

군집 저궤도 위성 네트워크에서 위성 간 간섭 영향 분석

류재학*, 박주하*, 전채연*,
한상민**, 신원재*

Interference Analysis Between Satellites for LEO Satellite Constellation Networks

Jaehak Ryu*, Juha Park*, Chaeyeon Jeon*,
Sangmin Han**, Wonjae Shin*

요약

대규모 Low Earth Orbit(LEO) 위성이 지구 전역에 인터넷 서비스를 제공하는데 사용할 수 있는 주파수 대역은 한정적이므로, 다수의 인접 위성이 동일 주파수 대역을 공유하는 시나리오가 주목받고 있다. 본 논문에서는 단일 궤도 내의 위성들이 동일 주파수 대역을 사용할 때, 배치된 위성 수와 고도에 따라 발생하는 하향 링크 간섭을 MATLAB Satellite Communications Toolbox를 이용하여 분석한다. 간섭 시나리오 분석 시 타겟 위성과 지상국이 연결되는 시간 중 Carrier to Interference plus Noise Ratio(CINR)이 기준 미달이 되는 시간의 비율을 이용한다. 간섭 신호의 세기는 궤도가 300-1,000 km 고도에서는 고도 증가에 따른 경로 손실의 증가보다 오프셋 각도의 감소에 더 큰 영향을 받지만, 1,000 km 이상 고도에서는 경로 손실의 증가에 더 큰 영향을 받음을 시뮬레이션을 통해 확인한다. 이러한 분석을 통해 Starlink에서 운용중인 고도 340, 550 km 궤도에서 배치 가능한 위성의 최대 개수는 각각 29개, 22개, OneWeb에서 운용 예정인 고도 1,200 km 궤도에서는 23개의 적절성을 실험적으로 검증 해본다.

Key Words : LEO Satellite Communication,

Interference, Offset Angle, Carrier to Interference plus Noise Ratio, Antenna Beam Pattern

ABSTRACT

The frequency bands for satellite communications become a limited resource in that a great number of Low Earth Orbit(LEO) satellites will be utilized to provide global internet services. With this, the spectrum sharing with adjacent satellites is of great interest. In this article, we analyze the downlink interference with the number and altitude of satellites deployed in a single orbit using the same frequency bands with the MATLAB Satellites Communications Toolbox. Analyzing the interference scenario, we check the ratio of the time when the Carrier to Interference plus Noise Ratio(CINR) falls short of the reference in the time when the target satellite and ground station are connected. The interference signal power is more affected by the reduction of the offset angle than by the increase of the path loss due to the increase in altitude at an altitude of 300-1,000 km. However, at higher altitudes than 1,000 km, it is more affected by the increase in path loss. With this, we also demonstrate that the maximum number of satellites that can be deployed at an altitude of 340 and 550 km in operation on Starlink is 29 and 22 respectively, and 23 on an altitude of 1,200 km scheduled to operate on OneWeb.

I. 연구 배경 및 목적

최근 SpaceX Starlink, Amazon Kuiper, 그리고 OneWeb 등이 고도 2,000 km 이하 고도의 Low Earth Orbit(LEO) 위성을 이용한 통신 서비스를 제공하기 위해 연구개발 및 도입 중이다. LEO 위성 통신을 이용해 오지, 해양, 교외 지역 등에도 원활한 초고

* 본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2022R1A2C4002065, No. 2021R1A4A1030775)과 정보통신기획평가원(No.2018-0-01424)의 지원을 받아 수행됨.

