

수학적 모델링을 통한 지구 정지 궤도 위성의 고도각에 따른 지구국의 저궤도 군집위성으로부터의 전파 간섭분석

장백훈, 조한신

한양대학교

jbhkorea33@hanyang.ac.kr ,hsjo23@hanyang.ac.kr

Mathematical Modeling of Signal Propagation Interference Analysis from Low Earth Satellite Constellations to Earth Stations Based on Elevation Angle of Geostationary Orbit Satellites

Baek-Hoon Jang, Han-Shin Jo

Hanyang Univ.

요약

본 논문에서는 최근 저궤도 위성(Low Earth Orbit, LEO)의 증가로 인해 발생하는 정지 궤도 위성(Geostationary Earth Orbit, GEO) 위성과 지구국(Earth Station, ES)의 전파 서비스를 방해하는 LEO 위성의 간섭전력을 분석한다. 제안된 시나리오는 GEO의 고도 각(Elevation angle)에 따른 여러 지구국을 배치하고, 해당 지구국에서의 간섭전력을 계산한다. 제안된 방법은 간섭 시나리오를 지구 중심 고정 좌표계(Earth-Centered Earth-Fixed, ECEF)를 통해 모델링 후, GEO, LEO 위성 그리고 ES 등의 좌표를 통해 Off-axis, Elevation angle을 분석하고 간섭전력을 계산한다. 시뮬레이션 결과, 지구국의 위도가 극지방으로 갈수록 극궤도 군집위성의 동적 성질로 인해, 저위도의 지구국보다 상대적으로 많은 LEO 위성으로부터의 간섭을 받지만, 전체 INR(Interference-to-Noise Ratio) 결과는 LEO 위성으로부터 받는 간섭의 수와 무관하다는 것을 분석할 수 있다.

I. 서론

최근 SpaceX의 Starlink와 OneWeb 등 다수의 저궤도 위성(Low Earth Orbit, LEO)을 이용한 주파수 공유, 통신망 구축 등의 통신 서비스를 제공하는 비지상 네트워크(Non-terrestrial Network, NTN)에 대한 관심이 증가하고 있다. 하지만, 저궤도 위성의 동적 성질과 수많은 개수로 인한 광범위한 분포 등의 이유로 LEO 위성보다 높은 고도에 위치한 위성의 광범위한 커버리지의 통신에서 다양한 간섭 문제가 발생할 수 있다. 특히, 정지궤도(Geostationary Earth Orbit, GEO)는 약 36,000km의 고도에 위치하며, 매우 광범위한 서비스를 하므로 동일 주파수 대역에서 LEO 위성들이 다양한 간섭을 발생시킨다. 이러한 상황은 국제전기통신연합(International Telecommunication Union, ITU)은 GEO 위성의 업무를 최우선으로 보호하며, 타 서비스의 간섭에 의한 보호를 요청할 수 없는 전파 규칙을 적용하였다.^[1]

본 논문에서는 GEO 위성의 고도 각에 따른 지구국을 배치한 후, 극궤도 군집위성 즉, LEO 위성으로부터의 간섭전력을 계산한다. 해당 시나리오에서 지구 중심 고정 좌표계(Earth-Centered Earth-Fixed, ECEF)를 통해 위성과 지구국의 수학적 모델링 후 Off-axis, elevation angle 등을 분석하고, 최종 간섭전력을 계산하여, LEO 위성으로부터 각 지구국이 받는 INR(Interference-to-Noise Ratio) 값을 통해 비교하며 분석한다.

II. 간섭 시나리오

그림 1은 본 연구의 간섭 시나리오에서 극궤도 군집위성과 5개의 지구국이 배치된 것을 보여준다. GEO와 지구국 간의 통신에서 LEO 군집위성이 지구국에 간섭을 주는 시나리오이며, GEO와 LEO의 지구국 및 안테나 방향은 모두 동일하다고 가정한다.^[2]

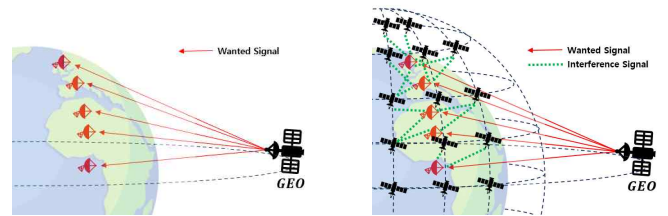


그림1. 위성 서비스 간 극궤도 군집위성의 간섭 시나리오

이때, 지구국이 받는 간섭전력은 다음과 같이 정의된다.

$$I = P_i + G_i + G_r - PL. \quad (1)$$

여기서 P_i 와 G_i 는 LEO 위성의 송신 전력 및 안테나 이득을 나타내며, G_r 는 수신 안테나 이득을 나타낸다. PL 은 시나리오 환경의 경로 손실을 의미하며, 본 논문에서는 자유공간 경로 손실(Free Space Path Loss, FSPL)환경을 가정하여 연구를 진행했다.

