

저궤도 위성 통신망에서 위성 군집 모델에 따른 성능 분석 연구

이다은, 민현선, 이석근*, 김태훈[§], 방인규[■]

국립한밭대학교 지능미디어공학과, *(주)에브리심, [§]국립한밭대학교 컴퓨터공학과
{delee, hsmin}@edu.hanbat.ac.kr, sark@everysim.io, {thkim, ikbang}@hanbat.ac.kr

A Study on Performance Analysis of Satellite Constellation Models in LEO Satellite Communication Networks

Daeun Lee, Hyeonseon Min, Seokkeun Yi*, Taehoon Kim[§], Inkyu Bang[■]*

Dept. of Intelligence Media Engineering, Hanbat National University, *EverySim,

[§]Dept. of Computer Engineering, Hanbat National University

요약

본 연구에서는 저궤도 위성의 군집 모델에 따른 위성 통신망의 성능을 비교 분석한다. 대표적으로 사용되는 3가지 군집 모델인 Walker Star, Walker Delta, Mixed Geometry을 기반으로 MATLAB 기반 모의실험을 통해 저궤도 위성 통신의 성능을 관찰한다. 또한, 대한민국의 대전 지역을 예로 들어 위성의 개수 차이에 따른 성능을 비교 분석하고 이를 바탕으로 효율적인 저궤도 위성 통신 설계에 위한 방안을 논의한다.

I. 서론

현대 사회에서 통신 기술은 지구상의 대부분의 지역에서 정보 교환이 가능할 만큼 지속적으로 발전하고 있다. 특히 인공위성을 활용한 통신은 기존 지상 기반 네트워크의 한계를 보완하는 기술로 주목받고 있으며, 이 중 저궤도 위성은 짧은 지연 시간과 높은 데이터 전송 속도, 연속적인 커버리지를 제공할 수 있어 6G 이동통신 시대의 핵심 기술로 부상하고 있다. 저궤도 위성망은 NTN의 주요 구성 요소로 간주되고 있으며, 다양한 분야에서 그 활용 가능성이 확대되고 있다.

저궤도 기반 통신 시스템의 성능은 위성의 배치 방식에 따라 크게 달라진다. 동일한 수의 위성을 운용하더라도 궤도 구성 방식에 따라 특정 지역의 커버리지 품질이나 통신 성능이 달라질 수 있다. 대표적인 위성 군집 배치 방식으로는 Walker Star, Walker Delta, Mixed Geometry 방식이 있다. Star 방식은 균일한 커버리지에 유리하고, Delta 방식은 특정 지역 중심의 집중 커버리지를 제공한다. Mixed 방식은 이 둘의 장점을 절충한 구조를 가진다 [1].

따라서 동일한 조건에서 위성 배치 방식에 따라 통신 성능 차이가 발생할 수 있으며, 관심 지역에서 어떤 군집 모델이 최적의 성능을 제공하며 효율적인지에 대한 정량적 비교 분석이 필요하다.

II. 시스템 모델 및 분석 방법

본 연구의 전체적인 시스템 모델은 그림 1에 나타나 있으며, MATLAB에서 제공하는 저궤도 위성 커버리지 예제 코드를 활용하여 관심 지역에서의 저궤도 군집 모델의 성능을 분석하고 [2], 커버리지 맵을 시각화하여 군집 모델 비교를 수행한다.

