

LEO-PNT 시스템 RTT 및 도플러 측정값을 이용한 샘플링 기법 기반 측위 알고리즘

양두희, 강정완, 김선우

한양대학교 융합전자공학부

{yangdh95, rkdwjddhks77, remero}@hanyang.ac.kr

A Sampling Method Based Positioning Algorithm Using RTT and Doppler in LEO-PNT Systems

Duhui Yang, Jeongwan Kang, Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문에서는 LEO(Low Earth Orbit)-PNT(Positioning, Navigation and Timing)에서 RTT(Round Trip Time)와 도플러 측정값을 활용한 샘플링 기법 기반 측위 알고리즘을 제안한다. 도플러 천이는 그 향상된 활용성으로 인하여 LEO-PNT 시스템에서 주로 활용되고 있으며, 또한 저궤도 위성통신에서 RTT(Round Trip Time)의 활용 논의되고 있음에 따라 두 값을 적절히 활용한 측위 기법 연구가 필요하다. 본 논문은 단일 RTT와 다수의 도플러 측정값을 활용해 샘플링 기법을 통한 베이지안 추론으로 UE(User Equipment)의 위치를 추정한다. 수치 실험을 통하여 제안 기법을 검증하였으며, 제안 기법이 기존 기법 대비 측위 정확도 관점에서 성능 이득이 있음을 보였다.

I. 서론

최근 LEO(Low Earth Orbit)-PNT(Positioning, Navigation and Timing)는 LEO 위성의 장점인 강한 신호 세기와 만여개의 위성군 (Mega Constellation)로 인하여 기존 PNT의 보완 및 대체제로 떠오르고 있으며 특히 도플러 기반 LEO-PNT 시스템 연구가 위성 이동성 향상에 따른 활용성 증가로 인하여 활발히 이뤄지고 있다 [1]. 또한, 위성 통신 환경에서 RTT(Round Trip Time)의 활용이 논의되고 있으며 이에 따른 두 측정값을 활용한 측위 연구가 필요하다 [2]. 본 논문에서는 도플러 측정값과 단일 RTT값을 이용한 샘플링 기법 기반 측위 알고리즘을 제안한다. 샘플링 기법을 통한 베이지안 추정을 통하여 UE(User Equipment)의 위치를 추정하며 수치 실험을 통하여 제안 기법이 성능 이득이 있음을 보인다.

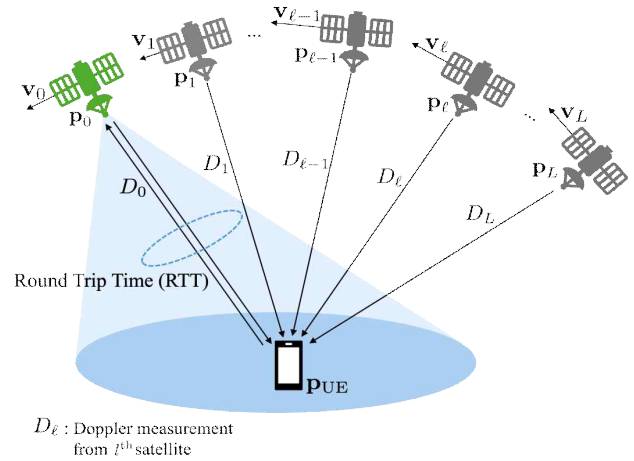


그림 1 단일 RTT와 다중 도플러 측정값 활용 측위 시나리오

II. 시스템 모델

본 논문에서는 ECEF (Earth Center Earth Fixed) frame을 따르며 고려하고자 하는 상황은 그림 1과 같다. 속도가 $\mathbf{v}_0 = [v_{0,x}, v_{0,y}, v_{0,z}]^T$ 인 통신위성 $\mathbf{p}_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$ 와 고정된 UE $\mathbf{p}_{UE} = [x_{UE}, y_{UE}, z_{UE}]^T$ 가 통신 중이다. 이에 따라 UE는 해당 위성으로부터 RTT τ_{RTT} 를 측정할 수 있으며 측정된 RTT를 통하여 해당 위성과의 거리 r_0 를 얻는다. 이는 다음과 같다.

