



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(6), 489-496(2021)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.6.489

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 저궤도 위성 간 X-대역 하향링크에서의 간섭 영향성 분석

추무궁<sup>1</sup>, 황인영<sup>2</sup>, 배민지<sup>3</sup>, 서인호<sup>4</sup>, 류영재<sup>5</sup>

### Interference Analysis Between LEO Satellites for X-band Downlink

Moogoong Choo<sup>1</sup>, Inyoung Hwang<sup>2</sup>, Minji Bae<sup>3</sup>, Inho Seo<sup>4</sup> and Youngjae Ryu<sup>5</sup>

Agency for Defense Development

#### ABSTRACT

The X-band frequencies for transmitting the data from earth observation satellites are limited, so a number of satellites share the frequency bands. In order for multiple satellites to utilize same or adjacent frequency bands, International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU-R) limits power flux density (PFD), which overcomes the interferences among multiple satellites. However, even under the regulation, the interference effect needs to be analyzed when multiple satellites are connected to communicate with multiple ground stations (GSs) located close to each other. In this paper, the interference effect is analyzed based on signal to interference plus noise ratio (SINR) when two low earth orbit (LEO) satellites operating in different orbits are connected to communicate with randomly located two GSs in Korean peninsula. From the analysis results, it is confirmed that there can be interferences during 365 days operation even if the satellites meet PFD requirement, but the periods under interference effects are short and the interference can be foreseen.

#### 초 록

지구 관측위성의 데이터를 지상으로 전송하기 위해 활용되는 X-대역 주파수는 한정적이므로, 여러 위성들이 해당 동일 대역을 공유하는 방식으로 활용한다. 복수의 위성이 유사 주파수 대역을 활용하기 위해서 국제전기통신연합-전파통신부문(International Telecommunication Union - Radiocommunication; ITU-R)에서는 송신 대역 내 전력속밀도(Power Flux Density; PFD) 제한 조건이 있고, 이를 통해 위성 간 간섭 영향성을 극복하고 있다. 하지만 이러한 규정 하에서도 복수의 위성이 비교적 근접한 지상국에 접속하는 경우 간섭 영향성의 분석이 수행될 필요가 있다. 본 논문에서는 한반도 내에 임의 배치된 두 개의 지상국을 기준으로, 서로 다른 궤도를 따르는 두 개의 저궤도 위성에 각각 접속하여 통신할 경우에 대해 수신 신호대 간섭+잡음비(Signal to Interference plus Noise Ratio; SINR) 기준으로 간섭 영향성 분석을 수행하였다. 간섭 영향성 분석을 통해 PFD 규격을 만족시키는 두 위성이라 하더라도 전체 임무 기간(365일 가정) 내에 간섭은 발생할 수 있으나 영향받는 기간이 짧고 미리 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : Low Earth Orbit(저궤도), RF Interference(RF 간섭), Signal to Interference Plus Noise Ratio(신호대간섭+잡음비), Offset Angle(오프셋 각도), Link Budget(링크 버짓), Power Flux Density(전력속밀도)

† Received : February 24, 2021    Revised : March 27, 2021    Accepted : April 16, 2021

<sup>1</sup> Researcher, <sup>2,3</sup> Senior Researcher, <sup>4,5</sup> Principal Researcher

<sup>5</sup> Corresponding author, E-mail : yjryu@add.re.kr

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

## I. 서 론

저궤도 위성에서 획득되는 고품질 영상에 대한 관심의 증가에 따라 해당 위성이 활용하는 주파수 대역에 대한 소요 또한 증가하고 있는 상황이다. 저궤도 위성은 정지궤도 위성과 다르게 특정 지상국을 항상 접속할 수 없는 것이 특징적이다. 그렇기 때문에 저궤도 위성은 통상 동일 주파수대역을 여러 위성이 공유하는 형태로 운용되고 있다. 이러한 상황에서 여러 위성 간 간섭 영향성을 최소화하기 위한 규정이 존재한다.

국제전기통신연합-전파통신부문(International Telecommunication Union - Radiocommunication; ITU-R)에서는 위성의 RF 송신 신호세기에 대하여 전력속밀도(Power Flux Density; PFD) 세기 제한을 통해 위성 간 RF 간섭을 관리하고 있다[1]. PFD 요구 조건은 1 GHz 이상의 주파수에 대해 주파수 대역별로, 지상안테나 고각별로 정의되어 있다. 이러한 PFD 요구 조건을 만족할 경우 다른 위성에 간섭을 주지 않는다고 통상적으로 판단할 수 있다. 또한 일반적으로 저궤도 위성의 지상국은 고지향성 안테나를 활용하여 실시간으로 위성을 지향하면서 운용하기 때문에 PFD 규정을 만족한다면 간섭 영향성이 미비하다고 판단할 수 있다. 그러나 한반도와 같은 비교적 작은 면적의 국가에서 여러 위성을 운용할 경우 지상국간 이격 거리가 짧을 수 있기 때문에 PFD 규정을 만족한다 하더라도 같은 주파수 대역을 사용하는 링크 간 RF 간섭이 발생할 수 있다. 특히 두 위성의 위치가 가깝게 위치한 상황에서 지상국 접속을 수행해야 한다면 위성 간에 간섭이 발생할 가능성이 있음을 예상할 수 있다.

