

한반도 위성통신망을 위한 저궤도 위성 궤도 설계

이용화*, 정건진**¹, 이수현**², 김형태**³, 백종수**⁴

Design of LEO Satellite Constellation for Korean Peninsula Satellite Network

Yonghwa Lee*, Geonjin Jung**¹, Suehyun Lee**², Hyoungtae Kim**³, and JongSoo Baik**⁴

이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-079)

요약

Starlink를 필두로 다양한 업체가 등장하며 위성통신이 많은 주목을 받고 있다. 기존 정지궤도 위성의 제한적 서비스에서 벗어나 지상망의 광대역 서비스를 위해 수많은 위성을 통한 통신망을 구축하고 있다. 특히, 글로벌 모델의 발전으로 최근 국내에서 저궤도 위성망 구축에 관한 요구가 발생하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 지상 단말의 최소양각 조건을 통해 다중빔을 모두 포함할 수 있는 제약조건 도출방법을 살펴보고 제약조건을 사용하여 24시간 무중단 서비스를 위한 저궤도 위성 궤도 모델의 최소 위성 결과를 제시한다.

Abstract

The Low-Earth Orbit(LEO) satellite communications have tremendous attracted by the appearance of various global companies including Starlink. In contrast to the Geostationary Orbit(GEO) satellites, lots of LEO satellites have deployed to provide broadband services of terrestrial networks. Hence, the demands of LEO satellite network deployment have arisen in Korea according to the advanced service models. Therefore, in this paper, we investigate the constraints by the minimum elevation angle of ground terminal which can contain whole multibeam coverage and present a result of LEO satellite constellation model with minimum number of LEO satellites.

Key words

satellite network, LEO satellite constellation, minimum elevation angle, Korean peninsula service

1. 서론

정지궤도 위성통신은 약 250ms의 매우 긴 지연에 의한 치명적인 단점을 갖고 있다. Iridium 등 전통적인 저궤도 위성통신 업체의 음성 서비스는 지상망 성능 대비 미비한 수준이다[1]. 최근 자원포화를 타개하고 새로운 망을 위한 비지상망(NTN,

Non-Terrestrial Network) 표준화[2][3]가 진행되고 있다. 고도화된 반도체의 향상된 처리량과 소형화된 장비 및 재사용 발사체를 통해 여러 기업에서 앞다투어 사업을 수행하고 있다. 특히 최근 국내에서도 저궤도 위성망을 위한 독자 기술을 획득하기 위해 탑재체 개발에 주목하고 있다.

* 한화시스템 연구원(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8454-1194>

** 한화시스템 연구원

- ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0006-7783-4128>

- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0004-4642-2775>

- ORCID³: <https://orcid.org/0009-0007-9647-3708>

- ORCID⁴: <https://orcid.org/0000-0002-3141-9168>

• Received: Feb. 20, 2025, Revised: Mar. 11, 2025, Accepted: Mar. 14, 2025

• Corresponding Author: Yonghwa Lee

Dept. of Space R&D Center, Hanwha Systems, South Korea

Tel.: +82-31-629-2851, Email: yhle0930@hanwha.com

II. 관련 연구

대표적인 연구인 [4]는 streets-of-coverage와 유전 알고리즘으로 글로벌 서비스를 위한 저궤도 위성군을 설계 방법을 제안했다. [5]는 기지국 배치의 핵심 기술인 확률 기하학적 접근법의 커버리지 확률에 대한 위성 하향링크 분석 결과를 통해 위성군 설계 결과를 제시했다. [6]은 커버리지 확률을 통한 게이트웨이의 밀도와 위성 고도의 영향을 분석하여 저궤도 위성군 설계 방법을 제안했다. 또한, 국내에서 위커-델타 위성군을 기반으로 재방문 주기와 탐색 시간을 통해 감시·정찰 위성군을 설계했다[7]. 최근 software-defined network의 컨트롤러 위치에 따라 저궤도 위성 배치 구조에 대한 분석[8] 등 저궤도 위성군 설계에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다. 기존 연구들은 대부분 통계적 분석 또는 최적화를 통해 위성군 설계를 수행하며 빔의 크기와 지상 단말의 조건이 명확히 고려되지 않았다. 따라서, 3절에서는 위성망 구축을 위한 제약조건 분석방식을 제시하고 4절에서는 그에 따른 저궤도 위성 궤도 모델에 대한 시뮬레이션 결과를 제시한다.

