

지상 장애물을 고려한 위성-지상 통합 네트워크의 성능 분석

박준영, 고영채
고려대학교

{megaduke7, koyc}@korea.ac.kr

Performance analysis of satellite-terrestrial integrated networks under terrestrial blockages

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

요약

차세대 이동통신(6G)의 핵심은 지형, 환경 제약을 넘어 끊김 없는 연결을 제공하는 것이며, 이를 위해 비지상 네트워크, 특히 저궤도 위성 기반 통신이 주목받고 있다. 본 논문은 지상 건물 등 장애물로 인한 가시선 차단을 확률적으로 고려하고, 위성-지상 링크를 통합 운용하는 위성-지상 통합 네트워크의 원리를 제시한다. 확률 기반 모델로 가시선/비가시선 발생과 후보 위성의 가시성, 그리고 계층 내부 간섭을 체계적으로 반영하여 커버리지 확률을 평가한다. 분석 결과, 임계 성능 구간에서 통합 네트워크는 단일 위성망 또는 단일 지상망 대비 더 높은 커버리지를 가지며, 이는 한 계층이 불리할 때 다른 계층으로 즉시 우회할 수 있는 구조적 이득에 기인한다. 본 연구는 장애물 인지형 설계, 링크 선택 정책, 주파수 분리 전략의 결합이 현실 환경에서 커버리지 향상을 확인함을 보이고, 향후 부하 균형식 제시 및 오프로딩을 포함한 통신 시스템 최적화로의 확장 가능성을 제안한다.

I. 서 론

6 세대 이동통신의 핵심으로서 비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN)가 주목받고 있으며, 가장 큰 관심을 받는 플랫폼은 위성 기반 통신 네트워크이다 [1]. 특히, 지상망을 보완하여 전 지구적인 통신망을 생성하는 목적으로 맞춰, 저궤도 (Low Earth Orbit, LEO) 위성이 주목받고 있다. LEO 위성 통신은 적은 전력 소모와 비교적 짧은 지연율 등을 자랑하나, 장애물로 인해 가시선(Line-of-Sight, LOS)이 방해받을 경우 효율성이 크게 감소할 수 있다 [2]. 실제로, 지상에서는 각종 건물, 농지 등 다양한 장애물들이 존재하므로 이로 인한 위성 신호의 감쇠는 통신망 성능을 분석할 때 필수 고려 대상이다. 이에 더해, 6 세대 이동통신은 단순 비지상망에 의존하는 것이 아닌, 지상 통신망을 동시에 사용하며, 이를 위성-지상 통합 네트워크 (Satellite-Terrestrial Integrated Network, STIN)으로 정의한다. STIN은 현재 차세대 통신 네트워크의 표준으로 간주되고 있을 만큼 유의미한 분석 대상이므로, 본 논문에서는 지상 장애물이 존재하는 환경에서, STIN의 커버리지 성능을 분석한다.

II. 본론

본 논문에서는 저궤도 위성망과 지상 기지국(BS, Base Station)으로 구성된 지상망을 모두 통신망으로서 활용하는 다운링크 환경을 가정한다. 그림 1과 같이, 3 차원 공간 \mathbb{R}^3 에 중심이 $(0, 0, 0)$ 이고 반지름이 R_E 인 구표면 $\mathbb{S}_{R_E}^2$ 위에 동차 구형 푸아송 포인트 프로세스 (Homogeneous Poisson point process, HPPP)를 따르는 위성 집합 $\Phi_S = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_K\}$ 이 존재한다고 가정한다. 이 때, 위성의 수 K 는 푸아송 분포를 따른다. 마찬가지로,

