

밀리미터파 대역에서 5G 이동통신과 고정위성서비스간 공존 연구

Coexistence between 5G Mobile Communication and Fixed-Satellite Service in the Millimeter Wave Band

조 연 기 · 김 현 기 · 조 한 신

Yeongi Cho · Hyun-Ki Kim · Han-Shin Jo

요 약

본 논문에서는 5세대 이동통신(IMT-2020)의 주파수 지정을 위해 국제전기통신연합(international telecommunication union: ITU)에서 제시한 모델링 방법론과 파라미터를 바탕으로 현재 IMT-2020의 밀리미터파 후보대역 중 기존에 할당되어 있는 고정위성서비스(fixed-satellite service: FSS) 상향링크 서비스와 IMT-2020의 동일채널 간섭 분석을 통해 두 서비스의 스펙트럼 공존 가능성을 연구한다. 첫째 기존 서비스의 보호를 위해 FSS 위성이 IMT-2020의 간섭 신호로부터 받는 영향을 분석한다. 그리고 IMT-2020이 FSS 지구국으로부터 간섭을 피하기 위한 최소 이격거리를 제시하며, 최종적으로 이를 통하여 동일대역에서 두 서비스의 공존 가능성을 평가한다.

Abstract

In this paper, the possibility of spectrum coexistence of 5th generation mobile communications(IMT-2020) and Fixed-Satellite Service(FSS) uplink in the millimeter wave band is studied based on modeling approach and considering the parameters proposed by the international telecommunication union(ITU) for the frequency assignment of IMT-2020. First, in order to protect the existing FSS, the interference signal of IMT-2020 received by an FSS satellite is calculated and its influence on the satellite is analyzed. Then, the interference received by the IMT-2020 from the FSS earth station is calculated and the minimum separation distance required to avoid interference is presented. Finally, the feasibility of coexistence of both services is evaluated based on simulation results.

Key words: Interference Analysis, 5G, Fixed-Satellite Service, Three-Dimensional Beamforming, Millimeter Wave

I. 서 론

스마트폰의 보급과 더불어 이동통신 시장의 급격한 발전은 현재의 기술이 제공하는 성능보다도 훨씬 높은 성능을 요구하고 있으며, 이에 따라 5세대 이동통신 (IMT-2020) 시스템에서는 현재보다도 더 많은 용량을 더 빠른 속도

와 낮은 지연시간으로 사용자에게 제공할 수 있어야 한다^[1]. 통신용량을 증대시키는 데 있어 가장 손쉬운 접근법은 주파수 대역을 넓히는 것이지만, 현재 이동통신에서 사용하고 있는 주파수 대역에서는 더 이상의 주파수대역 확보는 어려운 상황이며, 최근 이에 대한 해결책으로 밀리미터파 대역이 주목받고 있다. 밀리미터파 대역은 기존

한밭대학교 전자·제어공학과(Department of Electronics & Control Engineering, Hanbat National University)

· Manuscript received July 22, 2019 ; Revised August 16, 2019 ; Accepted September 19, 2019. (ID No. 20190722-071)

· Corresponding Author: Han-Shin Jo (e-mail: hsj@hanbat.ac.kr)

의 셀룰러 대역 주파수에 비해 전파손실이 크고 간섭 및 회절 특성이 약하다는 이동통신에 치명적인 단점을 갖고 있지만, 안테나의 소형화 및 경량화가 가능하여 더 많은 안테나를 사용할 수 있는 장점을 갖고 있다. 따라서 현재 많은 연구 기관에서 다중 안테나 배열을 이용한 빔 포밍 기술을 통해 안테나 이득을 높이는 방법이 주요 기술로 고려되고 있으며, 특히 밀리미터파 대역에서 IMT-2020을 서비스하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다^[2].

2015년 스위스 제네바에서 열린 세계전파통신회의(WRC-15)에서는 IMT-2020 주파수 지정을 위해 6 GHz 이상 대역에서 IMT-2020 주파수 할당을 위한 WRC-19 의제 1.13을 채택하고 구체적인 후보대역으로서 24.25~86 GHz 사이에 총 11개의 후보대역을 선정했으며 국제전기통신연합(international telecommunication union: ITU)은 의제1.13의 추진을 위해 ITU-R SG 5 산하에 IMT 후보대역과 타업무간 공유연구를 위한 Task Group 5/1 (TG 5/1)을 신설하였다^[3]. TG 5/1에서는 IMT-2020과 타 서비스간 공유 및 호환성 연구를 위해 IMT-2020 모델링 방법론을 비롯해 다양한 전파 손실 모델과 기존 서비스의 보호기준을 제안했다. 본 연구에서는 IMT-2020이 밀리미터파 후보대역에서 서비스될 경우, 기존에 할당되어 있는 고정위성서비스(fixed-satellite service: FSS)와의 간섭 분석을 통해 동일 채널에서 IMT-2020과 FSS의 스펙트럼 공존 가능성을 제안한다.

기존 IMT와 FSS간 스펙트럼 공유 연구의 경우, FSS의 상향링크에서 IMT가 지구국으로부터 받는 간섭과 위성이 IMT로부터 받는 간섭 분석 및 간섭 완화 알고리즘, 하향링크에서 IMT가 지구국으로부터 받는 간섭에 대해 다양한 방법으로 연구가 진행되었다^{[4]~[6]}. 그 중 FSS 상향링크에서 수행한 간섭 분석의 경우, 위성이 받는 간섭을 계산할 때, 단일 IMT 또는 하나의 네트워크에 대한 간섭을 계산 후 위성의 주빔 영역에 해당하는 footprint만을 고려하여 수신 간섭을 계산하였으며, IMT-2020의 핵심 기술인 3차원 빔포밍 기술이 포함되지 않았다^{[5],[6]}. 이러한 점을 보완하기 위해 위성의 간섭 수신 영역을 footprint 영역에서 전체 영역으로 확장하고, 지형 데이터를 고려하여 육지 지역에 분포되는 IMT-2020만을 고려한 연구까지 확장되었다^[7]. 반대로 FSS 상향링크에서 IMT-2020이 지구

국으로부터 받는 간섭 분석의 경우, FSS 지구국 주위에 기지국을 배치하고 수신하는 이동국의 스루풋 변화와 그에 따른 이격거리를 제안하였다^[8].

