

심층 강화학습 기반 전송 지연 및 간섭을 고려한 게이트웨이 위치 최적화 기법

진유경, 이호원

아주대학교

ygin@ajou.ac.kr, howon@ajou.ac.kr

Deep Reinforcement Learning-Based Gateway Placement Optimization Method Considering Transmission Delay and Interference

YooGyung Jin, Howon Lee

Ajou University

요약

본 논문은 LEO 위성통신 환경에서 동일 주파수 대역을 사용하는 서비스 링크와 피더 링크 간 간섭을 최소화하고 전송 지연을 줄이는 것을 목표로 한다. 이를 위해, 위성의 위치와 피더 링크 거리를 주요 고려 요소로 설정하여 보상 함수를 정의하고, 실시간으로 변화하는 환경에서도 효율적인 게이트웨이 배치를 도출할 수 있는 중앙집중형 심층 강화학습 기반 최적화 기법을 제안한다.

I. 서론

LEO 위성통신 시스템은 글로벌 광대역 서비스를 제공하기 위해 효율적인 자원 활용과 간섭 제어가 필수적이다. 특히, 동일 주파수 대역을 공유하는 서비스 링크와 피더 링크 환경에서는 간섭 완화와 게이트웨이 배치의 최적화가 시스템 성능을 좌우한다[1].

본 논문에서는 동적인 환경과 간섭 조건을 실시간으로 반영하여 사용자-위성-게이트웨이 간의 통신 경로에서 전송 지연과 간섭을 최소화하기 위한 심층 강화학습 기반 최적 게이트웨이 배치 기법을 제안한다.

II. 시스템 모델 및 제안 알고리즘

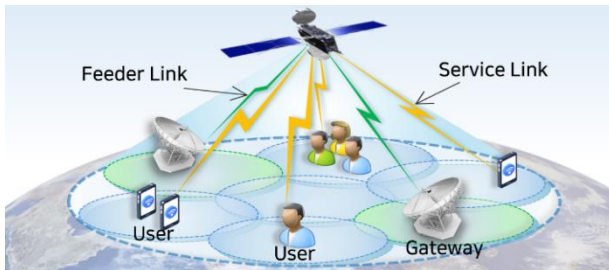


그림 1. System Model

본 논문에서는 단일 transparent 위성이 지상 셀에 배치된 사용자 단말 및 다중 게이트웨이와 송수신하는 시나리오를 다룬다. 시스템 모델은 NTN Deployment Scenario D4(Non-GEO, Ka band, Earth Fixed beams)를 기반으로 설계되었으며, 서비스 링크와 피더 링크가 동일 주파수를 사용하는 환경을 가정하여, 할당 가능한 주파수 자원이 제한된 미래의 통신 상황을 모사하였다[2][3]. 구체적으로, 위성이 지상에 방사하는 N 개의 빔으로 형성되는 빔 커버리지를 설정하였으며, 각 빔 커버리지에서의 UE 위치 및 트래픽 발생량은 초기에 랜덤하게 설정한 후 시공간적으로 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다. 제안된 알고리즘은 피더 링크 거리가 전송 지연과 신호 감쇄에 직접적인 영향을 미치며 전체 통신 품질의 중요한 요소임을 반영하여, 단일 위성의 위치 변화와 피더 링크의 거리를 주요 고려 요소로 포함하였다.

피더 링크 거리를 최소화하는 동시에 다중 객체를 고려하는 복잡한 환경에서의 게이트웨이 위치 최적화 문제를 해결하기 위해 중앙 집중형 심층 강화학습(DQN) 알고리즘을 사용한다. 에이전트는 중앙 컨트롤러이며, 상태는 위성의 위치, 다중 게이트웨이 각각의 위치, 각 빔 커버리지 내 사용자 단말의 분포로 정의한다. 행동은 각 게이트웨이를 특정 빔 커버리지로 이동시키는 것으로, $A_t = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ 과 같이 N 개의 빔 중심 좌표 중 하나를 선택하도록 정의된다. 제안 기법의 보상은 위성과

게이트웨이 간 평균 거리와 사용자 단말과의 평균 거리의 가중 합을 기반으로 하여, 통신 성능 최적화와 트래픽 분산을 동시에 고려한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

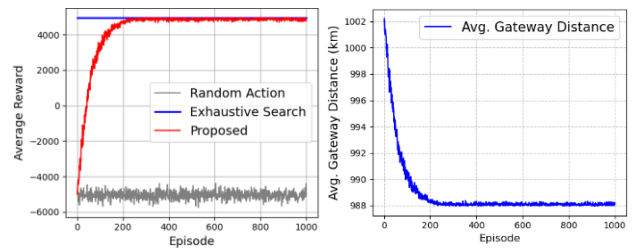


그림 2. Average Reward vs. episode

그림 3. Average Gateway Distance vs. episode

제안 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 Exhaustive Search 와 Random Action 을 비교 대상으로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Exhaustive Search 는 가능한 모든 게이트웨이 배치 조합을 탐색하여 최적의 위치를 도출하였다. 반면, Random Action 은 게이트웨이의 위치를 무작위로 설정하는 방식으로, 계산 비용이 비교적 낮으나 최적화 성능이 떨어지고 불안정한 결과를 보였다. 제안 방안은 Exhaustive Search 에 근접하는 결과에 수렴하며, 이를 통해 학습의 목표를 성공적으로 달성한 것을 입증하였다. 특히, 다중 게이트웨이의 거리와 위성 간의 평균 거리는 그림 3 과 같이 약 988km 로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. RS-2024-00359235, 3GPP 표준기반 저궤도 군집 위성통신 지상국 핵심기술 개발, 50%)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. RS-2024-00396992, 저궤도 위성통신 핵심 기술 기반 큐브 위성 개발, 50%)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] Q. Chen, L. Yang, J. Guo, X. Liu and X. Chen, "Optimal Gateway Placement for Minimizing Intersatellite Link Usage in LEO Megaconstellation Networks," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 22, pp. 22682–22694, 15 Nov.15, 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)