저궤도 위성 통신에서 GNSS Fix 간격에 의한 시간 오차 분석

심성훈, 유병하, 정해준
경희대학교

{tjdgns169, syeon2513, haejoonjung}@khu.ac.kr

Analysis of Time Error Based on GNSS Fix Intervals in LEO Satellite Communications

Sunghoon Shim, Byungha You, Haejoon Jung
KyungHee University

요 약

본 논문에서는 low-Earth orbit (LEO) 위성 통신 환경에서 Open-Loop Timing Advance (TA) 방식 적용 시, GNSS fix 간격 동안 누적되는 위치 오차가 시간 동기화 성능에 미치는 영향을 분석한다. 특히 GNSS fix 이후 UE 의 이동으로 인해 발생하는 전파 지연 오차가 TA 계산에 미치는 영향을 확인하고, 해당 위치 오차가 시간 동기화 성능에 어떤 영향을 주는지 시뮬레이션을 통해 보여준다.

Ⅰ. 서론

Non-terrestrial networks (NTN)은 넓은 통신 커버리지를 제공함으로써 지상 인프라가 부족한 지역에서도 지속적이고 안정적인 연결을 제공할 수 있다는 장점을 가진다. 특히, LEO 위성 기반 NTN 은 위성 제작 및 발사 비용 감소로 인해 저비용 고효율 통신 인프라 구축을 가능하게 하여 차세대 통신의 핵심 기술로 주목받고 있다.

5G-NR 은 다중 반송파 기반의 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 방식을 기반으로 하며, 이는 송수신기 간 시간 정렬이 맞지 않을 경우 서브캐리어 간의 직교성이 깨지게 되어 Inter Symbol Interference (ISI)가 발생한다. 따라서 모든 UE 의 상향링크 신호는 기지국 또는 위성에서 동일한 시간 내에 수신되어야 하며, 이를 가능하게 하기 위해 TA 기법이 필수적으로 적용되어야 한다.

그러나 LEO 위성 통신 환경에서는 위성의 빠른 이동과 UE 의 위치 변화로 인해 전파 지연이 지속적으로 변동되며, 이로 인해 정밀한 시간 동기화가 어려워진다. 3GPP Release 17 에서는 UE 는 Global Navigation Satellite System (GNSS) 데이터를 통해 자신의 위치를 파악하고, 네트워크로부터 제공받은 위성 궤도 정보를 활용하여 Open-Loop 기반 TA 보상 방식을 제안하였다.

TA 는 각 UE 의 송신 시점을 미리 조정하여 신호가 위성 또는 기지국에 정해진 기준 시간에 도달할 수 있도록 보정하는 메커니즘으로, 전파 지연과 추가적인 시간 오프셋을 고려하여 상향링크와 하향링크 간의 시간 정렬을 최적화한다. 이 과정에서 GNSS fix 는 UE 가 GNSS 신호를 획득하고 위치를 계산하는 과정을 의미하며, 계산된 GNSS 좌표는 일정 시간만 유효하다 [1]. 실제 환경에서 GNSS fix 가 매 프레임마다 수행되지 않으며, 일반적으로 수 초 간격으로 위치 정보가 갱신된다 [2].

본 논문에서는 GNSS fix 가 일정 주기마다 갱신된다는 가정 하에, 그 간격 동안 누적되는 위치 오차가 UE 와 위성 간의 거리 계산 및 전파 지연에 미치는 영향을 분석하고, 이를 통해 발생하는 시간 오차를 Open-Loop 방식으로 모델링한다. 또한, 초기 고도각 및 위성 고도에 따른 시간 오차의 특성을 시뮬레이션을 통해 분석한다.

