

확률기하학을 이용한 LoRa 기반의 저궤도 위성네트워크 가시성과 연결성 분석

정수엽*, 유준규*, 이준세^o

Analysis on the Visibility and Connectivity of LoRa Based LEO Satellite Networks Using Stochastic Geometry

Sooyeob Jung*, Joon Gyu Ryu*, Junse Lee^o

요 약

차세대 통신에서 저궤도 위성을 통한 다양한 어플리케이션이 고려되고 있으며, 그 중 저궤도 위성 네트워크의 넓은 커버리지를 활용한 사물인터넷 서비스에 대한 필요성이 요구되고 있다. 저궤도 위성 네트워크의 빠른 이동성으로 인한 도플러 효과를 보상하거나, 사물 인터넷을 위한 저전력 통신을 지원하기 위하여 LoRa (Long Range)는 유용한 기법으로 고려되고 있다. 본 논문은 저궤도 위성 네트워크에 LoRa 기법을 적용하였을 때, 지상에 있는 사용자 관점에서 바라보는 네트워크에 대한 가시성과, 연결성을 분석한다. LoRa 기반 통신의 중요한 물리계층 파라미터인 확산계수는 사용자와의 거리를 기반으로 하여 결정되며, 이러한 가정하에서 사용자가 경험하는 네트워크 환경에 대한 분석을 확률 기하학 기법을 활용하여 제시한다. 제공한 결과를 통해 네트워크의 파라미터와 성능간의 상호 관련성에 대한 직관을 제공한다. 마지막으로, 시뮬레이션 결과를 통하여 본 논문의 주요 이론적 결과가 시뮬레이션 결과와 일치함을 보여준다.

키워드 : 저궤도 위성 네트워크, 확률기하학, 네트워크 분석

Key Words : LEO satellite networks, Stochastic geometry, Network analysis

ABSTRACT

Various applications through Low-Earth Orbit (LEO) satellite networks are considered in next-generation communication. Especially, IoT services using the broad coverage of low-orbit satellite networks have been widely considered in many areas. Long Range (LoRa) is an essential technique to compensate for the Doppler effect due to the fast mobility of LEO satellites or to support low-power communication for IoT services. This paper analyzes the visibility and connectivity of the network viewed from the user's perspective on the ground when the LoRa technique is applied to LEO satellite networks. We assume that the spreading factor, an essential physical layer parameter for LoRa-based communication, is determined based on the distance from the user. Then, we present analyses of the network environment experienced by the user using stochastic geometry. The main results provide intuitions on the interrelationship between network parameters and performances. Finally, we present some numerical results which verify that our analyses are consistent with the simulations.

* 이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2020-0-00843, 저궤도 초소형 위성(10kg급) 기반 글로벌 IoT 서비스를 위한 저전력 위성다중 액세스 핵심기술 개발)

• First Author : Electronics and Telecommunications Research Institute, jung2816@etri.re.kr, 정희원

o Corresponding Author : Sungshin Women's University, junselee@sungshin.ac.kr, 정희원

* Electronics and Telecommunications Research Institute, jgryurt@etri.re.kr

논문번호 : 202310-104-A-RU, Received October 17, 2023; Revised October 23, 2023; Accepted October 23, 2023

I. 서 론

6G의 주요 네트워크 시나리오로 고려되는 위성 네트워크는 매우 넓은 커버리지를 통하여 기존의 지상 네트워크에서 제공해주지 못하는 다양한 서비스를 제공해줄 것이라 기대되고 있다^{1,2}. 위성의 경우 고도에 따라 크게 저궤도 위성, 중궤도 위성, 정지궤도 위성 및 고궤도 위성 등으로 분류가 된다. 단, ITU가 제시한 6G의 요구사항, 예를 들어 높은 데이터 전송률과 낮은 지연을 만족하기 위해서는 이들 중 저궤도 위성을 활용하는 것이 가장 적절하다. 이에 OneWeb이나 Starlink와 같은 해외 회사의 경우 수백개에서 수만개에 이르는 저궤도 위성을 발사하여 초거대 군집 위성군 (Mega-Constellation)을 구성하여 다양한 서비스를 계획 혹은 이미 제공을 하고 있다³.

저궤도 위성 네트워크의 넓은 커버리지란 장점은 사물인터넷 (IoT) 서비스 관점에서 기존의 지상 네트워크 대비 더 많은 활용성을 가져다 줄 수 있다. 하지만, 저궤도 위성 네트워크의 빠른 이동성으로 인한 도플러 효과, 그리고 IoT 서비스에서 요구하는 저전력 통신은 기존의 3GPP 기반의 통신에서 사용하는 물리계층의 기술을 도입할 경우 많은 품질의 저하를 초래할 수 있기에 여러 가지 방식의 기술이 검토가 되어 왔다. LoRa 프로토콜은 처프 확산 스펙트럼 (CSS: Chirp Spread Spectrum) 방식의 복조 방식을 사용하기에 도플러 효과에 강인하며 낮은 피크 전력 대비 평균 전력 비 (PAPR: Peak to Average Power Ratio)로 인해 저전력 통신에 유용하다. 위와 같은 장점으로 인해 LoRa 프로토콜은 위성을 활용한 IoT 서비스의 핵심 기술로 많은 연구가 진행이 되어 왔다⁴.