III. 시스템 모델

먼저, 원형궤도를 기반으로 0~90도의 경사도(i), 위성 수(S), 궤도면 수(P)와 인접 궤도 사이 위상(F)을 활용하는 위커-델타 모델을 사용한다. 위성과 단말은 충분한 조향 성능의 탑재안테나를 가정한다. 동일 크기의 빔으로 구성된 위성 다중빔을 가정하고 특정 지역에 서비스를 제공하는 지구 고정 빔을 적용한다. 위성 커버리지는 boresight에서 형성된 3dB 빔 폭의 원형 footprint를 활용한다.

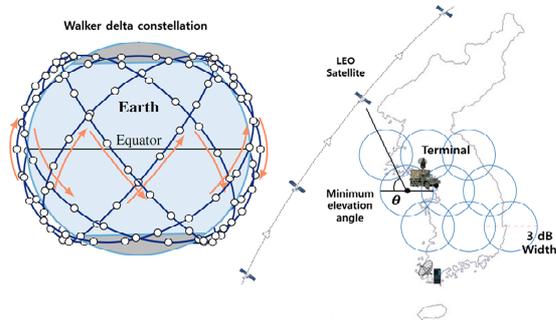


그림 1. 위커-델타 모델 및 분석 개념도
Fig. 1. Walker-delta model and analysis concept

IV. 위성-지상단말 제약조건 분석 방법

위성과 단말 사이 LOS(Line-Of-Sight) 설립을 위해 최소양각 조건이 반드시 식별되어야 한다. 3GPP NTN[3]의 단말 최소양각 10도는 지형의 영향이 큰 환경에 부적합한 규정으로 지형과 빔 형성 방식 등이 고려된 제약조건 식별 방법이 필요하다.

양각 조건은 단말 위치, 지형적 영향 및 위성 커버리지에 매우 종속적인 요소로 서비스 지역 내 모든 단말과 위성 사이 LOS 형성 여부를 확인해야 한다. 따라서, 서비스 지역 내 모든 단말을 커버할 수 있는 두 가지 최소양각 조건 분석 방법을 제시한다. 단일 위성의 전체 footprint를 클러스터로 정의하고, 다중빔의 각 서비스 지역은 빔으로 명명한다. 제약조건은 모든 단말에 공통으로 적용할 수 있는 파라미터를 식별하는 것을 목표로 한다.

1) 클러스터 제약조건: 그림 2는 클러스터 환경에서 제약조건에 관한 시나리오를 도식화한 것이다. 먼저, 단말은 서비스 위성으로부터 클러스터 내 가장 먼 가장자리에 위치한다. 단말의 위치에서 단말의 양각 조건(θ_T)에 부합하는 위성을 배치한다. 이때 식별된 θ_{CC} 를 클러스터 중심의 최소양각으로 정의한다.

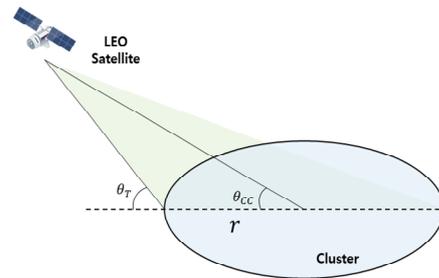


그림 2. 클러스터 제약조건 분석 시나리오
Fig. 2. Scenario of cluster constraint analysis

2) 빔 제약조건: 그림 3은 다중빔 구조에서 빔 제약조건에 관한 시나리오이다. 클러스터 제약조건과 동일 방식을 통해 최악의 경우를 위해 빔의 가장 먼 가장자리에 위치한 단말을 고려한다. 모든 빔에 대해 단말 양각 조건(θ_T)에 부합하는 위성을 배치한 상태에서 식별된 θ_{BC} 빔 중심의 제약조건으로 정의한다. 이를 통해 모든 클러스터/빔의 환경에서 동일한 조건을 적용할 수 있다. 하지만, 다중빔의 배치 및 빔 수 등 구조 차이에 따라 제약조건이 세부 파라미터는 상이할 수 있다.

