

국내 위성 통신 서비스를 위한 군집 저궤도 위성 분석

한상민*, 신원재, 김재현

*아주대학교 AI융합네트워크학과, 아주대학교 전자공학과

{*hsm960622, wjshin, jkim} @ajou.ac.kr kr

Analysis of LEO Satellites Constellations for Satellite Internet Access in Korea

Sangmin Han*, Wonjae Shin, Jae-Hyun Kim

*Department of AI Convergence Network, Ajou university

Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou university

요약

군집 저궤도 위성 통신 시스템은 지구 전 지역에 통신 서비스를 제공할 수 있는 장점이 있다. 국내에서는 2023년부터 저궤도 위성 통신 시범 서비스가 제공될 예정이고, 향후 몇 년 뒤에는 저궤도 위성 통신 서비스가 상용화될 전망이다. 본 논문은 국내 환경에서의 안정적인 위성 통신 서비스 제공을 위해 필요한 위성의 최소 개수를 분석한다. 저궤도 위성과의 지상 단말기 간 통신 가능 시간을 기반으로 하나의 궤도에 위성의 개수를 일정하게 배치하고, 각 위성은 지상 단말기와 최대한 연결되도록 다중 궤도를 생성하여 위성을 배치한다. 시뮬레이션 결과를 통해 국내 환경에 필요한 저궤도 위성 최소 개수를 도출한다.

I. 서론

저궤도 위성 통신 시스템은 차세대 통신 시스템으로 각광 받고 있으며, 6G 구현에 있어서는 필수 요소로 평가받는다. 특히 2023년부터는 SpaceX의 STARLINK 위성들이 국내에 시범 서비스를 제공할 계획이다. 하지만 국내 통신 환경에 필요한 위성 개수의 근거 자료는 아직 부족하다. 본 논문에서는 저궤도 위성-지상 단말기 사이의 통신 가능 시간과 저궤도 위성의 궤도 특성을 고려하여, 국내 통신 환경에서 안정적인 위성 통신 서비스를 제공하는데 필요한 저궤도 위성 최소 개수를 도출한다. 실제 STARLINK 위성의 궤도 요소들을 이용하여 통신 가능 시간을 확인하고, 이를 기반으로 하나의 궤도면에 연속적으로 배치 가능한 위성의 수를 3개, 5개로 제안한다. 각 방법은 하나의 위성이 지상 단말기와 연결되는 시간을 최대로 보장한다. 시뮬레이션 결과는 제안된 2가지 방법과 SpaceX의 initial phase 방식을 비교하여, 제안한 방식 중 단일 궤도 내 3개의 위성을 배치할 때 국내에 필요한 저궤도 위성의 개수가 더 적음을 보여준다 [1].

II. 위성-지상 단말기 간 통신 가능 시간에 따른 궤도 별 위성 배치

빔이 지상에 고정된 Earth-fixed beam 시나리오를 가정할 때, 저궤도 위성과의 지상 단말기 사이의 통신 가능 시간은 최대 고도각으로 표현된다. 저궤도 위성은 원 궤도에 가깝게 공전하므로, 지구 모양과 저궤도 위성의 궤도를 원으로 가정하면 저궤도 위성과의 지상 단말기 사이의 통신 가능 시간 $\tau(\theta_{\max})$ 은 다음의 수식으로 계산할 수 있다 [2].

$$\tau(\theta_{\max}) = \frac{2}{w_s - w_E \cos i} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{\cos(\cos^{-1}(\frac{r_E}{r} \cos(\theta_{\min})) - \theta_{\min})}{\cos(\cos^{-1}(\frac{r_E}{r} \cos(\theta_{\max})) - \theta_{\max})} \right), \quad (1)$$

수식 (1)에서 θ_{\max} 은 최대 고도각, θ_{\min} 은 최소 고도각을 의미하며, r_E 는 지구 평균 반지름, r 은 지구 평균 반지름과 위성 고도 (altitude)의 합을 나타내고 i 는 궤도 경사각 (inclination)이다. 그림 1은 수식 (1)을 활용