$$r_0 = c\tau_{RTT}/2 = \|\mathbf{p}_0 - \mathbf{p}_{UE}\| + c\delta_{atmos} + \epsilon_{RTT} \quad (1)$$

여기서 $c = 3 \cdot 10^8$ m/s는 빛의 속도이며, $\epsilon_{RTT} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{RTT}^2)$ 를 따르는 RTT 측정 잡음이다. δ_{atmos} 는 대기권 지연으로 보정 가능함을 가정한다.

통신을 진행하고 있는 위성을 포함하여 l^{th} 위성 ($l \in \{0, 1, \dots, L\}$) $\mathbf{p}_l = [x_l, y_l, z_l]^T$ 로부터 도플러 측정값 D_l 을 얻을 수 있다. 이를 변환하여 pseudorange rate 측정값 $\dot{\rho}_l$ 를 얻으며, 이는 다음과 같다.

$$\dot{\rho}_l = f_l(\mathbf{p}_{UE}, \dot{\delta}_{clk, UE}, \dot{\delta}_{clk, l}) + \lambda_{fc} \epsilon_l \quad (2)$$

여기서 $\epsilon_l \sim \mathcal{N}(0, \sigma_l^2)$ 는 도플러 천이의 측정 잡음이며 $\lambda_{fc} = c/f_c$ 는 중심 주파수 f_c 에 따른 진폭이다. 또한 $f_l(\mathbf{p}_{UE}, \dot{\delta}_{clk, UE}, \dot{\delta}_{clk, l})$ 은 다음과 같다.

$$f_l(\mathbf{p}_{UE}, \dot{\delta}_{clk, UE}, \dot{\delta}_{clk, l}) = \frac{\mathbf{v}_l^T(\mathbf{p}_{UE} - \mathbf{p}_l)}{\|\mathbf{p}_{UE} - \mathbf{p}_l\|} + c(\dot{\delta}_{clk, UE} - \dot{\delta}_{clk, l}) \quad (3)$$

이때, $\dot{\delta}_{clk, UE}$ 는 UE의 clock drift, $\dot{\delta}_{clk, l}$ 은 l^{th} 위성의 clock drift이다. (1)-(3)에 의하여 RTT 측정값을 통한 측정 거리 r_0 의 우도함수 $p(r_0|\mathbf{p}_{UE})$ 와 도플러 측정값을 통한 pseudorange rate $\dot{\rho}_l$ 의 우도함수 $p(\dot{\rho}_l|\mathbf{p}_{UE}, \dot{\delta}_{clk, UE}, \dot{\delta}_{clk, l})$ 는 다음과 같다.

$$p(r_0|\mathbf{p}_{UE}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{RTT}^2}} \exp\left(-\frac{(r_0 - \|\mathbf{p}_0 - \mathbf{p}_{UE}\|)^2}{2\sigma_{RTT}^2}\right), \quad (4)$$

$$p(\dot{\rho}_\ell | \mathbf{p}_{\text{UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, } \ell}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\ell^2}} \exp\left(-\frac{(\dot{\rho}_\ell - f_\ell(\mathbf{p}_{\text{UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, } \ell}))^2}{2\sigma_\ell^2}\right). \quad (5)$$