다양한 위성의 간섭 시나리오에 대하여 구체적으로 간섭문제에 대한 시나리오 분석과 해결을 위한 선행 연구들이 있어 왔다[2-10]. [2], [3]에서는 위성항법시스템(Global Navigation Satellite System; GNSS)에서의 간섭 신호 억제 기법에 대하여 기술한다. [4]-[6]에서는 지상의 모바일 사용자와 위성 간에 발생하는 간섭을 C/I 등의 지표를 활용하여 분석하고 간섭 억제 기법을 도입한다. [7]에서는 Ka대역 5G 기지국이 저궤도 위성 - Tracking and Data Relay Satellite (TDRS) 상향링크에 미치는 간섭의 영향성을 단위면적당 잡음대간섭비( $I/N$  [ $\text{dB}/\text{km}^2$ ])로 분석하였다. [8]에서는 Ka대역에서 성층권 무선 중계 시스템(HAPS: High Altitude Platform Stations)이 지상국-지구동기궤도 위성의 상향링크에 미치는 간섭의 영향성을 C/I를 활용하여 분석하였다. [9]에서는 비정지 위성, 정지 위성, 지상국, 비행체를 도입하여 몇 가지의 시나리오에서의 간섭 영향성을 C/I, BER, Equivalent PFD (EPFD)를 도입하여 분석하였다. [10]에서는 신호대 간섭+잡음비(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)를 바탕으로 인접 위성에서

발생하는 간섭 제거 기법을 도입하는데, 목표 위성-지상국-인접 위성 사이의 각도인 오프셋 각도가 작아지면서 간섭의 영향성이 커짐을 언급하고 있다.

이러한 기존 연구들은 복수 저궤도 위성 간 간섭 분석에 대해서는 수행되지 않았다. 복수의 저궤도 위성에 대한 간섭 분석을 위해서는 시나리오 기반의 위성 신호 간섭 분석이 반드시 수행되어야 한다. 이는, 단순 신호 레벨의 최악조건 분석만으로는 실질적인 운용상 영향성을 과대평가할 수 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 복수 저궤도 위성의 궤도 정보를 고려한 위성 신호 간섭 분석을 수행하고, 실질 시나리오 상에서의 영향성을 분석하였다.

본 논문에서는 PFD 규격을 준수하며 운용되는 두 저궤도 위성과 한반도 내의 지상국에서 교신하는 시나리오를 분석한다. 위성 궤도 분석 분야에서 널리 활용되는 상용 툴 중 하나인 STK를 활용하여 위성의 위치정보를 생성하였다. 분석의 정확도를 높이기 위해 간섭이 발생할 수 있는 구간을 조사하고 위치정보를 보강하였으며, 이를 바탕으로 SAR위성의 지상국 수신 SINR 분석을 수행하였다. 구체적으로 서로 다른 두 궤도를 갖는 저궤도 위성과 300km 간격으로 임의로 배치한 두 지상국이 서로 교신하는 상황과 서로 다른 두 궤도를 갖는 저궤도 위성과 물리적으로 이격되지 않고 같은 위치에 배치된 두 지상국이 서로 교신하는 상황을 시나리오로 설정하였다. 이러한 운용 시나리오 하에서 각 지상국에서 발생하는 SINR 수준 및 간섭 횟수 및 주기성 등을 확인하였다.

본 논문의 순서는 다음과 같다. 2장에서는 두 지상국이 서로 다른 지역에 있는 경우와 같은 지역에 있는 경우에 대한 시나리오를 기술하여 간섭 분석 방법을 제시한다. 3장에서는 두 시나리오에 대해 각각의 결과를 확인하고 분석하여 4장에서 결론으로 본 논문을 맺는다.

## II. 시나리오 개요 및 간섭 분석 방법

### 2.1 시나리오 개요

#### 2.1.1 시나리오 설정 및 임무 분석

Figure 1과 Fig. 2는 위성1 ( $SAT_1$ )이 지상국1 ( $GS_1$ )을, 위성2 ( $SAT_2$ )가 지상국2 ( $GS_2$ )를 각각 지향할 경우 RF 간섭 신호가 발생하는 시나리오를 도시하고 있다. 이때,  $d_1, d_2, d_3, d_4, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 는 각각 위성1과 지상국1 간의 거리, 위성1과 지상국2 간의 거리, 위성2와 지상국2 간의 거리, 위성2와 지상국1 간의 거리, 위성1과 지상국1과 위성2 사이의 각도(지상국1의 오프셋 각도), 위성2와 지상국2와 위성1 사이의 각도(지상국2의 오프셋 각도), 지상국1과 위성1과 지상국2 사이의 각도, 지상국2와 위성2와 지상국1 간의 각도이다. 이때 지상국1과 위성1, 지상국2와 위성2의 안테나는 각각 서로를 정확히 지향한다고 가정한다.

