

저궤도 위성 Geolocation 기술 동향 조사

정홍석, 박현우, 김선우

한양대학교 융합전자공학과

{hssjung, stark95, remero}@hanyang.ac.kr

A Survey of Geolocation Technology on Low-Orbit Satellite

Hongseok Jung, Hyunwoo Park, and Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

요약

저궤도 위성은 정지궤도, 중궤도 위성보다 상당히 낮은 고도에 위치하여 신호 전송 지연 시간이 적은 장점으로 더 정확한 위치 추정이 가능하다. 대표적으로 지상 단말 측위에 global navigation satellite system (GNSS)를 사용하지만, GNSS가 탑재되지 않은 단말의 측위가 어려운 상황에서 신호 기반 측위 방법인 geolocation은 다수 위성에서 수신받은 신호로부터 신호원의 위치를 추정하는 방법이다. 본 논문은 저궤도 위성 환경에서 geolocation 기술에서 사용하는 매개변수 Doppler shift, time difference of arrival (TDOA), frequency difference of arrival (FDOA)를 설명하며, 위치 추정 방법으로 algebraic solution, Bayesian filter을 설명한다.

1. 서론

최근 저궤도 위성을 이용하는 글로벌 위성 인터넷 서비스 구축을 목표로 하는 민간 기업의 출현으로 우주 통신 업계에 변혁이 진행되고 있다. 저궤도 위성은 중궤도, 정지궤도 위성보다 설계, 제조 시설의 간편으로 대량 생산 및 발사 비용이 적은 이점을 가진다. 특히, 저궤도 위성을 이용한 위치 추정은 고도가 높은 정지궤도, 중궤도 보다 신호 도달 지연 시간이 적어 향상된 추정 정확도를 기대할 수 있다. 현재 지상 단말 측위는 global navigation satellite system (GNSS)가 대표적으로 사용되지만, GNSS 미탑재 단말은 GNSS 기반 측위가 어려워 다수 위성에서의 수신신호를 기반으로 위치를 추정하는 geolocation 기술 사용이 가능하다. 본 논문은 저궤도 위성 환경에서 geolocation 기술 동향을 조사하고 기법들을 소개한다.

2. Doppler shift 기반 geolocation

저궤도 위성 환경에서 Doppler shift를 이용하는 geolocation이 가능하다. 저궤도 위성의 Doppler shift 기반 geolocation에는 3개 이상의 저궤도 위성이 필요하며, 위성 수가 많을수록 정확도가 향상된다. Doppler shift는 신호 송신단과 수신단의 상대적인 거리와 속도 차이이며, 수신단은 진동수와 파장의 변화로 Doppler shift를 측정할 수 있다. 수신단에서의 Doppler shift 모델은 다음과 같다[1].

$$\dot{r}_{k,i} = \left(\frac{f_0}{c} \right) \left(\frac{(\dot{\mathbf{x}}_k - \dot{\mathbf{s}}_{k,i})^\top (\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_{k,i})}{\|\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_{k,i}\|} \right) + n_{k,i} \quad (1)$$

여기서 f_0 은 반송 주파수, c 는 빛의 속도, \mathbf{x}_k 는 신호원 위치 벡터, $\dot{\mathbf{x}}_k$ 신호원 속도 벡터이며, i 번째 수신기 위치 벡터는 $\mathbf{s}_{k,i}$, 속도 벡터는 $\dot{\mathbf{s}}_{k,i}$ 이다. [1]논문에서는 저궤도 위성에서 Doppler

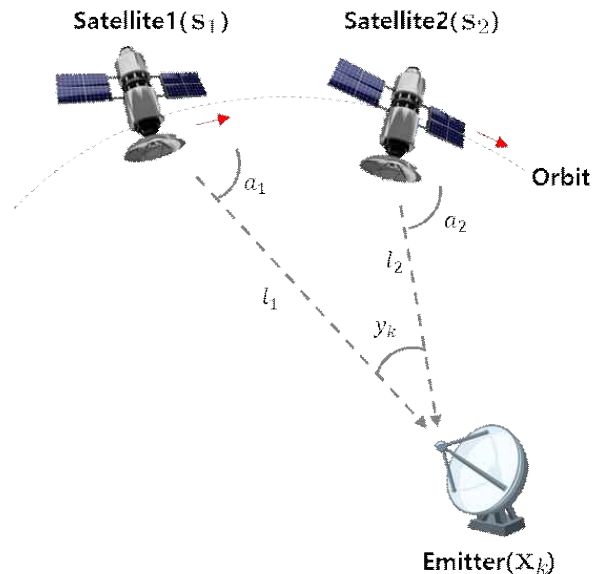


그림 1 Algebraic solution을 이용한 geolocation

측정값을 사용하여 algebraic solution 방법으로 신호원 위치 추정하는 방법을 제안한다. Algebraic solution은 closed form 방법으로서 방정식의 해를 해석적으로 표현하는 문제 해결 방법이다.

3. TDOA/FDOA 기반 geolocation

다수 저궤도 위성 환경에서 위치 추정 정확도 향상을 위하여 최근 time difference of arrival (TDOA)/frequency difference of arrival (FDOA) 측정값을 사용하는 geolocation 연구 또한 활발하다. TDOA는 다수 위성에 수신된 신호의 도착시간(time of arrival, TOA)의 차이로 이를 활용하여 정지한 물체의 정밀 위치 추정이 가능하다. TOA 모델은 식(2), 그리고 TDOA 모델은 식(3)과 같다.