이러한 저궤도 위성 네트워크에 대한 이해를 하는 것은 최적화된 네트워크 배치에 대한 계획 관점에서 매우 필수적인 요소이다. 특히, 위성의 발사 및 운영 가격 등을 고려하였을 때, 커버리지를 최적화하는 것은 매우 중요한 이슈사항이다. 기존에는 이러한 네트워크 성능에 대한 해석을 하기 위하여 시스템 레벨의 시뮬레이션을 통해 시스템을 이해하였다. 이를 통해 정확한 성능을 예측할 수 있지만, 해당 방식은 네트워크 파라미터와 성능간의 관계를 아는 것에 있어서 매우 제한적이며, 하나의 케이스에 대한 결과를 얻기 위해 매우 많은 시간이 소모가 된다는 단점이 있다.

최근 몇 십년간 확률 기하학 (Stochastic Geometry)을 활용한 네트워크 분석 기법이 연구되어 왔다^{5,6}. 확률 기하학을 이용한 네트워크 분석의 주요 결과는 고려하는 네트워크 성능을 여러 가지의 네트워크 파

라미터를 포함한 하나의 식으로 나타내주기에 시스템 레벨 시뮬레이션과 달리 성능에 대한 네트워크 파라미터에 따른 영향을 파악할 수 있으며, 성능을 최적화하기 위한 환경 조성 (예를 들어 Cell planning)에 대한 가이드라인을 제시해줄 수 있다. 상술한 장점을 토대로 애드혹 네트워크, 셀룰러 네트워크, 밀리미터파 네트워크, V2X와 UAV 환경에서 성능을 분석하였으며, 최근에는 위성 네트워크 도입하는 연구가 진행되고 있다.

확률 기하학을 이용한 위성 네트워크 연구의 경우 위성의 위치를 다양한 방식으로 모델링을 통하여 위성 네트워크의 성능들에 레퍼런스를 제공하였다. 위성을 위치를 이항 포인트 프로세스 (BPP: Binomial Point Process) 혹은 포아송 포인트 프로세스 (PPP: Poisson Point Process), 혹은 궤도를 따라 이동하는 위성의 특징을 모델링을 하였으며, 지상의 사용자와 가장 가까운 위성의 위치를 구하거나, 혹은 커버리지 관점에서 분석을 하였다.

본 논문은 LoRa 프로토콜을 사용하는 저궤도 위성 네트워크 환경에서 지상에 있는 사용자가 경험하는 가시성 (Visibility)과 연결성 (Connectivity)에 대하여 확률 기하학을 통해 분석한 연구 결과를 제시한다. LoRa 프로토콜의 주요 환경과 채널 환경, 그리고 다양한 네트워크 파라미터 (지구의 반지름, 위성의 높이, 위성의 밀도 등)와 사용자가 경험하는 네트워크 성능이 어떻게 연결이 되어있는지를 제시한다. 이를 통해 지상의 사용자가 경험하는 네트워크 성능을 시스템 레벨 시뮬레이션 없이 최적화하기 위한 가이드라인을 제시한다.

이후 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서 고려하는 LoRa 프로토콜의 시스템 모델과 네트워크 기하 (Geometry)에 대한 내용을 제시한다. 또한, 가시성과 연결성에 대한 주요 결과를 제시한다. III장에서 시뮬레이션을 통하여 II장의 결과에 대한 검증과 네트워크 해석을 제공하며, IV장에서 결론을 제시한다.

II. 본 론

본 장에서 본 논문에서 고려하는 LoRa 프로토콜, 네트워크 모델링을 제시하며, 사용자 관점의 가시성과 연결성에 대하여 확률 기하학을 통해 분석한 내용을 제시한다.

2.1 LoRa 프로토콜

LoRa 프로토콜은 장거리 연결 및 저전력 통신을

위해 설계된 프로토콜로 LPWAN (Low Power Wide Area Network)를 표준화하도록 설계하였다. LoRa 프로토콜은 MAC이나 Application과 같은 상위 계층도 설계 및 표준화 작업을 하였으나 본 논문에서는 LoRa 프로토콜의 물리계층에 집중하여 분석한다.

LoRa의 주요 물리 계층 파라미터는 채널 주파수 (Channel Bandwidth), 확산 계수 (SF: Spreading Factor), 부호율 (Coding Rate) 등이 있다. 이 중 부호율은 무선 채널의 데이터 전송률 (Data Rate)과 밀접한 연관이 있으며, 확산 계수는 무선 신호의 전송 거리와 관련이 있다. 확산 계수를 늘릴수록 신호는 더 멀리 전달이 되고 요구되는 수신 감도 (Receiver Sensitivity)는 적지만 전송률이 떨어지며, 확산 계수를 줄일수록 신호는 상대적으로 근거리까지만 도달하지만 요구되는 수신 감도가 높아지는만큼 전송률이 증가하게 된다. 표 1은 일반적으로 많이 사용되는 SF = 7~12에 대하여 채널 주파수가 125kHz이고 부호율이 4/5 일 때 확산 계수에 따른 전송률과 수신 감도를 나타낸다.