Ⅱ. 본론

Ⅱ-1. 시스템 모델

본 논문에서는 LEO 위성 통신 환경에서 GNSS fix 간격 동안 발생하는 시간 오차를 분석하기 위해 3 차원 좌표계 기반 시뮬레이션 모델을 구성하였다. t 시점에서 위성과 UE 의 실제 거리 $d_{Actual}(t)$ 및 GNSS 기반 위치 오차가 존재하는 경우의 거리 $d_{GNSS}(t)$를 각각 계산하여 시간 오차 $\varepsilon(t)$는 다음 수식으로 표현된다.

$$\varepsilon(t) = \left|\frac{d_{Actual}(t) - d_{GNSS}(t)}{c}\right|. \quad (1)$$

여기서 c 는 빛의 속도 ($3 \times 10^8 \mathrm{m/s}$)를 나타낸다. UE 의 위치는 매 GNSS fix 시점에서만 갱신되며, 그 외 시간에는 마지막으로 획득한 GNSS 좌표를 그대로 유지한다고 가정한다. 이로 인해 누적되는 위치 오차에 따른 TA 계산 시 시간 오차가 발생한다.

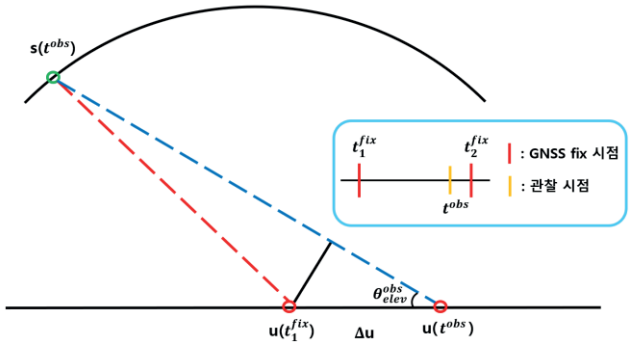

그림 1. GNSS fix 간격에서 전파 지연 오차 발생 구조

본 논문에서는 GNSS fix 시점 t_1^{fix}과 t_2^{fix} 사이에 LEO 위성이 관찰하게 되는 전파 지연 오차를 분석한다. 특정 GNSS fix 시점을 t_1^{fix}, 그 다음 fix 시점을 t_2^{fix}, 그리고 t^{obs} 는 $t_1^{fix} < t^{obs} < t_2^{fix}$ 를 만족하며 위성이 오차를 관찰하는 임의의 시점이라 정의한다. 또한, 그림 1 에서 볼 수 있듯, 시점 t_1^{fix} 이후 $(t^{obs} - t_1^{fix})$ 시간 동안 UE 는 일정한 속도로 이동한다고 가정한다. 시점 t_1^{fix} 일 때의 UE 기준 위치 $u(t_1^{fix})$ 및 위성 오차 관찰 시점 t^{obs} 일 때의 UE 위치 $u(t^{obs})$ 간 지표면 상 거리 차이 $\Delta u =$

$|u(t_1^{fix}) - u(t^{obs})|$ 가 발생한다. 이러한 위치 오차는 UE 와 위성 간 거리 계산에 영향을 미치며, 전파 지연 계산의 정확도를 감소시킨다. 결국 GNSS fix 간의 간격이 길어질수록, UE 가 마지막 GNSS fix 시점의 위치로부터 멀어질수록 Open-Loop 방식으로 계산된 TA 값의 정확도는 감소하게 된다.

Ⅱ-2. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서 GNSS fix 주기는 5 초로 고정되며, UE 는 초기 위치 $(0,0,R_E)$에서 시작하여 y 축을 따라 60m/s 의 일정한 속도로 이동한다고 가정하였다. 위성은 고도 h 에서 원형 궤도를 따라 일정한 속도로 이동하며, 위성의 속도는 고도별로 중력 기반 공식에 의해 $v_{sat} = \sqrt{\frac{GM}{R_E+h}}$ 로 계산된다. 여기서 $G = 6.67384 \times 10^{-11}\mathrm{Nm^2/kg^2}$ 는 중력 상수, $M = (5.9722 \times 10^{24}\mathrm{kg})$은 지구 질량, $R_E = 6371\mathrm{km}$ 는 지구 반지름을 나타낸다. 시뮬레이션은 UE 에서 위성으로 단방향 전파를 가정한다.