본 논문에서는 앞에서 언급한 두 가지 시나리오를 같이 다루어 24.25~27.5, 81~86 GHz 대역에서 IMT-2020과 FSS의 공존 가능성을 확인한다. 첫째로 위성이 다수의 IMT-2020으로부터 받는 간섭 시나리오의 경우, ITU-R에서 제안한 IMT-2020 모델링 문서와 파라미터를 바탕으로 전체 영역에 IMT-2020을 분포한 후에 다양한 전파 손실 모델을 고려하여 FSS 위성이 받는 간섭을 계산한다. 지형 데이터와 보간법을 사용하여 좀 더 정확한 간섭 분석을 가능하게 하며, 기존에 수행하지 않았던 81~86 GHz 대역에서의 위성 시스템이 받는 간섭 분석 결과를 추가적으로 제시한다. 이로 인해 위성의 양각에 따른 결과만을 제시하는 기존 연구들과 달리 주파수 대역에 따른 전파 손실, 위성의 높이, IMT-2020의 안테나 배열 등의 변화로 인한 결과를 제시하여 보다 다양한 관점에서 결과를 분석하는 것이 가능하다. 둘째로 IMT-2020이 지구국으로부터 받는 간섭을 계산하고, 보호 기준을 만족하는 최소 이격거리를 제안한다. 기존 이격거리에 따른 스루풋 변화 대신 보호 기준을 적용하여 IMT-2020이 지구국의 간섭에 영향을 받지 않는 최소 이격거리를 제시하였으며, 최악의 경우 외에도 지구국의 주빔 방향과 IMT-2020의 안테나 방향, 지역 밀집 비율에 따른 클러터 손실 등의 다양한 변수에 따라 이격거리를 제시하여 IMT-2020과 FSS의 공존 가능성을 확인한다.

그림 1은 본 논문에서 수행하는 두 가지 간섭 시나리오를 보여준다. FSS가 상향 링크를 수행할 경우 간섭 시나리오 I은 현재 서비스 중인 FSS 위성의 수신 영역 내에 분포되는 다수의 IMT-2020으로부터 받는 간섭을 계산하며, 간섭 시나리오 II는 IMT-2020이 지구국으로부터 받는 간섭을 계산한다. 본 논문의 II장에서는 간섭 시나리오 I에 대한 시뮬레이션 방법과 적용한 모델에 대해 설명하며, III장에서는 간섭 시나리오 II에 대한 시뮬레이션 방법을 설명한다. 그리고 IV장에서 두 가지 간섭 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과 및 결과 분석, 마지막으로 V장에서 본 연구의 결론과 IMT-2020과 FSS가 동일채널에서 공존하기 위한 방법 및 향후 연구 방향에 대해 설명한다.

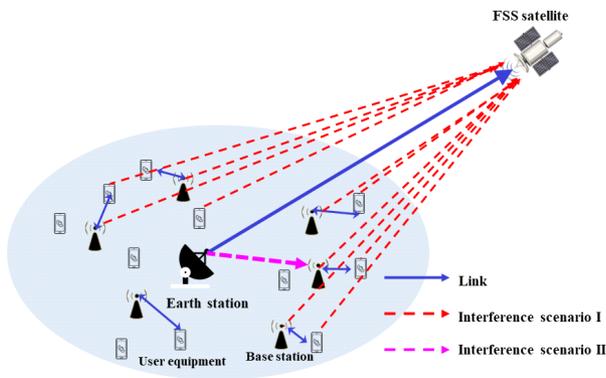


그림 1. FSS와 IMT-2020의 간섭 분석 시나리오
Fig. 1. Interference analysis scenario between FSS and IMT-2020.

II. IMT-2020 간섭 시나리오

그림 2는 FSS 위성이 다수의 IMT-2020으로부터 받는 간섭 시나리오를 보여준다. 간섭 분석을 위해, 먼저 위성의 수신 영역을 계산하고 그 안에 IMT-2020을 분포하며, 지구의 반지름이 R , 위성의 고도가 H 라고 할 때, 위성의 간섭 수신 영역은 다음과 같이 계산할 수 있다^[9].

$$S = 2\pi R^2 (1 - \cos(\alpha)) \quad (1)$$

이때 α 는 지구 중심에서 위성의 접선까지의 중심각으

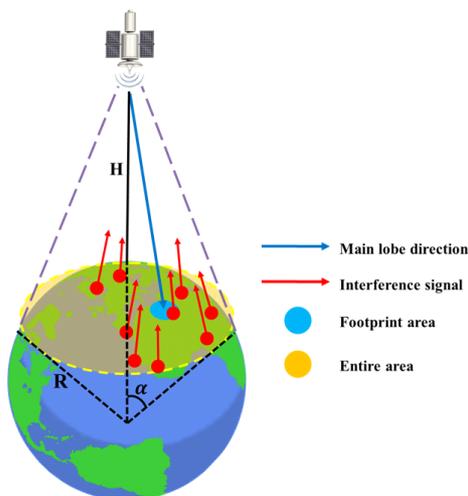


그림 2. 간섭 시나리오 I
Fig. 2. Interference scenario I.

로 다음과 같이 표현한다.

$$\alpha = \cos^{-1}(R / (H + R)) \quad (2)$$

그 후 수신 영역 내에 IMT-2020을 분포시킨다. IMT-2020의 밀도에 수신 영역과 거주 지역 비율, 핫스팟 비율, 기지국과 이동국의 활성화 비율을 모두 곱하여 기지국과 이동국의 개수를 결정하며, 이를 수신 영역 내에 분포시킨다. 기지국의 경우 수신 영역 내에서 균일 분포를 가정하며, 수평 방향으로 랜덤하게 수직 방향으로 10° 아래로 downtilt를 가정하여 안테나 방향을 부여한다. 이동국의 분포는 그림 3과 같이 먼저 가상의 기지국을 분포 후에 기지국의 안테나 방향을 기준으로 $\pm 60^\circ$ 안쪽에 분포하며, 기지국과의 거리는 레일리 분포를 가정한다. 그 후 기지국과 마찬가지로 안테나 방향을 수평 방향으로 랜덤하게 부여한다. 기지국은 모두 실외 환경을 가정하였으며, 이동국의 경우 확률에 따라 실외 또는 실내 환경을 가정하였다^[10].

그 후 지형 데이터를 이용하여 바다에 분포된 IMT-2020을 제거한다. ITU-R P.1144^[11] 문서에 첨부되어 있는 파일은 0.5° 단위로 위경도에 따른 지형의 높이 데이터와 0.5° 사이의 높이를 구하기 위한 보간법을 제시하고 있다. 그림 4는 위성의 높이가 35,786 km이고, 9° E 위치에 있을 때, 위성의 간섭 수신 영역을 보여준다. 지형 데이터와 보

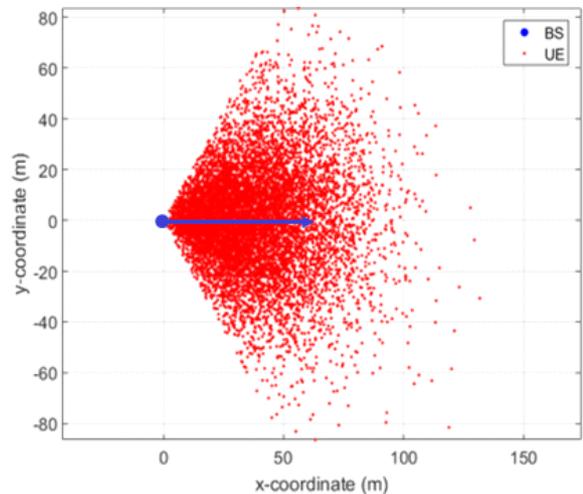


그림 3. IMT-2020 이동국 분포
Fig. 3. Distribution of user equipment of IMT-2020.