• First Author : Ajou University Dept. of Artificial Intelligence Convergence Network, fbwogkr98@ajou.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Ajou University Dept. of Electrical and Computer Engineering, wjshin@ajou.ac.kr, 중신회원

* Ajou University Dept. of Electrical and Computer Engineering, qkrwngk8471@ajou.ac.kr, 학생회원, uj0987@ajou.ac.kr

** Ajou University Dept. of Artificial Intelligence Convergence Network, hsm960622@ajou.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 202207-125-A-LU, Received July 4, 2022; Revised July 20, 2022; Accepted July 20, 2022

속 인터넷 제공이 가능하며, 통신망이 파괴된 재난 상황에서 통신망 복구에 유용하게 사용될 수 있다. LEO 위성의 특성상 통신 서비스 가능 시간을 확보하기 위해 다수의 위성이 요구되지만, 운용할 수 있는 주파수 자원은 한정되어 있다. 이때 다수의 위성이 주파수 대역을 공유하는 방식으로 활용하여 인접 위성에 의한 간섭이 발생한다. 따라서 군집 LEO 위성 운용 시 위성 간 간섭 분석이 필수적이다. 이러한 위성 간 간섭 시나리오를 분석하기 위해, 간단한 두 개 LEO 배치 시나리오에서의 위성 간 간섭을 분석한 최근 연구가 발표되었다.^[1,2]

그러나 기존 연구들은 여러 고도에 따른 위성 간 간섭 분석이 수행되지 않았다. 실제 군집 LEO 위성 네트워크를 운용하기 위해서는 고도별 간섭 분석이 필요하다. 그리고 궤도 내에 배치하는 위성의 개수에 따라 인접한 다수의 위성들이 간섭 신호를 보내는 상황이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 이용하여 LEO 궤도 내 위성 개수와 고도 변동에 따른 인접 위성에 의한 간섭의 영향을 Carrier to Interference plus Noise Ratio(CINR)과 Carrier to Noise Ratio(CNR)을 통해 분석한다.

II. 군집 LEO 위성 네트워크에서 인접 위성에 의한 간섭 정의 및 분석

2.1 인접 위성에 의한 간섭

LEO 위성은 지속적인 통신 서비스 제공을 위하여 다수의 위성을 배치해야 한다. 한 궤도에 배치하는 위성의 수가 증가함에 따라 지상국과 타겟 위성 간 하향 링크에 인접 위성에 의한 간섭이 발생한다. 그림 1은 타겟 위성 수신 안테나의 주빔(Main lobe)이 서로 지속해서 추적할 때 인접 위성에 의한 간섭이 발생하는 상황이다. 간섭의 세기는 타겟 위성과의 인접 위성 간의 오프셋 각도(Offset angle)와 안테나 빔 패턴을 고려해야 한다.^[2]

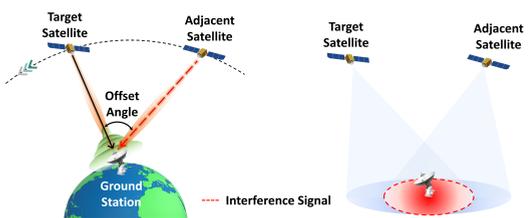


그림 1. 지상국과 타겟 위성 간 하향 링크에서 인접 위성에 의한 간섭
Fig. 1. Interference by adjacent satellites in the downlink

2.2 인접 위성에 의한 간섭 분석 방법

타겟 위성과 지상국의 하향 링크 상황에서 인접 위성에 의한 간섭의 영향은 CNR과 CINR을 지표로 분석할 수 있으며 각각 식 (1), (2)로 계산된다.

$$CNR = EIRP_T - FSPL + G_C - 10 \log_{10}(k_B TW) - LOSS_G \text{ [dB]} \quad (1)$$

$$CINR = EIRP_T - FSPL + G_C - 10 \log_{10}(I + k_B TW) - LOSS_G \text{ [dB]} \quad (2)$$

$EIRP_T$ 는 타겟 위성 송신 안테나의 실효 등방성 복사 전력, $FSPL$ 은 자유 공간 경로 손실, G_C 는 지상국 수신 안테나의 이득, I 는 인접 위성에 의한 간섭 신호 전력, k_B 는 볼츠만 상수, T 는 안테나 잡음 온도, W 는 송신 신호의 대역폭, $LOSS_G$ 는 지상국의 총 시스템 손실이다. 간섭의 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 식 (3)과 같은 지표를 도입한다.

