

지상 사용자의 신호 대 간섭비에 기반한 저궤도위성 궤도 간 최적의 변위 차

박재영, 최완

서울대학교 전기정보공학부, 뉴미디어통신공동연구소

pjy362@snu.ac.kr, wanchoi@snu.ac.kr

Optimal Displacement of Low-Orbit Satellites
Based on SIR of Ground User

Jae Young Park, Wan Choi

Institute of New Media Communications and Department of Electrical and Computer Engineering,
Seoul National University

요약

본 논문은 저궤도위성을 활용하는 Non-Terrestrial Network(NTN)에서 다수의 궤도를 활용할 때, 고려할 수 있는 저궤도위성 배치 방식을 제안하고자 한다. 지상 사용자 관점에서 통신 링크 형성이 가능한 상공에 다수의 위성이 존재하는 경우, 해당 링크 간에 간섭이 발생하게 된다. 다른 위성을 통해 들어오는 간섭에 따른 지상 사용자의 통신 링크 성능을 과악하여, 지속해서 안정적인 통신 링크를 확보할 수 있는 최적의 궤도 간 변위 차를 제시한다.

I. 서론

최근 들어 5G 통신의 상용화가 이루어지고, 6G 핵심기술에 대한 논의들이 진행되면서 핵심 연구 분야 중 하나의 키워드로 Non-Terrestrial Network(NTN)가 주목받고 있다. 특히, NTN을 구성하는 하나의 요소인 위성을 활용하여 넓은 통신 범위를 확보하려는 연구들이 현재 활발하게 진행 중이다. 기존의 정지궤도위성(GEO)의 경우, 높은 궤도로 인한 긴 통신 지연시간으로 인해 5G 통신의 요구사항을 충족시키지 못하는 데 반해, 저궤도위성(LEO) 시스템은 상대적으로 짧은 지연시간을 지원할 수 있어 저지연 초공간 통신의 기반이 되는 통합 네트워크로 활용 가치가 높다.

본 논문에서는 지상에 있는 사용자에게 최적의 위성통신 서비스를 지원하기 위한 저궤도위성 배치 방식을 제안하고자 한다. 지금까지 다수의 궤도를 배치하는 방식에 관해서는 다양한 연구들이 진행되고 있지만, 궤도 간 간섭의 영향을 배제하고 진행하는 경우가 많다. [1, 2] 또한, 궤도 간의 변위 차에 관한 연구는 현재까지 많이 진행되어 있지 않다. 본 논문에서는 다수의 궤도에 저궤도위성을 배치하는 환경에서 발생하는 간섭의 영향을 분석하여 지상의 사용자가 받을 수 있는 통신 서비스의 품질을 극대화하기 위한 최적의 궤도 간의 변위 차를 찾는다. 또한, 모의실험을 바탕으로 저궤도위성의 궤도 간 위상차에 따른 지상 사용자가 받을 수 있는 서비스 품질의 양상을 확인한다.

II. 본론

가. 시스템 모델

본 논문에서는 다수의 극궤도(polar-orbit constellation)에 저궤도위성을 배치할 때, 지상의 사용자의 신호 대 간섭비(signal-to-interference ratio; SIR)를 분석하고자 한다. 먼저, 모든 위성은 같은 상공(R_h)의 높이에 해당하는 N 개의 궤도 위에 위치함을 가정하고, 안정적인 통신망 확보를 위해 각 궤도는 균등한 간격($2\pi/N$)으로 배치된 환경을 고려한다.

