

저궤도-정지궤도 위성 공존 네트워크를 위한 하향링크 간섭 분석

함형빈, *류재학, 신원재

아주대학교 전자공학과, *아주대학교 AI융합네트워크학과

{andco2009, *fbwogkr98, wjshin}@ajou.ac.kr

Coexistence Downlink Interference Analysis Between LEO and GEO Systems

Hyeongbeen Ham, *Jaehak Ryu, Wonjae Shin

Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou Univ.

*Department of AI Convergence Network, Ajou Univ.

요약

저궤도 위성 통신은 글로벌 커버리지를 위한 3D 공간 네트워크 핵심 기술 중 하나로 큰 주목을 받고 있다. 저궤도 위성을 사용하려는 연구가 활발해지며 위성의 수가 증가하고 있지만, 다수의 위성을 운용하는 데 사용할 수 있는 주파수 자원은 한정적이므로 정지궤도 위성과의 주파수를 공유하며 운용되는 시나리오가 고려되고 있다. 하지만 주파수를 공유하며 운용될 때, 정지궤도 위성과의 간섭이 발생한다. 본 논문에서는 ITU-R 규제를 통해 간섭 시나리오를 분석하고, 간섭의 영향을 Carrier-to-interference-and-noise ratio (CINR) 계산을 통해 확인한다. 또한, 정지궤도 위성과의 상대적인 위치 관계를 통해 간섭을 예측할 수 있음을 검증하고 간섭예측을 활용한 저궤도 위성의 적응적 송신전력제어로 정지궤도 위성 통신에 미치는 영향을 완화할 수 있는지 검증한다. 적응적 전력제어를 적용함과 동시에, 저궤도 위성의 지속적인 연결을 고려할 때, 한 궤도 내 배치할 수 있는 저궤도 위성의 최소 개수는 17개로 확인된다.

I. 연구 배경 및 목적

기존 지상망의 좁은 커버리지를 극복하고, 6G 상용화를 위한 저궤도 위성에 대한 연구와 개발이 활발히 진행됨에 따라 저궤도 위성의 수가 급격하게 늘어나고 있다. 하지만 사용할 수 있는 주파수 자원은 한정적이기 때문에, 기존에 존재하는 다른 위성들과 주파수를 공유하며 운영된다. 특히 정지궤도 위성과의 주파수 대역(12-18 GHz)을 공유하며, 위성들이 동시에 신호를 보낼 때 간섭이 발생한다. 이러한 상황에서 ITU-R에서는 규제를 통해 정지궤도 위성을 우선적으로 고려하여 저궤도 위성의 운영관리로 상호간섭을 관리하고 있다 [1].

본 논문에서는 정지궤도 위성이 지상국과 하향링크 연결을 유지하는 상황에서 저궤도 위성의 간섭 영향을 Carrier-to-noise-and-interference ratio (CINR) 계산을 통해 분석하고, 간섭을 완화하기 위해 저궤도 위성의 적응적 송신전력제어를 시행하여 정지궤도 위성과의 지상국 사이의 하향링크 연결의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하여 본다.

II. 정지궤도의 하향링크에서 저궤도 위성에 의한 간섭 분석

그림 1과 같이 저궤도 위성은 하나의 궤도에 동간격으로 배치되며, 정지궤도 위성 안테나와 지상국의 안테나는 서로를 지향하고 있다. 각 위성들은 Ku-Band 주파수 대역을 공유하여 하나의 지상국에 하향링크 전송을 한다. 저궤도 위성의 위치에 따라 간섭 신호의 세기가 달라진다. 이러한 간섭의 영향은 식 (1)의 CINR 계산을 통해 확인할 수 있다.

$$CINR_{dB} = EIRP_{tx} + G_{rx} - 10\log_{10}(I + k_B T B_w) - LOSS_{rx} - LOSS_p, \quad (1)$$

$EIRP_{tx}$ 는 위성 송신 안테나의 전력과 등방성 안테나에 대한 절대 이득을 곱한 실효 등방성 전력, G_{rx} 는 지상국 수신 안테나의 안테나 이득, I 는 저궤도 위성의 간섭 신호 전력, k_B 는 볼츠만 상수, T 는 잡음온도, B_w 는 위성 송신기의 주파수대역, $LOSS_{rx}$ 는 수신기의 총 전력손실, $LOSS_p$ 는 자유경로 손실을 나타낸다. CINR 임계치는 정지궤도 위성과의 지상국 사이의 하향링크 연결의 성능을 보장할 수 있는 15.69 dB로 정하였다 [2].