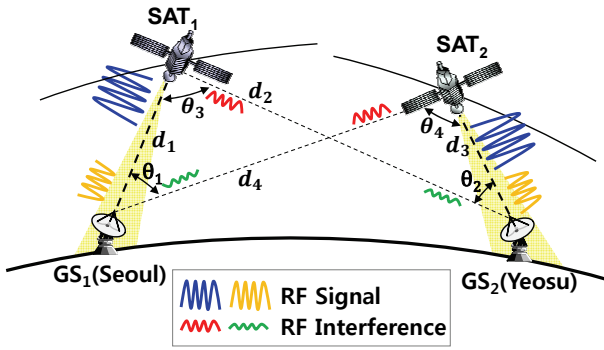


Fig. 1. The RF interference scenario between two satellites with GSs located in different regions

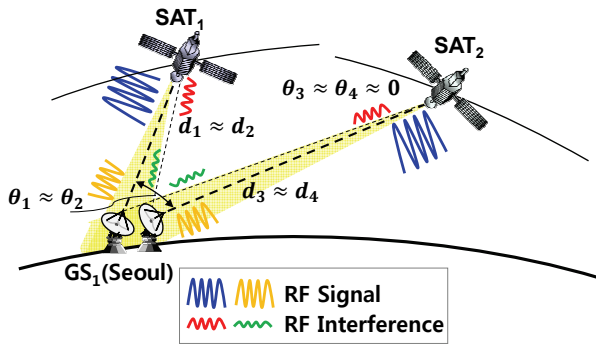


Fig. 2. The RF Interference Scenario between two satellites with GSs located in the same region

Fig. 1과 Fig. 2는 각각 지상국이 서로 다른 지역에 있는 경우와 지상국이 같은 지역(같은 위치)에 있는 경우를 나타낸다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 지상국의 위치가 같을 경우  $d_1$ 과  $d_2$ ,  $d_3$ 와  $d_4$ ,  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 는 각각 같다고 할 수 있고,  $\theta_3$ 와  $\theta_4$ 는 0이다.

분석을 위해 대표적인 SAR 위성 중 하나인 TerraSAR-X 위성과 TerraSAR-X 위성 유사한 고도의 임의의 저궤도 위성을 가정하였다[11]. 각 위성과 지상국의 정보는 Table 1로 요약된다.

Figure 3은 위성과 지상국의 안테나 이득을 보여준다. Fig. 3의 각도는 Elevation 각도이며, Azimuth 방향으로서는 같은 이득을 갖는다고 가정한다. 즉, 본 논문에서 안테나 이득은 안테나의 주빔(Main Beam)으로부터의 각도차이의 함수로 정의된다. 이때, 두 위성과 두 지상국은 같은 안테나 이득을 갖는다고 가정했다. 위성 안테나의 경우 지향성이 25 dBi, 안테나 이득이 23 dBi, 반전력 빉폭(Half Power Beam Width)이 10.6°인 Corrugated Horn Antenna의 빉패턴을 가정하였다. 지상국 안테나의 경우 안테나 이득은 51.4 dBi, 반전력 빉폭은 0.46°를 가정했고, 베셀 함수(Bessel function)를 활용하여 얻었다[12].

Table 1. Summary of Satellites and GSs

Satellite Parameter	SAT <sub>1</sub>	SAT <sub>2</sub>	GS Parameter	GS <sub>1</sub>	GS <sub>2</sub>
SMA	6892.14 km	6876.39 km	Region	Seoul	Yeosu
ECC	0	0	Altitude	0.25 km	0.4 km
INC	97.46°	45.00°	Location	37°33'04"N, 126°59'2"E	34°49'37"N, 127°42'5"E
AOP	10.86°	90°			
RAAN	0°	340°			
TA	0°	270°			

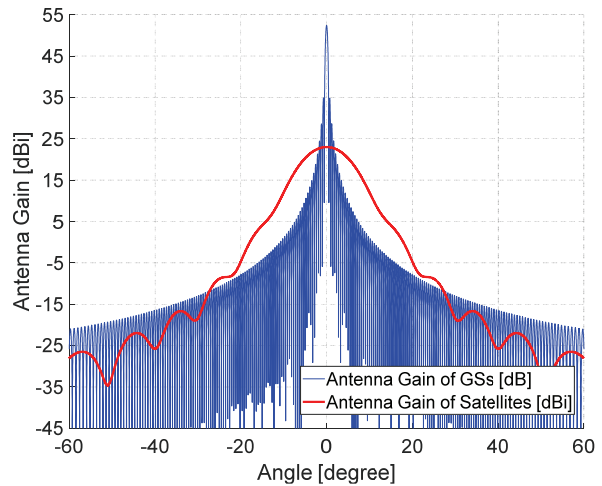


Fig. 3. The antenna gain of satellites and GSs

### 2.1.2 궤도 분석

간섭 분석을 위하여 위성과 지상국의 위치 벡터를 이용해 지상국과 위성 사이의 거리와 오프셋 각도를 계산한다. STK로부터 365일 동안의 위성의 위치정보를 생성하였고, 계산의 효율을 위해 step size는 60초로 설정하였다.

간섭이 발생할 수 있는 시점에는 좁은 시간 간격으로 위치정보가 보충되어야 할 필요가 있다. 간섭예상 조건을 지상국 안테나가 위성을 지향하는 고각이 6° 이상이면서, 두 위성의 지상국에 대한 오프셋 최솟값이 5°보다 작은 경우로 설정하였다.

