

5G NR 참조 신호를 활용한 저궤도 위성 기반 측위 성능 분석

송용진, 정방철

아주대학교

wiclyjsong@ajou.ac.kr, bcjung@ajou.ac.kr

Performance Analysis of LEO Satellite-Based Positioning Using 5G NR Positioning Reference Signals

Yong-Jin Song, Bang Chul Jung
Ajou University

요약

본 논문에서는 3GPP 5G NR에서 정의된 하향링크 포지셔닝 기준 신호(positioning reference signal: PRS)를 활용한 저궤도(low-Earth orbit: LEO) 위성 기반 위치 추정 성능을 분석한다. 새로운 파형이나 알고리즘을 제안하지 않고 Gold 시퀀스 기반 PRS와 OFDM 신호 구조를 그대로 유지한 채, 위성별 수신 신호를 독립적으로 처리하는 환경에서 도착시간(time-of-arrival: ToA) 기반 위치 추정 성능을 평가한다. 모의실험 결과, 선택 위성 수가 증가할수록 위성 기하 구조가 개선되어 GDOP(geometric dilution of precision)가 감소하고 위치 추정 오차가 감소함을 확인하였다.

I. 서론

6세대(6G) 이동통신에서는 지상망 커버리지가 제한적인 해상, 항공, 산악 및 재난 환경에서도 정밀한 위치 정보가 요구된다. 전역 측위를 제공하는 위성항법시스템(global navigation satellite system: GNSS)은 수신 전력이 낮아 도심 협곡, 실내 및 차폐 환경에서 가용성이 저하되며 재밍 및 스푸핑에 취약하다. 이에 따라 광역 커버리지와 빠른 기하 변화를 갖는 LEO 위성 통신 인프라를 GNSS의 보완 또는 GNSS-free 측위원(positioning source)으로 활용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 한편 5G NR 측위에서는 하향링크 PRS가 ToA 및 도착시간차(time-difference-of-arrival: TDoA) 측정을 위한 기준 신호로 사용되며, 이를 LEO 비지상망(non-terrestrial network: NTN) 환경에 적용할 경우 위성 기하 구조, 반송파 대 잡음비(carrier-to-noise ratio: CNR), GDOP 및 가시 위성 수가 측위 성능을 좌우한다. 본 논문에서는 새로운 신호를 설계하지 않고 3GPP 표준의 5G NR PRS 구조를 LEO 위성 측위에 적용한 환경을 구성하고, 고정밀 측위에 필요한 선택 위성 수와 GDOP의 영향을 분석한다.

II. NTN-IoT 시스템용 반복 전송을 활용한 IDMA 기술

5G NR 하향링크 PRS는 슬롯 번호와 셀 식별자 등으로 초기화되는 Gold 시퀀스로부터 생성된다. 생성된 이진 시퀀스는 단위 전력의 QPSK 형태 복소 심볼로 매핑된 후, comb 형태의 자원 요소 패턴을 따라 OFDM 자원 격자에 매핑된다 [2]. 이러한 의사 잡음(pseudo-noise) 특성과 넓은 점유 대역폭은 자기상관 피크를 날카롭게 하여 ToA 추정에 유리하다. 본 논문은 PRS 파형을 변경하지 않고 표준 구조를 그대로 사용하며, LEO 위성 채널과 링크 버짓은 3GPP TR 38.811/38.821의 NTN 모델을 따른다.

수신기는 위성별 독립 처리(per-satellite) 방식으로 각 위성의 PRS 수신 신호를 분리하여 처리한다. i 번째 LEO 위성의 PRS에 대한 이산시간 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_i[n] = a_i \exp(j2\pi v_i n T_s) x_i[n - d_i] + w_i[n], i = 1, \dots, n_s$$

여기서 $x_i[n]$ 은 i 번째 위성의 OFDM PRS 송신 신호, a_i 는 위성과 사용자 간 복소 채널 이득, v_i 는 도플러 편이, d_i 는 표본 단위 전파 지연, T_s 는 표본 주기, $w_i[n]$ 은 부가 백색 잡음, n_s 는 처리 대상 위성 수이다.