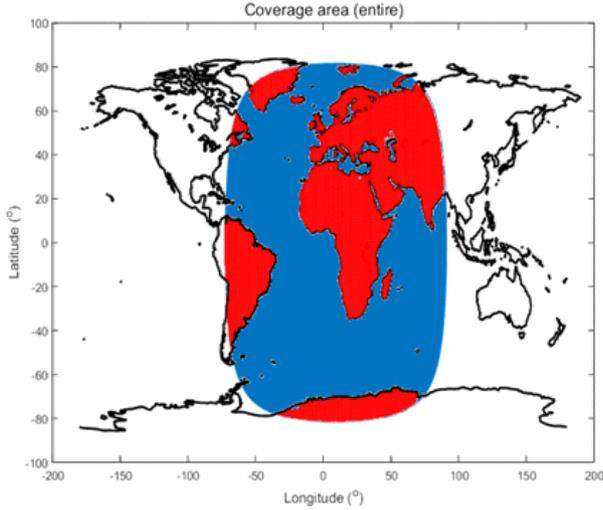


그림 4. 지형 데이터를 이용한 위성의 간섭 수신 영역
Fig. 4. Interference receive area of satellite using terrain data.

간섭을 이용하지 않을 경우, 위성의 간섭 수신 영역은 그림 4에서 색칠된 전체 영역을 의미하며, 면적은 217,056,000 km^2 이다. 그러나 본 논문에서 제안한 지형 데이터를 이용하여 육지 지역만 샘플링할 경우 그림 4의 빨간색 영역과 같이 육지 지역만 고려하여 간섭 수신 영역이 79,084,000 km^2 로 감소한다. 간섭 수신 영역이 줄어드는 만큼 간섭을 주는 IMT-2020의 개수도 줄어들며, 따라서 지형 데이터를 이용할 경우 위성의 높이와 위치에 따라 보다 정확한 간섭 분석이 가능하다.

IMT-2020의 가장 큰 특징은 송수신간 빔 포밍 기술을 통하여 지향성을 높여 밀리미터파 대역에서 발생하는 높은 전파 손실을 보완한다. IMT-2020의 위성 방향으로의 안테나 이득은 단일 소자 안테나 이득과 빔 포밍 안테나 이득을 더해 계산하며, 단일 안테나 이득은 앞에서 랜덤하게 부여한 안테나 방향을 기준으로 위성 방향으로의 방위각 ϕ 와 양각 θ 에 의해 결정되며, 다음과 같다^[12].

$$A_{EH}(\phi) = -\min\left[12\left(\frac{\phi}{\phi_{3dB}}\right)^2, A_m\right], \quad (3)$$

$$A_{EV}(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta-90}{\theta_{3dB}}\right)^2, SLA_v\right], \quad (4)$$

$$G_E(\phi, \theta) = G_{E\max} - \min\{-|A_{EH}(\phi) + A_{EV}(\theta)|, A_m\}, \quad (5)$$

여기서 $G_{E\max}$ 는 안테나 최대 이득을 나타내며, ϕ_{3dB} 와 θ_{3dB} 는 각각 3 dB 빔 폭을 의미, A_m 과 SLA_v 는 수평과 수직 성분의 안테나 최소 이득을 나타낸다. 추가적으로 IMT-2020은 서로 통신하는 송수신기 간에 빔 포밍 기술을 이용하여 지향성을 높이며, 이 때 위성 방향으로 향하는 IMT-2020의 빔 포밍 이득은 식 (6)과 같다.

$$G_{array} = 10\log_{10}\left(\sum_{m=1}^{N_H} \sum_{n=1}^{N_V} w_{n,m}(\phi, \theta) \cdot v_{n,m}(\phi_{escan}, \theta_{ctilt})\right), \quad (6)$$

여기서 N_H 와 N_V 는 IMT-2020의 안테나 배열에서 가로와 세로축 안테나 개수를 의미하며, $w_{n,m}$, $v_{n,m}$ 은 IMT-2020 모델링 문서에 제시되어 있으며, 여기서 ϕ_{escan} 과 θ_{ctilt} 는 송신 IMT-2020이 셀 반경내에 수신하는 IMT-2020을 향해 빔포밍을 수행할 때 위성 방향으로의 방위각과 양각을 의미한다. 그림 5는 IMT-2020의 안테나 배열에 따른 빔 포밍 패턴을 보여준다. 그림과 같이 안테나의 개수가 증가할수록 송수신 방향으로 지향성이 높아져 안테나 이득이 증가하며, 다른 방향으로의 안테나 이득은 반대로 감소하는 것을 확인할 수 있다. IMT-2020의 총 안테나 이득은 식 (5)의 단일 안테나 이득과 식 (6)의 빔포밍 이득을 더해 계산한다.

IMT-2020의 간섭 신호가 위성에 도달하기까지 생기는 총 전파손실은 자유 공간 경로 손실에 추가적으로 지구 환경에 의해 발생하는 손실 고려하여 모델링하였으며, 총 전파손실은 다음과 같이 계산한다.

$$PL_{tot} = PL_{free} + (L_{dutter \text{ or } L_{building}}) + L_{aq} + L_{bs} + L_{pol} + (L_{body}) \quad (7)$$

여기서 PL_{free} 은 자유공간 경로손실, L_{dutter} 는 클러터 손실을 나타내며, $L_{building}$, L_{aq} , L_{bs} , L_{pol} , L_{body} 는 각각 빌딩 투과 손실, 대기 가스에 의한 손실, 빔 퍼짐 손실, 편광 손실, 신체에 의한 손실을 나타낸다.

자유공간 경로손실은 매질이 없는 자유공간에서 생기는 경로 손실을 의미하며, 거리가 d km, 주파수가 f GHz 일 경우 다음과 같다.

$$PL_{free} (dB) = 92.45 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (8)$$

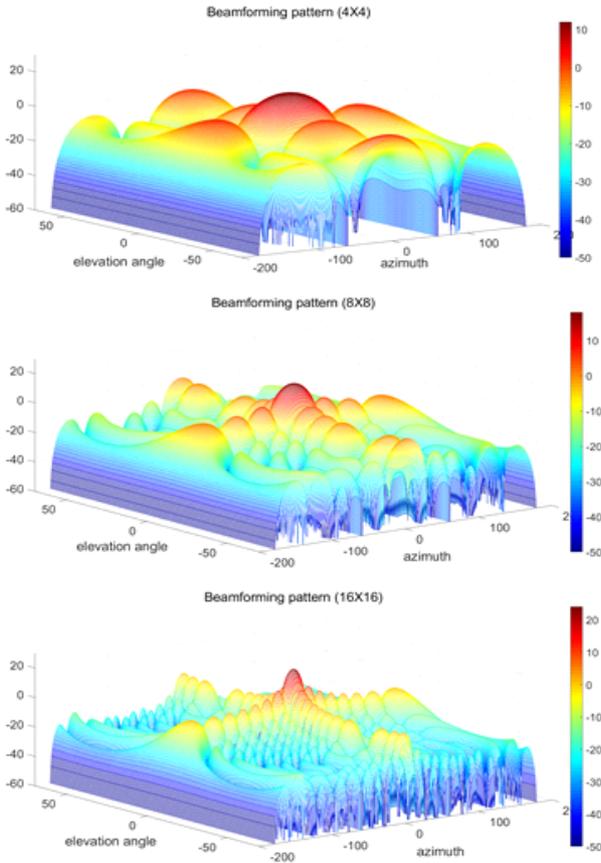


그림 5. 다중 안테나 배열에 따른 IMT-2020의 빔 포밍 패턴
 Fig. 5. Beamforming pattern of IMT-2020 according to the antenna array.