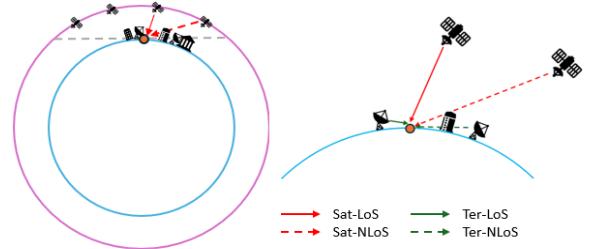


그림 1. 위성-지상 통합 네트워크 모델

지상 사용자와 지상 기지국의 경우, 반지름이 R_E 인 구표면 $\mathbb{S}_{R_E}^2$ 위에 분포하며, 각각 $\Phi_U = \{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_L\}$ 과 $\Phi_B = \{\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_L\}$ 로 표현한다. 총 사용자의 수 L 또한 푸아송 분포를 따른다고 가정한다. 확률적 기하학을 기반으로, 지상 사용자들의 집합 Φ_U 에 속하는 어떠한 사용자를 택하더라도 Φ_S 에 대한 통계적 특성은 변하지 않는다 [3]. 따라서, 분석의 용이성을 위해 본 논문에서는 지상 사용자 \mathbf{u}_1 을 $\mathbb{S}_{R_E}^2$ 의 정점 $(0, 0, R_E)$ 에 위치시킨다. 이 때, R_S 는 위성들이 특정 고도 h 위에 존재한다고 가정하므로 $R_S = R_E + h$ 로 정의한다. 사용자 \mathbf{u}_1 의 위치에서, $\mathbb{S}_{R_S}^2$ 에 접평면을 구축하면, 해당 접평면 위에 구형 캡(spherical cap)이 형성되며, 이 캡에 위치하는 위성들만이 가시성을 가져 후보 통신 위성이 된다. 지상 장애물의 경우, [4]의 모델을 따라, 불리안(Boolean) 모델링에 기반해 가로 L , 세로 W 의 직사각형 밀면을 가진다고 가정하며, 이 역시 HPPP를 따라 $\Phi_A = \{\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_M\}$ 으로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 연구의 단순화를 위해, 건물들의 높이를 모두 G 로 가정하나, 추후에는 특정 확률 밀도 함수를 따른다고 가정할 수 있다. 해당 모델에서, 지상 기지국은 Sub-6GHz의 FR1 주파수 대역을, 저궤도 위성망은 Ku 대역의 FR2 주파수 대역을 사용한다고 가정, 위성망과

지상망의 주파수 대역을 분리시킨다. 각 통신망의 경우, 사용자 \mathbf{u}_1 은 자신에게 가장 강한 수신 전력을 제공하는 통신 수단을 선택하며, 이 때 간섭은 선택된 수단과 동일한 수단으로부터 주어진다고 가정한다. 해당 모델의 성능 분석으로는 커버리지 확률(coverage probability)을 사용하며, 이는 통신이 가능하다고 간주되는 임계 SINR(Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio) 이상을 확보할 확률을 나타내며, $P_{\text{cov}} = \mathbb{P}[\text{SINR}_{\mathbf{u}_1} > \tau]$ 로 정의한다. 현재 연구 모델에서는 지상망, 위성망을 각각 T -tier, S -tier로 가정할 수 있으므로, 두 망을 사용할 확률에 따라 최종 커버리지 확률이 도출된다. 이는 곧,

$$P_{\text{cov}} = P_T * \mathbb{P}[\text{SINR}_{\mathbf{u}_1} > \tau | T] + P_S * \mathbb{P}[\text{SINR}_{\mathbf{u}_1} > \tau | S]$$

로 표현될 수 있다. 여기서, P_T, P_S 는 수신 전력에 따라 사용자 \mathbf{u}_1 이 각각 지상 기지국 또는 위성을 선택하여 접속할 확률을 나타낸다. 본 연구에서는, 지상 기지국만을 사용할 때의 커버리지 확률과, 위성만을 사용할 때의 커버리지 확률 및 STIN에서의 커버리지 확률을 비교하여, 성능의 차이를 분석한다.