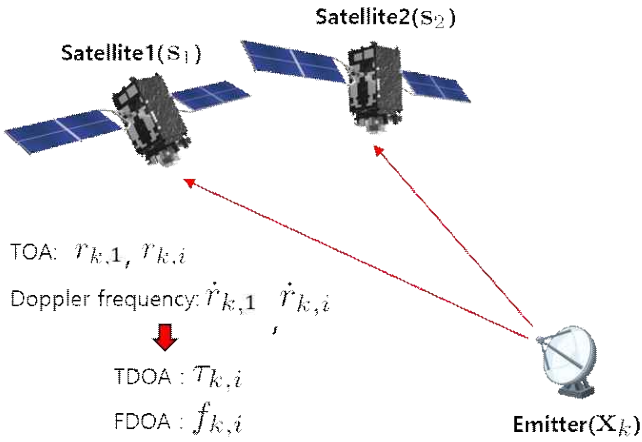


그림 2. TDOA/FDOA를 사용한 geolocation

$$r_{k,i} = \frac{1}{c} (\|\mathbf{x}_k - \mathbf{s}_{k,i}\|) + n_{k,i} \quad (2)$$

$$\tau_{k,i} = r_{k,i} - r_{k,1} \quad (3)$$

FDOA는 다수 위성에서 수신한 Doppler shift 측정값 차이로 이를 활용하여 이동하는 물체의 정밀 위치 추정이 가능하다. 위성에서 수신한 FDOA 모델은 식(1)에서 보이는 Doppler shift의 차이로서 다음과 같다.

$$\dot{f}_{k,i} = \dot{r}_{k,i} - \dot{r}_{k,1} \quad (4)$$

TDOA와 FDOA를 함께 사용하면 정지하거나 이동하는 물체를 더욱 정밀한 geolocation이 가능하지만, 거리와 속도에 따라서 측정값이 변하는 비선형성이 존재하여 이를 고려하는 추정 알고리즘이 요구된다. [2]에서는 TDOA/FDOA 비선형성을 고려하여 Gauss Hermite filter를 사용하는 UAV 위치 추정 연구를 제안한다. Gauss Hermite filter는 Bayesian filter 중 하나로서 비선형 함수를 선형화하는 방법으로 위치를 추정한다.

4. Single Satellite geolocation

앞서 다수의 위성 환경에서의 geolocation 기술을 소개했다. 하지만, 우주 공간에서 다수 위성을 찾기 어려운 환경을 고려하여 하나의 위성을 사용하는 geolocation 연구[3]가 존재한다. 단일 저궤도 위성 환경에서는 정확한 위치 좌표가 알려진 다수의 지상 reference station이 요구된다. 저궤도 위성은 각 reference station과 target으로부터 신호를 동일 시간에 수신받아 Doppler shift, 혹은 TDOA/FDOA 매개변수를 계산하고, least square(LS) 방법을 사용하여 단일 위성 환경에서 신호원의 위치를 추정하는 방법을 제안했다.

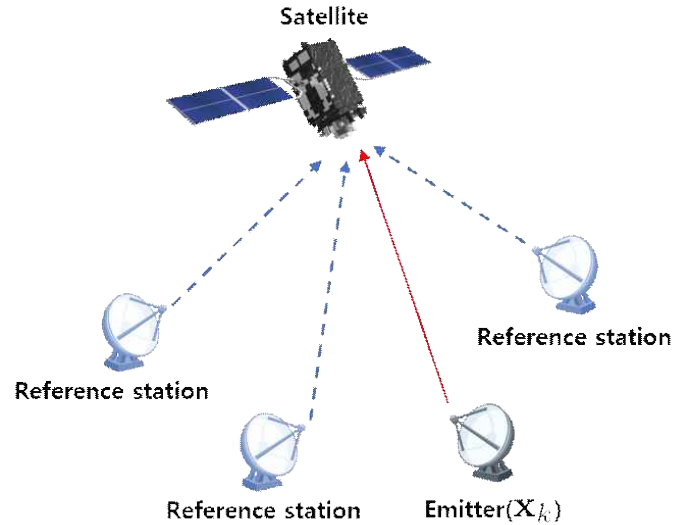


그림 3. 단일 위성 환경 reference station을 이용한 geolocation

5. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성 환경에서 geolocation 기술 연구 동향을 소개한다. 지상의 위치를 추정하기 위하여 인접한 다수의 위성이 필요하다. 또한 geolocation을 위한 매개변수는 위성에서 수신받은 신호의 Doppler shift, TDOA, FDOA가 사용되며, 추정 방법으로 algebraic solution, Gauss Hermite filter, LS 기법이 제안되었다. 또한, 하나의 위성을 사용하는 geolocation 기술을 소개한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 4단계 두뇌한국21 사업(4단계 BK21 사업)에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- [1] N. H. Nguyen and K. Doğançay, "Algebraic solution for stationary emitter geolocation by a LEO satellite using Doppler frequency measurements," IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. (ICASSP), 2016.
- [2] J. Zhao, L. Li and Y. Gong, "Joint Navigation and Synchronization in LEO Dual-Satellite Geolocation Systems," in IEEE Veh. Technol. Conf., 2017.
- [3] C. Hao, D. Feng, Q. Zhang and X. -G. Xia, "Interference Geolocation in Satellite Communications Systems: An Overview," in IEEE Veh. Technol. Mag., 2021.
- [4] P. Ellis, D. V. Rheeden and F. Dowla, "Use of Doppler and Doppler Rate for RF Geolocation Using a Single LEO Satellite," in IEEE Access, 2020.