

저궤도 위성 시스템에서 GNSS-Independent 환경을 고려한 고차 루프 기반 시간 동기화 기법

심성훈, 정해준
경희대학교

{tjdgns169, haejoonjung}@khu.ac.kr

High Order Loop Time Synchronization Scheme Considering GNSS-Independent Environment in LEO Satellite Systems

Sunghoon Shim, Haejoon Jung
KyungHee University

요 약

본 논문에서는 Global Navigation Satellite System (GNSS) 신호 없이도 low-Earth orbit (LEO) 위성 환경에서 시간 동기화를 유지하기 위한 Closed-Loop 기반 보정 구조를 제안한다. 허브 피드백 기반 루프 필터를 적용하여 다양한 user equipment (UE) 이동 모델에서 시간 오차 추적 성능을 분석한 결과, 3차 루프에서 가장 안정적인 수렴 특성을 확인하였다.

I. 서론

Non-terrestrial networks (NTN)은 지상 인프라가 취약한 지역까지 서비스를 확장하기 위한 핵심 기술로 주목받고 있으며, 특히 LEO 위성 기반의 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 방식에서는 서브캐리어 간의 직교성 유지가 필수적이므로 정밀한 시간 동기화가 요구된다. 시간 오차는 Cyclic Prefix (CP) 범위를 넘어설 경우 Inter Symbol Interference (ISI)를 유발하여 링크 성능을 저하시킨다. 이러한 이유로 5G-NR에서는 상향링크 도달 시간을 보정하는 Timing Advance (TA) 메커니즘이 필수적이다 [1].

3GPP Release 17에서는 모든 UE가 GNSS 수신기를 탑재하고 있으며, ephemeris 데이터를 수신할 수 있다고 가정한다. UE는 수신한 데이터를 기반으로 위치 및 속도를 계산해 시간 정렬을 수행하지만, LEO 환경에서는 전파 지연이 빠르게 변동하기 때문에 Open-Loop 방식만으로 누적 오차를 보정하기 어렵다. 또한 산악 지형, 건물 밀집 환경 등에서 GNSS 신호 수신에 불안정하며, 저전력 IoT 단말의 경우 GNSS를 지속적으로 사용할 전력이 부족하다는 문제가 존재한다.

이러한 한계를 보완하기 위해 최근에는 GNSS 독립 환경을 가정한 동기화 기법들이 활발하게 연구되고 있다 [3]. 본 논문에서는 LEO 환경에서의 UE 이동 시나리오에 따라 루프 필터 차수별 시간 오차 추적 성능을 분석하고 고차 루프 적용 시 안정적인 수렴을 검증한다. 이를 통해 LEO 환경에서의 GNSS 독립 동기화의 실현 가능성을 검증하였다.

II. 본론

II-1. 시스템 모델

본 연구에서는 LEO 위성 환경에서 GNSS를 사용하지 않고 UE와 허브 간의 시간 정렬을 유지하기 위한 루프 필터 기반 Closed-Loop 보정 구조를 고려한다. 기존의 Open-Loop TA 방식은 GNSS 위치와 위성 궤도 정보를 통해 전파 지연을 예측하였지만, GNSS 신호 수신에 불안정한 환경에서는 위치 갱신 주기가 길어 누적

오차가 증가하며, 이로 인해 최대 허용 타이밍 오차를 초과하게 된다.

이를 보완하기 위해 본 논문에서는 허브가 주기적으로 UE의 시간 오차를 추정하여 피드백하고, UE측에서 이를 내부 루프를 통해 보정하는 구조를 구성하였다 [4]. 허브에서 수신된 Demodulation Reference Signal (DMRS) 심볼을 기반으로 시간 오차를 추정하고, 그 결과를 MAC CE 메시지를 UE에 전달하는 형태로 동작한다. UE는 피드백된 오차를 입력으로 받아 내부 루프 필터를 통해 TA 값을 갱신한다.

