

Proof-of-Stake 합의를 이용한 이종 위성체계 간 협력적 시간 동기화 방법

장용훈, 김건, 이상현
고려대학교

{disclose, imgunkim99, sanghyunlee} @korea.ac.kr

Real-Time Dynamic Routing for LEO Satellite Networks via Blockchain Smart Contracts

Yong Hun Jang, Gun Kim, Sang Hyun Lee
Korea Univ.

요약

전 세계적으로 저궤도(LEO) 위성 도입이 빠르게 늘고 있다. 지구 전역 초고속 인터넷, 재난통신 백업, 정밀 관측, 6G 비지상망(NTN) 등의 수요가 커지면서, 수백·수천 기 규모의 별자리가 동시에 운영되는 시대가 되었다 [2][4][5]. 하지만 위성끼리 서로 보이는 시간이 짧고, 상대속도가 빨라 도플러가 크게 나타나 GNSS나 지상국에만 기대어 시간(시각)을 맞추기 어렵다 [2]. 따라서 위성들끼리 직접 시각을 주고받아 맞추는 분산 동기화가 필요하다 [3]. 본 논문은 이웃 위성과의 양방향 시간 교환(TWTT)으로 지역(Local) 시각을 보정하고, 그 품질을 점수화한 크레딧(신뢰도)을 PoS(Proof-of-Stake) 합의의 스테이크로 사용해 전역(Global) 기준시각을 정하는 방법을 제안한다 [1]. 더 나아가 서로 다른 운영자(다중 소유자) 사이에서도 대표 위성끼리 크레딧을 교환해 마치 하나의 가장 클러스터처럼 빠르게 기준시각에 수렴하도록 한다 [5]. 목표는 전역 RMS 오프셋 최소화, 빠른 수렴, 링크 비대칭·손실에 대한 강건성, 그리고 온체인 메타데이터 최소화다 [4][5]. 이 구조를 경량 PoS 기반 프라이빗 체인으로 실제 구현하고(온체인: 요약 통계·서명, 오프체인: TWTT 로그), 디지털 트윈·HIL 환경에서 검증한 결과 전역 RMS 오프셋과 수렴 시간이 유의하게 개선되고, 합의 지연과 온체인 오버헤드가 실시간 운영 범위 내에 있음을 확인하였다.

I. 서론

LEO 별자리는 저지연 통신과 전지구 서비스 실현을 위해 적극 도입되고 있다. 그러나 실제 운영에서는 두 가지 어려움이 뚜렷하다. 첫째, 궤도면이 다른 위성끼리 연결되는 인터플레인 ISL은 서로 보이는 시간이 짧아 링크가 자주 열리고 닫힌다. 둘째, 위성의 상대속도가 커서 도플러가 크게 변하고, 전파 경로도 자주 바뀐다 [2][4]. 이런 상황에서는 지상국을 통한 정기 보정이나 GNSS 만으로는 원하는 수준의 시간 정합을 계속 유지하기가 쉽지 않다. 결국 위성-위성만으로 공통 기준시각을 만들고 유지하는 완전 분산형 동기화가 현실적인 해법이 된다 [3].