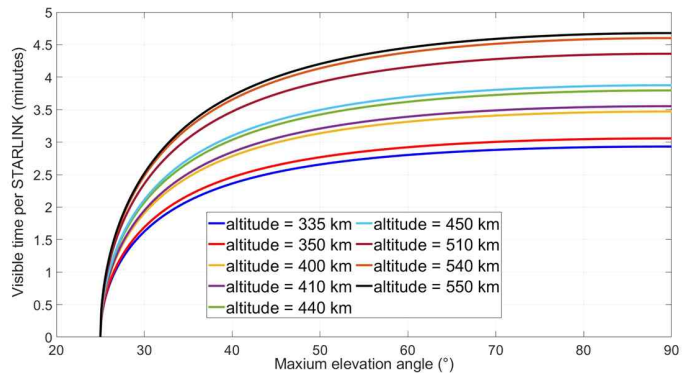


그림 1. 궤도 경사각이 53°인 STARLINK의 고도 별 통신 가능 시간

하여 현재 지구를 공전하고 있는 STARLINK 위성과 지상 단말기 사이의 통신 가능 시간을 최대 고도각 별로 나타낸 것이다. 궤도 경사각은 53°, θ_{\min} 은 25°로 설정한다. 그림 1을 통해 최대 고도각이 70° 이상일 때, 통신 가능 시간은 고도와 무관하게 최댓값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 저궤도 위성 통신 시스템의 상용화를 위해서는 저궤도 위성과 소형 단말기 사이 direct access가 구현되어야 한다. 또한, 안정적인 direct access를 위해서는 하나의 위성이 지상 단말기들과 최대한 오래 연결되어야 한다. 안정적인 저궤도 위성 네트워크 제공 및 위성의 공전 궤도를 고려할 경우, 위성과 지상의 단말기 간 최대 고도각이 70° 이상을 만족하는 소수의 위성들만 하나의 궤도 내에 배치되는 것이 적합하다.

저궤도 위성 네트워크의 안정성과 위성의 궤도를 고려할 경우, 그림 1의 통신 가능 시간을 기반으로 그림 2와 같이 2가지의 궤도 별 위성 배치 방안을 고려할 수 있다. 이론적으로는 하나의 STARLINK가 한국 전체에 위성 통신 서비스를 제공할 수 있으므로, 제안된 2가지의 방식은 매 순간 하나의 STARLINK가 한국 전체에 서비스를 제공한다고 가정한다 [3]. 첫 번째는 하나의 궤도면에 인접한 3개의 위성을 등 간격으로 배치하는 방식으로, 3 adjacent satellites per orbit (3ASO)로 명명한다. 두 번째 방식

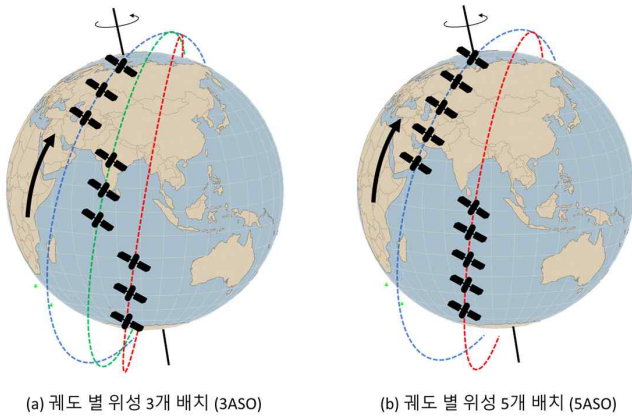


그림 2. 단일 궤도 내 배치된 위성의 숫자에 따른 위성 배치 방안

은 인접한 5개의 위성을 하나의 궤도 내에 동 간격으로 배치하는 방안으로 5 adjacent satellite per orbit (5ASO)라고 명명한다. 3개의 위성을 배치할 경우 각 위성들은 80° 이상의 최대 고도각을 만족할 수 있고, 5개의 위성을 배치할 경우 각 위성들은 70° 이상의 최대 고도각을 만족할 수 있다. 각 궤도의 위성들이 한국 부근에서 항상 일정 값 이상의 최대 고도각을 만족하기 위해 그림 2와 같이 릴레이 (relay) 형식의 다중 궤도 및 위성을 배치하도록 한다.

III. 시나리오 별 궤도 생성 및 시뮬레이션 결과

그림 2의 배치를 구현하기 위해 MATLAB Satellite Communications Toolbox를 이용한다. MATLAB에서 저궤도 위성을 생성하기 위해 Simplified General Perturbations 4 (SGP4)와 궤도 요소 (orbital elements)를 이용한다. 현재 운용 및 운영 예정인 저궤도 위성 중, 다수의 위성 고도가 550 km 이므로, 위성의 고도는 550 km로 설정한다. 통신 가능 시간 분석에서 중요한 지표인 최소 고도각은 STARLINK가 사용하고 있는 25° 로 설정한다.