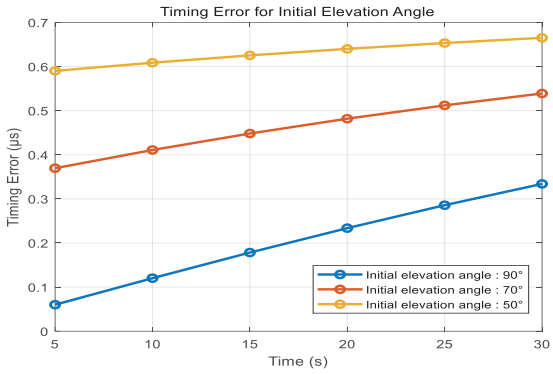

그림 2. 초기 고도각에 따른 시간 오차

그림 2 는 위성 고도를 600km 로 고정하고 초기 고도각이 90°, 70°, 50°일 때의 시간 경과에 따른 시간 오차를 변화를 보여준다. 해당 값은 5 초에서 30 초까지의 구간에서, 각 GNSS fix 시점 직전까지 누적된 시간 오차를 계산한 결과로, 각 시점에서 새로운 GNSS fix 가 이루어지기 직전에 누적된 시간 오차를 나타낸 것이다. 시뮬레이션은 위성이 UE 수직 상공을 지나면서 고도각이 점차 낮아지는 상황으로 수행되었기 때문에, 초기 고도각이 낮을수록 시간 오차가 증가하여 나타난다.

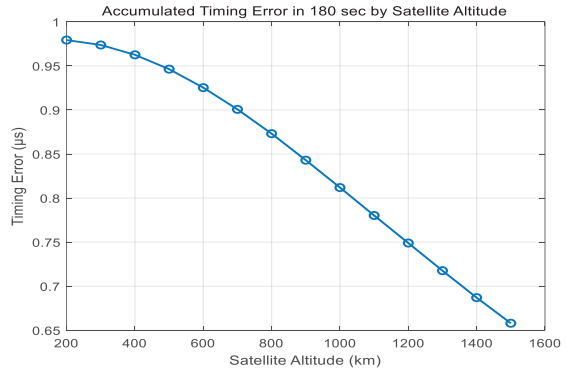

그림 3. 위성의 고도에 따라 180 초 시점에서 누적된 시간 오차

그림 3 은 위성 고도에 따른 누적 시간 오차를 시각화한 것으로, GNSS fix 직전 시점에서의 누적된 시간 오차를 시뮬레이션 종료 시점인 180 초에서 위성 고도별로 비교하여 나타낸 것이다. 위성의 고도가 높을수록 고도각이 천천히 감소하며, UE 의 동일한 이동 거리에 따른 위성과의 상대적인 거리 차이가 감소하기 때문에 시간 오차가 완화되어 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 LEO 위성 통신 환경에서 GNSS fix 간격 동안 누적되는 위치 오차가 Open-Loop 기반 TA 계산에 미치는 영향을 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 초기 고도각과 위성 고도에 따른 시간 오차 누적을 확인한 결과, 초기 고도각이 낮을수록 UE 의 이동에 따른 위치 오차가 전파 지연 계산에 크게 반영되어 시간 오차가 빠르게 증가하는 경향을 보였다. 또한 위성 고도가 높아질수록 고도각 감소 속도가 완만해짐에 따라 시간 오차의 누적 속도도 점차 완화되는 양상을 나타냈다. 특히, 위성의 고도가 200km 인 조건에서 발생하는 최대 시간 오차는 약 0.98μs 로, 이는 3GPP 에서 정의한 subcarrier spacing (SCS) 15kHz 기준 시간 오차 허용 한계 0.94μs 를 초과하는 수준이다 [3]. SCS 가 증가할수록 시간 오차에 대한 허용 한계는 더욱 감소하기 때문에 Open-Loop 기반 TA 방식만으로는 시간 동기화 요구사항을 만족하기 어렵다는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the MSIT, Korea, in part under the National Research Foundation of Korea grants (RS-2023-00303757), 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.

참 고 문 헌

[1] 3GPP TS 36.331, “Radio Resource Control,” V17.2.0, Sept. 2022.

[2] 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.

[3] 3GPP TS 38.133, “Requirements for Support of Radio Resource Management,” V17.6.0, June. 2022.