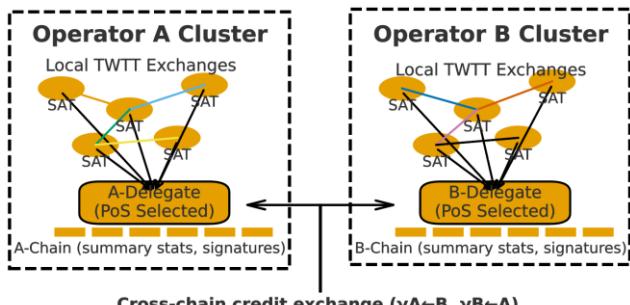


그림 1 이종 운영자 간 크로스체인 크레딧 교환 구조

이 논문은 그 요구에 맞춰 두 단계를 결합한다. 지역(Local) 단계에서는 이웃 위성과 간단한 왕복 패킷 교환으로 서로의 시각 차이를 재고(TWTT), 여러 이웃의 결과를 이상치에 덜 흔들리는 결합(가중 중앙값, Huber-M 등)으로 합쳐 내 시계를 안정적으로 보정한다. 전역(Global) 단계에서는 각 위성이 최근 성능을 근거로 얻은 크레딧(신뢰도 점수)을 스테이크처럼 사용하여 PoS 합의로 대표 위성을 뽑고, 대표가 모은 값을 다시 강건하게 합쳐 전역 기준시각을 만든다 [1]. 실제 네트워크는 여러 회사·기관이 각각의 별자리를 운영하는 다중 소유자 구조이므로, 대표 위성끼리 서로 정밀도 주장을 가볍게 검증하고 그 품질을 환율(γ)로 환산해, 상대의 크레딧 일부를 내 합의에도 반영한다. 이렇게 하면 서로 다른 별자리도 하나의 가장 클러스터처럼 빨리 같은 기준시각으로 모일 수 있다 [5]. 전반적인 설계는 조밀한 LEO 환경과 공존 이슈까지 고려해 지연·부하를 억제하도록 만들었다 [4].

그림 1은 서로 다른 운영자(Operator A, B)의 위성 클러스터가 각자 내부적으로 TWTT 기반 지역 동기화를 수행한 뒤, 대표(delegate) 위성을 통해 품질 크레딧을 교환함으로써 하나의 가장 클러스터처럼 전역 기준시각에 수렴하는 구조를 보여준다.

II. 본론

지역 단계에서 사용할 기본 관계는 다음과 같다. 이 관계를 통해 상대 시간차와 평균 지연을 간단히 계산하고, 링크가 열릴 때마다 반복 적용한다 [3].

$$\hat{\theta}_{i \leftarrow j} = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2}, \quad \hat{\delta}_{ij} = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2} \quad (1)$$

지역 보정 과정에서의 단기 변화는 아래의 간단한 상태 전이로 표현한다. 이는 소프트웨어 필터링과 예측 단계에 직접 쓰인다 [3].

$$X_i(k) = \Phi X_i(k-1) + W_i(k), \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \frac{\tau^2}{2} \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여러 이웃으로부터 얻은 보정량은 평균 대신 다음 기준으로 결합한다. 이 기준은 이상치에 둔감하여 짧은 가시창, 급격한 지역 변동에도 안정적으로 동작한다 [2][3].

$$t_{\text{ref}} = \arg \min_t \sum_j w_j \rho(\hat{\theta}_j - t) \quad (3)$$

지역 단계의 성과는 아래 규칙으로 점수화해 누적 관리한다. 정확·안정·가용할수록 점수가 커지며, 과거 정보와 적절히 혼합해 급변 상황에서도 과도한 진동을 줄인다 [1][5].

$$\tau_j^{(t+1)} = \alpha \tau_j^{(t)} + (1 - \alpha) g(\sigma_{\theta,j}^{-2}, \text{jitter}_j^{-1}, 1 - \text{loss}_j) \quad (4)$$

전역 단계에서는 다음 규칙에 따라 대표를 제안·선출한다. 이 규칙은 점수가 높을수록 제안 확률이 커지도록 해 자연스럽게 품질 좋은 노드가 전역 기준 형성에 기여하게 한다 [1].

$$p_i = \frac{\tau_i}{\sum_{k \in C} \tau_k} \quad (5)$$

서로 다른 운영자 간에는 아래의 조정 규칙을 적용한다. 대표끼리 교환한 품질 주장 요약을 가볍게 검증하고, 품질에 비례한 환율과 외부 반영율로 상대 점수 일부를 한시 반영함으로써, 가상 클러스터처럼 함께 수렴하도록 만든다 [5].

$$\tilde{\tau}_i^{(A)} = \tau_i^{(A)} + \beta \sum_{B \neq A} \gamma_{A \leftarrow B} \tau_i^{(B \rightarrow A)}, \quad p_i^{(A)} = \frac{\tilde{\tau}_i^{(A)}}{\sum_{k \in C} \tilde{\tau}_k^{(A)}} \quad (6)$$

온체인에는 표본 수, 분산, 요약 해시, 서명 등 최소 메타데이터만 기록하고, 원시 기록은 체인 밖에서 관리해 네트워크·저장 부담을 줄인다 [1][5].