본 논문에서는 간섭예상 조건을 만족할 때 최소 오프셋 시점을 기준으로 선형보간법을 이용해 60초 동안 1초 간격으로 위치 정보를 추가 생성하였다. Fig. 4는 지상국1에 대한 오프셋을 나타낸다. 빨간색

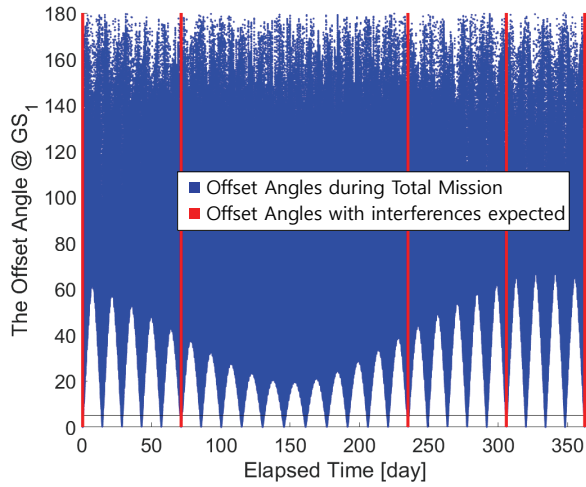


Fig. 4. The offset angle of GS1 during the mission

으로 표시한 지점이 간섭이 예상되어 위치정보가 보강된 곳으로서 지상국 안테나가 위성을 지향하는 고각이  $6^\circ$  이상이면서 두 위성의 지상국에 대한 오프셋 최솟값이  $5^\circ$ 보다 작은 경우이다. 이때 빨간색의 세로축 값은 의미가 없으며, 가로축에서 간섭 발생 가능성이 높은 경과시간을 나타낸다.

## 2.2 간섭 분석 방법

통상적으로 간섭이 없는 통신 환경에서는 수신 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)를 활용하여 링크 마진을 분석하게 된다. 하지만 간섭이 예상되는 상황에서는 간섭이 추가로 고려되어야 하고, 이를 고려하는 SINR을 활용하여 링크 마진을 분석해야 한다.

식 (1), (2)는 각각 지상국1에서 수신하는 위성1의 신호세기와 지상국2에서 수신하는 위성2의 신호세기를 표현한다. 이때,  $P_{Tx\_sat}$ ,  $G_{sat}(\theta)$ ,  $G_{gs}(\theta)$ ,  $f$ ,  $c$ 는 위성의 송신 출력, 주빔으로부터 각도가  $\theta$ 일 때 위성의 안테나 이득, 주빔으로부터 각도가  $\theta$ 일 때 지상국의 안테나 이득, 운용 주파수, 빛의 속도를 나타내며,  $\alpha(\theta)$ 는 고각이  $\theta$ 일 때 경로에서 발생하는 모든 대기 손실 (Atmospheric loss)을 나타낸다. 대기 손실에는 강우 감쇠, 구름 감쇠, 신틸레이션 페이딩, 대기 가스 감쇠가 포함된다[13]. 이때 편파 손실, 안테나 포인팅 손실 등은 없다고 가정한다.

$$S_{gs1sat_1}(\text{dB}) = P_{Tx\_sat} + G_{sat}(0^\circ) + G_{gs}(0^\circ) - 20\log_{10}(4\pi d_1 f/c) - \alpha(\theta) \quad (1)$$

$$S_{gs2sat_2}(\text{dB}) = P_{Tx\_sat} + G_{sat}(0^\circ) + G_{gs}(0^\circ) - 20\log_{10}(4\pi d_3 f/c) - \alpha(\theta) \quad (2)$$

유효 평균 잡음 전력은 수식 (3)과 같이 정의되며, 지상국1과 지상국2는 동일한 잡음 전력을 갖는다고 가정한다. 이때  $k$ 는 볼츠만 상수,  $T$ 는 안테나 잡음온도,  $B$ 는 신호의 점유대역폭이다.

$$N_{gs_1} = N_{gs_2} = N_{gs} = 10\log_{10}kTB \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

지상국1에서 수신하는 위성2의 간섭 세기와 지상국2에서 수신하는 위성1의 간섭 세기는 각각 수식 (4), (5)와 같이 표현된다. 이때 수식 (4), (5)는 각각의 전파 경로  $d_4$ ,  $d_2$ 와 위성 안테나 주빔으로부터의 각도  $\theta_4$ ,  $\theta_3$ 가 반영된 안테나 이득이 반영된다.

$$I_{gs1sat_2}(\text{dB}) = P_{Tx\_sat} + G_{sat}(\theta_4) + G_{gs_1}(\theta_1) - 20\log_{10}(4\pi d_4 f/c) - \alpha(\theta) \quad (4)$$

$$I_{gs2sat_1}(\text{dB}) = P_{Tx\_sat} + G_{sat}(\theta_3) + G_{gs_2}(\theta_2) - 20\log_{10}(4\pi d_2 f/c) - \alpha(\theta) \quad (5)$$

수식 (1), (3)에 의하여 구한 값을 바탕으로 위성1-지상국1의 SNR은 수식 (6)과 같이 표현된다. 마찬가지로 수식 (2), (3)의 값을 바탕으로 위성2-지상국2의 SNR은 수식 (7)과 같이 표현된다.

$$S/N_{gs1sat_1}(\text{dB}) = S_{gs1sat_1}(\text{dB}) - N_{gs_1}(\text{dB}) \quad (6)$$

$$S/N_{gs2sat_2}(\text{dB}) = S_{gs2sat_2}(\text{dB}) - N_{gs_2}(\text{dB}) \quad (7)$$

마찬가지로 지상국1과 지상국2의 신호대 간섭비 SIR은 수식 (8), (9)와 같이 표현된다.

