

수신 각도별 GNSS 오차 패턴 학습 기반 저궤도 위성 통신의 단절 예측 및 선제적 핸드오버 시뮬레이션

강민준, 장용훈, 이상현

고려대학교

juni577@korea.ac.kr, disclose@korea.ac.kr, sanghyunlee@korea.ac.kr

Proactive Handover Simulation for LEO Satellite Communications based on Angular GNSS Error Pattern Learning and Blockage Prediction

Min Jun Kang, Yong Hun Jang, Sang Hyun Lee

Korea University

요약

본 연구는 6G 위성 통신 및 비지상파 네트워크(NTN) 환경에서 서비스 연속성을 보장하기 위한 LEO 핸드오버 최적화 기법을 제안한다. 기존 기술은 위성의 고도각에만 의존하여 도심지의 비등방성 전파 차폐 및 다중경로 오차를 정밀하게 예측하지 못한다는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 LEO 위성과 지리적 상관성이 높은 GNSS(Global Navigation Satellite System)의 의사거리 잔차(Pseudorange Residual) 지표를 활용하여 도심지 각도별 통신 위험 지도(Risk Map)를 생성하였다. 랜덤 포레스트(Random Forest) 모델을 통해 30m 이상의 신호 왜곡 구간을 학습시켰으며, Skyfield 기반의 실제 스타팅크 궤도 데이터를 활용하여 제안 기법의 유효성을 검증하였다. 시뮬레이션 결과, 구축된 모델은 장애물 진입 전 신호 단절 시점을 정밀하게 예측하여 최적 위성으로 채널을 미리 절체하는 선제적 핸드오버(Proactive Handover)를 성공적으로 수행하였다. 본 연구의 결과는 복잡한 도심 환경에서 초신뢰·저지연 위성 통신 서비스를 구현하기 위한 핵심적인 판단 프레임워크로 활용될 것으로 기대된다.

I. 서 론

6G 통신 및 비지상파 네트워크(NTN) 실현을 위한 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성 통신망에서는 핸드오버(Handover) 기술이 필수적이다. 핸드오버는 지상 단말이 접속 중인 위성의 통신 권역을 이탈하기 전, 인접 위성으로 채널을 절체하여 서비스 연속성을 보장한다 [1]. 하지만 최소 고도각에만 의존하여 도심지의 비등방성(Anisotropy)에 따른 통신 단절을 예측하는 데에는 한계가 있다. 실제 수신 방위각에 따라 장애물 분포가 달라지므로, 고도각에 의존하는 단순 기하학적 모델로는 국지적인 통신 단절을 예측하기 어렵다. 이에 본 연구는 LEO와 전파 경로 특성이 유사한 GNSS의 실측 데이터를 활용하여, 이러한 수신 각도별 신호 불균형 문제를 해결하고자 한다. LEO와 GNSS(Global Navigation Satellite System) 위성은 물리적 장애물에 의한 기하학적 상관성이 높으므로, 특정 각도에서 GNSS 신호가 차폐되거나 오차가 크게 발생한다면 동일 경로의 LEO 신호 역시 유사한 품질 저하를 겪게 된다. 특히 본 연구는 의사거리 잔차(Pseudorange Residual)에 주목한다. 의사거리 잔차란 위성으로부터 수신기까지의 측정 거리와 기하학적 거리의 차이로서, 순수 신호 왜곡 정보를 내포한다. 즉, 의사거리 잔차를 기반으로 장애물에 의한 통신 음영 구역을 파악함으로써, 신호 품질이 보장된 최적의 위성을 선정하여 안정적인 핸드오버를 수행할 수 있다 [2].

따라서 본 연구는 국토지리정보원 상시관측소의 GNSS 데이터를 분석하여, 수신 각도(방위각 및 고도각)에 따른 의사거리 잔차 분포를 데이터셋으로 구축하고 이를 랜덤 포레스트(Random Forest) 알고리즘으로 학습시킨다 [3]. 이를 통해 실제 데이터 기반의 각도별 통신 위험도를 산출하여 핸드오버 대상을 최적화하고, 궁극적으로 LEO의 실질적인 통신 단절 시점을 사전에 정밀하게 예측하는 것을 목표로 한다.

II. 시스템 모델 및 문제 정의

기존 LEO 핸드오버 알고리즘은 GNN 등 최신 기법조차 단말의 최소 고도각 확보 여부만을 고려하는 단순 가시성 모델에 의존한다 [1]. 그러나 이는 장애물이 없는 이상적인 환경을 전제하므로, 고층 빌딩에 의한 신호 차폐와 다중경로 페이딩이 빈번한 도심지의 비등방성 전파 특성을 반영하지 못한다. 따라서 고도각만을 변수로 하는 기하학적 모델은 실제 도심 환경에서 국지적 신호 저하를 예측하는 데 한계가 있으며, 이는 잊은 핸드오버 실패와 통신 품질 저하의 주원인이 된다.

