지상 장애물 존재 확률을 고려한 저궤도 위성 네트워크에서의 커버리지 분석

박준영, 고영채
고려대학교

{megaduke7, koyc}@korea.ac.kr

Coverage Analysis of LEO Satellite Network Considering Terrestrial Blockages

Joon-Young Park, Young-Chai Ko
Korea Univ.

요 약

차세대 이동통신(5G)의 핵심 목표 중 하나는 지형적 제약을 뛰어넘는 원활한 통시 네트워크를 구축하는 것이다. 이는 위성을 통신 수단으로 활용한 저궤도 위성 네트워크를 통해 현실화될 수 있는데, 해당 모델에서는 지상 장애물을 고려한 직진파/비직진파 (LoS/NLoS) 확률 또한 염두하여 최적의 커버리지를 확보해야 한다. 본 논문에서는 이러한 최적 커버리지를 유도할 수 있는 환경에 대한 분석 및 시스템 구축의 통찰력을 제공한다.

Ⅰ. 서 론

6 세대 이동통신 (6G)의 진입을 목표로 하고 있는 현재, 이전 세대 대비 향상된 성능의 통신 네트워크에 대한 수요가 증가하고 있다. 6G 통신망이 성공적으로 구축될 시, 가장 큰 기대 효과 중 하나는 통신 기반 시설을 설치하기 어려워 고품질의 통신 서비스 제공이 어려웠던 산악 및 해양 지형 등에서, 더 이상 지형적 제약에 구애받지 않고 원활한 통신망을 제공할 수 있다는 것이다 [1]. 이를 가능하게 하는 통신 수단으로 위성이 사용될 수 있으며, 특히 지상 300-2000km 에서 운용되고 있는 저궤도 위성(LEO) 네트워크가 차세대 통신망으로서 주목받고 있다. 이러한 저궤도 위성 네트워크는 네트워크의 고도, 위성의 밀도, 기준 신호 대비 간섭비(SIR) 등 다양한 변수에 의해 그 커버리지 성능이 크게 달라질 수 있으므로, 해당 조건들을 망라하여 최적 커버리지를 확보할 수 있는 분석이 반드시 필요하다. 이 때, 지상에 있는 건물, 농경지, 과수원 등 다수의 지상 장애물들은 지상 사용자와 위성 간 신호에 대한 방해 요소로 작용해 비직진파 (NLoS) 신호가 전송되며, 방해받지 않는 경우 직진파 (LoS) 신호가 전송된다. 이러한 비직진파 신호 전송 확률은 사용자로부터 위성까지의 각도에 따라 달라질 수 있다. 본 논문에서는 확률적 직진파/비직진파 모델에 기반해 저궤도 위성 네트워크를 구축하고, 해당 네트워크가 제공하는 커버리지 성능을 분석한다. 해당 논문이 제공하는 주요 분석으로는 고밀도 위성 네트워크에서 비직진파 신호 활용이 유리하다는 것, 비직진파 신호는 간섭 위성으로부터의 간섭 신호 강도를 줄여 커버리지 성능 향상에 기여할 수 있다는 것 등이 있다.