수신기는 각 위성의 로컬 PRS 복제본과 정합 상관을 수행하여 지연-도플러 평면에서 상관 전력이 최대가 되는 점으로부터 개략 ToA와 도플러를 추정하고, 피크를 보간하여 미세 ToA를 얻는다 [3]. 추정 ToA는 빛의 속도를 곱하여 의사거리(pseudorange)로 변환된다. 의사거리를 활용해 사용자의 3차원 위치와 시계 바이어스를 상태로 하는 가우스-뉴턴 반복으로 위치를 추정한다.

각 측정식을 선형화하여 얻은 기하 행렬 $\mathbf{H}$ 는 위성 시선 방향 단위 벡터와 시계 향으로 구성되며 위성-사용자 기하 구조를 반영한다. 동일한 거리 측정 분산을 가정할 때, 위치 추정 오차의 기하학적 정도는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{GDOP} = \sqrt{(\text{tr}(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1})}$$

여기서 $\text{tr}(\cdot)$, $(\cdot)^T$, $(\cdot)^{-1}$ 는 각각 대각합, 전치, 역행렬을 의미한다. GDOP가 작을수록 위성 배치가 위치 추정에 유리하여 동일한 ToA 추정 오차에서도 최종 위치 오차가 작아진다. 즉, 충분히 많은 위성이 PRS를 송신하고 수신기가 기하적으로 잘 분산된 위성 부분집합을 선택할수록 GDOP가 감소하고 측위 정확도가 향상된다.

III. 모의실험 결과 및 결론

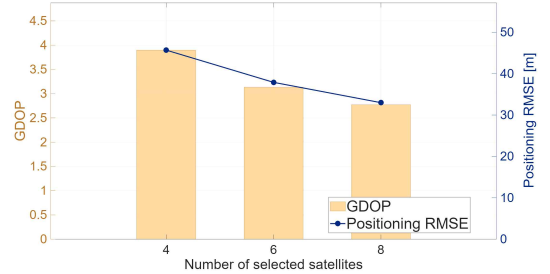


그림 1. 선택 위성 수에 따른 GDOP 및 positioning RMSE 성능

모의실험은 고도 약 550 km의 Walker 구조 Starlink Gen1 LEO 위성군 환경에서 수행하였다. 주요 파라미터로 comb 크기 12, 심볼 수 12 및 대역폭 10.02 MHz를 사용하였다. 그림 1은 선택 위성 수에 따른 평균 GDOP와 위치 추정 RMSE를 도시한 결과로, 선택 위성 수를 4개, 6개, 8개로 늘릴수록 위성 기하 구조의 다양성이 증가하여 GDOP가 감소하고 위치 추정 RMSE가 개선되는 경향을 확인하였다.

본 논문에서는 새로운 신호 설계 없이 3GPP 호환 5G NR PRS 구조만으로도 LEO NTN 환경에서 ToA 기반 위치 추정이 가능함을 확인했다. 다만 측위 성능은 PRS 신호뿐 아니라 위성 가시성, 선택 위성 수, CNR 및 GDOP에 크게 좌우되므로, 고정밀 측위를 위해서는 충분한 수의 LEO 위성이 측위용 PRS를 송신하거나 사용자가 다수의 위성 PRS를 관측할 수 있어야 한다. 또한, 다중 위성 수신 신호 간 간섭과 간섭 완화에 대한 후속 연구가 요구된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 한국연구재단의 지원(No. RS-2026-25489627)과 저궤도 위성통신 핵심기술 기반 큐브위성 개발 과제 지원(No. RS-2024-00396992)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] W. Stock, R. T. Schwarz, C. A. Hofmann, and A. Knopp, "Survey on opportunistic PNT with signals from LEO communication satellites," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 27, no. 1, pp. 77–107, Feb. 2025.
- [2] "TSG RAN; NR; Physical channels and modulation (Release 19)," 3GPP TS 38.211, version 19.3.0, Mar. 2026.
- [3] "TSG RAN; NG-RAN; Stage 2 functional specification of UE positioning in NG-RAN," 3GPP TS 38.305, version 19.1.0, Dec. 2025.