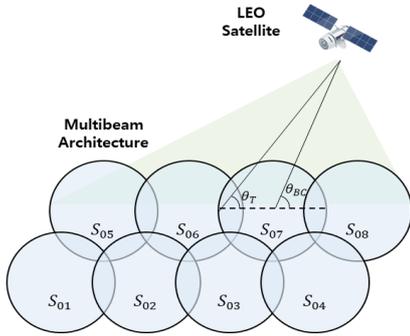


그림 3. 빔 제약조건 분석 시나리오
Fig. 3. Scenario of beam constraint analysis

V. 시뮬레이션 결과

다중빔 배치와 빔 수에 의한 차이를 배제하기 위해 4절의 클러스터 환경에 관한 제약조건과 저궤도 위성군 분석 결과를 제시한다. 표 1은 시뮬레이션 파라미터로 양각조건은 한반도 지형에서 가용성이 높은 파라미터를 적용한다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Satellite altitude (km)	600, 1200
Cluster diameter (km)	100, 200, 400
Elevation angle of ground terminal (deg)	30, 35, 40, 45, 50

그림 4는 클러스터 제약조건을 적용하여 위성 고도와 클러스터 크기에 따른 클러스터 중심의 최소 양각(θ_{CC})에 대한 결과이다. 각 고도에서 단말 양각이 증가함에 따라 제약조건은 선형적으로 증가하

나, 고도가 낮을수록 더 큰 폭으로 증가한다. 단편적 비교를 위해 1200km 대비 600km 고도에서 요구되는 제약조건 차이를 살펴본다. 먼저, 100km 클러스터와 30도 양각 환경은 LOS 설립을 위해 약 0.65도 증가된 양각이 필요하고, 400km 클러스터와 50도 양각 환경은 600km 고도가 안정적인 링크설립에 약 7.03도 증가된 조건이 요구된다.

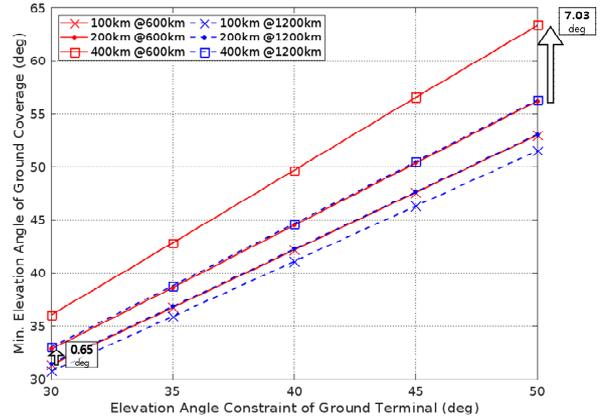
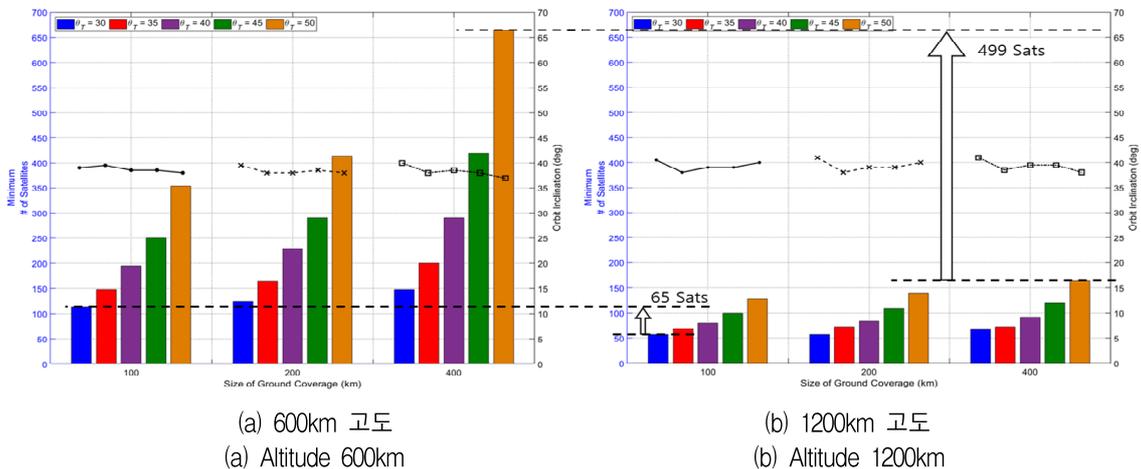


그림 4. 클러스터 환경의 클러스터 중심 최소양각
Fig. 4. Minimum elevation angle of cluster center

그림 5는 위도 36.3도/경도 127.7도에 위치한 단말과 최소양각을 기반으로 24시간 서비스 가능성을 나타내는 커버리지율을 통해 도출한 한반도를 위한 최소 위성 결과이다. 1대 이상의 위성이 지상 단말과 LOS 설립이 가능한 경우를 1로 그렇지 않은 경우를 0으로 설정하고 커버리지율을 분석한다. 최종적으로 커버리지율 100%를 만족하는 저궤도 위성군 모델의 위성 수를 확인한다.