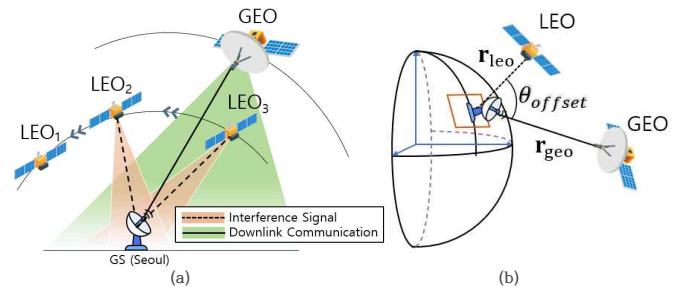


그림 1. (a) 저궤도 위성과의 정지궤도 위성이 공존하는 시나리오 예시 (b) 오프셋 각도의 정의

간섭신호의 세기는 정지궤도 위성과의 상대적인 위치에 따라 결정되므로, 오프셋 각도(Offset angle)를 사용하여 간섭을 예측하였다. 오프셋 각도는 그림 1과 같이 정지궤도 위성과의 지상국과 저궤도 위성 사이의 각도이며, 식 (2)을 활용하여 각 위성의 위치벡터로부터 계산된다 [3].

$$\theta_{offset} = \arccos\left(\frac{\mathbf{r}_{leo} \cdot \mathbf{r}_{geo}}{|\mathbf{r}_{leo}| |\mathbf{r}_{geo}|}\right), \quad (2)$$

\mathbf{r}_{leo} 는 저궤도 위성의 위치벡터, \mathbf{r}_{geo} 는 정지궤도의 위치벡터를 나타내며, 각 위치벡터는 지면 좌표계를 활용하여 지상국과 위성 사이의 상대적인 위치를 나타낸다.

III. 저궤도-정지궤도 공존 시나리오 기반 간섭 분석 시뮬레이션

시뮬레이션은 MATLAB Satellite Communications Toolbox를 사용한다. 그림 2와 같이 실제 ONEWEB-0240 위성의 Two-Line Element set (TLE) 파일을 이용하여 저궤도 위성을 한 궤도 내에 동간격으로 36개, 정지궤도 위성은 무궁화 6호 TLE 파일을 사용하여 배치한다. 지상국과 저궤도 위성의 하향링크 연결은 Minimum elevation angle을 25° 로 지정하였다 [4]. 이 외의 시뮬레이션에 사용한 파라미터들은 표 1과 같다. 궤도 위성으로부터 받는 간섭신호의 영향을 확인하기 위하여 저궤도 위성이 연속적으로 연결되는 3시간 동안의 간섭 영향을 분석하였다.

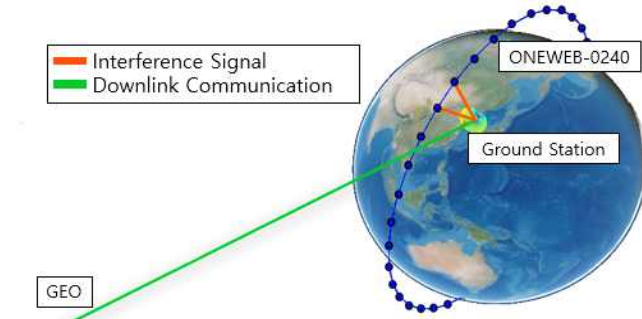


그림 2. 저궤도-정지궤도 위성 공존 시나리오를 적용한 시뮬레이션

그림 3. (a)는 오프셋 각도에 따른 CINR 값 변화를 나타낸 것이다. 36개의 저궤도 위성들 중, 간섭이 가장 많이 일어나는 위성 4개에 의한 CINR 값을 확인하였다. 그래프 상에서 오프셋 각도마다 두 개의 CINR 값을 갖는 것은 정지궤도 위성과 지상국의 하향링크 연결에 가까워지다가 멀어졌음을 의미한다. 각 위성은 오프셋 각도가 감소함에 따라 간섭의 영향이 증가한다. 그러므로 CINR 임계치 이하로 떨어지는 오프셋 각도를 확인하고, 이 특정 오프셋 각도 이내에 존재하는 저궤도 위성의 송신전력을 제어하여 간섭을 완화할 수 있다.

그림 3. (b)를 통해 동일한 오프셋 각도에서 고도가 높아짐에 따라 CINR 값에 적은 영향을 끼친다는 것을 확인하였다. 이는 고도가 높아짐에 따라 경로 손실에 의한 간섭 신호의 세기가 감소하기 때문이다.