그림 2는 지역 TWTT 만 적용한 경우보다, PoS 기반 전역 합의 및 크로스체인 크레딧 교환을 함께 적용할 때 전역 RMS 오프셋이 더 빠르고 안정적으로 수렴함을 보여준다. 평가는 전역 오차, 안정도, 수렴 라운드 수, 링크 비대칭·손실 강건도, 합의 지역, 블록당 온체인 기록 크기로 구성했다. 디지털 트윈·HIL 검증에서, 결합 기준(식 (3))은 평균 대비 전역 오차 분산을 효과적으로 낮췄고, 점수 누적 규칙(식 (4))은 급격한 품질 변화에서도 지분의 진동을 억제했다 [2][3][1]. 다중 소유자 환경에서는 조정 규칙(식 (6))을 통해 대표 제안 확률이 분산되어 과점이 줄고, 별자리 간 수렴이 빨라졌다 [4][5]. 지역은 후보·위원회 규모에 따라 증가했지만, 소수 후보·짧은 타임아웃·요약 온체인 원칙으로 실시간 운용 범위 내에서 제어 가능했다 [1][5].

III. 결론

결론적으로, 제안한 구조는 지상 의존 없이 LEO-LEO 만으로 전역 기준시각을 만들고 유지하는 실용적 방법이며, 실제 구현과 실험으로 목표 성능을 확인했다. 향후에는 환율 추정의 통계적 일관성, 비대칭 경로에서의

편향 상계, 외부 반영율·가중 상한·냉각 시간의 최적 설계가 남은 과제로 제시된다.

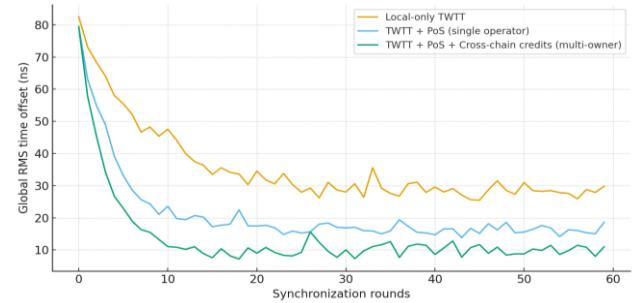


그림 2 동기화 라운드에 따른 전역 RMS 오프셋 비교

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No.2021-0-00467, 지능형 6G 무선 액세스 시스템, No. 2021-0-00260, 저궤도 군집 소형 위성 간 통신 기술 개발)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- Y. Xiao, N. Zhang, W. Lou and Y. T. Hou, "A Survey of Distributed Consensus Protocols for Blockchain Networks," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 2, pp. 1432–1465, Secondquarter 2020
- I. Leyva-Mayorga, B. Soret and P. Popovski, "Inter-Plane Inter-Satellite Connectivity in Dense LEO Constellations," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 20, no. 6, pp. 3430–3443, June 2021
- S. Liu, X. Guo, J. Lai and J. Yang, "Distributed Timekeeping in BeiDou Inter-Satellite Link Network," in IEEE Communications Letters, vol. 26, no. 12, pp. 3014–3018, Dec. 2022
- E. Kim, I. P. Roberts and J. G. Andrews, "Feasibility Analysis of In-Band Coexistence in Dense LEO Satellite Communication Systems," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 24, no. 2, pp. 1663–1677, Feb. 2025
- Y. Wang, Z. Su, J. Ni, N. Zhang and X. Shen, "Blockchain-Empowered Space-Air-Ground Integrated Networks: Opportunities, Challenges, and Solutions," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, no. 1, pp. 160–209, Firstquarter 2022