IV Sampling 기법 기반 측위 기법

본 논문에서는 MCMC (Markov Chain Monte Carlo) 계열의 샘플링 기법 중 하나인 MH (Metropolis Hastings) 기법을 기반으로 한 베이저안 추론으로 UE 위치 측위를 진행한다. 베이저안 추론을 위하여, 미지수인 $\mathbf{p}_{\text{UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, } \ell}$ 의 사전 확률 분포는 균일 분포로 가정한다. 이에 따라서, 사후확률 분포 $p(\mathbf{p}_{\text{UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, } 0:L} | r_0, \dot{\rho}_{0:L})$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$p(\mathbf{p}_{\text{UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, } 1:L} | r_0, \dot{\rho}_{0:L}) \propto \frac{p(r_0 | \mathbf{p}_{\text{UE}}) \prod_{\ell=0}^L p(\dot{\rho}_\ell | \mathbf{p}_{\text{UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, } \ell})}{p(r_0, \dot{\rho}_{0:L})} \quad (6)$$

사후확률 분포의 유도가 어려움에 따라, MH 기법을 통하여 사후확률 분포를 근사한다 [3]. MH 기법은 다음과 같이 진행된다. 근사하고자 하는 확률분포의 분자인 $h(\mathbf{x}) = p(r_0 | \mathbf{p}_{\text{UE}}) \prod_{\ell=0}^L p(\dot{\rho}_\ell | \mathbf{p}_{\text{UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, } \ell})$ 에 대하여 미지수 \mathbf{x} 에 대한 i^{th} 사전 제안 값인 $\mathbf{x}^{(i)}$ 와 $\mathbf{x}^{(i)}$ 를 평균으로 하는 제안 분포에서 추출한 샘플 \mathbf{x}^* 를 다음 수식을 통하여 비교한다.

$$A < \min\left(\frac{h(\mathbf{x}^*)}{h(\mathbf{x}^{(i)})}, 1\right) \quad (7)$$

여기서 A 는 acceptance rate로 매 샘플 추출마다 균일 분포 $\mathcal{U}(0,1)$ 에서 추출된다. 만약 (7)이 참이라면 $\mathbf{x}^{(i)} = \mathbf{x}^*$ 로 갱신하고 해당 샘플을 저장한다. 이러한 과정을 총 M 번 반복한다.

이를 통하여 저장된 J 개의 샘플들 중 UE의 위치에 해당하는 원소만을 취한 벡터 $\hat{\mathbf{p}}_{\text{UE}, j}$ 집합 $\{\hat{\mathbf{p}}_{\text{UE}, j}\}_{j=1}^J$ 에 대하여 샘플 평균 및 분산을 구하여 사후 확률분포 $p(\mathbf{p}_{\text{UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, UE}}, \dot{\delta}_{\text{clk, } 0:L} | r_0, \dot{\rho}_{0:L})$ 의 평균 및 분산을 근사한다. 따라서 UE 위치의 추정값 $\hat{\mathbf{p}}_{\text{UE}}$ 는 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{p}}_{\text{UE}} = \sum_{j=1}^J \hat{\mathbf{p}}_{\text{UE}, j} \quad (8)$$

IV. 시뮬레이션 결과

수치실험을 통한 시뮬레이션을 진행하였으며 TLE (Two Line Element) file을 통해 얻은 스타링크의 궤도정보를 위성의 위치 및 속도정보로 사용하였다. 고정된 UE의 위치는 한양대 서울 캠퍼스로 가정하였다. 중심 주파수 f_c 는 스타링크의 중심 주파수 11.325 GHz로 하였으며 RTT 및 도플러 측정값의 오차 분산은 각 $\sigma_{\text{RTT}}^2 = 1\text{m}^2$ 와 $\sigma_\ell^2 = \sigma^2 = 0.1\text{Hz}$ ($\forall \ell$)로 하였다 [4]. 또한 RTT의 대기권 오차는 보정 가능함을 가정하였다. 도플러 기반 Newton 기법으로 MH 기법의 초기값을 설정하였으며 이에 따라 Newton method와 제안 기법 간의 2D position error의 평균 $\mathbf{E}(\|\mathbf{p}_{\text{UE}, 1:2} - \hat{\mathbf{p}}_{\text{UE}, 1:2}\|)$ 을 위성 수 L 및 반복 횟수 M 별 비교하였다 [4].

