LEO 위성 네트워크에서 Intra-Plane 및 Inter-Plane 링크를 고려한 멀티패스 라우팅 분석

유광운, 민선홍, 장준우 ,김용강*
공주대학교

{yugwangun, devminsh02, jwjang1102}@smail.kongju.ac.kr, *ygkim@kongju.ac.kr

Multipath Routing Analysis Considering Intra-Plane and Inter-Plane Links in LEO Satellite Networks.

Gwangun Yu, Sun-hong Min, Junu Jang, Yonggang Kim*
Kongju University.

요 약

본 논문은 Low Earth Orbit(LEO) 위성 네트워크 환경에서 Intra-Plane 및 Inter-Plane 링크를 함께 고려하는 하이브리드 라우팅 방안을 적용하였다. 두 링크 유형 간의 상대적 비용을 조절하기 위해 가중치 계수 α를 도입하였으며, α는 경로 선택 과정에서 링크 비용에 직접 반영된다. Walker-Delta 기반 위성 네트워크환경에서 α값을 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 제한한 α기반 비용 조절 방식이 라우팅 경로 특성에 미치는 영향을 확인하였다.

Ⅰ. 서 론

지구 저궤도 위성(LEO, Low Earth Orbit) 기반 통신 네트워크는 다른 지구 고궤도 위성 통신 네트워크와 비교하여 현저히 적은 저지연성과 전 지구적 커버리지를 제공할 수 있다는 점에서 차세대 통신 인프라의 핵심 기술로 주목받고 있다. 그러나 LEO 위성은 빠른 궤도 이동과 이에 따른 빈번한 링크 재구성을 동반한다는 특성을 가지며, 이러한 위성의 동적 이동 환경속에서 위성 간 링크(ISL, Inter Satellite Link)는 경로 형성과 데이터 전송 안정성에 중요한 요소로 작용된다. ISL 은 동일 궤도면(Plane) 내에서 형성되는 Intra-Plane 링크와 서로 다른 궤도면 내에서 형성되는 Inter-Plane 링크로 구분된다. Intra-Plane 링크는 위성 간 상대적 위치 변화가 비교적 완만하여 안정적인 반면 Inter-Plane 링크는 보다 더 다양한 경로를 제공이 가능한 특성을 지닌다.[1] 따라 전송 경로 선택 시 서로 다른 성향을 보이며 네트워크 환경 및 운용 조건에 따라 활용 방식이 달라질 수 있다[2].

본 연구에서는 LEO 위성 네트워크 환경에서 Intra-Plane 및 Inter-Plane 구조를 동시에 고려하고, 이를 기반으로 멀티패스 전송 관점에서의 적용 가능성을 탐색하는 데 초점을 둔다. 각 궤도면별 구조는 그림 1 에 묘사되어있다. 이를 위해 Intra-Plane 링크를 우선적으로 활용하는 경로, Inter-Plane 링크를 우선적으로 활용하는 경로, 그리고 두 경로를 병렬로 활용하는 멀티패스 전송 시나리오를 정의하여 비교 실험 하였다. 또한 시간에 따라 변화하는 위성 가용성, 운용 과정에서 발생할 수 있는 유지보수 구간 또는 혼잡 상황 등을 함께 고려하여 링크 유형에 따른 경로 선택 성향과 전송 경로의 변화 양상을 관찰하고자 한다.

