 고려해 본 연구는 각 위성을 심층 강화학습 기반 에이전트로 정의하고, 피더링크 및 서비스 링크 선택 문제를 Markov Decision Process(MDP)로 모델링한다. i 번째 에이전트의 상태 $s_i(t)$ 는 $s_i(t) = [D_{i,k}^{pred}, B_{i,k}^{avail}, SINR_{i,k}, Prev_{i,k}, Relat_{i,k}^{candi}]$ 로, 각 요소는 예측된 셀별 트래픽 수요, 링크 별 대역폭 가용량, 링크 품질, 직전 연결 노드, 연결 가능한 릴레이 노드 후보로 구성된다. 행동 $a_i(t)$ 는 현재 노드에서 서비스링크, 피더링크, 또는 ISL 중 하나를 선택하여 다음 릴레이 노드를 결정하는 것으로 정의된다.

보상 함수는 예측된 트래픽 수요와 링크 효율성을 종합적으로 반영하도록 설계하였다. 각 빔의 Achievable Data Rate(ADR)이 셀별 트래픽 수요와 얼마나 정합하는지를 기반으로 보상을 부여하며, 전체 홉 수에 비례하

는 penalty 항을 추가함으로써 불필요한 릴레이 경로를 억제하고 전송 지연을 최소화한다. 각 위성 i 의 보상 함수는 다음과 같이 정의되며, unified reward는 각 위성의 보상을 합산하여 계산된다.

$$R_i = \alpha \cdot \frac{\sum_{k=1}^K B_{i,k}^{avail} \cdot \log_2(1 + SINR_{i,k})}{C_{max,i}} - \beta \cdot \delta_{i,k} - \gamma \cdot H_i \quad (1)$$

여기서 α, β, γ 는 각 요소를 조정하는 가중치를 의미한다. $\delta_{i,k}$ 은 셀 k 에서 예측된 트래픽 수요 $D_{i,k}^{pred}$ 와 셀 k 에서의 ADR $R_{i,k}^{ADR}$ 간의 상대 오차 기반 정합도이며, 다음과 같이 정의한다.

$$\delta_{i,k} = \exp\left(1 - \left| \frac{R_{i,k}^{ADR} - D_{i,k}^{pred}}{\max(D_{i,k}^{pred}, \epsilon)} \right| \right) \quad (2)$$

여기서 ϵ 은 분모가 0이 되는 것을 방지하는 상수이다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

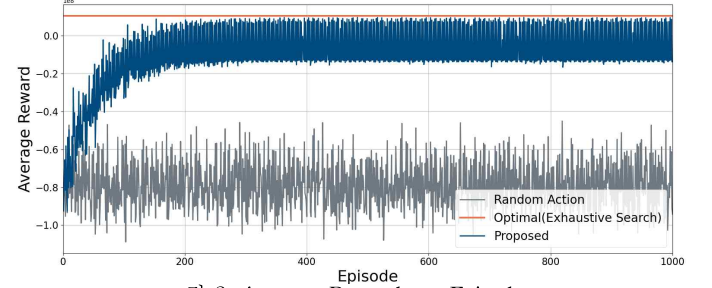


그림 2. Average Reward per Episode

본 논문에서는 제안 방안의 성능을 검증하기 위해 Exhaustive Search와 Random Action을 비교 방안으로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 고도 600km의 두 위성이 9개의 셀에 대해 서비스를 제공하는 환경에서 진행되었으며, 제안 방안은 그림 2와 같이 학습 약 300 에피소드 이후 안정적인 수렴 및 Exhaustive Search가 도출한 최대 보상 값의 약 97% 수준까지 근접하는 결과를 달성하였다. 이를 통해 DRL 기반 링크 선택 알고리즘이 위성통신 환경에서 일정 수준 이상의 보상을 안정적으로 달성할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. 2022-0-00704, 초고속 이동체 지원을 위한 3D-NET 핵심 기술 개발, 25%)과 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. RS-2024-00359235, 3GPP 표준기반 저궤도 군집 위성통신 지상국 핵심기술 개발, 25%)과 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. RS-2024-00936992, 저궤도 위성통신 핵심 기술 기반 큐브 위성 개발, 25%)과 2025년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2025-00563401, 3차원 공간에서 에너지 효율적 멀티레벨 AI-RAN 구현을 위한 AI-for/and-RAN 핵심 원천기술 연구, 25%)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] H. Lee, S. H. Lee and T. Q. S. Quek, "Multiobjective Optimization Strategy for AI-Aided Internet of Things Communications," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 17, pp. 15657-15673, 1 Sept. 1, 2022
- [2] Inigo del Portillo, Bruce G. Cameron, Edward F. Crawley, A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband, Acta Astronautica, Volume 159, 2019, Pages 123-135, ISSN 0094-5765
- [3] A Global Initiative. 3rd Generation Partnership Project Technical Report 38.811 v15.4.0, Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15)
- [4] Barlacchi et al., "A multi-source dataset of urban life in the city of Milan and the Province of Trentino," Scientific data 2 (2015).