

확률 기하 이론 기반 비지상 통신 네트워크 모델링 및 성능 분석

김동진, 채승호, 정방철*, 이호원**, 조정호***, 이성규***

한국산업기술대학교, *충남대학교, **한경대학교, ***국방과학연구소

{kdj95061, shchae}@kpu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr, hwlee@hknu.ac.kr, {jh.cho, Iskyu}@add.re.kr

Modeling and Analysis of Non-Terrestrial Communication Network With Stochastic Geometry

Dongjin Kim, Seong Ho Chae, Bang Chul Jung*, Howon Lee**, Jungho Cho***, Seongkyu Lee***

Korea Polytechnic Univ., *Chungnam National Univ., **Hankyong National Univ.,
***Agency for Defense Development

요약

최근, 위성의 소형화 및 발사 비용 감소와 함께, 비지상 위성 통신 네트워크에 대한 관심이 급격히 증가하고 있다. 최근, 확률 기하 이론(stochastic geometry)을 활용하여 위성 통신 네트워크를 분석하려는 시도들이 있다. 본 논문은 확률 기하 이론을 활용하여 다운링크 위성 통신 네트워크를 푸아송 포인트 프로세스로 모델링하고 모의 실험을 통해 커버리지 확률 성능을 분석하였다.

I. 서론

최근, 위성의 소형화 및 발사 비용 감소와 함께, 저궤도 위성 통신 네트워크에 대한 관심이 증가하고 있다. 저궤도 위성은 정지궤도 위성 대비 낮은 전송지연을 가지며 전 세계에 음영 지역 없는 이동통신 서비스를 제공하는 것이 가능하다. 따라서, 이러한 저궤도 군집 위성 네트워크를 모델링하고 한계 성능을 이해하는 것이 중요하다. 확률 기하 이론(stochastic geometry)은 랜덤 네트워크의 성능을 분석하기 유용한 수학적 도구로, 셀룰러 네트워크, 분산 네트워크 등 다양한 랜덤 네트워크의 특성을 이해하는데 활발히 적용되고 있다 [1],[2]. 최근, 확률 기하 이론을 활용하여 위성 네트워크를 모델링하고 성능을 이해하려는 연구가 시도되고 있다 [3]-[5]. 해당 논문들은 위성 네트워크를 이항 포인트 프로세스(Binomial Point Process: BPP)로 모델링하고 위성까지의 거리 분포 및 커버리지 확률을 분석하였다. 하지만, 간섭이 미반영되어 있거나 레일레이 페이딩 채널로 간략화되어 반영되어 있다. 따라서, 본 논문에서는 일반화된 Nakagami-m 페이딩 채널에 대해 푸아송 포인트 프로세스 모델 기반의 위성 네트워크 커버리지 확률 성능을 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 지구를 중심으로 한 고도 H [km]의 구 평면에 위성이 랜덤하게 분포하고 있는 다운링크 위성 통신 네트워크를 고려한다. 지구는 3차원 데카르트 좌표 시스템의 원점 $o = (0,0,0) \in R^3$ 을 중심으로 반지름 R_e (~6.371[km])의 구로 가정한다. 따라서, 위성 궤도 영역은 원점을 중심으로 한 반지름 $R_e + H$ [km]의 구로 모델링 된다. 위성은 밀도 λ [units/km²]의 균등 푸아송 포인트 프로세스(Poisson Point Process)로 모델링한다.

사용자 터미널은 지구 표면 위의 임의의 위치인 $o' = (0,0,R_e)$ 에 위치하고 있음을 가정하고, 위성과 사용자 터미널은 모두 단일 안테나를 가짐을

가정한다. 각 위성은 전송 파워 $P[W]$ 로 사용자를 서비스 함을 가정한다. 사용자 터미널을 기준으로 위성 궤도 영역은 가시 영역과 비가시 영역으로 구분된다. 사용자 터미널은 가시 영역의 위성들만 볼 수 있으며 해당 위성으로부터의 신호는 서로 간섭으로 영향을 미침을 가정한다.

사용자는 가시 영역 내의 위성 중에서 가장 가까운 위성에 접속하여 서비스를 받으며, 가시 영역 내에 위성이 존재하지 않을 경우에는 아웃티지가 발생함을 가정한다. 전송된 신호는 감쇠 지수승 α 의 경로 감쇠와 Nakagami-m 소규모 페이딩 채널을 겪음을 가정하며, 내 신호 링크와 간섭 링크는 서로 다른 채널 파라미터 m_D 와 m_I 를 겪음을 가정한다.

III. 커버리지 확률 모의 실험 성능

본 장에서는 확률 기하 이론을 활용하여 다운링크 위성 통신 네트워크의 커버리지 확률을 분석한다. 사용자 터미널이 가장 가까운 위성에 접속 시 수신 신호 대비 간섭 및 잡음 비 (Signal to interference plus noise ratio: SINR)는 다음과 같이 표현된다.

$$SINR = \frac{Ph_0^2 R_0^{-\alpha}}{N_0 W + I}, \quad (1)$$

여기서, σ^2 은 잡음 전력, I 는 간섭으로 다음과 같이 주어진다.

$$I = \sum_{l > 0: x_l \in \Phi_r} Ph_l^2 R_l^{-\alpha}. \quad (2)$$

커버리지 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_c = P[SINR \geq \tau], \quad (3)$$

여기서, τ 는 타겟 수신 신호 대비 간섭 및 잡음 비이다.

