

저궤도 위성 통신에서 Transformer 기반 채널 추정을 활용한 핸드오버 성능 개선

이충녕, 채승호*

한국공학대학교

lc9902130509@tukorea.ac.kr, *shchae@tukorea.ac.kr

Handover Performance Enhancement via Transformer-Based Channel Estimation in LEO Satellite Communications

Chungnyeong Lee, Seong Ho Chae*

Tech University of Korea

요약

본 논문에서는 6세대 이동통신(6G) 환경에서의 저궤도 위성 통신을 위한 Transformer 기반 채널 추정 모델을 제안하고, 이를 활용한 MAPPO(Multi-Agent Proximal Policy Optimization) 기반 핸드오버 제어 기법을 통해 채널 예측의 성능을 분석한다. 제안된 채널 추정 모델은 과거 5개 시간 슬롯의 채널 정보를 입력으로 하여, 이후 5개 시간 슬롯에 대한 채널 상태를 예측한다. 실험 결과, 본 방식은 기존 스킴 대비 약 23.1% 낮은 핸드오버 발생률을 기록하였으며, 이는 성공적인 채널 예측과 채널 예측이 핸드오버 성능 향상에 효과적으로 기여함을 보인다.

I. 서론

6세대 이동통신(6G)은 유비쿼터스 연결성의 구현을 핵심 목표 중 하나로 설정하고 있으며, 이를 달성하기 위해서는 비지상 네트워크를 포함한 6G 입체 통신 인프라의 구축이 요구된다[1]. 그러나 저궤도 위성을 포함한 비지상 네트워크는 지상 네트워크와 달리 신호 경로가 길어, 필연적으로 큰 지연 시간이 발생하는 문제가 있다. 그럼에도 불구하고 기존의 대부분 자원 최적화 연구들은 채널 정보를 현 시점에서 실시간으로 정확히 획득할 수 있다는 가정 하에 문제를 정의하였다[2]. 하지만 비지상 네트워크의 특성상 이러한 정보는 이미 지연된 상태일 가능성이 높기 때문에, 미래 시점의 채널 상태까지 예측할 수 있는 채널 추정 기법의 연구가 필요하다.

본 연구에서는 시계열 예측 모델인 Transformer 구조를 기반으로, 저궤도 위성 통신 환경에서 과거의 채널 정보를 활용하여 미래 채널 상태를 예측하는 채널 추정 기법을 제안한다. 제안한 기법을 다중 빔 기반 LEO 위성 환경의 핸드오버 제어에 적용함으로써, 채널 예측의 성능을 분석하고, 기존 방식 대비 핸드오버 발생률을 감소시킬 수 있음을 보인다.

II. 시스템 모델 및 성능 검증

그림 1은 본 논문에서 제안하는 다중 빔 저궤도 위성 환경에서의 Transformer 기반 채널 추정 기법과 이를 활용한 MAPPO(Multi-Agent Proximal Policy Optimization) 기반 핸드오버 제어 구조를 나타낸다. 채널 모델은 [2]를 기반으로 쉘도우드 라이시안 페이딩, 도플러 효과, 사용자 및 위성 안테나 이득 등을 반영하여 구성하였다. 채널 추정에 필요한 학습 데이터는 몬테카를로(Monte Carlo) 방식으로 생성되었으며, 로그 정규화 과정을 거쳐 Transformer의 입력으로 활용되었다. 본 예측 모델은 과거 5개 시간 슬롯의 채널 정보를 입력받아, 이후 5개 시간 슬롯에 대한 채널 상태를 예측한다.

MAPPO 기반의 핸드오버 제어에서는 각 지상 사용자가 개별 에이전트로 동작하며, Transformer로 추정된 미래 채널 정보와 현 시점의 부하 정보, 직전 시간 슬롯에서의 행동 정보를 기반으로 매 시간 슬롯마다 통신할 위성의 빔을 결정한다[3]. 성능 평가는 핸드오버 발생 비율을 비교하였으며, 비교 스킴으로는 미래 채널 정보 없이 현재 시점의 채널 정보만을 완벽히 알고 있는 상황을 가정한 MAPPO 기반 핸드오버 제어 기법을 사용하였다.

표 1은 제안한 기법과 비교 스킴 간의 핸드오버 발생 비율을 비교한 결과를 나타낸다. 실험 결과, 본 논문에서 제안한 기법은 약 11% 핸드오버 발생률을 보였으며, 이는 비교 스킴의 14% 대비 약 23.1% 감소한 수치이다. 이는 제안한 채널 추정 기법이 미래 채널 상태를 효과적으로 예측했음을 의미하고, 미래 채널 정보를 반영하는 것이 핸드오버 성능 개선에 실질적으로 기여할 수 있음을 시사한다.

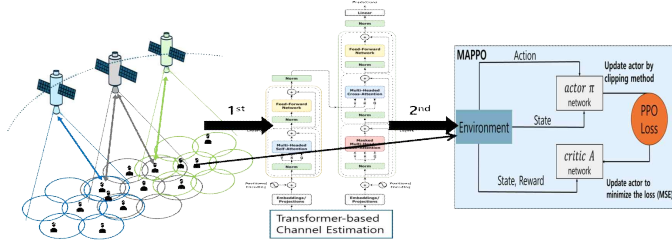


그림 1. Transformer 기반 저궤도 위성 채널 추정 기법 및 MAPPO 기반 핸드오버 기법

Handover Rate	
Proposed	Baseline [3]
11%	14%

표 1. 기법에 따른 핸드오버 발생 비율 비교

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRIT-CT-22-047 우주계측 지능통신망 특화연구실).

참고문헌

- [1] S. H. Chae, H. Lim, H. Lee, and B. C. Jung, "Performance analysis of dense low earth orbit satellite communication networks with stochastic geometry," *J. Commun. and Networks*, vol. 25, no. 2, pp. 208–221, Apr. 2023.
- [2] C. Lee, I. Bang, T. Kim, H. Lee, B. C. Jung and S. H. Chae, "Multi-agent deep reinforcement learning based handover strategy for LEO satellite networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 29, no. 5, pp. 1117–1121, May 2025.
- [3] 이충녕, 채승호, "심층 강화학습 기반 저궤도 위성 다중 빔 핸드오버 기법," 2024년도 한국통신학회 추계종합학술발표회 논문집, pp. 870–871, Nov., 2024.