III. 수학적 모델링

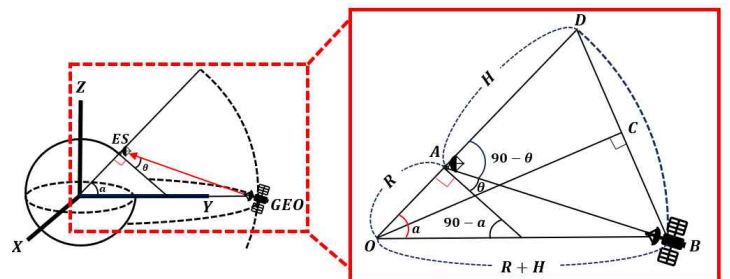


그림 2. ECEF의 2차원 모델링을 통한 지구국의 Elevation angle

본 연구의 시나리오에서 GEO와 지구국의 경도는 모두 같으며, 지구국의 위도는 GEO의 Elevation angle이 $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ 으로 가정한다.^[2] 지구국의 위도는 그림 2처럼 간섭 시나리오의 2차원 모델링을 통해 elevation angle θ 값을 대입하여 계산할 수 있다.

$$(R+H)^2 = \overline{AB}^2 + R^2 - 2\overline{AB}R\cos(90^\circ + \theta). \quad (2)$$

$$\overline{BD}^2 = \overline{AB}^2 + H^2 - 2\overline{AB}H\cos(90^\circ - \theta). \quad (3)$$

R은 지구 반지름 약 6,400km이며, H는 위성의 고도로, 지구국에서 LEO 위성의 거리이다. 제2 코사인 법칙을 통하여 \overline{AB} 와 \overline{BD} 를 구할 수 있으며, $\overline{OB}, \overline{OD}$ 의 길이가 같기 때문에, $\triangle OBD$ 는 이등변 삼각형이 된다. 여기서 피타고라스 정리에 의해 \overline{OC} 와 a 를 구할 수 있다.

$$\overline{OC}^2 = (R+H)^2 - (\overline{BD}/2)^2. \quad (4)$$

$$a = 2\cos^{-1}(\overline{OC}/R+H). \quad (5)$$

여기서 a 는 지구국의 위도이며, 각각의 elevation angle θ 값을 대입하면, θ 값이 작을수록 지구국은 고위도에 위치하게 된다. 그림 3은 본 연구에서 Antenna Gain을 계산하기 위한 Off-axis angle을 ECEF의 3차원 좌표를 통한 벡터화 모델을 보여준다. 지구국으로부터 GEO 위성과의 LEO 위성으로의 벡터를 통해 두 위성 사이의 각 φ 은 다음과 같다.

$$\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{\overline{EL} \cdot \overline{EG}}{|\overline{EL}||\overline{EG}|}\right). \quad (6)$$

위의 결과를 통해 시나리오의 Antenna Pattern에 φ 의 값을 넣어 Antenna Gain의 값을 구할 수 있다. 그림 4는 본 연구에서 LEO 위성의 간섭을 허용하는 범위를 결정하기 위한 지구국과 LEO의 elevation angle을 ECEF의 3차원 좌표를 통해 벡터화 모델을 보여준다. 지구 중심, 지구국, LEO 위성을 통한 θ_{11}, θ_{12} 는 다음과 같다.

$$\theta_{11} = \cos^{-1}\left(\frac{\overline{OE} \cdot \overline{OL}}{|\overline{OE}||\overline{OL}|}\right). \quad (7)$$

$$\theta_{12} = \cos^{-1}\left(\frac{\overline{LE} \cdot \overline{LO}}{|\overline{LE}||\overline{LO}|}\right). \quad (8)$$

(7), (8)을 통하여 지구국에서 바라보는 LEO 위성의 θ_i 은 다음과 같다.

$$\theta_i = 90 - \theta_{11} - \theta_{12} \quad (9)$$

위 결과를 통해 구한 θ_i 의 음수 값은 지구국의 지평선 기준 밑에 있는, 즉 간섭을 주지 않는 LEO 위성들이며, θ_i 을 통하여 간섭 위성의 Minimum elevation angle을 결정할 수 있다.