$$R_{I > N} = \frac{t_{CINR < CNR-3}}{t_{visible}} \times 100(\%) \quad (3)$$

식 (3)에서 $t_{visible}$ 는 타겟 위성과의 지상국이 통신하는 전체 시간 구간, $t_{CINR < CNR-3}$ 는 타겟 위성과의 지상국이 통신할 때, CINR이 CNR - 3 dB 이하인 시간 구간이다. 이 시점은 간섭 신호 전력과 잡음 전력이 동일한 시점으로 볼 수 있다. 따라서 식 (3)의 $R_{I > N}$ 은 타겟 위성과의 지상국이 통신하는 시간 중 인접 위성에 의한 간섭 신호 전력이 잡음 신호 전력보다 큰 시간의 비율을 의미한다.

III. 실제 운용 시나리오를 고려한 간섭 분석 시뮬레이션

본 논문에서는 LEO 위성 통신 상황에서 동일 궤도 인접 위성에 의한 하향 링크 간섭 영향을 MATLAB의 Satellite communication toolbox와 Antenna toolbox를 이용한 시뮬레이션으로 분석하였다.

그림 2와 같이 실제 Starlink에서 운용 중인 위성의 궤도 정보를 담은 Two-Line Element set(TLE) 파일

```

STARLINK-1022
1 44727C 190740 22143.03457343 -.00024710 00000-0 -16561-2 0 1434
2 44727 53.0546 331.5587 0001622 63.8915 152.7490 15.06411554 15
Inclination Mean Anomaly Mean Motion
    
```

그림 2. 운용중인 STARLINK-1022의 TLE 파일
Fig. 2. TLE file of STARLINK-1022

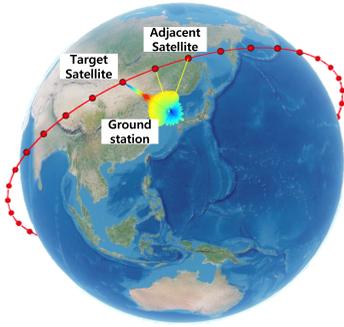


그림 3. 간섭 분석을 위한 MATLAB 시뮬레이션 실행 화면
Fig. 3. Snapshot of the MATLAB simulation

을 기반으로 위성의 Mean anomaly를 일정 간격으로 설정한 위성을 추가하여 그림 3과 같이 동일 궤도 내에서 공전하는 LEO의 시뮬레이션을 생성하였다.^[3]

세부적인 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다. 이때 최소 고도각(Minimum elevation angle)은 3GPP에서 제시한 NTN 기술보고서(TR 38.811)를 기반으로 설정하였다.^[4]

시뮬레이션 결과 그림 4와 같이 현재 Starlink에서 운용 중인 고도 340, 550 km의 궤도, OneWeb이 운용 중인 고도 1,200 km의 궤도에서 위성이 증가함에 따라 $R_{I>N}$ 이 증가하는 것을 확인하였다.^{[5],[6]} 이는 단일궤도 내 배치하는 위성의 개수를 증가시키면 오프셋 각도가 감소하여 간섭 신호의 수신 안테나 이득이 커지기 때문이다.

그림 5에서는 $R_{I>N}$ 의 기준을 10%로 두고 진행하였다. 고도 300-1,000 km 구간에서는 고도가 증가함에 따라 배치할 수 있는 최대 위성의 개수가 감소하며 고도 1,000 km 이상에서는 증가함을 확인하였다. 이는 간섭 신호의 세기가 고도 300-1,000 km 구간에서

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

	Parameters	Value
Satellite	Inclination	53.056°
	Transmitter antenna type	Gaussian
	Carrier frequency	11.7 GHz
	Bandwidth	25 MHz
	Transmit power	20 dBW
Ground station	Latitude	37°35'08"N
	Longitude	126°58'28"E
	Minimum elevation angle	10 °
	Receiver antenna type	Parabolic