클러터 손실은 IMT-2020이 실외 환경에 배치될 경우, 지구와 우주 사이의 경로에서 발생하는 클러터에 의한 손실을 나타내며, 빌딩 투과손실은 IMT-2020이 실내에 위치할 경우 건물 벽을 통과하면서 생기는 손실을 의미한다. IMT-2020이 실외 환경일 경우, 클러터 손실을, 실내 환경일 경우 빌딩 투과 손실을 적용하며, 클러터 손실 $L_{clutter}$ 와 빌딩 투과손실 $L_{building}$ 은 다음과 같이 계산한다^{[13],[14]}.

$$L_{clutter}(dB) = \left\{ \begin{array}{l} -K_1 \left[\ln \left(1 - \frac{p}{100} \right) \right] \\ \times \cot \left[A_1 \left(1 - \frac{\theta}{90} \right) + \frac{\pi\theta}{180} \right] \\ - 1 - 0.6 Q^{-1} \left(\frac{p}{100} \right) \end{array} \right\} \left[\frac{90 - \theta}{180} \right] \quad (9)$$

$$L_{building}(dB) = 10 \log(10^{0.1A(P)} + 10^{0.1B(P)} + 10^{0.1C}) \quad (10)$$

식 (9)에서 θ 는 IMT-2020의 양각을, p 는 지역 비율을 의미하며, K_1 과 A_1 의 경우 참고문헌에 제시되어 있다^[13]. 여기서 지역 비율 p 는 지역의 밀집도를 나타내며, 값이 클수록 도심환경에 가깝다는 것을 의미한다. 식 (10)에서 $A(P), B(P), C$ 의 경우, 주파수, 양각, 확률에 따른 건물 벽의 매질에 의해 랜덤하게 결정되며, 자세한 수식은 ITU-R P.2109 문서에 제시되어 있다^[14]. 대기 가스 손실 L_{og} 와 빔 퍼짐 손실 L_{bs} 는 IMT-2020의 간섭 신호가 대기층을 통과 하면서 생기는 손실로서 양각이 낮을수록 더 많은 대기층을 통과하기 때문에 손실이 증가하며, ITU-R P.619 문서에서 각 손실을 계산하는 알고리즘을 제시하고 있다^[15]. 그 외 L_{pol} 과 L_{body} 는 각각 3 dB, 4 dB를 가정하였으며, L_{body} 의 경우 이동국에만 적용한다. 이와 같이 간섭원 IMT-2020의 환경과 종류에 따라 다른 전파손실을 적용하여 총 전파손실을 계산한다.

그 후, FSS 위성의 수신 안테나 이득을 계산한다. 위성의 수신 안테나 이득은 위성의 주빔 방향과 분포된 IMT-2020의 사잇각에 의해 결정되며, 다음과 같다^[16].

$$G_{SS}(\Psi) = \begin{cases} G_m - 3(\Psi/\Psi_o) & , (\Psi \leq \Psi_o) \\ G_m - 3(\Psi/\Psi_o)^2 & , (\Psi_o \leq \Psi \leq a\Psi_o) \\ G_m + L_s & , (a\Psi_o < \Psi \leq b\Psi_o), \\ G_m + L_s + 20 - 25 \log(\Psi/\Psi_o) & , (b\Psi_o < \Psi \leq \Psi_1) \\ 0 & , (\Psi_1 < \Psi) \end{cases} \quad (11)$$

여기서 G_m 은 최대 안테나 이득, Ψ 는 위성의 주빔과 IMT-2020 사이의 off-axis angle을 의미하며, $\Psi_o, L_s, \Psi_1, a, b$ 의 의미와 값은 참고문헌에 제시되어 있다^[16].

앞에서 계산한 안테나 이득과 전파 손실을 이용하여 FSS 위성이 수신하는 총 간섭전력을 계산한다. 위성이 i 번째 IMT-2020으로부터 수신하는 단일 간섭전력은 다음과 같다.

$$I_{single,i} = P_t + G_{IMT} + G_{SS} + PL, \quad (12)$$

식 (12)에서 P_t 는 IMT-2020의 송출 전력, G_{IMT} 는 IMT-2020의 송신 안테나 이득, G_{SS} 는 FSS 위성의 수신 안테나 이득, PL 은 총 전파손실을 의미하며, OTR 은 간섭원과 피간섭원의 대역폭에 따른 감소 비율을 의미한다. 그 후

식 (13)과 같이 모든 IMT-2020의 단일 간섭을 더해 총 수신 간섭 전력을 계산한다.

$$I_{agg} (dBm) = 10 \log \left(\sum_{i=1}^{N_{IMT}} 10^{(I_{single,i}/10)} \right), \quad (13)$$

FSS 위성이 IMT-2020으로부터 받는 총 간섭을 계산 후 위성의 보호기준과 비교한다.

III. 지구국 간섭 시나리오

그림 6은 IMT-2020이 지구국으로부터 간섭을 받는 시나리오를 보여준다. FSS 지구국의 안테나는 최소 양각 θ_{ES} 로 위성을 향하고 있으며, 이 때 송신 IMT-2020으로부터 신호를 수신하는 수신 IMT-2020이 지구국의 방위각 ϕ_{ES} 의 변화에 따라 받는 간섭 전력을 계산하고, 보호기준을 만족하는 IMT-2020의 최소 이격거리를 찾는다. 간섭

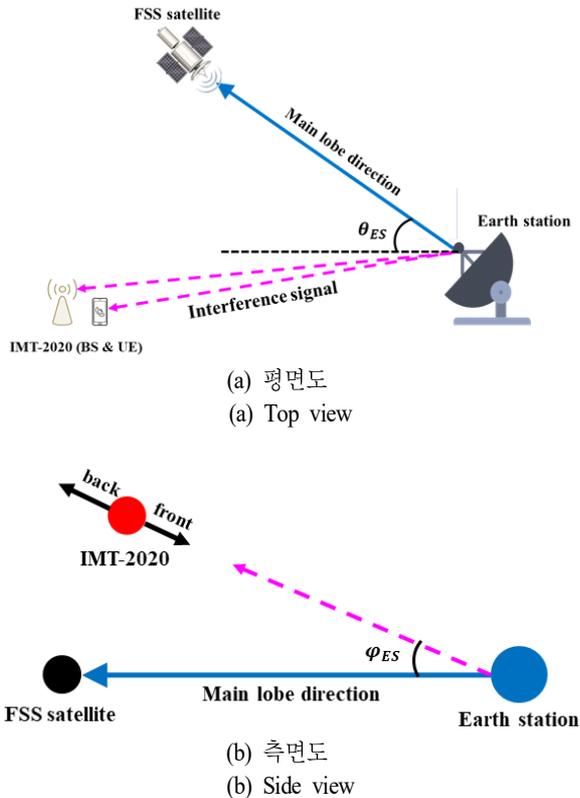


그림 6. 간섭 시나리오 II
Fig. 6. Interference scenario II.

