

기하학적 시뮬레이션 기반 최소 고도각에 따른 LEO 위성통신 가시 위성수 분석

김가연*, 김해정†, 신원재*,†

*고려대학교 차세대통신학과, †고려대학교 전기전자공학과
{sagj14610, haejung, wjshin}@korea.ac.kr

Geometric Simulation-Based Analysis of Visible Satellite Count by Minimum Elevation Angle in LEO Satellite Communications

GaYeon Kim*, Haejung Kim†, Wonjae Shin*,†

*Department of Communications Engineering, Korea Univ.,

†School of Electrical Engineering, Korea Univ.

요약

본 논문은 저궤도(LEO, Low Earth Orbit) 위성통신 시스템에서 최소 고도각(Minimum elevation angle) 설정이 커버리지(Coverage) 및 가시 위성수에 미치는 영향을 기하학적 시뮬레이션을 통해 분석한다. MATLAB 기반 시뮬레이션을 수행하여 동북아시아 지역을 대상으로 최소 고도각 조건에 따른 가시 위성 수 분포를 정량적으로 평가하였다. 분석 결과, 최소 고도각을 낮게 설정할수록 가시 위성 수가 증가하여 링크 연속성 확보에 유리함을 확인하였다. 이를 바탕으로 재난 상황과 같이 통신 연속성이 중요한 환경에서의 LEO 위성통신 운용 전략에 대한 시사점을 제시한다.

I. 서론

전쟁, 지진 등 재난 상황에서는 지상 통신 인프라가 전면적으로 붕괴될 위험이 있다. 이러한 위험에 대한 해결책으로 위성통신 서비스가 큰 주목을 받고 있다. 실제로 2022년 SpaceX는 러시아-우크라이나 전쟁 중에 Starlink를 우크라이나에 공급한 사례가 있다. 특히 저궤도(LEO, Low Earth Orbit) 위성통신 시스템은 정지궤도(GEO, Geostationary Earth Orbit) 위성 대비 낮은 전파 지연과 완화된 단말 요구 조건을 가지는 장점으로 인해 재난 대응 통신에서 유망한 대안이다[1].

재난 상황에서는 순간적인 최대 전송률보다, 통신 링크가 끊기지 않고 지속적으로 유지될 수 있는지 여부가 더 중요하다. 이러한 관점에서 단일 위성과의 링크뿐만 아니라, 동시에 여러 위성이 가시되는 구조를 통해 링크 단절 시에도 대체 경로를 확보할 수 있는지가 핵심적인 요소가 된다. 저궤도 위성통신 시스템에서 최소 고도각(Minimum elevation angle)은 이러한 가시성 특성에 직접적인 영향을 미치는 주요 설계 파라미터이다.

본 논문에서는 최소 고도각 변화에 따른 커버리지와 동시에 보이는 저궤도 위성 수의 변화를 기하학적 시뮬레이션을 통해 분석한다. 이를 통해 재난 대응 관점에서의 LEO 위성통신 운용 전략에 대한 시사점을 도출한다.

II. 본론

2.1 이론적 배경 및 기하학적 모델

저궤도 위성통신 시스템에서는 지상 사용자와 위성 간의 연결 여부는 고도각(Elevation angle)에 의해 결정된다. 위성의 고도각은 지상 단말에서 수평면을 기준으로 위성을 바라보는 각도로 정의되며, 최소 고도각은 위성과 사용자가 연결될 수 있는 가장 낮은 고도각이다. 최소 고도각이 클수록 한 위성이 커버할 수 있는 면적이 작아져 가시 가능한 위성의 수가 감소하는 경향을 가진다.

본 연구에서는 지상의 사용자와 위성의 위치를 지구 중심 좌표계(ECEF, Earth-Centered Earth-Fixed)에서 표현하고, 지상점의 천정점(Local zenith) 방향 벡터와 위성으로 향하는 LOS(Line-of-Sight) 벡터 간의 관계를 통해 고도각을 계산한다. 계산한 고도각이 설정한 최소 고도각보다 크면 사용자와 연결될 수 있는 가시 위성으로 판단하였으며, 최소 고도각보다 작으면 연결될 수 없는 위성으로 판단하였다.

