

한국에서의 저궤도 위성 서비스를 위한 STARLINK 위성군 분석

한상민, 문태한*, 추현우*, 김장면**, 이영포**, 오태석**, 김동욱**, 김재현*

아주대학교 AI융합네트워크학과, *아주대학교 전자공학과, **SK텔레콤 New Connectivity 팀

{hsm960622, ansxogks3*, back1ho*}@ajou.ac.kr,
{zaanda**, youngpo.lee**, taeseok**, kimdw**}@sk.com, jkim@ajou.ac.kr*

Analysis of STARLINK Constellation for LEO Satellite Service in Korea

Department of AI Convergence Network, Ajou university

*Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou Univ.

**Department of New Connectivity, SK Telecom

요약

저궤도 위성과 지상 단말기 간 직접 통신 (Direct-to-Cell 혹은 Direct-to-Satellite, DtS)을 통한 데이터 전달 서비스는 향후 몇 년 이내에 상용화될 예정이다. 본 논문에서는 SpaceX가 계획하고 있는 DtS STARLINK 중 남한에 적합한 STARLINK 위성군을 분석하기 위해 서로 다른 궤도의 위성군 중, 최소 고도각을 조건에 적합한 위성군을 분석한다. 또한, 고도각 조건을 통해 분석한 위성군의 STARLINK와 남한의 지상 단말기 간 신호 세기도 분석한다.

I. 서론

2024년부터 SpaceX가 위성-스마트폰 간 직접 통신 (Direct-to-cell 혹은 Direct-to-Satellite, DtS) 서비스를 북미에서 제공하기 시작함에 따라, 근접 저궤도 위성을 이용한 스마트폰 및 소형 단말기 통신 서비스가 전 세계에서 본격적으로 상용화될 예정이다 [1]. DtS는 위성통신 서비스 상용화뿐만 아니라 지상-비지상 통합망 구성 시 중요한 역할을 수행할 것으로 전망된다. 이러한 동향을 고려하여, 본 논문에서는 한반도에 적합한 DtS 용 STARLINK 위성군에 대해 분석한다. 분석을 위해 서울에 지상 단말기를 위치시키고, 지상 단말기로부터 최소 고도각 (minimum elevation angle, θ_{\min})을 만족하는 시간 별 연결 가능한 shell 별 STARLINK 개수 및 하나의 위성에 대한 평균 연결 가능 시간을 확인한다. 분석 결과 궤도경사각이 43° 인 DtS STARLINK 위성군이 θ_{\min} 기준 연결 가능성 기준 측면에서 남한에 적합하다는 것을 알 수 있다. θ_{\min} 관점에서 분석한 위성군을 기반으로, 공개적으로 발표된 SpaceX의 위성 통신 관련 설정값들과 3rd Generation Partnership Project (3GPP) NTN 표준 문서의 경로 감쇠 수식을 활용하여, 지상 단말기 기준 위성의 궤도 특성에 따른 Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) 세기를 분석한다.

II. DtS STARLINK 위성군 모델

SpaceX가 계획하고 있는 DtS STARLINK 위성군에 대한 정보는 표 1과 같다 [1], [2]. 총 3개의 위성군 (shell)을 DtS 용도로 고려하고 있으며, 각 shell의 이름을 shell 1, shell 2, shell 3로 명명한다. Shell 순서대로 고도 (altitude, a)는 525, 530, 535 km이며, 궤도경사각 (inclination, i)은 53° , 43° , 33° 이다. 모든 shell의 궤도면 수 (the number of orbital plane, N_p) 수는 28, 단일 궤도 당 위성 수 (the number of satellite in a plane, M_p)는 120이다. θ_{\min} 은 STARLINK 위성들이 사용하는 25° 으로 설정한

표 1. FCC에 승인된 SpaceX의 Gen2 DtS 계획 [1] [2]

Shell	고도 (a) (km)	궤도경사각 (i) ($^\circ$)	궤도면 수 (N_p)	단일 궤도 당 위성 수 (M_p)
1	525	53	28	120
2	530	43	28	120
3	535	3	28	120

다.