을 수신하는 IMT-2020의 안테나 방향은 지구국을 향하는 front 방향과 반대편을 향하는 back 방향 두 가지 경우를 가정하였다.

IMT-2020이 FSS 지구국으로부터 받는 간섭 전력은 다음과 같이 계산한다.

$$I = P_{ES} + G_{ES} + G_{IMT} + PL + L_{clutter}, \quad (14)$$

식 (14)에서 P_{ES} 는 지구국의 송출 전력, G_{ES} 는 지구국의 송신 안테나 이득, G_{IMT} 는 IMT-2020의 수신 안테나 이득, PL 은 지상간 경로 손실을 의미하며, $L_{clutter}$ 은 식 (7)과 같이 클러터에 의한 손실을 의미한다.

FSS 지구국의 송신 안테나 이득은 지구국의 주빔 방향과 IMT-2020이 이루는 ϕ_{ES} 와 θ_{ES} 에 따른 사잇각 Ψ 에 의해 결정되며 식 (15)와 같다^[17].

$$G_{ES}(\Psi) = \begin{cases} G_m & , (\Psi < 2^\circ) \\ 52 - 10 \log(D/\lambda) - 25 \log(\Psi) & , (2^\circ \leq \Psi \leq 48^\circ) \\ -10 & , (48^\circ < \Psi \leq 180^\circ) \end{cases} \quad (15)$$

식 (15)에서 G_m 은 지구국의 최대 송신 안테나 이득을 의미하며, D 와 λ 는 각각 지구국의 안테나 직경과 파장을 의미한다.

IMT-2020의 수신 안테나 이득은 II장에서 설명한 IMT-2020의 안테나 모델링 방법과 동일하게 식 (3)~식 (6)을 이용한다^[12]. IMT-2020 지구국과 지구국의 위치와 안테나 방향은 고정되어 있지만, IMT-2020의 빔포밍 방향은 통신하는 IMT-2020의 위치에 따라 수시로 바뀐다. 따라서 최악의 경우를 가정하여 IMT-2020의 빔포밍 방향은 지구국 방향을 향한다고 가정한다. 따라서 IMT-2020의 수신 안테나 이득 중 빔포밍 이득은 최대로 가정하며, 여기에 수평각 ϕ 와 IMT-2020과 지구국 간 높이 차에 의한 수직각 θ 에 의해 결정되는 IMT-2020의 단일 안테나 이득을 더해 총 수신 안테나 이득을 계산한다. IMT-2020의 안테나가 front 방향일 경우 ϕ 는 0° , back 방향일 경우에는 180° 로 설정한다.

ITU-R에서 제안한 P.452 문서는 간섭원과 피간섭원이 지표면상에 있을 경우, 지상 전파에서 발생하는 회절, 산란 등의 전파현상을 반영한 경로 손실을 계산하는 알고

리즘을 제공하고 있다^[18]. 이를 이용하여 IMT-2020과 지구국간 전파 손실 PL 을 계산하며, 추가적으로 시나리오 I에서 사용한 ITU-R P.2108 문서에서 제안한 지상간 클러터 손실 모델을 추가하였다^[13]. 지상간 클러터 손실은 다음과 같다.

$$L_{clutter} = -5 \log(10^{-0.2L_i} + 10^{-0.2L_s}) - 6Q^{-1}(p/100), \quad (16)$$

여기서 L_i 와 L_s 는 주파수 f 와 거리 d 에 의해 결정되며, $Q^{-1}(p/100)$ 은 식 (9)와 같이 지역 비율 p 에 의해 결정되는 역 상보 정규분포 함수(inverse complementary normal distribution function)를 의미한다^[13]. 그림 7은 주파수 대역과 지역 비율에 따른 클러터 손실을 보여준다. 그림과 같이 주파수 대역과 지역 비율이 높을수록 클러터 손실이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그 후 식 (14)를 이용하여 ϕ_{ES} 와 IMT-2020의 안테나 방향, 지역 비율 p 에 따라 지구국 또는 이동국이 받는 간섭을 계산하고, IMT-2020의 보호기준을 만족하는 최소 이격거리를 찾는다.

IV. 시뮬레이션 결과

표 1은 IMT-2020의 파라미터를, 표 2와 3은 각각 FSS 위성과 지구국의 파라미터를 보여준다^{[10],[19]}. 표의 파라미터와 II, III장에서 설명한 방법론을 이용하여 간섭 분석을 수행하고, 보호 기준과 비교하여 27 GHz와 81 GHz에서 FSS와 IMT-2020이 받는 간섭을 계산한다. FSS와 IMT-

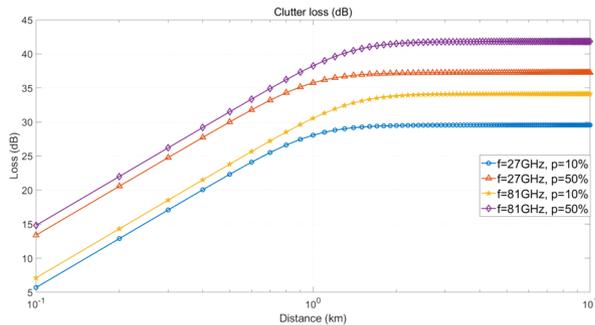


그림 7. 주파수와 지역비율에 따른 클러터 손실
Fig. 7. Clutter loss according to the carrier frequency and percentage of location.

표 1. IMT-2020 파라미터

Table 1. Parameters of IMT-2020.

Parameters [Unit]	Value	
	Base station	User equipment
Carrier frequency [GHz]	24.25 ~ 27.5, 81 ~ 86	
Bandwidth [MHz]	200	
Antenna height [m]	6	1.5
Density/km ²	Urban: 30 Suburban: 10	Urban: 100 Suburban: 30
Resident area ratio [%]	5	
Hotspot area ratio [%]	Urban: 7, Suburban: 3	
Network loading factor [%]	20, 50	
TDD activity factor [%]	80	20
Environment ratio [%]	Outdoor: 100	Outdoor: 80 Indoor: 20
Conducted power [dBm]	10(27 GHz), 6(81 GHz)	
Mechanical downtilt [°]	10	-
Peak element antenna gain [dB]	5	5
Antenna array [NH×NV]	8×8(24.25 GHz), 16×16(81 GHz)	4×4(24.25 GHz), 8×4(81 GHz)
φ3 dB, Θ3 dB [°]	65	90
Am, SLAv	30	25
Body loss [dB]	-	4
Protection criterion (I/N) [dB]	-6	

표 2. FSS 위성 파라미터

Table 2. Parameters of FSS satellite.

Parameters [Unit]	Value	
Carrier name	Carrier #06	Carrier #18
Carrier frequency [GHz]	27 ~ 27.5	81 ~ 86
Bandwidth [MHz]	200	500
Orbit [km]	37,855	8,500
Peak antenna gain [dB]	51	64.3
LS [dB]	-20	-25
3 dB beamwidth [°]	0.65	0.11
Noise temperature [K]	950	700
Protection criterion (I/N) [dB]	-12.2	-10.5

2020의 보호 기준은 I/N 형식으로 주어졌으며, 따라서 식

표 3. FSS 지구국 파라미터
Table 3. Parameters of FSS earth station.