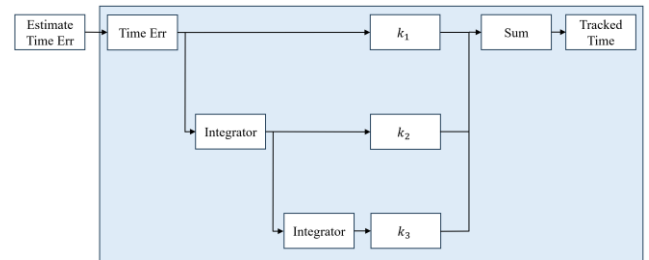


그림 1. UE 내부 추적 루프

그림 1은 본 논문에서 고려한 UE 내부 추적 루프 구조를 보여준다. 루프는 비례항과 적분항으로 이루어진 고차 제어 구조로, 시간 오차 변화율에 해당하는 가속도 성분까지 추적할 수 있다. 루프의 갱신 주기는 10ms 프레임 단위로 설정되어 내부에서 계산된 보정값은 다음 프레임의 송신 시점에 반영된다. 이때 루프의 파라미터 k_1, k_2, k_3 는 루프 상수 T_c 와 감쇠비 ζ 에 따라 응답 특성이 달라지며, 고차 루프일수록 변화율 추적 능력이 향상된다.

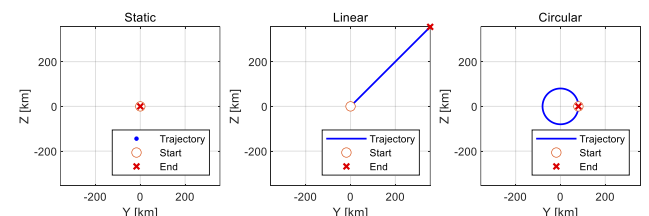


그림 2. UE Trajectories

본 시뮬레이션에서는 UE의 이동 형태에 따른 시간 오차 특성을 비교하기 위해 그림 2와 같은 세 가지 이동 모델을 고려하였다. 첫째, static UE는 지상 고정 UE를 가정하며, 위성의 궤도 이동만으로 전파 지연이 변하는 기준 환경이다. 둘째, linear UE가 일정 속도로 직선 이동하는 경우로, 위성의 상대 위치 변화와 UE의 이동이 함께 반영되어 지연 시간의 변화율이 점진적으로 증가한다. 마지막 circular UE는 일정 반경 내에서 UE가 원형 궤도로 이동하는 경우로, 위성과 UE 간의 거리 변화가 주기적으로 반복되어 지연이 주기적으로 변한다. 이러한 이동 시나리오를 통해 각 루프 차수별 시간 오차 보정 성능을 분석한다.

II-2. 시뮬레이션 결과

위성 고도 400km, 속도 7.67km/s의 LEO 환경에서 제안된 Closed-Loop 기반 시간 동기화 성능을 static, linear, circular 세 가지 UE 이동 모델로 검증하였다.

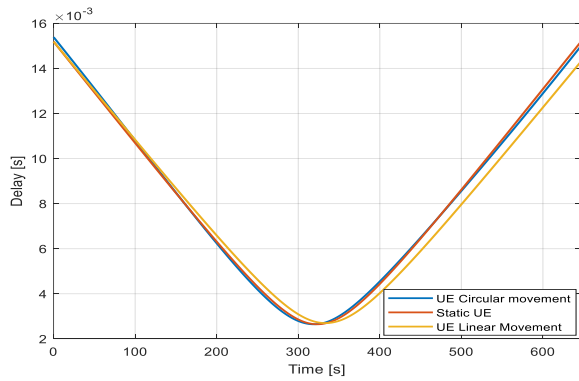


그림 3. UE 이동에 따른 전파 지연

그림 3은 각 이동 모델에서의 전파 지연 변화를 나타낸다. 세 이동 모델 모두 위성의 고도각이 최대가 되는 시점에서 전파 지연이 최소가 되며, 이후 고도각이 낮아질수록 전파 지연이 증가하는 경향을 보인다. 특히 linear 이동의 경우 UE가 일정 속도로 이동하면서 위성과의 상대 위치가 지속적으로 변화하기 때문에, 다른 이동 모델과 비교하여 전파 지연 변화가 조금 더 완만한 형태로 나타난다. 이러한 지연 곡선은 시간 동기화 루프의 추적 기준으로 사용된다.

