저궤도 위성군을 활용한 의사거리 기반 측위 연구

김시환, 최지환*
한국과학기술원 항공우주공학과

sihwankim@kaist.ac.kr, *jhch@kaist.ac.kr

A Study on Pseudorange-Based Positioning Using Low Earth Orbit Satellite Constellations

Sihwan Kim, Jihwan Choi*
Deopt. of Aerospace Eng., KAIST

요 약

저궤도 위성군을 활용하는 위치, 항법, 시간 동기화(positioning, navigation, and timing, PNT)는 기존 글로벌 위성항법시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS)과 정확도 및 보안성 측면에서 경쟁 가능한 기술적 여건을 가지고 있다. 본 논문에서는 저궤도 위성군을 활용한 PNT 의 위치 오차를 개선하기 위해 time of arrival (TOA) 정밀도를 높일 수 있는 방안을 제시한다. Starlink 의 프레임을 모사하여, TOA 분석에 활용된 신호의 신호 대 잡음비 (signal to noise ratio, SNR)가 증가하거나, 점유 대역폭이 증가할수록 성능 향상이 있음을 확인하였다.

Ⅰ. 서 론

GPS 를 포함한 글로벌 위성항법시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS)은 -130dBm 수준의 약한 신호 세기와 개방된 신호구조, 단방향 브로드캐스트로 인해 재밍 및 스푸핑에 취약하다는 단점이 있다. 반면, 최근 기업◦국가간 경쟁적으로 발전되고 있는 저궤도 군집위성은 통신 서비스 뿐 아니라, GNSS 의 한계를 보완할 수 있는 위치, 항법, 시간 동기화(positioning, navigation, and timing, PNT) 수단으로도 주목받고 있다 [1]-[2]. 저궤도 위성은 낮은 고도에서의 운용으로 인해 수신신호 세기가 강하며, 넓은 대역폭의 사용으로 인해 재밍에 강인하다. GNSS 시스템 (L-band, 1~2GHz)에 비해 높은 주파수 대역에서 운용되는 저궤도 위성 시스템 (Ku, Ka-band, ~20GHz)은 우수한 시간 분해능으로 인해 다중 경로 페이딩에서의 직접경로와 반사경로의 구분이 좋으며, 많은 수의 위성 운용으로 인해 기하학적 다이버시티 측면에서도 이점을 가진다.

이러한 장점에도 불구하고, 저궤도 위성 기반 PNT 를 실용적으로 구현하기 위해서는 몇 가지 기술적 개선이 선행되어야 한다. 먼저 위성 시계의 오차와 다운링크 프레임 타이밍의 오차를 보정하는 기술이 요구되며, 보다 정밀한 위성 궤도 정보(ephemeris)의 확보가 필요하다. 위치 오차를 줄이기 위해 time of arrival (TOA)의 추정 역시 안정적으로 수행되어야 한다. 전자의 경우 통신사업자의 협력에 의존해야 한다면, 후자의 경우는 위성 신호 구조의 리버스 엔지니어링과 동기화 시퀀스의 추출 및 패턴 복원을 통해 개선될 수 있다 [3]. 이 점에 착안하여 본 연구에서는 저궤도 위성 신호내에 파일럿 신호를 활용하여 TOA 를 추정하고, 오차 분산의 이론적 하한을 분석하여 의사거리 기반 PNT 성능을 향상시키기 위한 조건을 제시한다.