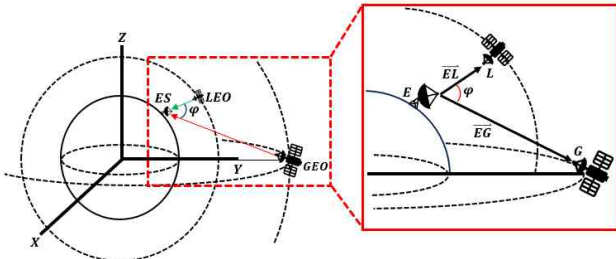


그림 3. ECEF의 3차원 모델링을 통한 LEO 위성의 Off-axis angle

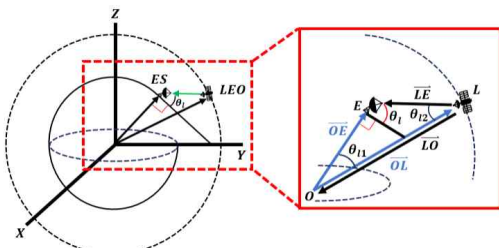


그림 4. ECEF의 3차원 모델링을 통한 LEO 위성의 Elevation angle

Parameter	Value
Satellites altitude	GEO: 36,000km LEO: 1,200km
Earth Station longitude	West 105°
Power Flux Density	Article 21-4 limits ^[1]
Earth Station Peak Gain	46 dBi
Earth Station Antenna Pattern	ITU-R S.2462-0 ^[2]

표 1. 시스템 파라미터

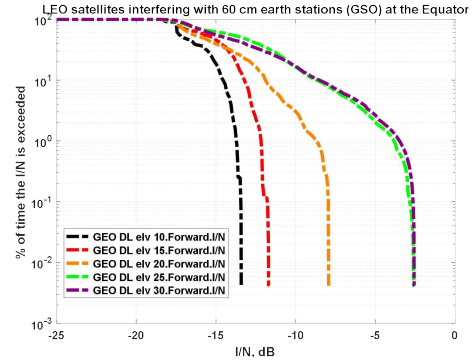


그림 5. 시뮬레이션 결과

표 1은 본 연구에서 사용된 시스템 파라미터이며, 그림 5는 elevation angle에 따라 배치한 각 지구국에서의 전체 간섭전력을 보여준다. 그래프는 INR 값과 INR 값이 초과한 시간의 비율(%)로 보여준다. 시뮬레이션 결과, 본 연구에서는 elevation angle이 높은 지구국 즉, 저위도에 위치한 지구국에서 간섭의 세기가 강한 것을 보인다.

IV. 결론

본 논문에서는 지구국과 GEO 위성과의 위성 서비스에서 발생하는 극궤도 군집위성으로부터의 간섭전력을 계산하는 과정을 수학적 모델링을 통하여 계산했다. 제안된 방법은 간섭 시나리오를 2차원 모델링을 통하여 GEO 위성의 elevation angle 5개의 지구국 배치를 공식화했으며, 지구 중심 고정 좌표계의 3차원 모델링을 통하여, LEO 위성의 Off-axis angle과 elevation angle을 계산하였다. 시뮬레이션 결과, 지구국의 위치가 저위도보다 고위도에 위치할수록 극궤도 군집위성의 동적 특성상 다수의 간섭을 받지만, 전체 INR 값의 결과는 저위도에서 더 강한 간섭을 일으키고 있음을 보였다. 해당 결과는 간섭 허용 범위에 존재하는 간섭 위성이 저위도 지구국일수록 적도 궤도에 위치한 GEO와 LEO의 Off-axis angle이 더 작아서, Receiving Antenna Gain의 값이 크기 때문임을 확인했다. 향후 연구에서는, Off-axis angle과 elevation angle의 Pattern에 따른 지구국 위치의 간섭 크기를 예측하는 알고리즘을 확장할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (21-106-A00-007, 우주계층 지능통신망 특화 연구실)

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0020536, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

참고 문헌

- [1] ITU Radio Regulations 2020;
<http://handel.itu.int/11.1002/pub/814b0c44-en>
- [2] ITU-R S.2462.0
<http://itu.int/pub/R-REP-S.2462-2019>