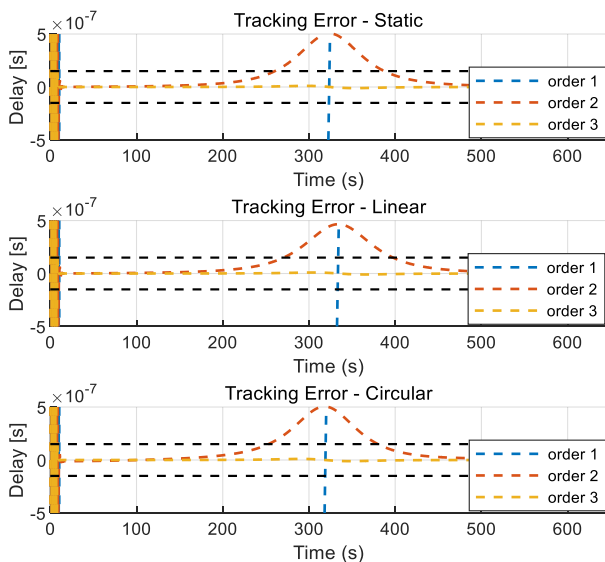


그림 4. UE 이동에 따른 추적 오차

그림 4는 이동 시나리오별 루프 차수에 따른 시간 오차 추적 성능을 비교한 결과를 보여준다. 검증 대상은 3GPP Release 17 기준 numerology와 CP 길이를 기준으로 동기화 성능을 검증하기 위해 보수적으로 설정한 시간 오차 기준 ($0.15\mu\text{s}$)을 나타낸다. 1차 루프의 경우 매우 큰 추적 오차를 보이지만 2차 및 3차 루프에서는 오차가 빠르게 정상 상태로 수렴한다. 특히 3차 루프는 오차 변화율 향을 추가로 추적하기 때문에 시간 변화가 큰 LEO 환경에서도 안정적으로 수렴하는 경향을 보인다. Circular 및 static UE의 경우 궤적 중심에서 크게 벗어나지 않으며 이동 거리가 제한적 이므로 위성 이동에 따른 상대 거리 변화가 주로 영향을 미친다. 이에 따라 3차 루프 기준 평균 RMSE는 약 $0.0039\mu\text{s}$ 로 두 모델에서 동일한 결과를 보였다. 반면, linear UE는 일정 방향으로 이동하기 때문에 상대 거리 변화가 지속적으로 누적된다. 이 결과, 3차 루프 기준 평균 RMSE는 약 $0.0035\mu\text{s}$ 로 더 낮은 값을 나타내었다. 이는 UE의 직선 이동이 루프 필터의 오차를 보상하는 방향으로 작용했기 때문이다.

III. 결론

본 논문에서는 GNSS 신호 수신에 불가능한 환경에서의 시간 동기화 성능 향상을 위해 LEO 위성 기반 Closed-Loop 보정 구조를 적용하였다. 제안된 구조는 허브의 피드백 정보를 이용하여 UE 내부 루프 필터를 통해 시간 오차를 지속적으로 보정하며, 다양한 이동 모델에 대해 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 3차 루프에서 가장 안정적인 수렴 특성을 보였으며, 모든 이동 모델에서 $0.15\mu\text{s}$ 의 시간 동기화 기준을 만족하였다. 이를 통해 제안된 구조가 LEO 환경에서의 GNSS 독립적인 시간 동기화의 대안이 될 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

The work was supported by the MSIT, Korea, in part under the National Research Foundation of Korea grant (RS-2025-23323081), in part under the ITRC support programs (IITP-2025-RS-2021-II212046), and in part under the Convergence security core talent training business support program (IITP-2023-RS-2023-00266615) supervised by the IITP.

참고 문헌

- [1] L. Ma, C. Park, X. Wang, P. Gaal and A. R. Alvarino, "Uplink Time Synchronization for Non-Terrestrial Networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 7, pp. 114-118, July 2023.
- [2] 3GPP TS 36.331, "Radio Resource Control," V17.2.0, Sept. 2022.
- [3] F. Berggren and B. M. Popović, "GNSS-Independent Uplink LEO Satellite Synchronization," in *IEEE Communications Letters*, vol. 29, no. 6, pp. 1245-1249, June 2025.
- [4] P. Delbeke and D. Duyck, "5G-NR GNSS Independent Time and Frequency Synchronization in NTN Scenarios," in *Ka and Broadband Communications Conference*, Oct. 2023.