Ⅱ. 본론

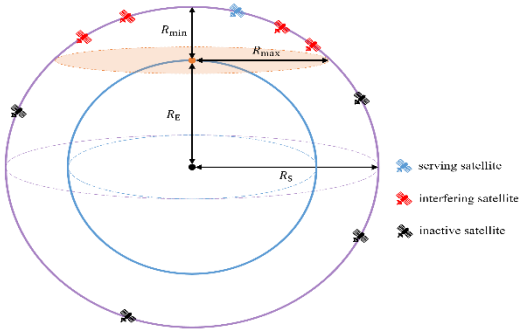

그림 1. 저궤도 위성 네트워크 모델

본 논문에서는 위성으로부터 지상 사용자에게 통신을 제공하는 다운링크 환경을 가정한다. 그림 1 과 같이, 중심이 $(0,0,0)$이고 반지름이 R_{S}인 구 표면 $\mathbb{S}^2_{R_{\mathrm{S}}}$ 위에 동차 구형 푸아송 포인트 프로세스 (HPPP)를 따르는 위성 집합 $\mathbf{\Phi}_{\mathrm{S}} = \{\mathbf{x}_1, \cdots, \mathbf{x}_K\}$이 존재한다고 가정한다. 이 때, 위성의 수 K는 푸아송 분포를 따르며, 각 위성은 동일한 송신 전력 P_t를 가진다. 지상의 사용자들의 경우, 반지름이 R_{E}인 구 표면 $\mathbb{S}^2_{R_{\mathrm{E}}}$ 위에 동일한 원리로 분포하며, $\mathbf{\Phi}_{\mathrm{U}} = \{\mathbf{u}_1, \cdots, \mathbf{u}_L\}$로 표현한다. 총 사용자의 수 L 또한 푸아송 분포를 따른다고 가정한다. 슬리브니악의 정리에 따라, 지상 사용자들의 집합 $\mathbf{\Phi}_{\mathrm{U}}$에 속하는 어떠한 사용자들을 택하더라도, $\mathbf{\Phi}_{\mathrm{S}}$에 대한 통계적 특성은 변하지 않는다 [2]. 따라서, 분석 모델 설계에서의 용이성을 위해 한 특정 사용자 $\mathbf{u}_1$을 $\mathbb{S}^2_{R_{\mathrm{E}}}$의 정점 $(0,0,R_{\mathrm{E}})$에 위치시킨다. 해당 위치를 중심으로 전개한 평면을 $\mathbb{S}^2_{R_{\mathrm{S}}}$로 확장시키면 $\mathbb{S}^2_{R_{\mathrm{S}}}$의 일부가 구형 캡 $\mathcal{A}$로 분할되는데, 사용자의 시야에서는 해당 캡에 존재하는 위성들만 볼 수 있으므로 이 위성들이 잠재적 통신

위성이 되며, 본 모델의 네트워크 환경의 핵심 요소로 작용한다.

다음으로, 직진파 공 (LoS-Ball) 모델을 활용하여, 위성으로부터 사용자에게 전달되는 신호의 직진파 확률을 단순화할 수 있다. 통신 위성이 사용자가 위치한 지평면에 내린 고도각을 θ라고 할 때, 고도각이 $[0^{\circ}, \theta]$인 경우 지상 장애물에 방해받을 확률이 $[\theta, 90^{\circ}]$보다 매우 높으므로, 전자를 비직진파 영역, 후자를 직진파 영역으로 정의한다. 분석의 용이성을 위해 이를 단순화할 수 있다.

$$p_{\mathrm{LoS}}(r) = \begin{cases} 1, & [0^{\circ}, \theta] \\ 0, & [\theta, 90^{\circ}] \end{cases}$$

이 때, 위성과 사용자 간 거리 r 은 다음 식을 따른다.

$$r = -R_{\mathrm{E}} \sin\theta + \sqrt{R_{\mathrm{S}}^2 - (R_{\mathrm{E}} \cos\theta)^2}$$

직진파 영역의 경우 나카가미-m 페이딩을, 비직진파 영역의 경우 레일레이 페이딩을 따르도록 설정한다. 이를 바탕으로, 고도각이 θ에 해당할 때의 위성과 사용 간 거리를 h로 설정해, 라플라스 변환을 이용한 총 간섭의 크기 및 커버리지 확률을 다음과 같이 표현된다. 해당 식들을 전개하는 과정에서, 위성과 사용자 간 연결 우선순위는 사용자에게 가장 강한 신호를 전송하는 위성을 통신 위성으로 설정하는 것을 원칙으로 한다.

$$\mathcal{L}_{I_r}(s) = \exp\left(-2\pi\lambda \frac{R_{\mathrm{S}}}{R_{\mathrm{E}}} \left(\int_{R_{\min}}^{h} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{sv^{-\alpha_{\mathrm{LoS}}}}{m}\right)^m} \right) r\, dr \right) + \left(\int_{h}^{R_{\max}} \left(1 - \frac{1}{1 + sv^{-\alpha_{\mathrm{NLoS}}}} \right) r\, dr \right) \right)$$

$$P_{\mathrm{cov}}(\gamma; \alpha, \lambda, R_{\mathrm{S}}, m) = 2\pi\lambda \frac{R_{\mathrm{S}}}{R_{\mathrm{E}}} \left(\left(\int_{R_{\min}}^{h} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(-m)^k \gamma^k r^{k\alpha_{\mathrm{LoS}}}}{k!} \frac{d^k \mathcal{L}_{I_r}(s)}{ds^k}\Big|_{s=m\gamma r^{\alpha_{\mathrm{LoS}}}} r\, dr \right) + \left(\int_{h}^{R_{\max}} \mathcal{L}_{I_r}(s)|_{s=\gamma r^{\alpha_{\mathrm{NLoS}}}} r\, dr \right) \right)$$