본 연구는 이러한 도심지의 전파 특성을 정량적으로 분석하기 위해 GPS 신호의 의사거리 잔차를 핵심 지표로 활용한다. 이를 위해 국토지리정보원 상시관측소의 원시 데이터를 활용하여 다음과 같은 데이터 전처리 과정을 수행하였다. 먼저, 케플러 6요소(Keplerian Elements)를 기반으로 위성의 정밀한 3차원 위치(ECEF)를 도출하였다. 산출된 위성 위치를 실제 신호 거리와 비교하여 이론적인 거리 차이를 계산한 뒤, 수신기 시계 오차

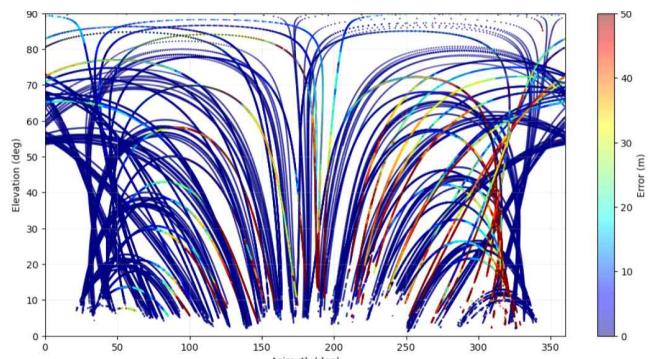


그림 1 수신 각도에 따른 GNSS 의사거리 잔차

(Receiver Clock Bias)와 같이 모든 위성에 공통적으로 포함된 잡음을 제거하기 위해 매 관측 시점(Epoch)마다 전체 위성 잔차의 중앙값(Median)을 산출하여 차감하는 필터링을 적용하였다. 이 과정을 통해 대기 오차나 클락 바이어스가 배제된, 순수하게 건물 등 지형지물에 의해 발생하는 신호 왜곡 성분만을 추출하였다. 그림 1은 상기 과정을 통해 추출된 GPS 의사거리 잔차를 방위각(x축)과 고도각(y축)에 매핑하여 시각화한 히트맵이다. 분석 결과, 잔차의 분포는 고도각에 반비례하는 선형적 경향을 보이지 않고 방위각에 따라 불규칙한 패턴을 보인다. 특히 방위각 300도에서 330도 사이의 구간을 살펴보면, 고도각이 40도 이상으로 충분히 확보된 상황에서도 10m 이상의 높은 잔차가 집중적으로 관측된다. 이는 해당 방향에 심각한 신호 왜곡이 발생하고 있음을 실증한다. 따라서 이러한 국지적 위험 구간을 사전에 예측하기 위해, 본 연구는 실제 관측된 잔차 데이터를 학습한 머신러닝 모델을 제안한다.

III. 모델 생성 및 시뮬레이션

본 연구는 앞서 전처리한 GNSS 실측 데이터를 학습하여 도심지의 복잡한 전파 위험 구간을 식별하는 머신러닝 모델을 설계하고, 이를 실제 LEO 핸드오버 시뮬레이션에 적용하는 기법을 제안한다. 먼저, 지형지물에 의한 신호 왜곡을 정량화하기 위해 랜덤 포레스트 기반의 분류 모델을 구축하였다. 핸드오버의 의사결정 과정에서는 오차의 정밀한 수치적 예측보다는 통신 가능 여부를 판별하는 것이 효율적이라는 판단하에, 의사거리 잔차가 30m를 초과하는 경우를 위험(Danger), 그 이하를 안전(Safe)으로 정의한 이진 분류 레이블을 생성하였다. 여기서 30m 임계값은 도심지 빌딩 숲에서 발생하는 다중경로 오차 중 통신 품질을 심각하게 저하시키는 비가시 환경을 보수적으로 식별하기 위한 기준이다. 학습된 결과인 그림 1은 서울 도심의 전파 위험 지역을 시각화한 위험 지도(Risk Map)로, 특정 방위각의 저고도 구간에서 국지적으로 형성된 차폐 영역을 명확히 보여준다. 구축된 예측 모델을 실제 저궤도 위성 통신망에 투영하여 검증하기 위해 Python의 Skyfield 라이브러리와 Starlink 위성의 궤도 정보인 TLE(Two-Line Element) 데이터를 결합한 시뮬레이션 환경을 구현하였다. 제안하는 알고리즘은 단순히 현재 시점의 가시성을 판단하는 기준 방식과 달리, 위성의 운동 방정식을 풀이하여 현재 연결된 위성이 미래 시점에 도달할 방위각과 고도각을 실시간으로 추적한다. 시스템은 예측된 위성 경로 좌표를 AI 모델에 상시 입력하여 해당 경로가 붉은색 차폐 영역에 진입할 확률을 모니터링하며, 이를 통해 신호 단절이 발생하기 수 분전 미리 위험 시점을 특정한다.