위성 수 L 에 따른 성능은 그림 2와 같다. 제안 기법 (Newton-MH)가 Newton 기법 대비 평균 3.82m²의 성능 이득을 보였으며 고려한 전체 위성 수에서 유사한 추세를 보였다. 또한, 위성 수가 증가할수록 성능

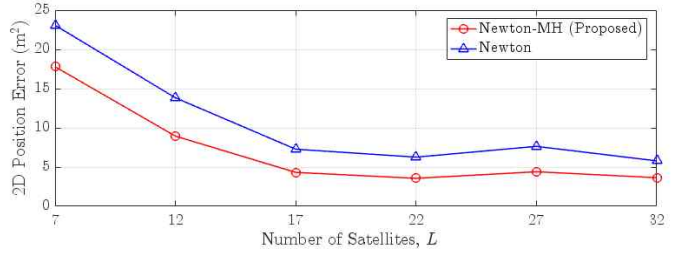


그림 2 위성 수 별 기법 간 2D position error 비교

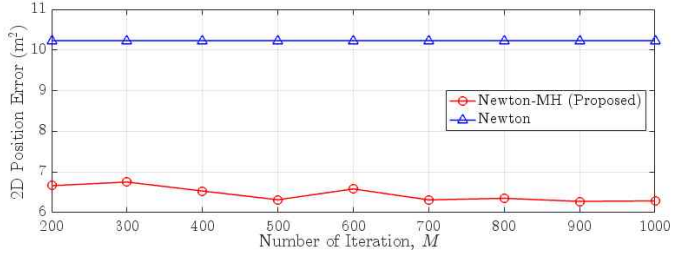


그림 3 MH 기법의 iteration 수 M 에 따른 2D position error 비교

감소 추세가 줄어들어 가는 것을 확인하였다. 그림 3은 위성 수 L 이 17일 때 MH 기법의 반복 수 M 에 따른 2D position error이다. M 이 200 이후부터 500까지 1미터 이내의 오차 감소 추세를 보이나, 그 이상의 반복 횟수부터 비교적 유사한 성능을 보였다.

V. 결론

본 논문에서는 LEO-PNT 시스템에서 단일 RTT와 다중 도플러 측정값을 활용한 샘플링 기법 기반 측위 기법을 제안하였다. MH 샘플링 기법을 통하여 사후확률 분포를 근사하여 UE의 위치를 추정하였으며, 초기값은 도플러 기반 Newton 기법을 통해 얻었다. 수치 실험 결과 제안 기법이 고려한 위성 수에 대하여 Newton 기법 대비 평균 3.82m²의 성능 이득이 있음을 확인하였다. 추후 연구로써 위성 오차의 통계적 특성을 고려한 베이저안 기반 위치 측위 및 음영지역이 심한 deep urban canyon 환경에서 강인한 측위 기법 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. No. NRF-2023R1A2C3002890).

참고 문헌

- [1] R. M. Ferre, E. S. Lohan, H. Kuusniemi, J. Praks, S. Kaasalainen, C. Pinell, and M. Elsanhoury, "Is LEO-Based Positioning with Mega-Constellations the Answer for Future Equal Access Localization?," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 60, no. 6, pp. 40–46, June 2022.
- [2] S. J. Nawaz, E. Cianca, T. Rossi, and M. De Sanctis, "Round Trip Time (RTT) and Doppler Measurements for IoRT Localization by a Single-Satellite," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 28, no. 3, pp. 528–532, Mar. 2024.
- [3] C. Andrieu, N. de Freitas, A. Doucet, and M. I. Jordan, "An introduction to MCMC for machine learning," *Mach. Learn.*, vol. 50, no. 1, pp. 5–43, 2003.
- [4] C. Shi, Y. Zhang, and Z. Li, "Revisiting Doppler positioning performance with LEO satellites," *GPS Solut.*, vol. 27, no. 126, May 2023.