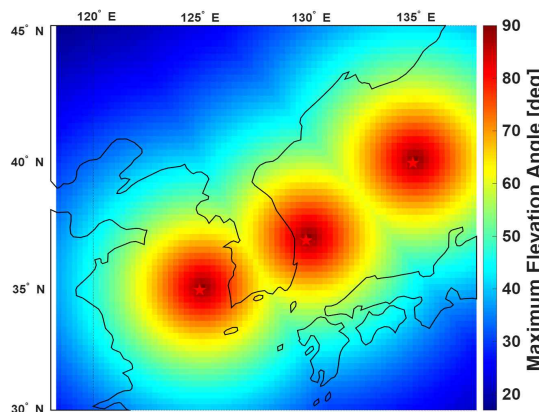


그림 1 시뮬레이션 환경에서 동북아시아 지역의 최대 고도각

최소고도각	단순 연결 영역 비율(%)	안정 연결 영역 비율(%)	평균 가시 위성수(기)
10°	100	100	2.97
20°	98	95	2.51
30°	86	60	1.62
40°	64	28	0.94

표 1. 최소 고도각에 따른 단순 및 안정 영역 비율과 평균 가시 위성 수

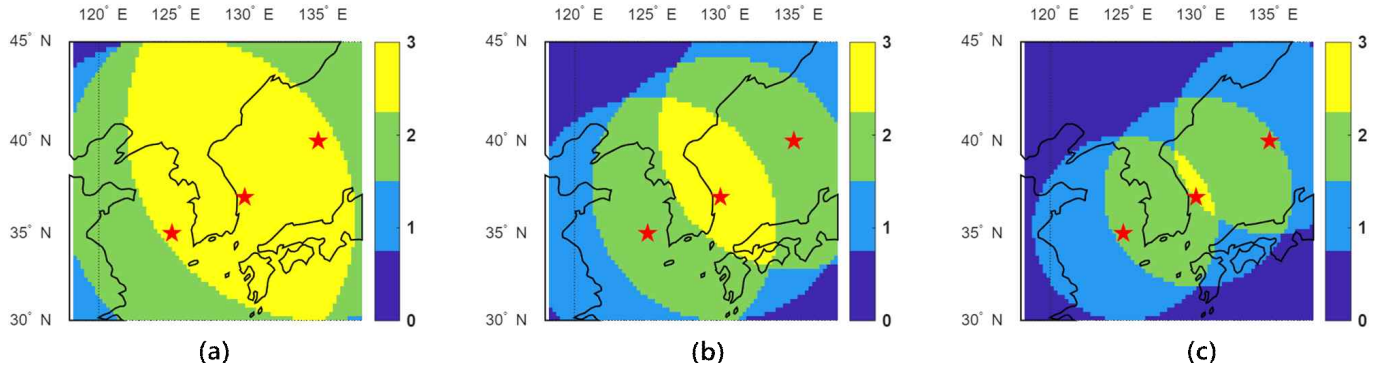


그림 2 최소 고도각에 따른 동북아시아의 가시 위성 수 분포 (a) 최소 고도각 10° (b) 최소 고도각 30° (c) 최소 고도각 40°

2.2 시뮬레이션 모델 및 설정

시뮬레이션은 MATLAB 환경에서 수행되었으며, 한반도가 포함된 동북아시아 지역(위도 30°~45°, 경도 118°~138°)을 분석 대상으로 설정하였다. 지구 반지름은 6,371 km로 설정하였으며, 고도 약 550 km의 저궤도 위성 3기를 특정 시점의 고정된 위치에 배치하였다. 이때 위성은 실제로 우리나라를 지나는 경사도 53°의 위성 경로를 사용하였다.

그림 1은 각 지점에서 보이는 위성들 중 최대 고도각을 나타낸 것이다. 시뮬레이션에 사용한 3기의 위성은 별표로 표시하였고, 별표 지역은 위성 바로 아래에 위치하므로 최대 고도각이 90°로 나타난다. 최소 고도각은 3GPP NTN 시뮬레이션에서 일반적으로 고려되는 10°부터 Starlink의 목표값인 40°까지 단계적으로 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다[2].

2.3 시뮬레이션 결과

그림 2는 최소 고도각에 따라 보이는 LEO 위성의 개수를 나타낸다. 최소 고도각이 높아질수록 동시에 보이는 위성의 개수가 감소함을 확인할 수 있다. 특히 최소 고도각이 30° 이상으로 증가할 경우, 대부분의 지역에서 단일 위성만 가시되기 시작했고 위성이 하나도 보이지 않는 서비스 불가 영역 역시 확대되었다. 또한, 최소 고도각이 낮아질수록 한 개 이상의 위성이 보이는 커버리지 영역이 넓어짐을 확인할 수 있다.

