

블록체인 스마트 컨트랙트를 통한 저궤도 위성 실시간 동적 라우팅

장용훈, 김건, 이상현
고려대학교

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

Collaborative Time Synchronization between Heterogeneous Satellite Systems Using Proof-of-Stake Consensus

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

요 약

저궤도(LEO) 위성 성좌는 고속 궤도 이동에 따른 링크의 빠른 변화 특성 때문에, 고정된 라우팅 테이블이나 중앙집중형 제어에만 의존할 경우 실시간 상태 반영과 전역 일관성을 유지하기 어렵다. 특히 혼잡 상황에서는 경로 루프와 오실레이션이 쉽게 발생한다. 본 논문은 이러한 문제를 해결하기 위해, 위성 내에 블록체인 네트워크를 구성하고, 링크 상태와 정책 변화를 스마트 컨트랙트(SC)에 기록함으로써 성좌 전체에 신뢰 가능한 상태를 공유하며, 각 위성이 이를 구독하고 오프체인에서 즉시 경로를 재계산하는 이벤트-트리거드 라우팅 프레임워크를 제안한다. 핵심 아이디어는 인터플레인 링크를 동적으로 매칭하고, 경로 선택에서 지역 재계산을 통해 부하를 분산하며, 링크 상태나 정책 변화가 발생할 때 SC 규칙을 통해 자동으로 반응하는 구조를 갖는 것이다. 이 프레임워크는 Unity 기반 디지털 트윈 시뮬레이터에서 구현되었으며, 링크 품질의 시간적 변화와 혼잡 환경에서의 적응성과 자동화 성능을 실험적으로 검증하였다.

I. 서 론

6G 시대에는 비지상망(NTN)이 핵심 인프라로 편입되며, LEO 위성망은 지상의 백홀 보완과 커버리지 확장, 멀티캐스트 오프로딩 등에서 중요한 역할을 담당한다[4]. 하지만 고속 궤도 특성으로 인해 토폴로지가 지속적으로 변하고, ISL의 가용성도 시간에 따라 달라진다. 이로 인해, 정적 경로 테이블이나 중앙 집중 제어 방식은 동적 환경에 효과적으로 대응하기 어렵고, 링크 이상이나 트래픽 밀도 변화에 따라 경로 루프, 오실레이션, 재라우팅 지연이 발생할 수 있다[1], [2]. 본 논문은 상태와 정책을 블록체인의 스마트 컨트랙트(SC)로 동기화하고, 각 위성이 이를 구독한 뒤 오프체인에서 로컬 경로를 빠르게 재계산하는 이벤트 기반 라우팅 방식을 제안한다. 온체인에는 정책과 상태를 기록하고 집행하는 기능이 포함되며, 실제 경로 계산과 패킷 전달은 지연을 최소화하기 위해 오프체인에서 수행된다. 이를 통해 LEO 환경에서 전역 일관성을 유지하면서도 실시간성과 적응성을 확보할 수 있다.

II. 본론

제안하는 구조는 크게 온체인 계층과 오프체인 계층으로 나뉜다. 온체인 계층은 두 블록으로 구성된다. 첫 번째는 LinkState Registry로, 각 링크의 ID와 가중치, 상태, TTL, 버전을 저장함으로써 위성 전체가 공유할 수 있는 단일 진실(single source of truth)을 형성한다. 두 번째는 Policy Rules 블록으로, 혼잡 임계치, 우선순위, 히스테리시스 등 정책 조건을 정의하고 이벤트 발생 시 자동으로 규칙을 집행하고 알림을 발생시킨다. 이러한 블록체인 기반 처리의 합의 부담을 줄이기 위해 delegate 위성을 지정해 지역 이벤트를 배치로 처리하며, 필요시

우주 세그먼트-지상 세그먼트 간의 사이드체인을 통해 분산 합의도 수행할 수 있다[5]. 오프체인에서는 각 위성이 블록체인의 알림을 구독하고, 최신 정보를 기반으로 로컬 경로를 재계산한다. 초기 탐색 단계에서는 반복 사용된 링크의 비용을 인위적으로 증가시켜 경로 다양성을 확보하는 SIDA 방식을 활용하며, 혼잡이 발생한 경우에는 SSLB 기법을 통해 초과된 유량을 인접 노드로 분산시켜 계산량과 신호량을 증가시키지 않으면서도 트래픽 안정화를 도모한다. 핵심 변수는 시간에 따라 변하는 링크 가중치 (1)이며, 예를 들어 지연, 혼잡, 품질 요소를 단순 조합한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$w_e(t) = \alpha \frac{d_e(t)}{c} + \beta q_e(t) + \gamma \frac{1}{\text{SNR}_e(t)} \quad (1)$$

이때, 링크 상태가 급변하거나 용량이 임계치에 도달하면 이벤트 트리거 변수 (2)가 1로 설정되며 이는 다음과 같다.

$$\mathcal{E}_e(t) = \mathbf{1}(|w_e(t) - w_e(t^-)| \geq \theta_e) \vee \mathbf{1}(\text{cap}_e(t) \leq \tau_e) \quad (2)$$

delegate 위성이 이를 SC에 커밋하고, 해당 알림을 수신한 위성들은 곧바로 경로를 재계산한다. 전체 재라우팅 지연 ΔR 은 감지 지연, 커밋 지연, 전파 지연, 계산 지연의 합으로 구성되며 이는 (3)과 같이 수식화된다. 각 구간의 최적화가 전체 성능에 큰 영향을 미친다.

$$\Delta R = \Delta_{\text{detect}} + \Delta_{\text{commit}} + \Delta_{\text{notify}} + \Delta_{\text{recalc}} \quad (3)$$

ISL 수립은 두 단계로 진행된다. 1 단계에서는 시점 (t) 의 가시성 집합 (F(t)) 내에서 기대 전송률을 최대화하는 이진 매칭을 수행하며 이때 최적화 식은 다음과 같다.

$$\max_{\{x_{ij}\}} \sum_{(i,j) \in \mathcal{F}(t)} r_{ij}(t) x_{ij} \quad \text{s.t.} \quad \sum_j x_{ij} \leq Q_i, \sum_i x_{ij} \leq Q_j, x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (4)$$

이후 간섭 여부에 따라 무선 자원을 분배하는 2 단계로 넘어간다. 선택된 링크는 온체인 상태로 기록되어 전체 성과가 동일한 최신 정보에 기반해 경로를 결정할 수 있다.

