

저궤도 위성 통신 시스템에서의 인공지능 기반 궤도 예측 기술 동향

이준서, 차호경, 윤훈석, 이종범, 이병주
인천대학교 정보통신공학과

{201901706, 202101646, hunseok2002, sjgsjb3, blee}@inu.ac.kr

Recent Trends in AI-Based Orbit Prediction Techniques for LEO Satellite Communication Systems

Junseo Lee, Hokyong Cha, Hunseok Yun, Jongbeom Lee, Byungju Lee

Department of Information and Telecommunication Engineering, Incheon National University

요약

저궤도 (Low Earth Orbit, LEO) 위성 활용의 확대에 따라, 궤도 예측 정밀도 향상 및 통신 최적화를 위한 인공지능(Artificial Intelligence, AI) 및 머신러닝(Machine Learning, ML)기술의 도입이 활발히 진행되고 있다. 본 논문은 이러한 AI/ML 기술의 적용 가능 영역과 최신 기술 동향을 정리하고, LEO 위성 시스템에서의 AI/ML 활용 가능성은 살펴본다.

I. 서 론

저궤도 (Low Earth Orbit, LEO) 위성 시스템은 Starlink, OneWeb 등 민간 주도의 대규모 위성 군집 구축을 통해 빠르게 확산되고 있으며, 통신, 항법, 감시 등 다양한 분야에서 활용이 확대되고 있다 [1]. 현재 궤도 예측에 널리 사용되는 SGP4(Simplified General Perturbation-4) 모델은 시간 경과에 따라 수 km 수준의 누적 오차를 초래할 수 있으며, 이는 충돌 회피 실패 및 통신 품질 저하 등 실질적인 위협으로 이어진다.

이러한 한계를 보완하기 위해 TDNN(Time Delay Neural Network), FNO(Fourier Neural Operator) 등 시계열 기반 머신러닝(Machine Learning, ML) 모델이 주목받고 있다. 해당 기법들은 궤도 예측 뿐만 아니라 전파 간섭 탐지, 항법 보조, 우주 상황 인식 등으로의 확장이 가능하며, 궤도 변화에 대한 정밀 예측에 효과적이다. 그러나 학습 데이터 부족, 온보드(onboard) 연산 자원 제약, 모델 경량화 등 여전히 해결이 필요한 기술적 과제가 존재한다. 본 논문은 LEO 위성 궤도 예측에서 AI/ML 기술의 적용 가능성 및 실용성을 살펴본다.

II. AI/ML 기반 저궤도 위성통신 시스템.

AI/ML은 위성 간 트래픽 예측, 자원 할당, 스펙트럼 관리, 간섭 회피 등 통신 네트워크 운용의 최적화에도 활용되며, 지구 관측, 환경 모니터링, 자원 탐사 분야에서는 위성 영상을 분석하여 산불, 홍수, 지하자원 등을 조기 감지하는 데 기여한다. 또한, 우주 쓰레기 추적, 위성 상태 모니터링 등 운용 안정성 확보에도 효과적이다.

LEO 위성 궤도 예측 분야에서는 TDNN이 시계열의 시간 종속성을 학습하여 예측 정밀도를 향상시킨다. 자율 내비게이션 분야에서는 GNN(Graph Neural Network)을 통해 위성 간 관계를 그래프로 모델링하고, STAN(Simultaneous Tracking and Navigation) 구조와 결합해 협력 항법 경로를 구성할 수 있다 [2]. 환경 예측 분야에서는 FNO와 같은 연산자 기반 모델이 대기 밀도나 전리층 상태 등 복잡한 물리량을 빠르고 정밀하게 예측하며, 기존 수치 모델 대비 높은 일반화 성능을 나타낸다.

LEO 위성의 궤도 예측 정확도 향상을 위해 다양한 신경망 기법이 제안되고 있으며, 그 중 TDNN 기반 구조는 위성의 단기 위치를 예측하고 시간 지연 특성을 학습할 수 있어 궤도의 비선형적 변화를 예측하는 데 효과적이다. 이를 통해 TDNN 기반 예측이 물리 기반 모델의 단기 예측 한계를 효과적으로 보완하며, 위성 기반 PNT(Positioning, Navigation, and Timing) 시스템의 신뢰성을 강화할 수 있는 유효한 대안이 될 수 있다. AI/ML을 위성 시스템에서 안정적으로 적용하기 위해서는 모델 경량화 및 온보드 연산이 가능한 구조 설계가 필요하고 궤도 예측, 항법, 탐지 기능을 통합할 수 있는 AI 프레임워크 개발이 필요하다.

III. 결 론

LEO 위성 시스템의 고도화와 함께, AI/ML 기반 기술은 궤도 예측, 항법, 간섭 감지 등 주요 기능의 정확도와 운용 유연성을 향상시키는 핵심 대안으로 부상하고 있다. 본 논문에서는 TDNN, FNO 등 시계열 기반 추론 모델이 LEO 위성 환경에서의 실질적 적용 가능성을 살펴보았다. 향후 궤도 예측, 항법, 간섭 탐지 기능을 통합하는 AI 프레임워크 개발될 경우, 위성 간 협력 운용 기반이 마련되어, LEO 위성 시스템은 실시간 학습과 협업이 가능한 통합 지능형 플랫폼으로 진화할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 학·석사연계 ICT 핵심인재 양성사업 (IITP-2025-RS-2024-00437024)의 연구결과로 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] H. Lee, B. Lee, H. Yang, J. Kim, S. Kim, W. Shin, B. Shim, and H. V. Poor, "Towards 6g hyper-connectivity: Vision, challenges, and key enabling technologies," *Journal of Communications and Networks*, vol. 25, no. 3, pp. 344-354, 2023.
- [2] J. Khalife et al., "Improved Starlink Satellite Orbit Prediction via Machine Learning with Application to Opportunistic LEO PNT," *ION GNSS+*, 2024.