III. 위성 통신 채널 모델

본 논문에서의 연구를 위해, DtS STARLINK에 대해 공개되어 있는 값들은 해당 값들을 사용하며 [1], 나머지 다른 변수들 중 경로 감쇠 모델 및 antenna aperture 값은 3GPP TR 38.811의 large scale channel model을 사용한다 [3]. [1]에서 공개된 DtS STARLINK 관련 값들은 하향링크 중심 주파수, 대역폭, 최대 안테나 이득, 등가 등방 복사 전력 최댓값 밀도 (peak EIRP density), 등가 등방 복사 전력 최댓값 (peak EIRP)이며, 각각 1.99 ~ 1.995 GHz, 1.4 MHz 혹은 5 MHz, 38 dBi, 7.67 dBW/MHz, 58 dBW으로 설정한다 [1,2]. 지상 단말기에 대한 정보는 스마트폰의 안테나 이득이 명시되어 있으며, Long-Term Evolution (LTE) 스마트폰의 안테나 이득인 -5 dBi으로 설정한다. [3]에서 명시된 Signal-to-Noise Ratio (SNR)와 Signal-to-Interference Ratio (SIR) 및 SINR을 계산하기 위해, 경로 감쇠 (PL)에 대한 수식은 다음과 같다.

$$PL [dB] = \text{prob}_{.LOS} * PL_{LOS}(FSPL + SF) + \text{prob}_{.NLOS} * PL_{NLOS}(FSPL + SF + CF), \quad (1)$$

식 (1)에서 $\text{prob}_{.LOS}$ 와 $\text{prob}_{.NLOS}$ 은 각각 Line-Of-Sight (LOS)와 Non Line-Of-Sight (NLOS) 확률이며, $PL_{LOS}(FSPL + SF)$ 과 $PL_{NLOS}(FSPL + SF)$ 은 각각 LOS와 NLOS에 대한 자유 경로 감쇠

표 3. 서울에서 θ_{\min} 을 만족하는 DtS STARLINK 위성 결과

DtS STARLINK shell	Shell 1	Shell 2	Shell 3
연결 가능한 최대 위성 수 (/sec.)	16	28	14
연결 가능한 최소 위성 수 (/sec.)	10	21	8
연결 가능한 평균 위성 수 (/sec.)	12.8	24	11.4
연결 가능한 위성 당 평균 연결 시간	208 초	229 초	189 초

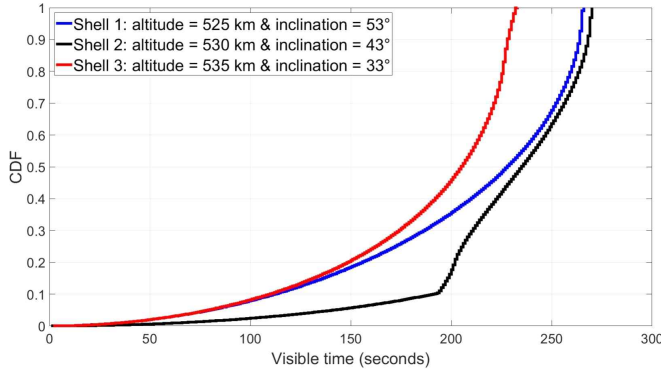


그림 1. DtS STARLINK shell 별 CDF 결과.

(free space path loss, $FSPL$)와 음영 효과 (SF), 클러터 손실 (CL)을 포함한 경로 손실 값이다. Antenna aperture 는 2m로 설정한다. $prob_{LOS}$ 및 $prob_{NLOS}$ 을 포함한 다른 설정들은 하향링크의 중심 주파수 대역이 1.99 ~ 1.995 GHz인 것을 고려하여 [3]에서의 값들을 활용한다.

III. 성능 분석 환경 설정 및 결과

DtS 용 STARLINK shell 중 남한에 적합한 shell을 분석하기 위해, MATLAB Satellite Communications Toolbox를 활용한다. 서울에 스마트폰의 위치를 고정시키며, 해당 스마트폰에 대해 θ_{\min} 이 25° 를 만족하는 위성들에 대해 분석한다. 각 shell에 대한 위성의 총 개수는 SpaceX가 계획한 DtS STARLINK가 총 2,016개인 것을 고려하여 각각 2,016개로 설정하며 M_p 는 72개로 설정한다. 궤도 내 위성 간 간격을 동일하게 설정하기 위해 true anomaly는 5씩 증가시키며, 궤도 간 간격 역시 동일하게 설정하기 위해 Right Ascension of the Ascending Node (RAAN)을 12.857° 씩 증가시킨다. 인접 궤도 간 위성 사이의 관계를 의미하는 phasing factor는 0으로 설정한다. 모의 실험 시간은 7일로 설정하며, MATLAB 내에서의 samptime은 1초로 설정한다.