그림 1에서의 통신 가능 시간이 최대 고도각이 70° 이상일 때 최댓값으로 수렴하는 것을 기반으로, 제안한 방식을 구현하기 위해 하나의 궤도 내에서 위성 간 간격은 진근점 이각 (true anomaly, 하나의 궤도 면에서 위성의 위치를 정하는 궤도 요소)을 이용하여 각각 $16.79, 16.78^\circ$ 로 설정한다. 설정된 값들은 각 위성과 지상 단말기 간 통신 가능 시간을 최대로 보장한다. 이 수치들은 고도 550 km의 궤도에 22개 위성을 동 간격으로 배치할 때 단일 궤도 내 인접한 위성 간 간섭 효과를 무시할 수 있는 최소 간격인 16.363° 를 만족한다 [3]. 궤도 간 간격은 상승 교점 경도 (right ascension of the ascending node, raan)을 기반으로 각각 $3.53, 5.8^\circ$ 로 설정하여 릴레이 형식의 다중 궤도 환경에서도 지속적인 위성통신 서비스를 제공하도록 한다. 저궤도 위성 통신의 주요 이슈인 handover (핸드오버)도 고려하여, 인접한 위성 간 핸드오버 발생 시 1초 동안 중복 연결이 가능하도록 한다. 또한, 하나의 저궤도 위성이 현재의 위치로 돌아오는 데 소요되는 시간 (revisit time)은 최대 14일이므로 시뮬레이션은 14일 동안 수행한다.

시뮬레이션 결과는 고도 550 km 궤도 내에 22개의 위성을 배치하는 SpaceX의 initial phase 방식과 비교한다 [1]. Initial phase 방식을 국내 환경에 적용할 시 표 1과 같이 총 308개의 군집 위성부터 지속적인 통신 서비스를 제공할 수 있다. 하지만 해당 방식은 단일 위성과 지상 단말기 사이의 통신 가능 시간을 최대화하는 것을 고려하지 않고, 최소 고도각만 고려한 방식이다. 반면에 3ASO와 5ASO는 각각 필요한 위성의 개수와 궤도면의 수는 306개, 102개, 320개, 64개이다. 지구의 자전과 위성의 공전

표 1. 단일 궤도 내 인접한 위성 배치 방안 별 설정 및 14일 동안 지속적인 위성 통신 네트워크를 제공하기 위한 궤도 및 위성 개수 결과

단일 궤도 내 인접한 위성 배치 방안	SpaceX initial phase	3ASO	5ASO
궤도 내 위성 개수	22	3	5
인접 위성 간 간격 (true anomaly, $^\circ$)	16.36	16.79	16.78
궤도 간 간격 (raan, $^\circ$)	25.71	3.58	5.8
궤도면 개수	14	102	62
위성 개수	308	306	320

경로를 동시에 고려할 경우, 위성 궤도 및 진근점 이각의 오차를 0.1° 만큼 허용하면 3ASO 방식은 307번째 위성의 궤도와 진근점 이각은 첫 번째 위성과 동일하다. 따라서 102개의 궤도 및 306개의 위성이 필요하다. 5ASO의 경우, 각각의 궤도들은 모두 독립적이며 필요한 위성 개수는 320개가 된다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 방식 중 3ASO의 방식으로 위성들을 배치하면 국내 환경에 필요한 저궤도 위성의 개수가 가장 작은 것을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 국내 환경에서 각각의 저궤도 위성과 지상 단말기의 통신 가능 시간을 최대화하기 위해 하나의 궤도에서 연속적으로 배치하는 위성의 수를 3개 (3ASO), 5개 (5ASO)로 제안하였다. 제안한 방식들은 국내 환경에 맞게 설정된 SpaceX의 initial phase 방식과 비교하였다. 시뮬레이션 결과는 안정적이면서도 지속적인 저궤도 위성 네트워크를 제공하기 위해 필요한 최소한의 저궤도 위성 개수가 하나의 궤도면에 3개의 위성을 동 간격으로 연속하게 배치하였을 때 306개인 것을 알 수 있다. 본 논문의 결과는 국내에서의 STARLINK 시범 서비스뿐만 아니라 국내 통신 환경에서의 저궤도 위성 네트워크 설계 시 기초 자료가 될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A4A1030775).

참 고 문 헌

- [1] N. Pachler, et al., "An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband," in *Proc. 2021 IEEE international conference on communications workshops (ICC workshops)*, Montreal, Canada Jun. 2021, pp. 1-7.
- [2] I. Ali, et al., "Predicting the visibility of LEO satellites," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 4, pp.1183-1190, Oct. 1999
- [3] Reddit STARLINK Coverage Tracker (<https://starlink.sx/>).
- [4] 류재학, 박주하, 전채연, 한상민, 신원재, "군집 LEO 위성 네트워크에서 위성 간 간섭 영향 분석," *한국통신학회논문지*, vol. 47, no. 8, pp. 1051-1054, 2022