Parameters [Unit]	Value	
	Carrier #13	Carrier #18
Carrier name	Carrier #13	Carrier #18
Carrier frequency [GHz]	27	81
Bandwidth [MHz]	100	250
Antenna diameter [m]	0.45	6.8
Antenna height [m]	20	20
Peak transmit antenna gain [dBi]	40.4	73.4
Peak transmit power [dBW/Hz]	-56	-63
Minimum elevation angle [°]	5	10

(17)을 이용하여 FSS 위성 또는 IMT-2020이 받는 간섭 전력을 I/N 형태로 변환하고 보호 기준과 비교하였다.

$$I/N_{th} = I_{aaa} - N, \tag{17}$$

여기서 N 은 위성의 수신 잡음으로 다음과 같다.

$$N = 10 \log(k \times T \times BW) \tag{18}$$

식 (18)에서 k 는 볼츠만 상수, T 는 잡음 온도를 의미하며, BW 는 피 간섭원의 대역폭을 의미한다.

4-1 시나리오 I 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 위성이 9°E에 위치했을 때, 주빔은 각각 (50°E, 45°N), (36.6°E, 53.6°N), (50°W, 10°S)을 향한다고 가정하였으며, IMT-2020의 위치, 환경, 안테나 방향 등 다양한 랜덤 변수에 의해 결정되기 때문에 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 동일한 시나리오를 반복하여 시뮬레이션 결과를 누적분포함수 형태로 나타낸다.

그림 8은 각각 27, 81 GHz 대역에서 운용 중인 FSS 위성이 9°E에 위치하고, 주빔 방향이 (50°E, 45°N), (50°W, 10°S)을 향할 때 수신하는 안테나 이득을 보여준다. 두 위성이 동일한 위치에 있다고 가정할 때, 27 GHz 대역에서 운용 중인 위성의 경우 약 1,518,000개의 IMT-2020으로부터 간섭을 받게 되며, 81 GHz 대역에서 운용 중인 위성의 경우 약 980,000개의 IMT-2020으로부터 간섭을 받는다. 27 GHz 대역의 위성은 81 GHz 대역의 위성보다 높은 고도에 위치해 있으며, 3 dB 빔 폭 또한 크기 때문에 상대적

으로 footprint 면적과 전체 간섭 수신 영역이 넓지만, 최대 안테나 이득이 낮은 것을 확인할 수 있다.

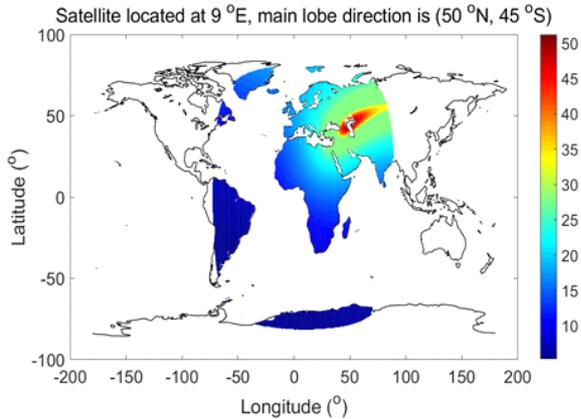
그림 9는 시나리오 I의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림에서 점선은 기존 간섭분석 기법에서 주로 사용되었던 footprint 면적만을 고려했을 경우의 결과이며, 실선은 본 논문에서 제안한 전체 수신 영역에 추가적으로 지형 데이터를 이용한 결과이다. 시뮬레이션 결과, 본 논문에서 제안한 간섭 분석 방법에서 27 GHz 대역의 위성인 Carrier #05의 경우 최대 5.3 dB, 81 GHz 대역의 위성인 Carrier #18의 경우 최대 7.9 dB의 간섭을 추가적으로 수신하는 것을 확인하였다. 이는 위성이 받는 간섭을 계산할 때, footprint뿐만 아니라, 사이드 로브에서 수신하는 간섭까지 계산해야 한다는 것을 보여준다. 또한 시뮬레이션 결과에서 선의 색은 각각 주빔 위치를 나타내며, 위성의 주빔 위치에 따라 위성이 IMT-2020으로부터 수신하는 간섭 전력이 달라지는 것을 확인할 수 있다.

추가적으로, 그림 9(b)에서 주빔이 (50°E, 45°N)를 향하는 주황색 실선의 경우, 기존과 전혀 다른 양상의 결과 그래프를 확인할 수 있다. 그 이유는 그림 8에서 확인할 수 있다. 그림 8에서 Carrier #18의 경우 위성의 안테나 패턴이 얇고 뾰족하여 Carrier #05에 비해 상대적으로 footprint에서 수신하는 간섭의 영향을 크게 받게 되는데, 그림 8의 (c)의 경우 위성의 주빔 방향 근처에 존재하는 카스피 해 (Caspian Sea)로 인해 높은 수신 안테나 이득을 가지는 부분이 바다로 되어 간섭을 받지 않는다. 따라서 간섭이 크게 줄어들어 다른 그래프와 다른 양상을 띠는 것을 확인하였다.

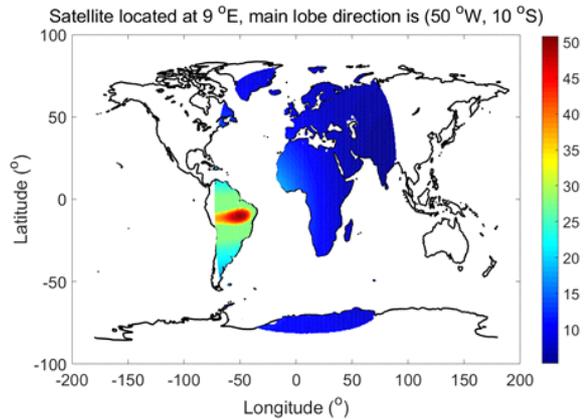
모든 시뮬레이션 결과를 종합했을 때, 81 GHz의 경우 27 GHz의 위성보다 높은 최대 수신 안테나 이득과 좁은 빔 폭으로 인해 footprint 영역에서 오는 간섭에 크게 의존하며, footprint 안에 분포된 IMT-2020의 환경에 따라서 간섭의 최소값과 최대값의 편차가 크다. 그러나 27 GHz와 81 GHz 모두에서 위성이 받는 간섭은 위성의 보호 기준인 -12.2 dB보다 작기 때문에 FSS 위성은 IMT-2020의 간섭으로부터 큰 영향을 받지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