$$S/I_{gs_1}(\text{dB}) = S_{gs1sat_1}(\text{dB}) - I_{gs1sat_2}(\text{dB}) \quad (8)$$

$$S/I_{gs_2}(\text{dB}) = S_{gs2sat_2}(\text{dB}) - I_{gs2sat_1}(\text{dB}) \quad (9)$$

최종적으로 수식 (5)~(9)를 활용하여 수식 (10), (11)과 같이 신호대 간섭+잡음비를 계산할 수 있다. 이때 데시벨(dB) 스케일을 환산하여 계산에 반영한다.

$$S/(N+I)_{gs_1} = [(S/N_{gs1sat_1})^{-1} + (S/I_{gs_1})^{-1}]^{-1} \quad (10)$$

$$S/(N+I)_{gs_2} = [(S/N_{gs2sat_2})^{-1} + (S/I_{gs_2})^{-1}]^{-1} \quad (11)$$

## III. 간섭분석 결과

### 3.1 분석을 위한 파라미터 설정

Table 1의 위성과 지상국 정보를 바탕으로 STK 시뮬레이터를 활용하여 총 365일 동안의 임무를 가정하여 RF 분석을 수행하였다. 이때 Fig. 1과 Fig. 2와 같이 지상국의 위치에 따라 시나리오를 나누어서 SINR을 분석한다. Fig. 1 시나리오의 경우 거리가 약 300 km 떨어진 서울과 여수 지역을 기준으로 분석을 수행하고, Fig. 2 시나리오의 경우 두 지상국이 서울의 같은 위치에 있는 것을 기준으로 분석을 수행한다. 시나리오 상 기본 시간 간격(Sampling Period)은



1분으로 설정하고, 지상국1과 지상국2의 오프셋 각도  $\theta_1, \theta_2$ 가  $5^\circ$  이내의 범위에 들어왔을 때 시간 간격을 1초로 설정하여 분석을 수행한다. 계산된 SINR은 각 지상국에서 요구되는 SINR값과 비교하여 요구 SINR 보다 더 작은 경우 간섭이 발생한다고 분석한다.

Table 2는 SINR 분석 시 활용되는 파라미터의 요약이다. 운용 주파수는 일반적으로 활용되는 X-대역을 가정하였다. 요구  $E_b/N_0$ 는 4D-TCM 8PSK 2.25 decoder 기준  $1E-06$  수준의 비트오류율(Bit Error Rate; BER) 만족을 위해 요구되는 7.9 dB에 구현손실(Implementation Loss) 3 dB와 추가 링크 마진 3 dB를 포함하여 13.9 dB로 설정했다[14]. 최종적으로 요구 SINR은 요구  $E_b/N_0$ 에 3.7 dB의 스펙트럼효율(Spectral Efficiency)을 더하여 얻었다. 이때 두 위성은 PFD 규격을 전 고각에서 만족하며 간섭이 없을 경우 링크 버짓을 만족하는 범위에서 송신출력, 안테나 이득, 점유대역폭이 설정되었으며, 단일 편파를 가정한다. 구체적으로 PFD의 최악 조건인 고각  $90^\circ$ 에서 위성들의 PFD는 수식 (12)와 같이 계산된다.

$$PFD_{90^\circ} = EIRP - 10\log_{10} 4\pi h^2 - 10\log_{10} B / (4 \times 10^3) \text{ [dBW/m}^2\text{/4kHz]} \quad (12)$$

이때, 임무 궤도 상 최소 높이인  $h$ 는 508 km가 반영되고, 점유대역폭  $B$ 는 200 MHz가 적용된다. 이때 얻어진 PFD는  $-146.09 \text{ dBW/m}^2\text{/4kHz}$ 로 고각  $90^\circ$ 의 기준값인  $-140 \text{ dBW/m}^2\text{/4kHz}$  이하를 만족한다.

링크버짓의 경우, 최악 조건인 고각  $6^\circ$ 를 기준으로 SNR은 수식 (13)과 같이 계산된다.

$$SNR_{GS} \text{ [dB]} = EIRP + G_{gs} - 20\log_{10} 4\pi df/c - 10\log_{10} kTB + \Gamma - \alpha(5^\circ) \quad (13)$$

이때 고각  $6^\circ$  기준 최장거리  $d$ 는 2,320 km, 지상국 안테나 이득  $G_{gs}$ 는 51.4 dBi,  $c$ 는 빛의 속도  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $k$ 는  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ , 지상국 안테나 잡음 온도  $T$ 는 180 K, 스펙트럼효율  $\Gamma$ 는 3.7 dB가 적용되었다. 고각  $6^\circ$  기준 대기 감쇠는 [13]을 준용하여 서울 기

Table 2. Summary of SINR Parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Frequency	8.2 GHz	Required SINR	17.6 dB
GS Antenna Noise Temperature	180 K	Occupied Bandwidth	200 MHz
Transmit Power	3 dBW		

준 경우 가용도 99.5%일 때 3.59 dB를 적용하였다. 그 결과로 얻어진 SNR은 24.6 dB로, 요구 SINR 대비 7.0 dB의 여유 마진을 갖는다. 따라서 간섭이 없을 경우 위성-지상국 간 링크에서 PFD 규격을 만족하며 링크 버짓을 충족한다.

