

단일 저궤도 위성을 활용한 Doppler 및 RTT 측정 기반 측위

문재준, 정해준*
인천대학교, *경희대학교

mjj7343@inu.ac.kr, *haejoonjung@khu.ac.kr

Localization Based on Doppler and RTT Measurements Exploiting a Single Low Earth Orbit Satellite

Jaejoon Moon, Haejoon Jung*

Dept. of Information and Telecommunication Engineering, Incheon National Univ.

*Dept. of Electronics and Information Convergence Engineering, Kyung Hee Univ.

요약

Global Navigation Satellite System (GNSS)에 비해 지연 및 링크 손실 측면에서 유리한 저궤도 위성은 기존 GNSS를 보완·대체하거나 GNSS-denied 환경에서도 높은 정밀도를 확보할 수 있다. 본 논문에서는 저궤도 위성의 신호 구조를 알지 못하여도 수행 가능한 측위 기법의 도플러 및 왕복시간 측정에 따른 추정 성능 및 실용성을 분석한다.

I. 서 론

비지상 네트워크 (Non-Terrestrial Network, NTN)은 차세대 6G 이동통신의 핵심 요소 중 하나로써 중차대한 역할이 강조되고 있다. 저궤도 (Low Earth Orbit, LEO) 위성은 중궤도 (Medium Earth Orbit, MEO)에 위치한 전통적인 GNSS 보다 지구와의 거리가 훨씬 짧아 전파 지연과 링크 손실이 감소하며, 지상의 사용자 단말 (User Equipment, UE)과의 직접 통신 가능성을 크게 확장시킨다.

GNSS 수신기는 복수 위성 동기화와 정밀 신호 처리를 위한 복잡한 수신 구조와 고전력 연산을 요구 하며, 이는 배터리 기반 저전력 사물 인터넷 (Internet of Things, IoT) 단말 등 전력 및 크기 제한이 있는 기기에 부담이 된다 [1]. 이러한 맥락에서 단일 LEO 위성 기반 측정값을 활용한 위치 추정 방식이 제안되었다 [2]. RTT 와 도플러 천이 측정값을 동시에 활용한 위치 추정 가능성이 분석되었으며 UE 가 위치할 수 있는 영역을 기하학적으로 규명하였다. 제안된 측위 기법은 수신된 신호의 주파수만으로도 거리의 변화율에 대한 정보를 획득할 수 있기 때문에, 신호 구조에 대한 세부 정보 없이도 적용이 가능하다. LEO 위성의 중심 주파수나 변조 방식 등 일부 정보만 제한적으로 공개되고 있는 현 상황에서, 고정밀 동기화가 선행되어야 하는 기존 위성 기반 측위 알고리즘의 한계점을 극복할 수 있다는 큰 장점을 가진다. 특히, 위성의 궤도 정보와 결합하여 도플러 천이를 분석하면, 단일 위성만으로도 UE의 위치를 추정할 수 있다 [2].

본 논문에서는 [2]의 제안 기법인 단일 LEO 위성 기반의 RTT 및 도플러 천이 측정값을 동시에 활용한 위치 추정 방식의 측정 오차에 따른 측위 성능의 실용성을 평가한다. 특히, 본 논문에서는 기존 연구 [2]에서 가정하지 않았던 제안 기법 수행 시점 및 UE 이동성 변화를 추가 고려하고 측정 오차에 따른 측정값의 기하학적 교차 범위를 분석한다.

II. 본 론

II-1. 시스템 모델

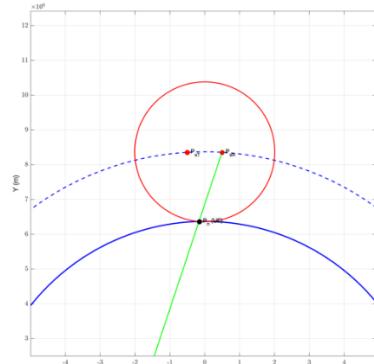


그림 1. ECEF 좌표계를 고려한 시스템 모델

본 논문에서는 단일 LEO 위성이 도플러 천이 및 RTT를 측정한다고 가정한다. 또한 2 차원 기하 기반 시스템 모델을 고려하고 측정값을 기반으로 지표면 상에 존재하는 UE의 위치를 추정한다.