그림 1과 2는 타겟 수신 신호 대비 간섭 및 잡음에 대한 커버리지 확률 성능을 보여주는 그림으로, 구체적인 시뮬레이션 환경은 다음과 같다.

$$P = 10(W), \quad N_0 = -174(\text{dBm}), \quad W = 10\text{MHz}, \quad \alpha = 2,$$

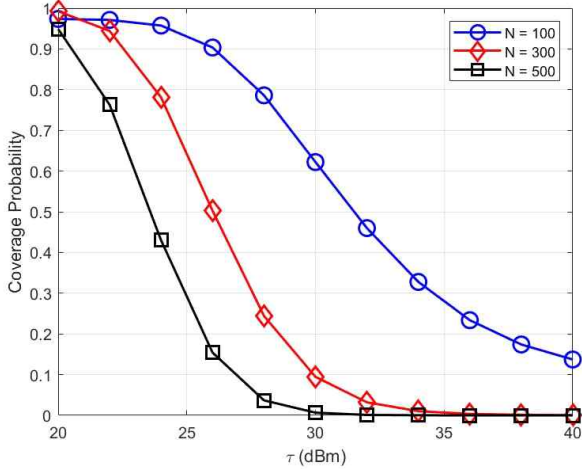


그림 1. 타겟 수신 신호 대비 간섭 및 잡음에 대한 위성 평균 개수 N 의 변화에 따른 커버리지 확률

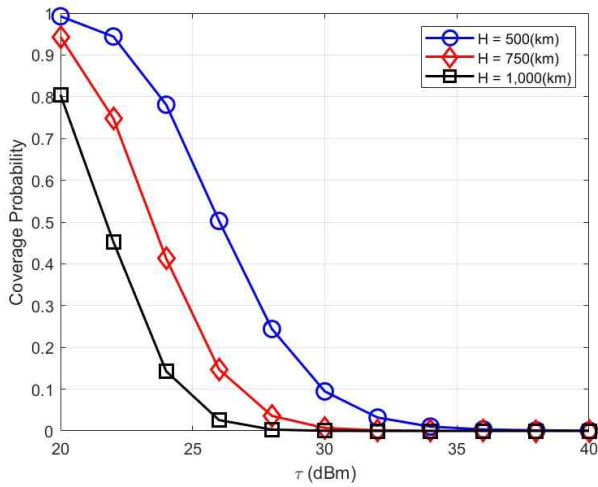


그림 2. 타겟 수신 신호 대비 간섭 및 잡음에 대한 위성 고도 변화에 따른 커버리지 확률

$$H = 500 \text{ (km)}, R_e = 6371 \text{ (km)}, m_D = 10, m_I = 3.$$

그림 1은 사용자 터미널이 가지 영역 내에 가장 가까운 기지국에 접속시, 타겟 수신 신호 대비 간섭 및 잡음에 대한 위성 평균 개수 N 의 변화에 따른 커버리지 확률 성능을 비교한 그림이다. 그림 1은 동일한 고도 $H = 500 \text{ (km)}$ 에 대해 위성의 평균 개수가 증가할수록 커버리지 확률이 감소함을 보여주고 있다. 이는 사용자로부터 서비스 가능한 접속 위성 기지국까지 거리가 감소함에 따라 수신 파워 크기가 증가하는 이득에 비해, 간섭의 크기 증가에 의한 수신 신호 대비 간섭 및 잡음 비율 감소 손실이 더욱 크기 때문이다.

그림 2는 타겟 수신 신호 대비 간섭 및 잡음에 대한 위성 고도 H 의 변화에 따른 커버리지 확률 성능을 비교한 그림이다. 평균 위성 개수가 $N = 300$ 으로 동일할 때, 사용자로부터 위성의 고도가 높아질수록 커버리지 확률이 감소함을 보여준다. 이는 사용자로부터 서비스 가능한 위성 기지국까지의 거리가 멀어짐에 따라, 수신 신호 파워 손실이 증가하기 때문이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 확률 기하 이론을 활용하여 군집 위성 네트워크 분석을 위한 분석 프레임워크를 제안하고 Nakagami- m 페이딩 채널 환경에서 커버리지 확률 성능을 모의 실험을 통해 분석하였다. 제안된 모델은 다양한 위성 네트워크 모델링 및 분석에 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by the Agency for Defense Development (ADD).

참 고 문 헌

- [1] S. H. Chae, J. Hong, and W. Choi, "Optimal access in OFDMA multi-RAT cellular networks with stochastic geometry: Can a single RAT be better?," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 7, pp. 4778-4789, Jul. 2016.
- [2] S. H. Chae, T. Kim, and J. Hong, "Distributed multi-radio access control for decentralized OFDMA multi-RAT wireless networks," *IEEE Commun. Letters*, vol. 25, no. 4, pp. 1303-1307, Apr. 2021.
- [3] N. Okati, T. Riihonen, D. Korpi, I. Angervuori, and R. Wichman, "Downlink coverage and rate analysis of low earth orbit satellite constellations using stochastic geometry," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 8, pp. 5120-5134, Aug. 2020.
- [4] A. Talgat, M. A. Kishk, and M.-S. Alouini, "Stochastic geometry-based analysis of LEO satellite communication systems," *IEEE Commun. Letters*, to appear.
- [5] A. Al-Hourani, "An analytic approach for modeling the coverage performance of dense satellite networks," *IEEE Wireless Commun. Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 897-901, Apr. 2021.