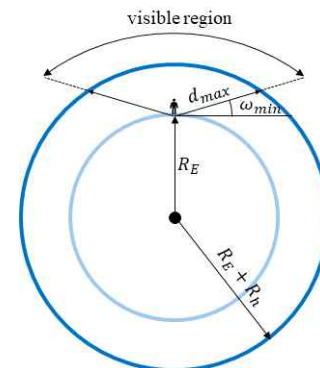


그림 1 LEO 시스템 모델

또한, 지구는 반지름 R_E 의 균일한 구라고 가정하고, 같은 궤도 내 존재하는 M 개의 위성은 균등한 간격($2\pi(R_E + R_h)/M$)으로 배치된 환경을 고려한다. 그림 1과 같이 지상의 사용자를 기준으로 최소 w_{\min} 이상의 시야 영역을 통신 가능 영역으로 정의하여, 지상의 사용자는 해당 영역에 존재하는 위성들과만 통신 링크 연결이 가능하다. 이때, 지상의 사용자는 가장 가까운 거리에 위치하는 위성을 통해 통신 서비스를 지원받는다. 이때, 서비스를 제공하는 위성을 제외한 다른 위성이 지상 사용자의 시야 영역 내에 존재하는 경우, 해당 위성은 간섭을 발생시키는 위성으로 간주한다.

그림 1과 같은 사용자 기준 모델을 바탕으로 위성은 아래의 그림 2 [3]와 같이 궤도 간의 균등한 간격 $\Delta\Omega$ 의 차이를 두는 극궤도를 바탕으로 배치된다. 인접한 궤도는 변위 차 $\Delta\omega$ 를 가진다. 인접한 궤도 간의 변위 차에 따라 달라지는 위성의 배치는 지상의 사용자에게 서비스를 제공하는 위성의 분포에 영향을 주는 동시에, 시야 내에 존재하면서 간섭의 영향을 주는 위성의 배치에 영향을 준다. 특히 간섭의 영향은 지상에 존재하는 사용자의 통신성능을 결정하는 신호 대 간섭비에 직접적인 영향을 주기 때문에, 최적의 변위 차를 갖도록 하는 위성 배치는 중요한 요소 중 하나이다.

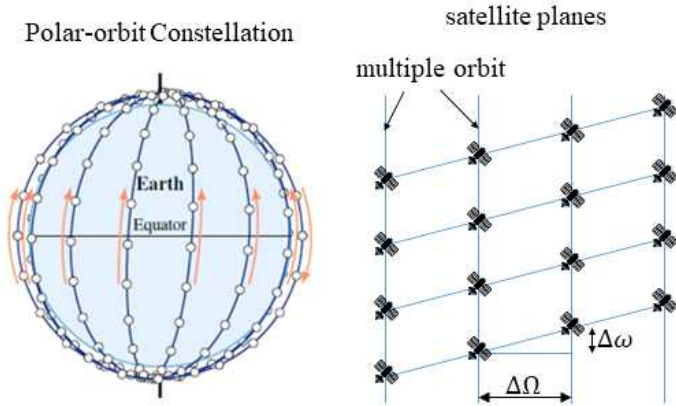


그림 2 다수의 극궤도 배치 모델

나. 시뮬레이션 세팅

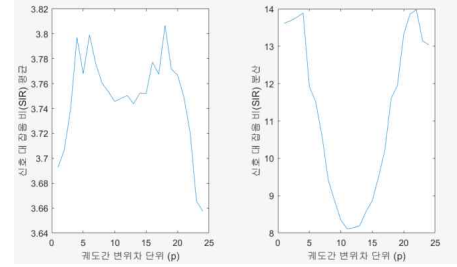
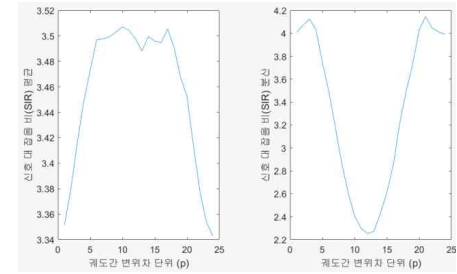
본 시뮬레이션에서는 지구의 반지름은 6,400km, 위성의 고도는 500km로 설정하였고, 24개의 궤도를 균일한 간격으로 배치하였다. 궤도별로 위성을 24개씩 배치하여 총 576개의 위성이 지상의 사용자에게 통신 서비스를 지원하는 환경을 고려하였다. 사용자 기준으로 서비스를 지원하는 최소 시야 각도 w_{\min} 는 10° 로 설정하고, 모든 위성은 동일한 전력 P 를 활용하여 통신 서비스를 지원한다. 이때, 본 논문에서는 지상 사용자에게 통신 서비스를 지원하는 위성의 경우, main beam을 통해 서비스를 직접 지원하고, 시야 영역 내에 존재하면서 간섭을 야기하는 다른 위성은 side beam을 통해 지상의 사용자에게 간섭의 영향을 주는 상황을 고려하였다. main beam과 side beam 사이의 전력이득은 $20\log_{10}(G_r^{MB}/G_r^{SB}) = 13\text{dB}$ 가 되는 것을 가정하였다. [2] 신호 대 간섭비는 다음과 같은 식을 통해 계산할 수 있다.

