

대형 저궤도 군집 위성 간 광통신 링크의 라우팅 경로 탐색 영향 분석

이용화, 곽정호, *최지환
대구경북과학기술원, *한국과학기술원

yhlee_ice@dgist.ac.kr, jeongho.kwak@dgista.c.kr, *jhch@kaist.ac.kr

Investigation of Optical Inter-Satellite Links for Routing Path Discovery in the LEO Satellite Mega Constellation Network

Yonghwa Lee, Jeongho Kwak, *Jihwan P. Choi
DGIST, *KAIST.

요 약

본 논문은 최근 주목받는 대형 저궤도 군집 위성 네트워크에서 광통신 위성 간 링크(ISL; inter-satellite link)의 중요성과 라우팅 경로 탐색에서 광통신 활용에 따른 도전 과제들을 보여준다. 대형 군집 위성 네트워크의 경로 탐색에서 발생될 수 있는 문제점을 보이고, 광 통신시스템에서 링크 설립 시, RF (radio frequency) 시스템과 달리 매우 좁은 빔 발산 특성에 의한 지연 요소가 라우팅 경로 탐색에 미치는 영향을 분석한다.

I. 서 론

기존 위성통신 시스템은 많은 사용자에게 서비스 제공이 가능했지만 주로 장거리중계와 지상 인프라 제공이 어려운 재난/산간 지역에 활용되었다. 하지만, 최근 3GPP 5G 비지상네트워크 개발로 위성통신은 6G 시스템 핵심기술로 주목받으며[1]~[3], SpaceX 등 민간 기업의 군집위성모델 개발로 새로운 국면을 맞고 있다[4]. 특히, 우주 광통신과 위성 간 링크(ISL; inter-satellite link)에 관심 증대로 저지연 및 고 신뢰성의 위성통신연구가 주목받고 있다.

종래의 라우팅 연구들은 정적 토폴로지 환경에서의 최단경로탐색[5] 혹은 위성의 예측 가능한 이동과 주기성을 기반으로 경로 탐색 알고리즘을 제안했다[7],[8]. 또한, 다수의 토폴로지 스냅샷에 대한 최단 경로를 탐색 후, 토폴로지 변화 반영을 위한 추가적인 경로 최적화 방법이 제안되었다. 그러나, 정적 모델은 토폴로지 변화를 반영하지 못하며, 모든 스냅샷에 대한 경로 탐색은 대형 군집위성구조에서 증가된 위성으로 엄청난 계산과 데이터 저장공간이 요구될 것이다. 따라서, 대형 군집위성망과 시변 토폴로지가 동시에 고려되는 효율적인 경로 탐색 알고리즘 설계가 필요하다.

본 연구는 원활한 위성 간 신호 전송을 위한 경로 탐색 알고리즘 설계에 광통신의 매우 좁은 빔 발산에 의한 지연 영향을 분석하며 시변 토폴로지와 위성 증가 영향이 반영된 신뢰성 있는 광통신 기반 저궤도 군집 위성 네트워크 구축을 위한 도전과제를 제시한다.

II. 본 론

광 통신시스템의 높은 지향성은 인접 노드에 의한 간섭 감소의 장점을 갖지만 매우 좁은 빔 발산으로 위성 간 링크 설립에 정확한 빔 정렬이 요구되는 단점을 갖는다. 따라서, 경로 설정 시, 빔 정렬에서 요구되는 정확한 빔

포인팅과 스캐닝에 의한 지연을 고려해야한다[9]. 먼저, 위성 이동과 흔들림으로 포인팅 오류가 발생되며, 이는 레일리 분포로 표현된다.

$$f(\theta) = \frac{\theta}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

θ (mrad)와 σ 는 각각 빔 포인팅 오류 각도와 표준편차를 나타낸다. 안테나의 회전 능력만 고려하여 에러보상시간을 계산한다. 즉, 안테나의 회전능력이 ϕ (mrad/ms)라 할 때, 에러보상시간 $T_{com} = \theta/\phi$ (ms)로 계산할 수 있다. 그림 1 과 같이 보상 시간은 500 km 링크 거리에서 오류에 따라 종단간 지연의 약 70~75 %로 상당한 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 인접 위성과 빔 정렬을 위한 스캐닝에 소요되는 시간은 다음과 같다.

$$T_{scan} = \frac{2\pi\sigma^2}{I_\theta^2} \left[1 - \left(\frac{\theta_U^2}{2\sigma^2} + 1 \right) \exp\left(-\frac{\theta_U^2}{2\sigma^2}\right) \right] \cdot T_{dwell} \quad (2)$$

$I_\theta = \theta_{div} \cdot (1 - O_F)$ 는 빔 크기로 빔 발산 각 θ_{div} 와 빔 간 오버랩 factor O_F 로 계산된다. θ_U 는 스캔이 필요한 field-of-view 의 크기이고 T_{dwell} 은 스캔 지점에 빔이 머무는 시간이다. 그림 2 와 같이 링크 거리에 따른 스캐닝 시간을 도출되며 짧은 거리에서는 영향이 크지

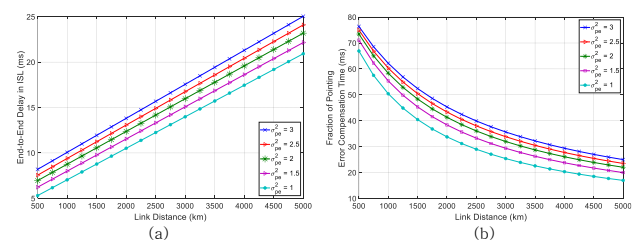


그림 1. 종단간 지연 및 포인팅 에러 보상 시간 영향.