### 3.2 다른 지역 지상국 간 RF 간섭

Figure 1과 같은 시나리오에서 임무 기간 내 지상국1과 지상국2에서 각각의 SINR은 Fig. 5에서 볼 수 있다. 이때 Fig. 5는 각각 지상국1 기준 위성1의 고각이  $6^\circ$  이상, 지상국2 기준 위성2의 고각이  $6^\circ$  이상인 경우만을 도시하고 있다. 즉, 지상국 기준 위성에 대한 가시성이 있는 경우만 나타내었다. Fig. 5에서 빨간 점선은 Table 2의 요구 SINR이다. 따라서 직선보다 아래에 있는 경우 간섭의 영향을 받는다고 볼 수 있다. 지상국1과 지상국2는 모두 경과 시간 기준 305일 21시간 38분경에 간섭의 영향을 받았으며, 간섭의 지속 시간은 약 2초 수준이었다.

Figure 6은 임무 기간 내 지상국1의 오프셋 각도  $\theta_1$ 과 지상국2의 오프셋 각도  $\theta_2$ 를 도시한다. 이때 간섭의 발생 가능성이 있는 각도  $5^\circ$  이내만 도시했다. Fig. 6에서 지상국1의 오프셋 각도  $\theta_1$ 이  $5^\circ$  이내로 들어오는 경우는 경과 시간 기준 0일 9시간 37분경, 71일 8시간 18분경, 71일 9시간 53분경, 234일 22시 57분경, 305일 21시간 39분경 그리고 362일 8시간 48분경이다. 이때 305일에 발생한 간섭의 경우 오프셋 각도는  $0.05^\circ$ 로 지상국 안테나의 빔폭  $0.46^\circ$  이하로 위성들이 근접해 있기 때문에 간섭이 발생했다고 볼 수 있다. 지상국1의 오프셋 각도가 그 다음으로 가장 작았던 시간은 234일이고, 이때 오프셋 각도가  $2.78^\circ$ 로 지상국 안테나 빔폭의 약 6배 수준이었다.

Figure 6에서 이번에는 지상국2의 오프셋 각도  $\theta_2$

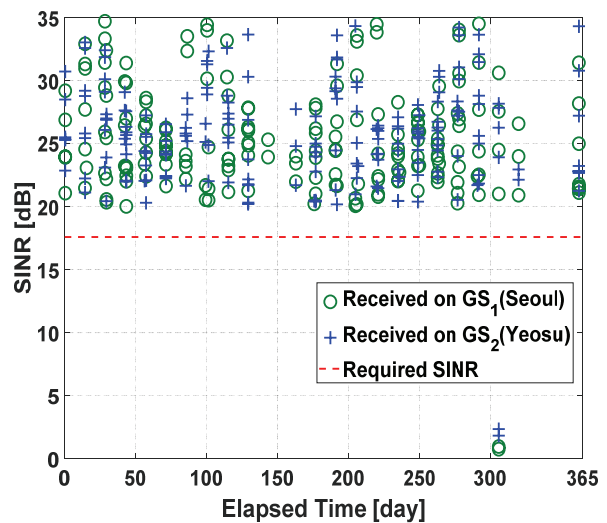


Fig. 5. The received SINR of GS1(Seoul) and GS2(Yeosu) during the mission

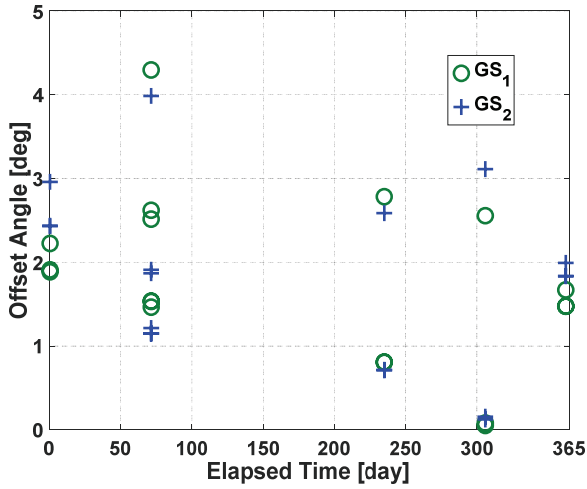


Fig. 6. The angle of SAT1-GS-SAT2 during the mission

가  $5^\circ$  이내로 들어오는 경우를 보면, 앞선 경우와 동일하게 경과 시간 기준 0일 9시간 37분경, 71일 8시간 18분경, 71일 9시간 53분경, 234일 22시 57분경, 305일 21시간 39분경 그리고 362일 8시간 48분경이다. 이때 305일에 발생한 간섭의 경우 오프셋 각도는  $0.12^\circ$ 로 지상국 안테나의 빔폭 이하로 위성들이 근접해 있기 때문에 간섭이 발생했다고 볼 수 있다. 오프셋 각도가 그 다음으로 가장 작았던 시간은 234일이고, 이때 오프셋 각도가  $2.59^\circ$ 로 지상국 안테나 빔폭의 약 5.6배 수준이었다.

앞선 결과를 통해 확인할 수 있는 사항은 간섭의 발생 여부는 오프셋 각도에 영향을 받으며, 이 각도는 두 위성이 근접한 경우 작아지고, 오프셋 각도가 지상국 안테나의 빔폭보다 작은 경우 간섭이 발생한다는 것이다. 이때 지상국1과 지상국2가 직선 거리 기준 약 300 km 떨어져 있음에도  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 가 높은 상관관계를 가지며, 따라서 지상국1 혹은 지상국2에서 간섭이 발생할 경우 마찬가지로 지상국2 혹은 지상국1에서도 간섭이 발생할 수 있음을 알 수 있다.