그림 1에서 볼 수 있듯, 지구 중심을 원점으로 하는 Earth centered earth fixed (ECEF) 좌표계의 xy 평면에 위성과 UE가 모두 존재하며, 위성의 궤도 또한 해당 평면 상에 존재한다. 이에 따라 z 축은 고려하지 않으며, UE가 위성을 바라볼 때 maximum elevation angle은 90° 이다. 지표면 상에 존재하는 UE는 점 $P_n = (x_n, y_n)$ 에 위치하며, LEO 위성은 송신 시점 t_T 및 수신 시점 t_R 에 각각 $P_{s,T} = (x_{s,T}, y_{s,T})$ 및 $P_{s,R} = (x_{s,R}, y_{s,R})$ 에 위치한다. 위성은 자신의 궤도면을 따라 일정한 속도로 이동하며, 위성의 궤도 정보는 시스템에 이미 알려져 있다고 가정한다.

II-2. 도플러 및 RTT 측정에 대한 기하 모델링

본 절에서는 [2]의 프레임워크를 따라 도플러 및

도플러 삼각형, 그리고 RTT 및 RTT 타원에 대한 기하 모델을 제시한다.

위성은 시점 t_r 에 수신 신호의 도플러 주파수 f_D 를 측정하며, 이는 UE의 위성에 대한 상대속도에 비례한다. f_D 에 대응하는 도플러 삼각형은 $P_{s,R}$ 을 꼭짓점으로 간주하고 위성 운동 방향으로부터 $\alpha_D = \frac{\pi}{2}(1 - \frac{f_D}{f_{max}})$ 만큼 기울어진 선을 따라 형성되며, xy 평면에서 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} & |(x - x_{s,R}) \cos \alpha_s + (y - y_{s,R}) \sin \alpha_s| \\ & + \left((y - y_{s,R}) \cos \alpha_s - (x - x_{s,R}) \sin \alpha_s \right) \cot \left(\frac{\pi f_D}{2 f_{max}} \right) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

이는 도플러 주파수 측정값이 일정한 지점들로 이루어진 경계 조건을 나타내며, 실제 UE의 위치는 지구와 RTT 타원과 도플러 삼각형 경계선이 교차하는 점으로 제한된다.

위성의 송신 신호를 수신한 UE는 수신 신호를 처리하고 난 후 응답 신호를 위성에 다시 전송하며, 이때 신호 처리 지연 시간은 t_{pr} 이다. UE의 응답 신호를 수신한 위성은 t_{pr} 를 고려한 RTT를 계산하며, 이는 다음과 같다.

$$t_{RTT} = t_R - t_T - t_{pr} \quad (2)$$

수식 (2)를 통해 위성 및 UE 간 왕복 거리 계산이 가능하며, 이는 두 위성의 위치 $P_{s,T}, P_{s,R}$ 을 초점으로 갖는 타원으로써 표현된다. 위성 궤도운동 기반으로 회전각 α_s 을 결정하고 중심 (x_0, y_0) 을 기준으로 α_s 만큼 회전된 타원 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{(x - x_0) \cos \alpha_s + (y - y_0) \sin \alpha_s}{a} \right)^2 \\ & + \left(\frac{-(x - x_0) \sin \alpha_s + (y - y_0) \cos \alpha_s}{b} \right)^2 = 1 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 장축과 단축은 각각 $a = \frac{d_{RTT}}{2}$, $b = \sqrt{a^2 - c^2}$ 이다.