그림 4. (a)는 저궤도 위성의 전력제어를 시행하기 전, 정지궤도 위성과 지상국 사이의 하향링크 성능을 나타낸 그래프이다. 그림 4.(b)에서는 CINR 임계치에 미달하는, 오프셋 각도 7.26° 이내의 저궤도 위성들에 대해 적응적 전력제어를 적용하였다. 그래프와 결과와 같이, 저궤도 위성의 전력제어를 통해 효과적으로 정지궤도 위성과 지상국 사이의 하향링크 연결을 보장해 줄 수 있었다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

	Parameters	Value
LEO Satellite	Carrier frequency	12.575 GHz
	Bandwidth	250 MHz
	Transmitter antenna type	Gaussian
	EIRP	34.6 dBW
GEO Satellite	Carrier frequency	12.5 GHz
	Bandwidth	500 MHz
	Transmitter antenna type	Gaussian
	EIRP	62 dBW
Ground Station	Latitude	37.511°
	Longitude	126.988°
	Receiver antenna type	Parabolic

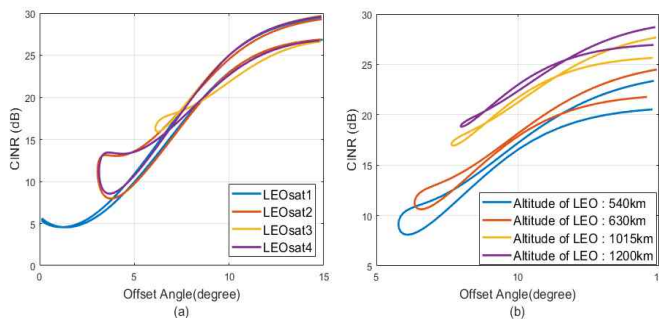


그림 3. (a) 오프셋 각도에 따른 CINR 변화 (b) 각 고도별 오프셋 각도에 따른 CINR 변화

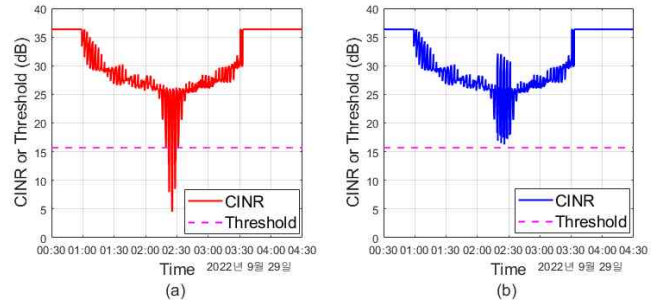


그림 4. (a) 기존의 CINR 변화 추이 (b) 적응적 전력제어 기반 간섭완화 적용시 CINR 변화 추이

저궤도 위성의 적응적 송신전력제어를 진행하는 동시에, 저궤도 위성과 지상국 사이의 연결을 보장하기 위해, 전력이 꺼진 위성과 같은 궤도 내에 인접한 저궤도 위성과 지상국 사이의 연결을 유지하도록 하여 한 궤도 내에 최소 17개의 저궤도 위성을 배치할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 저궤도 위성과 정지궤도 위성이 동시에 운용되어 하나의 지상국에 연결된 상황에서 발생하는 간섭을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 간섭의 영향은 오프셋 각도와 CINR 계산을 통해 분석하였으며, 저궤도 위성의 고도에 따른 간섭 세기의 변화도 확인하였다. 오프셋 각도로 간섭의 영향을 예측할 수 있음을 확인하였으며, 이러한 간섭예측을 활용하여 저궤도 위성의 적응적 송신전력 제어를 통해 간섭이 완화된 것을 확인하였다. ONEWEB-0240의 궤도에 위성이 36개가 존재한다는 것은 시뮬레이션을 통해 얻은 위성의 개수 17개인 상황보다 저궤도 위성의 성능도 보장하여 배치하였다는 것으로 생각된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 기초연구사업(No.2022R1A2C4002065)과 정보통신기획평가원(No.2022-0-00704) 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] ITU Radio Regulations 2020; <http://handle.itu.int/11.1002/pub/814b0c44-en>
- [2] H. Wang *et al.*, "Coexistence Downlink Interference Analysis Between LEO System and GEO System in Ka Band," in *Proc. 2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, pp. 465-469
- [3] T. Celcer *et al.*, "Virtual multiple input multiple output in multiple high-altitude platform constellations," in *IET communications*, vol. 3, no. 11, 2009, pp. 1704-1715
- [4] N. Pachler *et al.*, "An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband," *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pp. 1-7