### 3.3 같은 지역 지상국 간 RF 간섭

Figure 2와 같은 시나리오에서 임무 기간 내 지상국1과 지상국2에서 각각의 SINR은 Fig. 7에서 볼 수 있다. 이때 분석의 편의성을 위하여 두 지상국은 모두 서울에 있으며, 두 위성이 지상국1과 교신함을 가정했다. Fig. 7은 앞선 경우와 마찬가지로 각각 지상국1 기준 위성1의 고각이  $6^\circ$  이상, 지상국2 기준 위성2의 고각이  $6^\circ$  이상인 경우만을 도시하고 있다. Fig. 7에서 빨간 점선은 Table 2의 요구 SINR로, 마찬가지로 직선보다 아래에 있는 경우 간섭의 영향을 받는다고 볼 수 있다. 지상국2는 경과 시간 기준 234일 22시 57분경에 약 2초 수준의 간섭의 영향을 받았고, 경과 시간 기준 305일 21시간 38분경에는 지상

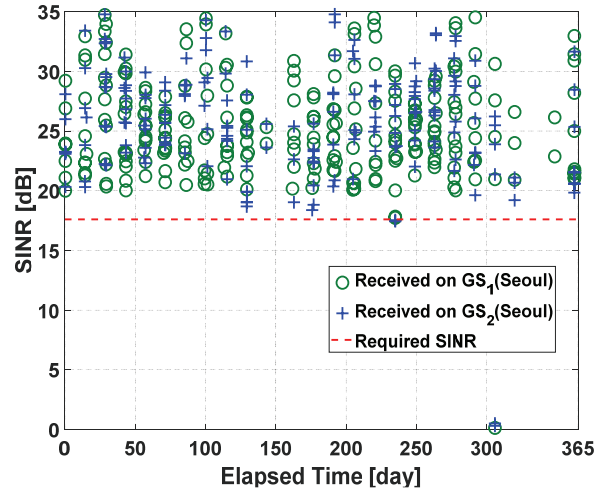


Fig. 7. The received SINR of GS1(Seoul) and GS2 (Seoul) during the mission

국1과 지상국2 모두 간섭의 영향을 받았으며, 간섭의 지속 시간은 약 2초 수준이었다.

지상국1과 지상국2는 서울(같은 위치)에 있기 때문에 각각의 오프셋 각도는 동일한 값을 가지며, Fig. 6의  $GS_1$ 에서 각도를 확인할 수 있다. 따라서 앞선 경우와 마찬가지로 오프셋 각도가  $5^\circ$  이내로 들어오는 경우는 경과 시간 기준 0일 9시간 37분경, 71일 8시간 18분경, 71일 9시간 53분경, 234일 22시 57분경, 305일 21시간 39분경 그리고 362일 8시간 48분경이다. 이때 지상국1과 지상국2에서 305일에 발생한 간섭의 경우 위성들과의 각도는 마찬가지로  $0.05^\circ$ 로, 지상국 안테나의 빔폭  $0.46^\circ$  이하로 위성들이 근접해 있기 때문에 간섭이 발생했다고 볼 수 있다. 지상국2에서 234일에 발생한 간섭의 경우 각도는  $0.80^\circ$ 로 지상국 안테나의 빔폭의 약 1.7배이다. 같은 시기에 지상국1에서는 근소한 차이로 간섭이 발생하지 않았는데, 이는 위성2의 고도가 위성1의 고도보다 약 10km 높기 때문에 간섭이 발생하지 않은 것으로 볼 수 있다. 지상국과 위성들과의 각도가 그 다음으로 가장 작은 시간은 234일이고, 이때 지상국과 위성들 간 각도가  $2.78^\circ$ 로 지상국 안테나 빔폭의 약 6배 수준이었다.

앞선 결과를 통해 확인할 수 있는 사항은 마찬가지로 간섭의 발생 여부는 지상국의 오프셋 각도에 영향을 받으며, 이 각도는 두 위성이 근접한 경우 작아지고 지상국 안테나의 빔폭의 약 1.7배 수준에서 간섭이 발생할 수 있다는 것이다. 이때 지상국1과 지상국2가 동일 위치에 있기 때문에 오프셋 각도가 같으며, 따라서 지상국1 혹은 지상국2에서 간섭이 발생할 경우 마찬가지로 지상국2 혹은 지상국1에서도 간섭이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 이 경우 상대적으로 고도가 낮은 위성이 더 간섭을 일으킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서 간섭 발생을 최소화하기 위해 PFD 분석 및 링크 마진 분석뿐만 아니라