표 1은 각 shell 별 결과로, 각 shell에 대해 연결된 위성 수를 1초당 개수로 분석한다. shell 1 위성군을 활용할 경우 시간 당 최대 및 최소 연결 가능한 STARLINK는 16, 10개이며, 평균적으로 약 13개가 연결된다. Shell 2는 각각 28, 21, 그리고 약 24이며, shell 3는 14, 8, 그리고 약 11개이다. 또한, 각 shell 내에서 θ_{\min} 을 만족하는 위성들 중 연결 가능한 평균 시간 (available visible time)은 shell 1, 2, 3 순서대로 각각 208, 209, 189초인 것을 알 수 있다. 표 1의 결과를 통해, 연결 가능한 평균 STARLINK 숫자와 visible time 측면에서 모두 shell 2가 한반도에 적합한 것을 알 수 있다. 이는 각 shell에서 θ_{\min} 을 만족하는 위성들의 visible time에 대한 누적분포함수 (Cumulative Distribution Function, CDF)를 나타내는 그림 1에서도 확인할 수 있다.

Shell 2의 위성 하나에 대한 SINR 결과를 확인하기 위해, 채널 모델은

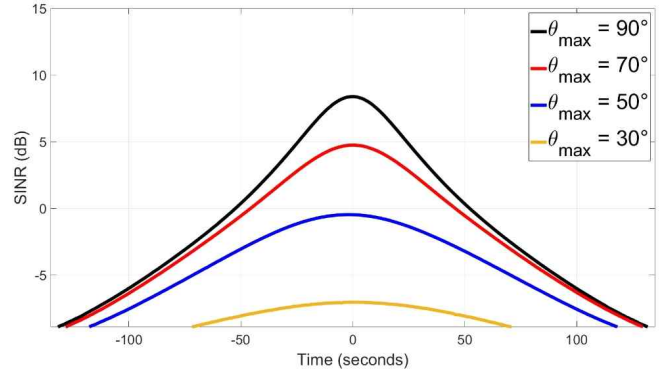


그림 2. Shell 2의 STARLINK에 대한 θ_{\max} 별 SINR.

Urban Scenario를 사용하며, 주된 UE (main UE)를 남한 가운데에 위치시키고, UE 간 간격을 50 km로 설정하여 간섭 신호로 간주되는 다른 UE들 36개를 배치시킨다 [3]. 그림 2는 SINR 결과로, 지구가 자전하면서 인공위성이 공전하는 것을 고려하여 STARLINK와 지상 단말기 간 최대고도각 (maximum elevation angle, θ_{\max}) 별 SINR 결과가 포함되어 있으며, θ_{\max} 을 만족하는 시각을 기준으로 시간을 정규화하고 θ_{\min} 을 만족하는 구간들만 SINR을 표기한다. 분석 결과 [4]와 같이 θ_{\max} 이 클수록 visible time도 증가하며, SINR 역시 θ_{\max} 이 클수록 전반적으로 높게 측정된다.

IV. 결론

본 논문은 DtS STARLINK 서비스 상용화에 대비하여, 남한에 적합한 DtS STARLINK 위성군에 대해 분석하였다. 이를 위해 DtS STARLINK에 대해 공개된 정보와 3GPP NTN 문서의 수식을 활용하였다. 분석 결과, 궤도경사각이 53° , 43° , 33° 인 위성군 중 43° 인 위성군이 남한에 적합한 것을 알 수 있었으며, 해당 위성군에 대한 SINR 결과를 궤도 특성에 따라 확인하였다. 본 연구를 바탕으로, 향후에는 실제 STARLINK가 사용하는 uniform rectangular array를 반영하여 성능을 분석하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 SK 텔레콤 산학협력과제 (저궤도 군집위성 설계/분석을 위한 AI 기반 시뮬레이터 개발) 지원으로 연구되었음.

참고 문헌

- [1] SPACE EXPLORATION HOLDINGS, LLC, "SPACEX GEN2 DIRECT-TO-CELLULAR SYSTEM," [Online]. Available: <http://https://cdn.arstechnica.net/wp-content/uploads/2023/05/SpaceX-T-Mobile-Technical-Narrative.pdf>
- [2] Space Exploration Holdings, LLC. (2022) SAT-LOA-20200526-00055. Pending approval. [Online]. Available: <https://www.fcc.gov/document/fcc-partially-grants-spacex-gen2-broadband-satellite-application>
- [3] 3GPP TR 38.811 v15.4.0 "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15)", Sep. 2020.
- [4] 한상민, 신원재, 김재현, "국내 위성 통신 서비스를 위한 군집 저궤도 위성 분석," 한국통신학회 학술대회논문집, pp. 1,257-158, 2023. 2.