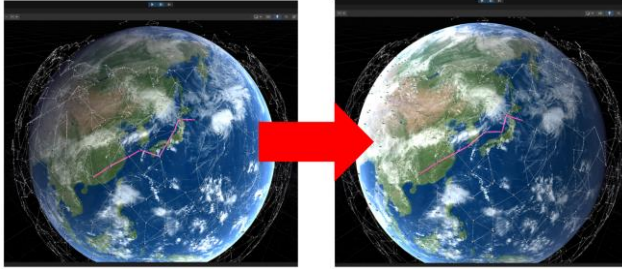


그림 1 제안된 스마트 컨트랙트 기반 저궤도 위성 라우팅 동작 예시

그림 1은 이처럼 제안된 스마트 컨트랙트 기반 프레임워크가 어떻게 링크 상태를 반영하여 재라우팅을 수행하는지를 시각적으로 설명한다. 초기 링크 상태에 따라 경로를 결정하고, 이후 정책 변화나 혼잡 발생 시 경로가 어떻게 동적으로 재계산되는지를 보여준다.

실험은 Walker 위성 성과와 TLE 기반 궤도 정보, 인터/인트라플레인 ISL, 교차링크 제약 등을 반영하였으며, 트래픽은 eMBB와 URLLC 유형을 혼합해 구성하였다 [4]. 비교군은 온체인을 사용하지 않는 기본 SIDA + SSLB 조합이며, 제안 방식은 동일한 라우팅 엔진 위에 SC 기반 상태·정책 동기화만 추가된 형태다.

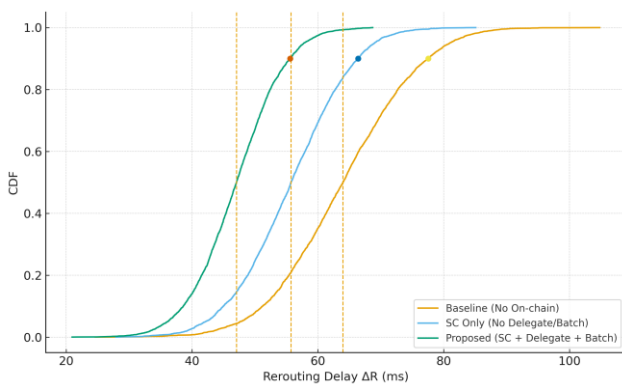


그림 2 재라우팅 지연 ΔR 의 CDF 비교 결과

Baseline(온체인 미사용) 대비 제안 방식(SC + Delegate + Batch)은 커밋·전파·재계산 과정의 지연이 감소하면서 ΔR 분포가 전체적으로 좌측으로 이동하였다. 특히 중앙값 및 90 백분위수에서의 차이가 뚜렷하여, 제안 구조가 이벤트 발생 후 경로 수립 속도를 향상시키고 전체 네트워크의 반응성을 높이는 효과가 있음을 보여준다.

III. 결론

LEO 위성망에서 실시간 라우팅을 효율적으로 수행하려면, 지속적으로 변하는 링크 상태와 트래픽 혼잡을 빠르게 감지하고, 그에 대응하는 경로 재계산을 각 위성이 독립적으로 수행할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 상태 정보가 전 성과에 신뢰 가능한 방식으로 동기화되어야 하며, 각 위성의 계산과 전달은 지연 없이 이루어져야 한다. 본 논문은 이러한 조건을 만족하기 위한 구조로, 블록체인의 스마트 컨트랙트를 활용한 공통 상태/정책 동기화와, 이를 구독하는 오프체인 라우팅 계층의 결합을 제안하였다.

제안식 (1), (2), (3)의 분해는 핵심 시스템 구성 요소를 수식화해 최적화 포인트를 명확히 하며, ISL 매칭과 SIDA/SSLB 결합은 효율성과 안정성을 모두 달성하도록 설계되었다. 남은 과제로는 위임자(delegate) 동적 할당, 사이드체인 기반 온·오프체인 분할 구체화, 커밋 전략의 최적화, 과장대별 링크 모델링, 그리고 위성 간 시간 동기 연동 문제 등이 있다. 종합적으로, 본 프레임워크는 LEO의 시간가변적 네트워크 환경에서 정책-트리거 기반 실시간 라우팅을 효과적으로 구현할 수 있는 실용적 경로를 제시한다.

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.

참 고 문 헌

- [1] S. Bukhari, K. Sharif, L. Zhu, C. Xu, F. Li and S. Biswas, "Dynamic Fine-Grained SLA Management for 6G eMBB-Plus Slice Using mDNN & Smart Contracts," in IEEE Transactions on Services Computing, vol. 17, no. 6, pp. 3499-3512, Nov.-Dec. 2024
- [2] 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
- [3] J. Liu, R. Luo, T. Huang and C. Meng, "A Load Balancing Routing Strategy for LEO Satellite Network," in IEEE Access, vol. 8, pp. 155136-155144, 2020
- [4] 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
- [5] O. Kodheli et al., "Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 1, pp. 70-109, Firstquarter 2021