II-3. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 도플러 및 RTT 측정 기반 측위 성능을 분석한다. II-2 절에서 제시된 기하 모델링을 기반으로, 측정 오차 σ_f 에 따라 변형된 도플러 삼각형 및 RTT 타원과 지표면 간 교차 범위가 그림 2와 그림 3에 각각 제시되었다. θ_s 는 $P_{s,R}$ 이 y 축과 이루는 각이며, 동일 측정 오차 하에서도 θ_s 에 따라 교차 범위가 달라진다. 지구의 반지름은 $R_E = 6371\text{km}$, 위성의 고도는 2000km로 설정하였다. 또한, RTT 측정 오차는 $\sigma_t = 20 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 이다. 시뮬레이션 결과는 측정값의 오차가 커질 수록 교차 범위가 길어지는 것을 보여준다. 교차 범위가 길수록, 기하 모델과 오차 기반의 최대 우도 함수를 적용할 때 UE 위치 추정 오차가 더 커질 수 있음을 시사한다 [3].

III. 결론

본 논문에서 위성과 UE가 정반대의 이동성을 가지고 있을 때, 측정값의 오차에 따라 추정 위치의 오차가 커질 수 있음을 확인하였다. 특히, 위성과 UE 간 상대 위치에 따라 RTT 타원과 도플러 삼각형의 교차 범위가 달라지며, 이로 인해 교차 범위의 크기가 크게 변화하는 것을 관찰하였다. 이는 RTT 및 도플러 주파수 측정의 정확도 뿐만 아니라, 위성과 UE의 궤도상 위치와 타원과 삼각형의 배치가 위치 추정의 신뢰도에 중대한 영향을 미친다는 것을 의미한다. 민간 및 국방 분야 모두에서 유용하게 활용될 수 있다. 민간에서는 재난 대응, 원격

지역 내 자율 이동체 운영 등에 적용 가능하며, 국방에서는 GNSS가 제한되거나 교란된 상황에서도 보완적 위치 정보를 제공할 수 있다.

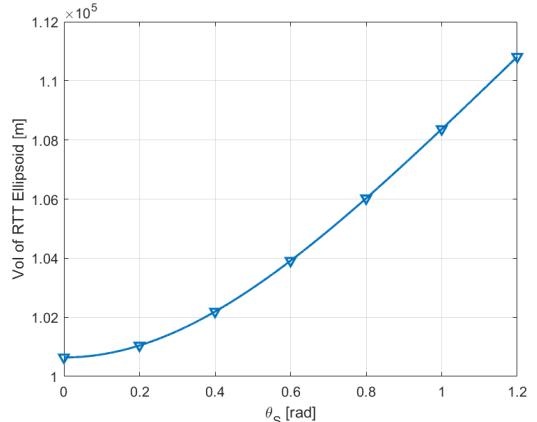


그림 2. RTT 타원과 지표면 교차 범위 변화 양상

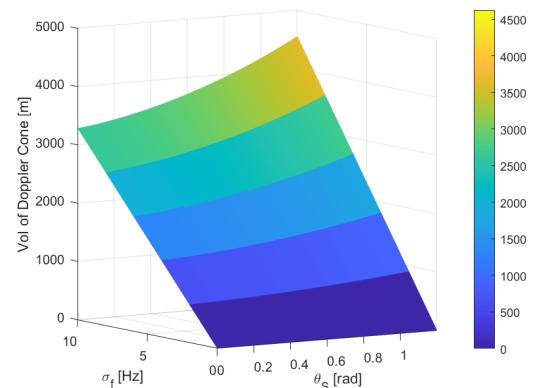


그림 3. 도플러 삼각형 및 지표면 교차 범위 변화 양상

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] D. Yang, J. Kang, M. Jeong and S. Kim, "RTT-Enabled Doppler Positioning in LEO-PNT Systems," *J. Positioning, Navigation, and Timing*, vol. 13, no.3, pp. 301-307, Sep. 2024.
- [2] S. J. Nawaz, E. Cianca, T. Rossi and M. De Sanctis, "Round Trip Time (RTT) and Doppler Measurements for IoT Localization by a Single-Satellite," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 28, no. 3, pp. 528-532, Mar. 2024.
- [3] I. S. Mohamad Hashim and A. Al-Hourani, "Satellite-Based Localization of IoT Devices Using Joint Doppler and Angle-of-Arrival Estimation," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 23, p. 5603, Dec. 2023.