그림 3은 최소 고도각 설정에 따른 두 종류의 커버리지 변화를 나타낸다. LEO 위성은 빠르게 이동하므로 단일 위성만 가시될 경우 핸드오버 시 순간적인 링크 단절이 발생할 수 있다. 따라서 안정적인 통신 연속성을 위해서는 최소 2기 이상의 위성이 동시에 가시되어, 한 위성과의 링크가 끊기기 전에 다른 위성으로 전환할 수 있는 환경이 필요하다. 이를 반영하여, 위성이 최소 한 개 이상 보이는 지역의 비율을 '단순 연결 영역 비율'로, 위성이 두 개 이상 보이는 지역의 비율을 '안정 연결 영역 비율'로 정의하였다. 최소 고도각이 증가함에 따라 단순 연결 영역 비율은 완만하게 감소하는 반면, 안정 연결 영역 비율은 급격히 감소하는 경향을 보인다.

표 1은 최소 고도각에 따른 커버리지 지표를 정리한 것이다. 최소 고도각이 10°일 때는 전체 영역에서 2기 이상의 위성이 보인다. 그러나 최소 고도각이 40°로 증가하면 단순 연결 영역 비율은 64.8%로 감소하고, 안정 연결 영역 비율은 28.7%까지 급감한다. 평균 가시 위성 수 역시 10°에서 2.98기, 40°에서 0.95기로 약 3배 차이를 보인다. 이는 최소 고도각 설정이 다중 위성 가시성에 큰 영향을 미침을 보여준다.

2.4 결과 해석 및 논의

최소 고도각은 저궤도 위성통신에서 다중 위성 가시성을 결정하는 핵심 파라미터이다. 높은 최소 고도각 조건에서는 가시 가능한 위성의 수가 감소하여 링크 단절에 대한 취약성이 커진다. 반면 낮은 최소 고도각 조건에서는 동시에 여러 위성이 가시되어 링크 연속성 확보에 유리하다. 다만,

낮은 고도각에서는 전파 경로가 길어지고 대기 손실이 증가하여 개별 링크 품질이 저하될 수 있으므로, 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

재난 상황에서는, 순간적인 최대 성능보다 통신이 끊기지 않고 유지될 수 있는지가 더욱 중요하다. 이러한 관점에서 동시에 보이는 저궤도 위성 수는 재난 대응 통신에서 중요한 지표가 될 수 있으며, 최소 고도각을 낮게 설정하는 운용 전략은 링크 연속성을 확보하는 데 유리하다.

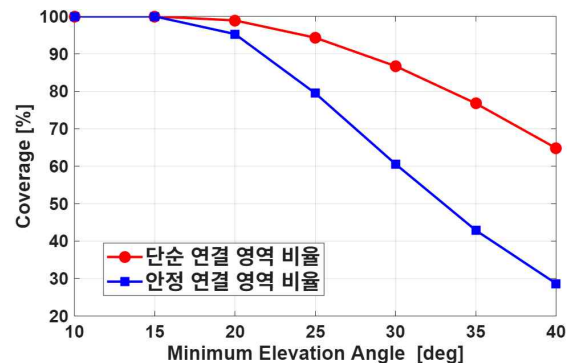


그림 3 최소 고도각에 따른 단순 및 안정 연결 영역 비율의 변화

III. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성통신 시스템에서 최소 고도각 변화가 커버리지 및 다중 위성 가시성에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 최소 고도각이 감소할수록 동시에 보이는 저궤도 위성 수가 증가하며, 이는 링크 안정성 측면에서 유리하다. 이러한 결과는 재난 상황에서 저궤도 위성통신 시스템의 운용 전략을 설계할 때, 다중 위성 가시성을 함께 고려해야 함을 시사한다. 다만, 낮은 최소 고도각 설정은 개별 링크의 경로 손실 증가, 핸드오버 빈도 상승, 간섭 환경 복잡화 등의 문제를 수반할 수 있어, 향후 이러한 요소들을 포함한 종합적인 분석이 필요하다. 본 논문은 재난 대응 관점에서 다중 위성 가시성 확보를 위해 낮은 최소 고도각 운용이 좋은 전략이 될 수 있음을 제시한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 고려대학교 차세대 통신학과 ACSESS 진리장학 프로그램의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Abels, "Private infrastructure in geopolitical conflicts: the case of Starlink and the war in Ukraine," *Int. Political Sociology*, vol. 18, no. 3, 2024.
- [2] Space Exploration Holdings, LLC, "Application for Modification of Authorization for the SpaceX NGSO Satellite System," FCC File No. SAT-MOD-20181108-00083, Nov. 2018.