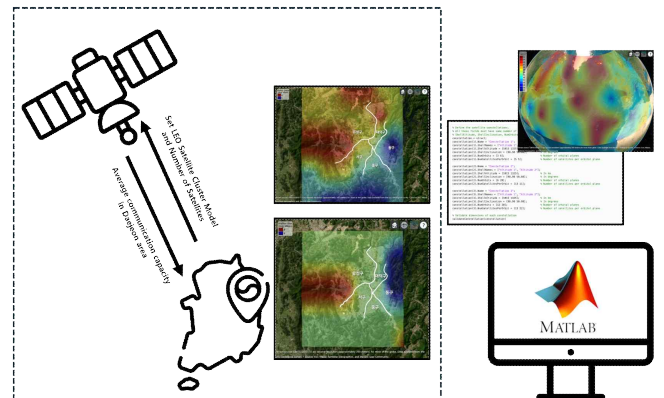


그림 1. 시스템 모델

본 연구를 통해 저궤도 위성 통신 성능을 개선할 수 있는 군집 모델을 분석할 수 있고 이를 활용하면 보다 효율적인 저궤도 위성 통신 시스템을 설계할 수 있다.

III. 모의실험 환경 및 결과

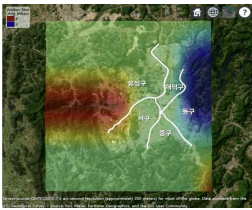
1) 모의실험 환경

본 연구는 MATLAB의 저궤도 위성 커버리지 예제 코드를 응용하여 모의실험을 수행한다. 위성 군집 모델에 따라 Walker Star, Walker Delta, Mixed Geometry 세 가지 군집 모델을 비교하였다. 또한 위성 수에 따른 군집 모델의 성능 차이를 분석하기 위하여 위성의 개수를 다르게 하여 두 가지 모의실험을 진행하였다. 이하 본문에서는 Walker Star와 Walker 모델을 각각 Star, Delta로 약칭하여 표기한다.

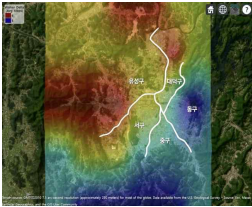
2) 모의실험 결과

본 모의실험에서는 3가지 저궤도 위성 군집 모델을 활용하여 대전 지역의 사용자가 경험하는 평균 통신 용량 커버리지 맵을 생성하였다. 모의실험은 구체적으로 위성의 개수가 8개인 경우와 96개인 경우로 나누어 2번 진행하였으며, 커버리지 맵에서 붉은 영역은 높은 통신 용량을 의미하며 위성과의 링크가 연결성이 높은 지역을 의미한다. 푸른 영역일수록 위성과의 연결성이 낮은 지역을 의미한다. 노란 영역의 경우 고성능은 아니지만 안정적인 연결이 가능 지역을 의미한다.

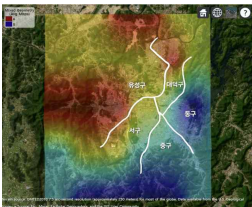
실험 1 : 위성의 개수가 적은 경우 (8개)



(a). Walker Star 모델

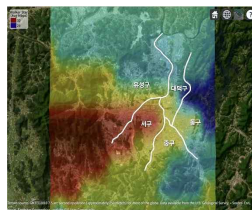


(b). Walker Delta 모델



(c). Mixed Geometry 모델

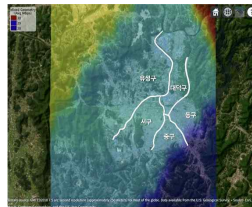
실험 2: 위성의 개수가 많은 경우 (96개)



(a). Walker Star 모델



(b). Walker Delta 모델



(c). Mixed Geometry 모델

표 1 : 위성의 개수가 적은 경우

실험 1	위성 가시성	링크 가용성	통신 용량 > 1Mbps
(a)	13.151	8.5291	13.151
(b)	15.414	9.0483	15.414
(c)	15.414	9.0483	15.414

표 2 : 위성의 개수가 많은 경우

실험 2	위성 가시성	링크 가용성	통신 용량 > 1Mbps
(a)	75.319	61.541	75.319
(b)	73.557	62.423	73.557
(c)	73.557	62.423	73.557