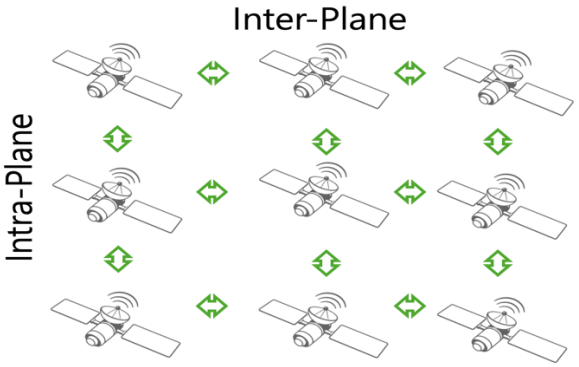

그림 1. Inter 및 Intra 궤도면 구조

Ⅱ. 본론

실험 대상 네트워크는 Walker-Delta 형태의 위성 군집으로 구성되며, 총 20 개의 궤도면과 각 궤도면당 100 개의 위성으로 총 2,000 개의 위성으로 이루어져 있다. 각 위성은 궤도면 인덱스와 궤도상 위상각에 따라 초기 위치가 정의되며, 시간에 따라 공전운동을 수행함으로써 네트워크 토폴로지는 변화한다. Intra-Plane 링크는 동일 궤도면 내 위성 간 연결로 정의되며, Inter-Plane 링크는 인접한 궤도면(±1 plane)에 위치한 위성 간의 연결만을 허용한다. 시간에 따른 네트워크 변화와 실제 운용 환경을 모사하기 위해, 본 연구에서는 위성 가용성 변화를 다음과 같은 세 가지 요인으로 모델링하였다. 첫째, 위성의 궤도상 위상각에 따라 특정 구간에서 통신이 제한되는 음영 구간을 설정하였다. 둘째, 실제 위성 운영 시 발생할 수 있는 유지보수 상황을 반영하기 위해 특정 궤도면(Plane3, 7)에 대해 일정 기간

동한 위성을 비활성화하였다. 셋째, 네트워크 혼잡 상황을 모델링하기 위해 각 시간 시점에서 연결 차수가 상위 10%에 해당하는 위성 노드를 혼잡 노드로 간주하고, 해당 노드를 일시적으로 라우팅에서 제외하였다. 시뮬레이션은 총 7 일 동안의 위성 운용 상황으로 고려하여 수행되었으며 주요 분석 시점은 1 일, 3 일, 4 일,5 일,7 일의 다섯 개 시간 지점으로 설정하였다. 시점을 이렇게 선택한이유는 1 일차의 정상적인 모습, 3 일차에 유지보수 시작 시점, 4 일차 유지보수 진행 시점, 5 일차 유지보수 종료시점, 7 일차 유지보수후 안정된 모습을 보기 위함이다. 각 시간 시점에서 위성 위치, 가용성, 그에 따른 링크 구조를 갱신한 후, 랜덤하게 선택된 100 개의 송신-수신 위성쌍에 대해 라우팅 실험을 수행하였다. 라우팅 과정에서는 링크 유형 선호도를 반영하기 위해 가중치 기반 비용 함수를 정의하였다. 뒤 위성 u, v 사이의 링크 비용은 다음과 같이 설정된다.

$$w(u,v) = \begin{cases} \alpha, & \text{if } u \text{ and } v \text{ are in the same plane,} \\ 1-\alpha, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

여기서 $\alpha \in \{0,1\}$ 은 Intra-Plane 링크에 대한 상대적 비용을 조절하는 파라미터이다. 즉, α는 확률적 선호도가 아닌 Inter 및 Intra 궤도면 중 어느 유형을 상대적으로 유리하게 평가할지를 결정하는 비용 편향 파라미터로 정의된다. 특히 이론적으로는 α=0.5 에서 두 궤도면이 동일 비용으로 평가되며, α >0.5 에서는 Intra-Plane 중심 ,α<0.5 Inter-Plane 중심의 경로 선택 경향이 강화된다. 멀티패스 전송에서 두 경로 중 하나라도 유효한 경로가 존재할 경우 전송이 성공한 것으로 판단했다. 이를 통해 시간 변화, 가용성 저하 및 혼잡 상황 하에서의 라우팅 성능과 전송 성공률에 미치는 영향을 종합적으로 분석했다.