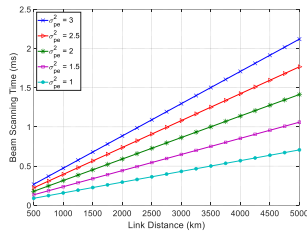


그림 2. 안정적인 빔 정렬을 위한 빔 스캐닝 시간

않지만 거리 증가에 따라 빔 정렬에 많은 시간이 소모됨을 확인할 수 있다.

본 연구는 전파 지연, 큐잉 지연과 광통신으로 인한 지연 2 가지, 총 4 가지의 지연 요소를 고려하여 종단간 경로 탐색에서 광통신의 영향을 분석하기 위해 greedy 알고리즘 측면에서 주어진 위성 토폴로지 환경에 대한 경로 탐색 알고리즘을 설계한다. 초기 위성과 마지막 위성 간 최단경로탐색 후, 경로 상 2 번째 위성에서 다시 최단경로탐색을 수행하는 과정을 지상 목적지와 연결되는 위성으로의 경로를 찾을 때까지 반복하는 알고리즘을 제안한다. 그림 3 과 같이 주어진 자식 노드 중에서 최단경로탐색을 위한 자식 노드 선택에 집중하는 greedy 알고리즘 기반 시변 위성 토폴로지 라우팅경로탐색을 사용하여 종단간 지연 시간, 전송에 필요한 위성 수 측면에서 기존 [7]의 경로탐색방식과 성능을 비교 분석한다.

본 연구에서 제안하는 greedy 알고리즘 기반 경로 탐색 방식을 비교한 결과를 표 1 에 정리하였다. 두 방식 모두 1 Mbit 의 데이터 전송을 가정하고 750 회의 반복 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 종단간 지연 시간은 큰 차이 없음은 볼 수 있지만 평균 요구 노드 수 결과에서 기존의 방식보다 약 46.13 % 감소된 노드가 사용됨을 알 수 있었다. 이를 통해 기존의 최단 경로 탐색 후 최종 경로 결정 방식은 주어진 시작-끝 위성 사이 노드 수만큼 최단경로탐색을 반복 수행해야하는 반면 제안하는 알고리즘은 이미 탐색된 노드에 대한 경로 탐색은 하지 않게 되어 통신 자원 활용측면에서 훨씬 효율적인 것을 알 수 있다.

	기존 방법 [7]	제안 방법
종단간 지연	115.4 ms	120.1 ms
노드 수	19.36	10.43

표 1. 성능 비교 분석 결과

III. 결론

본 논문에서는 대형 군집위성구조를 사용하는 차세대 위성 네트워크에서 광통신 ISL 을 활용하는 라우팅 시스템에서 발생될 수 있는 문제점을 보이고 기존 방식과 성능을 비교 분석 해보았다. 간단한 greedy 기반의 알고리즘만으로도 성능 향상을 보였기에 더욱 신뢰성 있고 효율 높은 알고리즘의 개발 가능성을 보였다고 할 수 있다. 그러나 패킷 단위로 전송되는 데이터가 고려된 연구가 수행될 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018-0-01658, 차세대 위성 핵심 기술 개발)

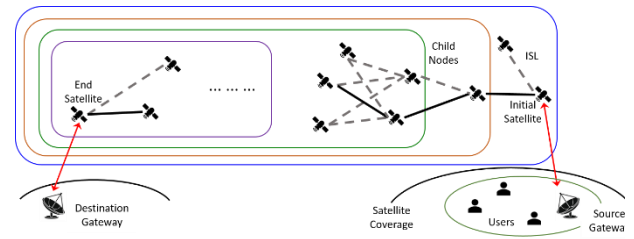


그림 3. 그리디 알고리즘 기반 시변 위성 토폴로지 라우팅 경로 탐색

참 고 문 헌

- [1] Study on using Satellite Access in 5G, 3GPP TR 22.822, v.16.0.0, June 2018.
- [2] Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN), 3GPP TR 38.821, v.16.0.0, Feb. 2020.
- [3] Foreman, V. L., Siddiqi, A, and De Weck, O., "Large satellite constellation orbital debris impacts: Case studies of oneweb and spacex proposals," *ALAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*. 2017.
- [4] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan and M. Zorzi, "Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55-61, Mar. 2020.
- [5] Chang, H. S., et al., "FSA-based link assignment and routing in low-earth orbit satellite networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47, no. 3, pp. 1037-1048, Aug. 1998.
- [6] Liu, Z., Guo, W., Deng, C., Hu, W., and Zhao, Y. "Perfect match model-based link assignment to design topology for satellite constellation system," *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 34, no.2, pp. 263-276, 2016.
- [7] Werner, Markus, et al. "ATM-based routing in LEO/MEO satellite networks with intersatellite links." *IEEE Journal on Selected areas in Communications* 15.1 (1997): 69-82.
- [8] Papapetrou, Evangelos, Stylianos Karapantazis, and F-N. Pavlidou. "Distributed on-demand routing for LEO satellite systems." *Computer networks* 51.15 (2007): 4356-4376.
- [9] Kaushal, H., Jain, V. K., and Kar, S. *Free space optical communication*. vol. 1. Gurgaon, Haryana: Springer, 2017.
- [10] Walker, J. G., "Satellite constellations," *Journal of the British Interplanetary Society (JBIS)*, vol. 37, pp. 559-571, 1984.