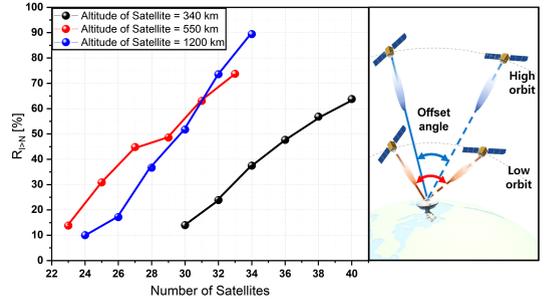


그림 4. 고도 별 위성 개수 증가에 따른 $R_{I>N}$ 변화
Fig. 4. Change of $R_{I>N}$ due to increasing number of satellites according to altitudes

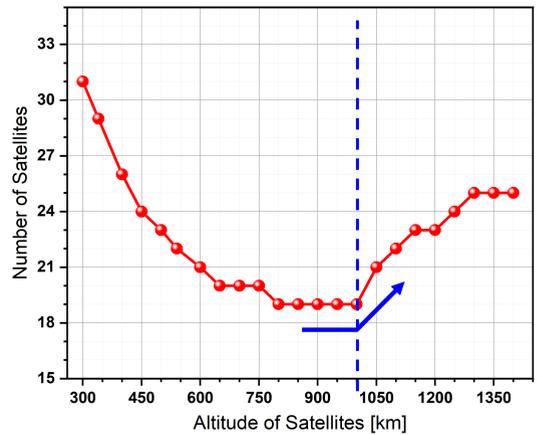


그림 5. 고도별 배치 가능한 위성의 최대 개수
Fig. 5. Maximum number of satellites deployed by altitude

는 고도 증가에 따른 오프셋 각도 감소의 영향이 경로 손실 증가에 의한 영향보다 크지만, 고도 1,000 km 이상에서는 경로 손실 증가에 의한 영향이 더 크기 때문이다.

IV. 결론 및 고찰

본 논문에서는 LEO의 타겟 위성과 서울에 배치된 지상국 간 하향 링크에서 인접한 위성으로부터의 궤도의 고도와 단일 궤도 내에 동일 간격으로 배치된 위성의 개수가 간섭에 미치는 영향을 분석하였다. 시뮬레이션 결과 동일 고도에서 위성의 수를 증가시키는 경우 타겟 위성과 간접 위성 간 오프셋 각도가 감소하여 간섭 신호에 대한 수신 안테나 이득의 증가로 $R_{I>N}$ 이 증가함을 확인하였다. 고도 별로 배치할 수 있는 최대 위성의 개수를 확인하였을 때 550 km 궤도에서 22개로, 이는 실제 Starlink에서 단일 궤도 내 배

치 중인 위성 개수와 근접하였다.^[5] 본 논문의 분석이 향후 군집 LEO 운용 시 하향 링크에서 궤도 내 활용할 수 있는 위성의 수를 판단하기 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

References

- [1] M. Choo, et al., “Interference analysis between LEO satellite for X-band downlink,” *J. Korean Soc. Aeronautical and Space Sci.*, vol. 49, no. 6, pp. 489-496, Jun. 2021. (<https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.6.489>)
- [2] H. W. Park and Y. S. Jang, “Adjacent satellite interference cancellation in dual-contact satellite scenario,” *J. IEIE*, vol. 57, no. 8, pp. 551-561, Aug. 2020. (<https://doi.org/10.5573/ieie.2020.57.8.9>)
- [3] T. Kelso, “CelesTrak,” *Public Domain Satellite Tracking Data*, 2022. [Online]. Available: <http://celestrak.com/>
- [4] 3GPP, TR 38.811 v16.4.0, “*Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks* (Release 15),” Sep. 2020.
- [5] Federal Communication Commission, “LLC request for modification of the authorization for the SpaceX NGSO satellite system,” *FCC 21-48, In the Matter of Space Exploration Holdings*, Apr. 2021.
- [6] H. Al-Hraishawi, et al., “A survey on non-geostationary satellite systems: The communication perspective,” *arXiv:2107.05312*, 2021. (<https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.05312>)