$$SIR = \frac{H_1 \times \|x_1 - u\|_2^{-\alpha} G_r^{MB} \times P}{\sum_{n=2}^M H_n \times \|x_n - u\|_2^{-\alpha} G_r^{SB} \times P}$$

위 식에서 M 은 시야 내에 존재하는 위성의 수를 나타내며, u 는 지상 사용자의 위치를, x_i 는 i 번째로 가까운 위성의 위치를, H_i 는 i 번째로 가까운 위성과 지상의 사용자 사이의 채널을 나타내며, 본 논문에서는 저궤도 위성의 지리적 특성을 고려하여 $\alpha = 2$ 이고, $m = 1, 10$ 인 나카가미 페이딩 채널 환경을 고려하였다.

다. 시뮬레이션 결과

본 시뮬레이션에서는 궤도 내 위성 간의 간격을 고려하여 균일한 간격을 유지할 수 있도록 총 24개 ($p * 2\pi / (24 * 24), p = 1, 2, \dots, 24$)로 궤도를 고려하였다. 총 100,000개의 궤도를 연속균등분포로 생성하여 시뮬레이션에 활용하였다. 궤도 간 변위 차에 따른 신호 대 간섭비의 평균값은 최대 5% 이하의 차이를 보여, 궤도 간 변위 차는 평균 성능에 영향이 크지 않은 것을 확인하였다. 하지만 궤도 간의 변위 차 p 가 12에 가까워 나타날수록, 즉 궤도 간의 변위 차가 클수록 신호 대 간섭비의 분산 값이 작게 나타났다. 이는 궤도 간의 변위 차가 클수록, 통신 링크의 성능에 변화량이 적은 것을 의미한다. 따라서 궤도간의 변위 차를 크게 나타내도록 배치하는 것이 상대적으로 신호 대 간섭비의 변화가 적어 안정적인 통신 링크를 지속해서 확보하는 데 도움이 될 수 있음을 의미한다.

그림 3 나카가미 $m = 1$ 페이딩 채널에서의 결과그림 4 나카가미 $m = 10$ 페이딩 채널에서의 결과

III. 결론

기존 저궤도 위성 기반 NTN 연구에서는 지상 사용자에서 서로 다른 위성 신호에 의한 간섭이 잘 고려되지 않았던 반면, 위성의 수가 증가하면서 지상의 사용자는 다른 위성으로부터 받는 간섭의 영향을 무시할 수 없다. 본 논문에서는 다수의 궤도에 저궤도 위성을 배치하는 환경에서 간섭의 영향을 고려하여 지상의 사용자가 활용하는 통신 서비스의 품질을 극대화하기 위한 최적의 궤도 간 변위 차를 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 향후 간섭을 고려하는 수학적 모델링 분석을 바탕으로 더욱 정교한 저궤도 위성 배치 기법을 개발하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (IITP-2021-0-02048)

참 고 문 헌

- [1] R. Deng, B. Di, H. Zhang, L. Kuang, L. Song, "Ultra-dense LEO satellite constellations: How many LEO satellites do we need?," *IEEE Transactions on Wireless Communications* 20.8 (2021): 4843-4857.
- [2] J. Lee, S. Noh, S. Jeong, N. Lee, "Convergence Analysis of LEO Satellite Downlink Networks: Orbit Geometry Dependent Approach", arXiv preprint arXiv:2206.09382, 2022.
- [3] I. Leyva-Mayorga, B. Soret, B. Matthiesen, M. Röper, D. Wübben, A. Dekorsy, P. Popovski, "NGSO Constellation Design for Global Connectivity". arXiv preprint arXiv:2203.16597, 2022.