실험 1은 위성의 개수가 적은 경우이다. 커버리지 맵 출력 결과 Delta(b)와 Mixed Geometry(c) 모델의 경우 동일한 성능을 보인다. 반면 Star(a) 모델의 경우 앞선 두 모델과는 다르게 푸른 영역이 더 많이 보인다. 또한 Star 모델의 신호 평균 통신 용량은 최대 5Mbps이고 최소 용량은 4Mbps로 다른 두 모델보다 낮은 통신 속도를 제공한다. 이는 Star 모델의 성능이 다른 두 모델보다 좋지 않다는 것을 의미하며, 표 1의 결과를 통해서도 확인할 수 있다. 따라서 위성의 수가 적은 경우 Star 모델이 다른 방식 대비 상대적으로 좋지 못한 성능을 보인다.

실험 2는 위성의 수를 96개로 증가시킨 실험의 결과이다. 이 실험에서는 실험 1과 다르게 Star(a) 방식의 평균 통신 용량 커버리지 맵에서 붉은 영역이 다른 두 방식에 비하여 많게 나타났다. 하지만 표 2를 보면 값이 위성의 수가 적은 경우보다 차이가 나지 않으며 링크 가용성의 경우는 다른 두 방식이 더 높음을 알 수 있다. 하지만 실험 1에 비하여 12배라는 많은 위성의 수가 필요하다. 따라서 Star 방식이 좋은 성능을 보이기 위해서는 다른 두 방식에 비하여 많은 위성이 필요함을 알 수 있다. 하지만 위성의 개수가 증가함에 따라 실험 시간이 많이 증가하였으며 표 2를 보면 링크 가용성의 경우 다른 두 방식이 더 좋은 것을 확인할 수 있다. 위 두 실험 결과 관심 지역에서 위성의 개수가 많아야 다른 두 방식에 비하여 더 좋은 연결성을 보이는 Star 모델과 다르게 위성의 개수가 적은 상황에서 더 좋은 연결성인 Delta 방식과 Mixed Geometry 방식이 시스템 설계 및 운용 비용 등에서 더 효율적임을 알 수 있다. 위 실험을 통하여 저궤도 위성 통신 모델을 구성할 때 Delta 또는 Mixed Geometry 군집 모델을 사용하는 게 효율적인 측면에서 더 좋은 선택임을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 연구에서는 저궤도 위성 통신 환경에서 위성 군집 모델에 따른 저궤도 위성 통신의 성능을 분석하였다. 실험 결과, 위성의 개수가 적은 환경에서는 Delta와 Mixed Geometry 모델이 Star 모델보다 더 우수한 통신 성능을 나타냈다. 반면, 위성 개수가 12배 증가한 환경에서는 Star 모델이 상대적으로 균등한 커버리지 맵을 제공하며 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 여전히 Delta 및 Mixed Geometry 방식과 큰 성능 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있었다. 위성 수 증가에 따른 설계 및 운용 비용을 고려할 때, Star 모델은 타 모델 대비 효율성 떨어지는 모델로 평가된다. Delta 및 Mixed Geometry 모델이 실질적인 통신 효율성과 운용 경제성을 고려하였을 때 저궤도 위성망 구성에 적합한 방식임을 확인할 수 있다.

본 연구의 결과는 향후 저궤도 위성 통신망의 구조 설계에 활용될 수 있으며, 추후 Delta 또는 Mixed Geometry 기반의 실시간 장애 예측 및 복구 모델 설계에 대한 후속연구를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2025-RS-2024-00437886, 50%)과 2025년 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업의 연구결과로 수행되었음 (2022-0-01068).

참 고 문 헌

- [1] Y. Su, et al., "Broadband LEO Satellite Communications: Architectures and Key Technologies," IEEE Wireless Communications, Vol. 26, No. 2, April 2019.
- [2] MATLAB. Version 2024b, "Analyze NTN Coverage and Capacity for LEO Mega-Constellation" link: <https://kr.mathworks.com/help/satcom/ug/analyze-ntn-coverage-and-capacity-for-leo-mega-constellation.html>