(a) 600km 고도 (a) Altitude 600km
(b) 1200km 고도 (b) Altitude 1200km

그림 5. 클러스터 중심 제약조건에 대한 최소 위성 수
Fig. 5. Minimum number of LEO satellites with cluster center constraint

먼저, 그림 5(a)와 5(b)에서 저궤도 위성군 모델의 경사도(i)는 위성 수와 단말의 양각조건에 따라 약간의 편차를 보이나 단말 위치의 영향으로 35도~45도 부근에서 형성된다. 이 때, 최소 위성 수에 대한 결과는 클러스터 크기와 θ_{CC} 증가에 따라 지수적 상승하고 고도가 낮아질수록 요구되는 위성 수가 큰 폭으로 증가한다. 특히, 30도와 100km 클러스터 환경은 600km 고도에서 65기의 위성이 추가로 요구되지만, 50도와 400km 클러스터 환경은 499기의 증가된 위성이 배치되어야 안정적인 환경을 제공할 수 있다는 결론이 도출된다. 앞의 두 시뮬레이션 결과는 단편적으로 위성 수 감소의 목적을 위해 높은 고도와 낮은 양각 조건이 요구된다는 결과로 귀결된다. 그러나, 고도 상승은 전파지연과 소모전력 증가와 함께 방사선 영향에 강인한 우주급 부품의 사용으로 제작비용 증가의 원인이 된다. 또한, 낮은 양각은 지형지물의 영향에 취약할 수 있어 안정적인 통신 환경 조성에 치명적 단점으로 작용할 수 있다. 결론적으로, 시스템 설계 과정에서 단순히 제약조건을 선정하는 이슈에서 벗어나 안정성, 비용 및 성능 등 여러 요소의 상충관계가 고려된 위성망 구축에 관한 하는 매우 어려운 도전과제가 해결되어야 한다.

VI. 결 론

본 논문은 한반도에 저궤도 위성통신망을 구축하기 위한 최소양각 조건 계산 방식을 제안하고 클러스터 환경에서의 위성군 설계 결과를 제시했다. 이를 통해 특정 지역에 위성통신망을 구축에 관한 기반을 제공할 수 있을 것으로 기대한다. 특히, 제시된 제약조건 분석 방법은 잦은 핸드오버의 저궤도 위성망에서 핸드오버 트리거 이벤트 설계의 초석으로써 활용성을 기대한다.

References

- [1] Y. Lee and J. P. Choi, "Connectivity Analysis of Mega-Constellation Satellite Networks With Optical Intersatellite Links", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 57, No. 6, pp. 4213-4226, Dec. 2021. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3090914>.
- [2] 3GPP TR 38.821 v16.1.0: "Solutions for NR to support non-terrestrial networks(NTN)(Release 16)"
- [3] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, "Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies", *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 58, No. 3, pp. 55-61, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411>.
- [4] T. A. Ely, W. A. Crossley, and E. A. Williams, "Satellite constellation design for zonal coverage using genetic algorithms", *The Journal of the astronomical sciences*, Vol. 47, No. 3, pp. 207-228, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1007/BF03546200>.
- [5] A. Al-Hourani, "An Analytic Approach for Modeling the Coverage Performance of Dense Satellite Networks", *IEEE Wireless Commun. Lett.*, Vol. 10, No. 4, pp. 897-901, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3049179>.
- [6] A. Talgat, M. A. Kishk, and M. S. Alouini, "Stochastic Geometry-Based Analysis of LEO Satellite Communication Systems", *IEEE Commun. Lett.*, Vol. 25, No. 8, pp. 2458-2462, Aug. 2021. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3029808>.
- [7] J. Shin, Y. Hwang, S. Park, S. Jeon, E. Lee, and S. Song, "Design of Micro-Satellite Constellation for Reconnaissance of Korean Peninsula", *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 50, No. 6, pp. 401-412, Jun. 2022. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.6.401>.
- [8] T. Kim, J. Kwak, and J. P. Choi, "Satellite Network Slice Planning: Architecture, Performance Analysis, and Open Issues", *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Vol. 18, No. 2, pp. 29-38, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1109/MVT.2023.3238515>.

[1] Y. Lee and J. P. Choi, "Connectivity Analysis of Mega-Constellation Satellite Networks With Optical Intersatellite Links", *IEEE Trans. Aerosp. Electron.*