4-2 시나리오 II 시뮬레이션 결과

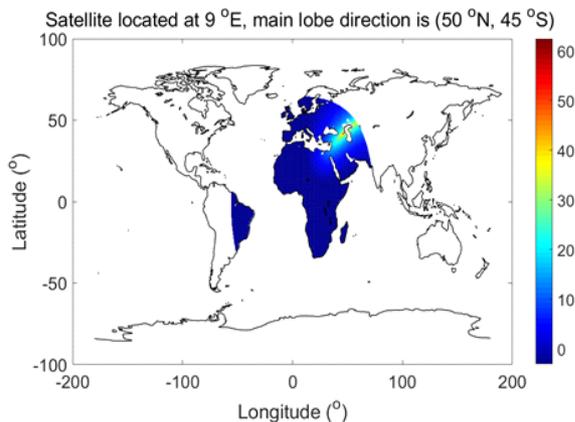
시뮬레이션은 IMT-2020의 안테나가 front 방향으로 지



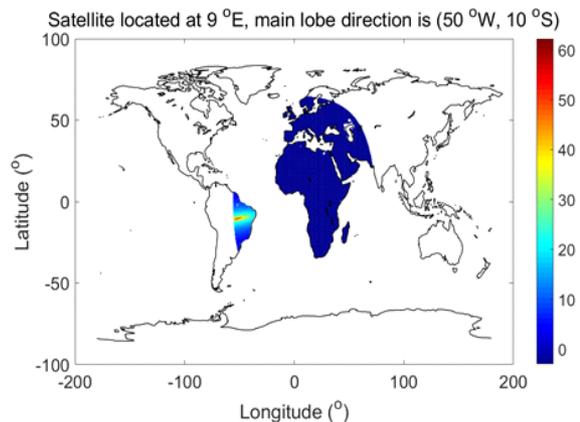
(a) Carrier #05 위성, 주빔 방향(50°E, 45°N)
 (a) Carrier #05 satellite, main lobe direction is (50°E, 45°N)



(b) Carrier #05 위성, 주빔 방향(50°W, 10°S)
 (b) Carrier #05 satellite, main lobe direction is (50°W, 10°S)



(c) Carrier #18 위성, 주빔 방향(50°E, 45°N)
 (c) Carrier #18 satellite, main lobe direction is (50°E, 45°N)



(d) Carrier #18 위성, 주빔 방향(50°W, 10°S)
 (d) Carrier #18 satellite, main lobe direction is (50°W, 10°S)

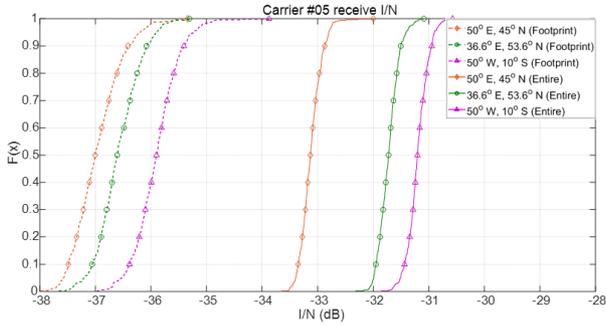
그림 8. 주빔 방향에 따른 위성의 안테나 패턴

Fig. 8. Antenna pattern of satellite according to the main lobe direction.

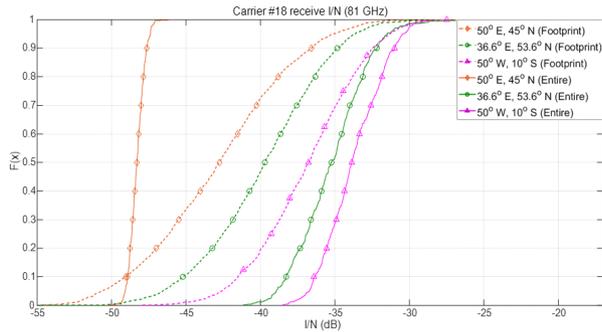
구국을 향하며, 지구국의 주빔 방향인 ϕ_{ES} 가 0° , 지역 비율이 10 %인 최악의 경우를 기준으로 각각 지역 비율, ϕ_{ES} , 안테나가 방향을 바꿔가면서 시뮬레이션을 수행하고 최소 이격거리를 계산하였다.

그림 10은 지구국이 IMT-2020 기지국에게 주는 간섭 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 시뮬레이션 결과, 지역 비율이 높아질수록 그림 7과 같이 클러터 손실이 증가, ϕ_{ES} 가 증가할 경우 지구국의 송신 안테나 이득의 감소, 안테나 방향이 back일 경우 IMT-2020의 수신 안테나 이득의 감소로 인해 IMT-2020이 받는 간섭 전력이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이 다양한 시나리오에서 IMT-2020이 받는 간섭 전력을 계산하고, 보호 기준을 만족하는 최소 이격거리를 계산하였다. 표 4는 다양한 조건에 따라 27, 81 GHz 대역에서 IMT-2020이 지구국의 간섭을 피하기 위한 최소 이격거리를 제시한 표이다. 동일한 조건에서 27 GHz 대역에서 받는 간섭 전력이 81 GHz 대역에서 받는 간섭 전력보다 크기 때문에 최소 이격거리가 증가하는데, 그 이유는 81 GHz 대역의 경우, IMT-2020의 수신 안테나 이득이 증가하지만 높은 주파수 대역으로 인해 경로손실과 클러터 손실의 증가폭이 더 크기 때문에 받는 간섭이 감소하여 모든 시나리오에서 이격거리가 1 km 미만으로 나오는



(a) Carrier #05 결과(27~27.5 GHz)
(a) Carrier #05 result(27~27.5 GHz)



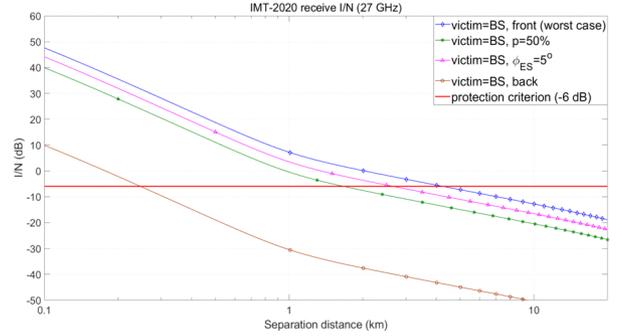
(b) Carrier #18 결과(81~86 GHz)
(b) Carrier #18 result(81~86 GHz)

그림 9. 시나리오 I 시뮬레이션 결과
Fig. 9. Simulation result of scenario I.

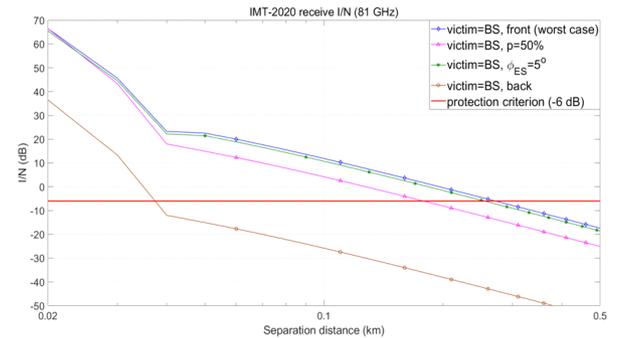
것을 확인할 수 있다.

표 4. 최소 이격거리 (km)
Table 4. Separation distance (km).