시뮬레이션에서는 $\alpha_{\mathrm{LoS}} = 3$, $\alpha_{\mathrm{NLoS}} = 4$, $m = 2$를 가정했다. 그림 2 에서는 고도가 500km 로 설정된 위성 네트워크에서, 구형 캡 내 평균 위성 수 $\lambda|\mathcal{A}|$를 5,23 10 20, 50 으로 점차 증가하는 경우에 대해 고도각의 변화에 따른 커버리지 확률을 제시한다. 사용 가능한 위성 수가 증가할수록 최적 커버리지를 제공할 수 있는 비직진파 영역이 커지는데, 이는 통신 위성을 제외한 나머지 위성들이 모두 간섭으로 작용하므로, 간섭 위성들을 비직진파 영역에 속할 확률을 높여 경로 감수 지수를 증가시키면 그 신호 세기가 줄어들어 총 간섭 세기 또한 감소하기 때문이다. 또한, 최적 커버리지는 위성 밀도가 증가할수록 더 감소하는데, 이는 SIR 이 0dB 보다 클 경우 최소 요구 SIR 에 부합하는 위성이 1 개로 제한되어 정확한 커버리지 확률을 제안할 수 있고 [3], 이 경우 통신 위성이 비직진파 영역에 포함될 확률이 증가하여 직진파 영역에 포함되었을 경우에 비해 신호 세기가 감소하기 때문이다. 그림 3 에서는 최소 요구 SIR 이 0, 3, 5dB 로 설정되었을 때, 위성 네트워크의 고도에 따른 커버리지 확률의 변화를 제시한다. 500km 에서 1000km 까지의 범위 내에서, 고도가 높아질수록 커버리지 확률이 감소함이 확인되었는데, 이는 저궤도 위성 네트워크를 구축할 때 고도와 밀도 및 직진파 확률 등을 고려하여, 최적 커버리지 확보에 대한 통찰력을 제공한다.

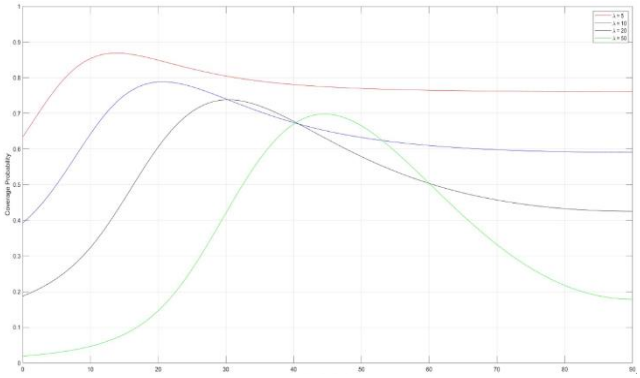

그림 2. 고도각에 따른 최적 커버리지 분석

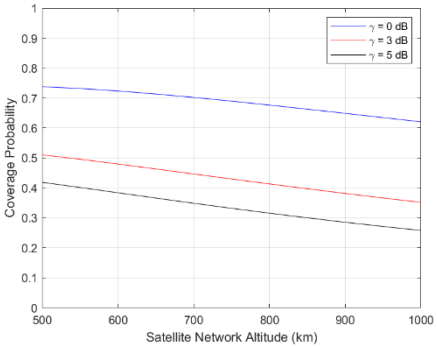

그림 3. 위성 네트워크 고도에 따른 커버리지 분석

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 확률 기하 이론을 기반으로, 저궤도 위성 네트워크를 구축할 때 지상 장애물 모델링을 고려해 직진파/비직진파 확률을 포함한 최적 커버리지를 확보하기 위한 분석을 제시했다. 6 세대 이동통신의 상용화를 목표로 하는 현재, 잠재적인 위성 네트워크에 대한 분석 및 성능 최적화는 위성 활용에 있어 필수적인 부분이므로, 해당 논문에서는 그 방안 및 시뮬레이션을 통한 결과를 제시했다. 추가적으로, 다양한 위성-사용자 간 연결 방식, 기타 직진파 확률 모델링 활용 등을 통해 더욱 향상된 커버리지 성능을 확보할 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021-0-00260,저궤도 군집 소형 위성 간 통신 기술 개발).

참 고 문 헌

[1] X. Zhu and C. Jiang, "Integrated Satellite-Terrestrial Networks Toward 6G: Architectures, Applications, and Challenges," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 1, pp. 437-461, 1 Jan.1, 2022.

[2] F. Baccelli and B. Błaszczyszyn, “Stochastic geometry and wireless networks: Volume I theory,” Found. Trends Netw., vol. 3, nos. 3-4, pp. 249-449, 2009.

[3] H. S. Dhillon, R. K. Ganti, F. Baccelli, and J. G. Andrews, “Modeling and analysis of K-tier downlink heterogeneous cellular networks,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 30, no. 3, pp. 550-560, Apr. 2012.