시뮬레이션에서는 위성 고도 h 를 500km로, $E[L]$, $E[W]$ 를 각각 15m와 20m로, 건물 높이 G 를 35m로 설정한다. 경로 감쇠 지수의 경우, 지상망의 경우 3, 위성망의 경우 2를 사용한다. 주파수 대역은 지상망은 3.5GHz, 위성망은 28GHz로 가정한다. 시뮬레이션 결과는 그림 2와 같이 나타난다. 임계 SINR이 0dB 미만일 경우, 위성, 지상, STIN의 커버리지 성능에 큰 차이가 없는 반면, 그 이후부터는 STIN이 가장 큰 커버리지를, 이후 위성, 지상 순으로 높은 커버리지를 나타낸다. 이는 STIN의 경우, 수신 전력이 더 큰 링크를 선택하는 시스템이므로 순간적으로 불리한 계층을 회피할 수 있으며, 주파수 분리를 가정하므로 위성-지상 간 이종(heterogeneous) 간섭이 제거됨에 따라 선택된 계층 내부 간섭에만 대응할 수 있어 비교적 높은 SINR 구간에서 적은 손실이 발생한다. 특히, 위성망은 고주파수 대역을 사용함에 따라 장애물에 막히는 비가시선(Non-Line-of-Sight, NLoS) 신호가 될 경우, LoS 신호가 통신 제공 신호라는 점에 착안할 때 간섭이 크게 줄어들 수 있다는 장점이 있다. 동시에, 지상 기지국의 경우 더 우수한 경로 감쇠 덕택에 위성의 신호 세기가 불리할 때, 더 강한 신호를 제공할 수 있으므로 커버리지에 유리함을 제공한다. 따라서, 본 연구는 지상 장애물의 존재 시, 위성/지상 통합 네트워크를 기반으로, 신호 세기에 따른 확률적 통신 수단 선택을 통해 지상망 및 위성망의 이점을 모두 활용할 수 있는 통신 방안을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 확률 기하 이론을 기반으로, 지상 장애물이 존재할 때 위성-지상 통합 네트워크를 활용하여, 지상망과 위성망의 이점을 모두 누릴 수 있는 STIN 다운링크 모델링을 제시한다. 시뮬레이션 결과, STIN에서의 커버리지 성능이 가장 우수했으며, 이후 위성망과 지상망의 순서로 향상된 성능을 보였다. 본 연구는 지상 장애물을 피해, LoS 확률이 비교적 높다는 점에 착안한 위성망의 이점을 확인하고, 낮은 경로 감쇠 정도로 인한 우수한 채널 상태를 활용한 지상망의 이점을 확인하였으며, 이 두 부분을 모두 활용하는 STIN이 현실 시나리오에 부합하는 지상 장애물 기반 셀룰러 네트워크에서 큰 유리함을 제공할 수 있음을 증명한다. 추후 연구에서는, 현재와 같은 직사각형 불리안 장애물 모델링에 더해, 원형을 포함한 다양한 장애물 모델링을 제안할 수 있으며, 각 망 체계에 따른 부하(load)를 정의하여, 선택 확률에 따라 시스템의

처리량(throughput)의 최적화를 꾀할 수 있는 오프로딩 알고리즘을 제안할 수 있다. 마지막으로, 현실적인 통신 체계와 유사한 시나리오를 제시함으로써, STIN의 추후

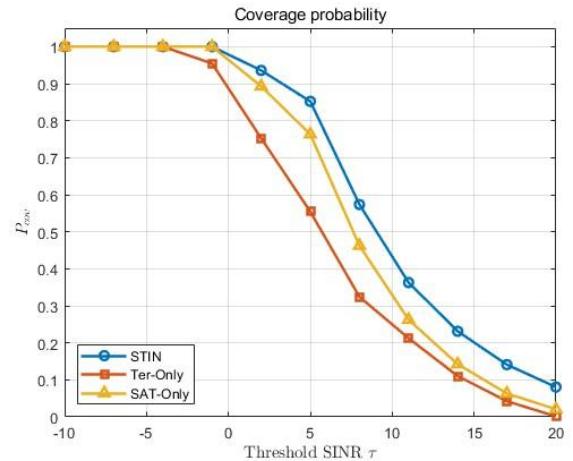


그림 2. 커버리지 성능 분석

발전 가능성 및 적용에 대한 잠재력을 제안해, 통신 가능성에 대한 통찰력을 제공한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022-0-00704, 초고속 이동체 지원을 위한 3D-NET 핵심 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. 2022.
- [2] J. -Y. Park, B. Lim, and Y. -C. Ko, "Effect of LoS and NLoS Propagations on Coverage Performance of LEO Satellite Networks", 2024 15th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), pp. 621-622, 2024.
- [3] F. Baccelli and B. Błaszczyk, "Stochastic geometry and wireless networks: Volume I theory," Found. Trends Netw., vol. 3, nos. 3-4, pp. 249-449, 2009.
- [4] T. Bai, R. Vaze and R. W. Heath, "Analysis of Blockage Effects on Urban Cellular Networks," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 13, no. 9, pp. 5070-5083, Sept. 2014