그림 2는 이러한 예측 정보를 바탕으로 수행되는 선제적 핸드오버(Proactive Handover)의 시뮬레이션 결과이다. 현재 접속 중인 위성 A의

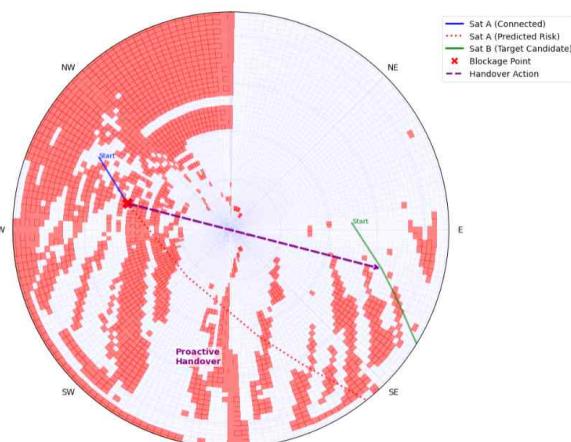


그림 2 통신 단절 예측 구간 회피를 위한 선제적 위성 핸드오버 결과

미래 궤도를 분석한 결과, 그림 내 X 지점에서 위험 구간에 진입할 것이 예측되면 시스템은 즉시 주변 위성들의 미래 품질을 조사한다. 이때 단순히 고도각이 높은 위성이 아닌, 향후 이동 경로 전체가 안전 구역 내에 머무를 것으로 예측되는 최적의 위성 B를 타겟으로 선정한다. 최종적으로 통신 단절이 실제로 발생하기 직전, 보라색 화살표와 같이 위성 A에서 위성 B로 채널을 선제적으로 절체함으로써 도심지에서의 통신 블랙아웃을 방지하고 서비스 연속성을 극대화한다. 이는 고도각 기준의 정적 모델이 해결하지 못한 비등방성 차폐 문제를 데이터 기반의 동적 예측으로 극복할 수 있음을 실증한다.

IV. 결론

본 연구에서는 LEO 통신망의 서비스 연속성을 보장하기 위해, GNSS 실측 데이터 기반의 머신러닝 모델을 활용한 선제적 핸드오버 기법을 제안하였다. 기존의 핸드오버 알고리즘은 단말의 최소 고도각 확보 여부만을 고려하는 단순 기하학적 모델에 의존하여, 복잡한 지형지물이 밀집한 도심지의 비등방성 전파 차폐 문제를 해결하는 데 한계가 있었다. 실험 및 시뮬레이션 결과, 제안하는 랜덤 포레스트 기반 분류 모델은 GPS 의사거리 잔차 패턴을 학습하여 도심지의 국지적 신호 왜곡 구간을 정확히 식별하였다. 구축된 위험 지도는 특정 방위각의 저고도 차폐 영역을 효과적으로 정의하였으며, 이를 통해 도심지 환경에서의 급격한 통신 품질 저하 및 블랙아웃을 원천적으로 방지할 수 있음을 실증하였다. 결론적으로, 다가오는 6G 및 NTN 시대의 위성 통신은 정적인 가시성 판단을 넘어, 실측 데이터 기반의 동적 환경 예측을 통해 신뢰성을 확보해야 한다. 본 연구에서 제시한 데이터 기반 차폐 예측 프레임워크는 향후 복잡한 도심지 전파 환경에서 저지연 위성 서비스를 실현하기 위한 중요한 설계 원칙을 제공할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 고려대학교 차세대통신학과 진리장학 프로그램의 지원을 받아 작성되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] J.-W. Lee, B. Lim, K.-H. Kim, J.-M. Lee, Y.-S. Ha, Y.-J. Han, and Y.-C. Ko, "Handover strategy for LEO satellite communication using graph neural network," *ICT Express*, vol. 11, pp. 239 - 244, 2025.
- [2] R. Zawislak, M. Greiff, K. J. Kim, K. Berntorp, S. Di Cairano, K. Mao, K. Parsons, P. V. Orlik, and Y. Sato, "GNSS Multipath Detection Aided by Unsupervised Domain Adaptation," Mitsubishi Electric Research Laboratories (MERL), Cambridge, MA, USA, Tech. Rep. TR2022-118, Oct. 2022.
- [3] 국토지리정보원, "GNSS 데이터 통합센터: 서울 상시관측소(SOUL) RINEX 관측 데이터," 2025년 1월 접속. [Online]. Available: <http://gnss.ngii.go.kr>