위성의 임무 고도 이격 확보, 지상국 간의 물리적인 거리 확보가 추가적으로 요구된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 두 위성이 운용되고 한반도 내 지상국과 교신하는 경우 발생하는 위성 간의 간섭을 분석하기 위하여 STK 시뮬레이터를 활용하여 임의의 300 km 떨어진 두 지상국에서의 간섭과 동일 지역 내의 두 지상국에서의 간섭을 SINR 계산을 통해 분석하였다. 한반도 내에서 관계되는 서로 다른 임무 궤도의 두 저궤도 위성에 대하여 각각의 위성이 PFD 요구 조건을 만족하고, 각각의 지상국에서 수신하는 SNR이 요구 조건을 만족하는 상황에서 SINR 계산을 통해 간섭의 발생 가능성을 확인하였다. 분석한 시나리오에서는 두 지상국 시나리오에서 모두 2 초 수준의 간섭이 발생했으며, 간섭이 발생한 경우 오프셋 각도가 지상국 안테나 빔폭 수준으로 작음을 확인했다. 또한 지상국이 물리적으로 같은 위치에 있는 경우 상대적으로 간섭 영향성이 더 큼을 확인했고, 위성의 임무 고도 설정이 간섭 가능성에 영향을 줄 수 있음을 확인했다. 본 분석을 통해 같은 주파수 대역을 활용하는 위성들을 한반도 내 지상국에서 운용할 경우 링크 버짓 분석 및 PFD 요구조건 충족 여부뿐만 아니라 SINR 분석이 필요함을 확인했다. 그리고 분석 결과 간섭은 365일 임무를 기준으로 수 초 이내로 발생하여 영향성이 미미하나 오프셋 각도를 통해 미리 예측할 수 있음을 확인하였다. 그럼에도 간섭을 최소화하기 위하여 지상국 간의 물리적인 이격을 고려한 설계가 필요함을 확인했다. 한편으로 본 논문의 시나리오에서 고려했던 요소 외에 저궤도 위성별 전파세기, 통신프로토콜, 궤도특성, 지상국 간 거리, 지상안테나의 성능 등과 같은 요소에 따라서 주파수간섭이 일어나는 빈도와 시간은 편차가 크게 나타날 것이다. 따라서 본 논문에서 제시하는 시나리오 한가지의 예시로서 분석되었을 뿐 모든 시나리오를 대표하지 못하는 것을 인지하여야 하고, 한반도 내에 운용되는 저궤도위성의 숫자가 증가하는 현 추세에서 각 위성 간 주파수간섭의 영향성은 본 논문에서 제시한 방식에 기반하여 각 운용 시나리오를 고려한 분석이 시행되어야 할 것이다. 본 논문의 분석이 향후 한반도 내에서 관계되는 저궤도 위성들 간의 간섭 영향성 분석을 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

#### References

1) Recommendation ITU-R SF.358-5, "Maximum permissible values of power flux-density at the

surface of the earth produced by satellites in the fixed-satellite service using the same frequency bands above 1 GHz as line-of-sight radio-relay systems," 5<sup>th</sup> Ed., Recommendation ITU-R, Geneva, 1995, pp. 1~14.

2) Amin, M. G. and Sun, W., "A Novel Interference Suppression Scheme for Global Navigation Satellite Systems Using Antenna Array," *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, Vol. 23, No. 5, 2005, pp. 999~1012.

3) Lim, Z. H. and Shin, C. S., "Interference Suppression for Satellite Navigation Based on Dual-Polarized Antenna," *Information and Control Symposium*, October 2020, pp. 315~316.

4) Vatalaro, F., Corazza, G. E., Caini, C. and Ferrarelli, C., "Analysis of LEO, MEO, and GEO global mobile satellite systems in the presence of interference and fading," *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, Vol. 13, No. 2, 1995, pp. 291~300.

5) An, K., Lin, M., Zhu, W., Huang, Y. and Zheng, G., "Outage Performance of Cognitive Hybrid Satellite - Terrestrial Networks With Interference Constraint," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, No. 11, 2016, pp. 9397~9404.

6) Henarejos, Z. P., Vázquez, M. Á. and Pérez-Neira, A. I., "Deep Learning For Experimental Hybrid Terrestrial and Satellite Interference Management," *2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communication*, July 2019, pp. 1~5.

7) Kim, H. K., Jo, Y. K., Kim, J. S. and Jo, H. S., "Interference Analysis between Inter-Satellite Service and Submillimeter-wave 5G Mobile Communication Service," *Proceeding of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences*, June 2017, pp. 524~525.

8) Kim, B. S., Lee, K. W. and Lee, W. K., "Environmental Impact Analysis of Satellite Communications from Interference," *Proceeding of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences*, January 2016, pp. 809~810.

9) Kang, Y. H. and Choi, M. H., "The Analysis on the Interference Effects from Airship of HAPS system to Satellite of GSO system in Ka band," *The Journal of the Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol. 29, No. 5B, 2004, pp. 476~481.

10) Park, H. W. and Jang, Y. S., "Adjacent Satellite Interference Cancellation in Dual-contact

Satellite Scenario," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 57, No. 8, 2020, pp. 9~19.

11) Pitz, W. and Miller, D., "The TerraSAR-X Satellite," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 48, No. 2, 2010, pp. 615~622.

12) Bouchal, Z. and Olivik, M., "Non-diffractive vector Bessel beams," *Journal of Modern Optics*, Vol. 42, No. 8, 1995, pp. 1555~1566.

13) Recommendation ITU-R P. 618-13, "Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems," 13<sup>th</sup> Ed., Recommendation ITU-R, Genova, 2017, pp. 1~29.

14) CCSDS 413.0-G-2, *Bandwidth-efficient Modulations: Summary of Definition, Implementation, and Performance*, 2<sup>nd</sup> Issue, GREEN BOOK, Washington DC, 2009, pp. B-4~B-7.