		Base station		User equipment	
		$p=10$ %	$p=50$ %	$p=10$ %	$p=50$ %
Carrier #13 (27~27 GHz)	Front, $\phi_{ES} = 0^\circ$	4.25	1.67	0.27	0.18
	Front, $\phi_{ES} = 5^\circ$	2.66	1.15	0.25	0.17
	Back, $\phi_{ES} = 0^\circ$	0.25	0.17	0.15	0.1
Carrier #18 (81~86 GHz)	Front, $\phi_{ES} = 0^\circ$	2.11	0.99	0.18	0.12
	Front, $\phi_{ES} = 5^\circ$	1.39	0.78	0.16	0.11
	Back, $\phi_{ES} = 0^\circ$	0.04	0.04	0.04	0.04



(a) Carrier #13 결과 (27~27.5 GHz)
(a) Carrier #13 result (27~27.5 GHz)



(b) Carrier #18 결과 (81~86 GHz)
(b) Carrier #18 result (81~86 GHz)

그림 10. 시나리오 II 시뮬레이션 결과
Fig. 10. Simulation result of scenario II.

V. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 IMT-2020의 후보 대역 지정을 위해 ITU에서 제안한 모델링 문서를 바탕으로 현재 27~27.5 GHz 대역에서 운용 중인 FSS 상향링크 서비스와의 간섭 분석을 통해 두 서비스의 동일채널 공존 가능성에 대해 분석하였다. 시뮬레이션 결과, FSS 위성이 IMT-2020으로부터 받는 간섭 시나리오는 위성의 위치와 주빔 방향에 따라 달라지지만, 모든 결과에서 위성의 보호기준 미만이라는 결과를 확인하였으며, IMT-2020이 지구국으로부터 받는 간섭 시나리오의 경우 위성의 파라미터, 안테나 패턴, 수평각, 지역 비율, 등과 같이 다양한 조건에 따라 보호 기준을 만족하는 최소 이격거리를 제시하였다. 따라서 FSS와 IMT-2020이 동일 채널에서 공존하기 위해서는 IMT-2020과 지구국의 이격거리 조건

을 만족해야 하며, 본 논문에서 제시한 다양한 결과를 활용하여 지구국의 안테나 방향과 전파 환경에 따라 적절한 이격거리를 설정할 수 있다. 본 논문에서 제안한 간섭 시나리오는 밀리미터파 대역 내에서 다양한 위성 서비스와의 공존 연구에 적용할 수 있으며, 향후 연구 계획으로 이 모델링 방법을 확장하여 다양한 위성 시스템과의 공존 가능성을 연구할 계획이다.

References

- [1] C. G. Oh, "5G mobile communication standardization and frequency trend," *The Magazine of the IEIE*, vol. 43, pp. 26-34, Apr. 2016.
- [2] S. Y. Lee, Y. N. Yun, J. H. Park, M. G. Chu, Y. U. Kim, and J. H. Choe, et al., "5G antenna technology trends," *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 2, pp. 3-15, Mar. 2018.
- [3] H. S. Jo, "Trends in shared research for determining candidate bands for IMT-2020 5G services," *The Magazine of the IEIE*, vol. 44, no. 7, pp. 26-35, Jul. 2017.
- [4] J. W. Lim, H. S. Jo, H. G. Yoon, and J. G. Yook, "Interference mitigation technique for the sharing between IMT-advanced and fixed satellite service," *Journal of Communications and Networks*, vol. 9, no. 2, pp. 159-166, Jun. 2007.
- [5] T. Wang, Z. Qian, L. Kang, S. Geng, and X. Zhao, "Coexistence interference analysis of 28 GHz IMT and fixed-satellite service systems," in *2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chongqing, Mar. 2017, pp. 1574-1578.
- [6] S. Kim, E. Visotsky, P. Moorut, K. Bechta, A. Ghosh, and C. Dietrich, "Coexistence of 5G with the incumbents in the 28 and 70 GHz bands," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1254-1268, Jun. 2017.
- [7] Y. Cho, H. Kim, A. E. Ernest, and H. S. Jo, "Spectral coexistence of IMT-2020 with fixed-satellite service in the 27~27.5 GHz band," in *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, Oct. 2018, pp. 1-6.
- [8] F. Guidolin, M. Nekovee, "Investigating spectrum sharing between 5G millimeter wave networks and fixed satellite systems," in *2015 IEEE Globecom Workshops (GC Workshops)*, San Diego, CA, Dec. 2015, pp. 1-7.
- [9] A. Ketsdever, "Lesson 2: Space mission geometry." http://eas.uccs.edu/~aketsdev/MAE%205595_files/Lesson%202.pdf
- [10] ITU, "System parameters and propagation models to be used in sharing and compatibility studies," Report on the fifth meeting of Task Group 5/1, Geneva, May 2018.
- [11] *Guide to the Application of the Propagation Methods of Radio Communication Study Group 3*, ITU-R Rec P. 1144-9, Dec. 2017.
- [12] *Modelling and Simulation of IMT Networks and Systems for Use in Sharing and Compatibility Studies*, ITU-R Rec M.2101-0, Feb. 2017.
- [13] *Prediction of Clutter Loss*, ITU-R Rec P.2108-0, Jun. 2017.
- [14] *Prediction of Building Entry Loss*, ITU-R Rec P.2109-0, Jun. 2017.
- [15] *Propagation Data Required for the Evaluation of Interference between Stations in Space and Those on the Surface of the Earth*, ITU-R Rec P.619-2, Jun. 2017.
- [16] *Satellite Antenna Radiation Pattern for Use as a Design Objective in the Fixed-Satellite Service Employing Geostationary Satellites*, ITU-R Rec S.672-4, Sep. 1997.
- [17] *Reference Radiation Pattern for Earth Station Antennas in the Fixed-Satellite Service for Use in Coordination and Interference Assessment in the Frequency Range from 2 to 31 GHz*, ITU-R Rec S.465-6, Jan. 2010.
- [18] *Prediction Procedure for the Evaluation of Interference between Stations on the Surface of the Earth at Frequencies above 0.1 GHz*, ITU-R Rec P.452-16, Jul.

2015.

[19] *FSS Technical Parameters for Sharing Studies under*

WRC-19 Agenda Item 1.13 and 1.14, ITU-R Rec 4A/504-E, Oct. 2017.

조 연 기 [한밭대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-5711-3765>



2017년 2월: 한밭대학교 전자·제어공학과 (공학사)
2018년 3월~현재: 한밭대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 무선통신 시스템간의 주파수 공유 및 양립성, 확률기하이론

조 한 신 [한밭대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-5738-1807>



2001년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2004년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2009년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2009년 10월: University of Texas at Austin,

Postdoctoral Fellow

2011년 11월: 삼성전자 네트워크사업부 책임연구원
2012년 3월~현재: 한밭대학교 전자·제어공학과 부교수
[주 관심분야] 이기종 무선네트워크, 무선통신 시스템간의 주파수 공유 및 양립성, MIMO 시스템, 펄스셀 및 소형셀 네트워크, 확률기하이론

김 현 기 [한밭대학교 / 석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6822-2924>



2017년 2월: 한밭대학교 전자·제어공학과 (공학사)
2018년 3월~현재: 한밭대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 무선통신 시스템간의 주파수 공유 및 양립성, 확률기하이론