Ⅲ. 결과

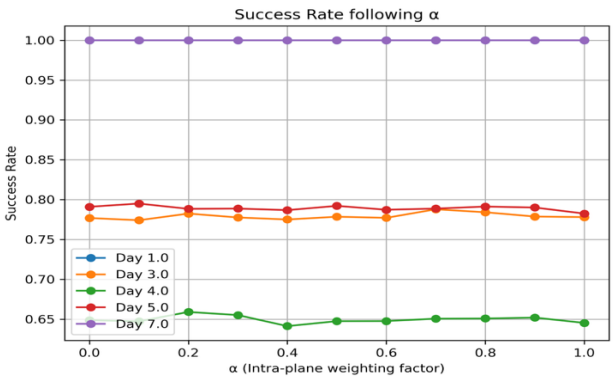

그림 2. 각 시점별 및 α 값별 전송 성공 비율

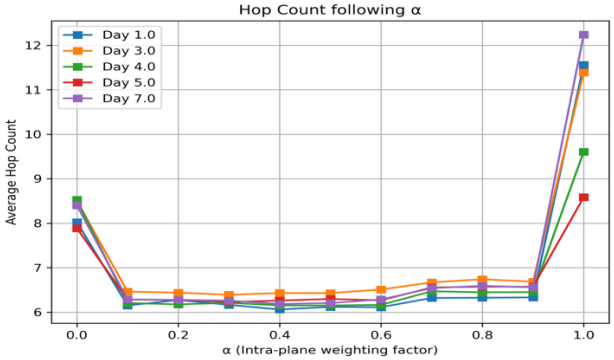

그림 3. 각 시점별 및 α값 별 평균 홉 카운트

그림 2 는 Intra-Plane 가중치 계수 α에 따른 종단 간 성공률을 서로 다른 시간 시점에서 나타낸 결과이다. 모든 시간 시점에서 성공률은 α값에 따라 큰 변동 없이 유사한 수준을 유지한다. 이는 α가 링크의 존재 여부를 변경하지 않고, 동일한 네트워크 연결 구조 내에서 경로 선택 비용만을 조절하기 때문으로, α 변화가 종단 간 연결 가능성 자체에는 큰 영향을 미치지 않음을 의미한다.

그림 3 은 α에 따른 평균 hop count 를 시간 시점별로 나타낸 결과이다. α가 0.6 이하인 구간에서는 대부분의 시간 시점에서 평균 hop count 가 비교적 낮고 안정적으로 유지된다. 다만 α = 0.0 에서는 Inter-Plane 링크를 우선적으로 선택하는 경향으로 인해 일부 시간 시점에서 hop count 가 증가하는 현상이 관찰된다. 반면 α가 증가하여 Intra-Plane 링크에 대한 선호도가 높아질수록 평균 hop count 가 점진적으로 증가하며, 특히 α가 1 에 근접할 경우 모든 시간 시점에서 hop count 가 크게 증가하는 경향을 보인다.

Ⅳ. 결론

본 연구에서는 LEO 위성 네트워크 환경에서 Intra-Plane 및 Inter-Plane 링크를 함께 고려한 하이브리드 라우팅 분석 기법을 제안하고, Intra-Plane 가중치 계수 α 변화에 따른 성능 특성을 분석하였다. 실험 결과, 종단 간 성공률은 α 변화에 대해 전반적으로 안정적인 수준을 유지하여, 제안 기법인 시간 변화 및 장해 상황에서도 기본적인 연결성을 보장함을 확인하였다.

반면 평균 hop count 는 α값에 따라 뚜렷한 차이를 보였으며 α 가 지나치게 작거나 큰 경우 경로길이가 증가하는 경향이 나타났다. 특히 Intra-Plane 또는 Inter-Plane 링크 중 한쪽에 과도하게 편향된 설정에서는 경로 효율성이 저하되는 반면, 중간 범위의 α 에서는 비교적 짧고 안정적인 경로가 유지되었다. 이러한 결과는 LEO 위성 네트워크에서 단일 링크 유형에 의존하는 라우팅보다, Intra 및 Inter plane 을 균형 있게 활용하는 하이브리드 접근 방식이 경로 효율성과 안정성 측면에서 유리함을 시사한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2026-RS-2024-00438430).

참 고 문 헌

[1] Leyva-Mayorga, I., Röper, M., Matthiesen, B., Dekorsy, A., Popovski, P., & Soret, B. (2021, December). Inter-plane inter-satellite connectivity in LEO constellations: Beam switching vs. beam steering. In 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) (pp. 1-6). IEEE.

[2] Leyva-Mayorga, I., Soret, B., & Popovski, P. (2021). Inter-plane inter-satellite connectivity in dense LEO constellations. IEEE Transactions on Wireless Communications, 20(6), 3430-3443.