Ⅱ. 본론

현재 운용중인 글로벌 저궤도 위성망의 경우 물리 계층 구조가 표준화되어 있지 않아, 수신 신호를 리버스 엔지니어링 하여 그 구조를 추측하는 방식으로 연구가 이루어지고 있다. Starlink [1]의 경우 한 프레임을 구성하는 302 개의 심볼 중 첫번째 심볼에 primary synchronization sequence (PSS), 두번째 심볼에 secondary synchronization sequence (SSS)가 배치되어 있는 것으로 추정되며, OneWeb [2]의 경우 한 프레임 내에 10 개의 프리엠블이 포함되어 있는 것으로 추정된다. 채널 추정 및 동기화에 활용되는 이 심볼들은 특정한 값을 가지며, 이를 기반으로 상관을 수행하여 수신단에서 신호를 획득할 수 있다. 즉, 복소 자기상관 함수 (complex ambiguity fuction, CAF)의 피크 위치를 통해 신호의 TOA 를 검출할 수 있다. 그림 1 은 Starlink

프레임에 기반한 PSS 및 SSS 상관 결과이다. 추정된 SNR 값은 약 -7.82dB 였다.

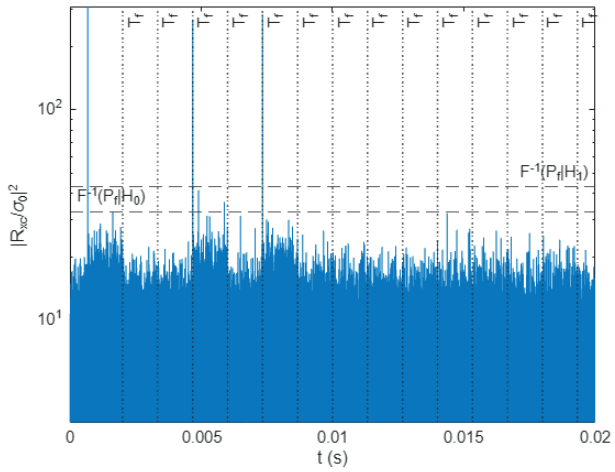

그림 1 PSS 및 SSS 의 CAF 결과

TOA 의 오차 분산 σ_τ^2 하한은 다음과 같이 표현된다

$$\sigma_\tau^2 \geq \left(\frac{2E}{N_0} \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} 4\pi^2 f^2 |S(f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df} \right)^2 \right)^{-1} \quad (1)$$

이 때 S는 검출에 활용된 동기 또는 파일럿 신호, E는 신호의 에너지, N_0 는 잡음의 스펙트럼 밀도, f 는 주파수이다. (1)을 통해, 신호 대 잡음비(signal to noise ratio, SNR)이 높아지거나, 점유하는 대역폭이 거칠수록 TOA 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 신호 설계 및 정밀 추출을 통해 SNR 을 향상시키고, 복수의 프레임 PSS/SSS 신호를 활용해 동기 신호의 점유 대역폭을 높임으로써 TOA 정밀도를 높일 수 있다. 그림 1 의 결과 -7.82dB 의 SNR, 1 개의 Starlink 프레임 동기신호를 활용할 경우 TOA 의 평균 제곱근 편차는 약 3×10^{-2}m 였으나, 2 개의 동기신호를 활용할 경우 평균 제곱근 편차가 약 2×10^{-2}m 로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Ⅲ. 결론

본논문에서는 저궤도 위성군을 활용한 PNT 성능 향상을 위해, 수신신호의 TOA 정밀도를 높일 수 있는 방안을 고려하였다. Starlink 프레임의 동기신호를 활용하였으며, TOA 오차 분산 하한식 분석을 통해 수신신호의 SNR을 향상시키거나 점유 대역폭을 높이는 것이 오차 성능을 개선함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2023-2021-0-02048)

참 고 문 헌

[1] Qin, Wenkai, et al. "Timing Properties of the Starlink Ku-Band Downlink." arXiv preprint arXiv:2501.05302 (2025).

[2] Komodromos, Zacharias M., et al. "Network-aided pseudorange-based LEO PNT from OneWeb." 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). 2025.

[3] Komodromos, Zacharias M., Wenkai Qin, and Todd E. Humphreys. "Signal simulator for Starlink Ku-Band downlink." Proceedings of the 36th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2023). 2023.