표 1에서 볼 수 있듯이 신호 감도, 데이터 전송률은 확산 계수의 함수로 표현이 된다.

표 1. 채널 주파수가 125kHz이고 부호율이 4/5일 때 LoRa 특성
Table 1. LoRa Characteristics under channel bandwidth = 125kHz and code rate = 4/5

SF	Bit Rate	Receiver Sensitivity
7	5.469kbps	-124.5dBm
8	3.125kbps	-127dBm
9	1.758kbps	-129.5dBm
10	0.977kbps	-132dBm
11	0.537kbps	-134.5dBm
12	0.291kbps	-137dBm

2.2 네트워크 모델

그림 1과 같이 지구는 반지름 R_E 인 구라 가정하고, 위성의 지표면으로부터의 높이를 R_h 라 하자. 즉, 위성들은 반지름 $R (= R_E + R_h)$ 인 구에 위치한다고 가정한다. 카테시안 좌표계 (Cartesian Coordinate)를 도입하여 지구의 중심을 (0, 0, 0)에 배치하고, 일반성을 잃지 않고 우리가 고려하는 지표면 상의 사용자의 위치는 (0, 0, R_E)에 있다고 가정한다.

저궤도 위성의 위치는 반지름이 R 인 구 표면 상에 밀도가 λ 인 균일한 포아송 포인트 프로세스를 (homogeneous Poisson Point Process) 따른다고 가정

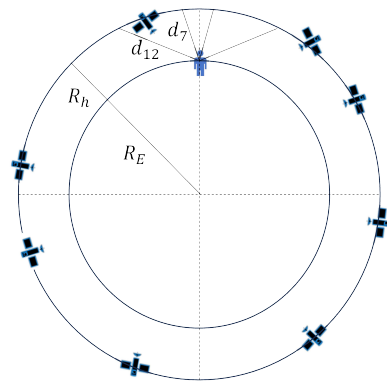


그림 1. 네트워크 모델 (투영도)
Fig. 1. Network Model (Projection View)

한다. 즉, 구표면상에 M 개의 위성이 있다고 할 때, M 은 평균값이 $4\pi R^2\lambda$ 인 포아송 분포를 따르게 된다. 또한, $\Phi = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ 을 위성의 위치라 하자.

본 논문에서는 전파 감쇄 (Path-loss Attenuation)과 소규모 페이딩 (Small-scale Fading)이 결합된 경로 손실 모델 (Path-loss Function)을 사용한다. 공간상에서 x 에서 송신한 신호를 y 에서 수신할 때 발생하는 전파 손실은 식 (1)과 같이 거리 기반의 모델을 활용한다.

$$\|x - y\|^{-\alpha} \tag{1}$$

이 때 α 는 거리 손실 지수이다. 또한, 본 논문에서는 간단한 레일리 페이딩 모델의 소규모 페이딩 효과를 고려하며, 각 채널별 페이딩 계수는 동일하며 독립적이라 가정한다. (IID: Independent and Identically Distributed) 페이딩 계수 (H)의 평균값이 1이라 가정할 때, ($\mathbb{E}[H] = 1$) 페이딩 계수의 확률 분포는 식 (2)와 같다.

$$f_H(x) = 2x \exp(-x^2) \tag{2}$$

저궤도 위성은 주어진 경로를 따라 이동하다가 특정 영역에 들어올 때, 사용자와 확산 계수 i ($i = 7, 8, \dots, 12$)를 이용하여 통신한다고 가정하자. 확산 계수 i 로 사용자와 통신하는 영역을 A_i ($i = 7, 8, \dots, 12$)라 하자. 확산 계수는 일반적으로 수신 감도를 (Receiver Sensitivity) 기반으로 결정이 되기 때문에 반지름이 R 인 구면 상에서 사용자와의 거리가 $d_{i,1}$ 에서 d_i 사이가 되는 영역을 A_i 가 된다. 이 때, d_i 는 다음과 같이 정의한다.

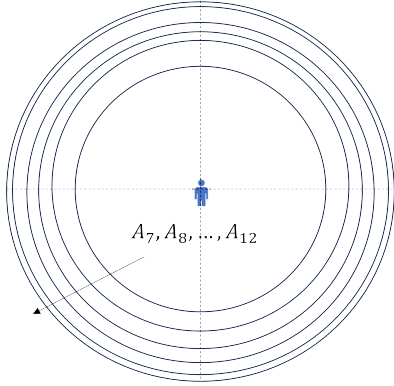


그림 2. 사용자의 위쪽에서 바라본 A_i
 Fig. 2. Illustrations on the top view of A_i

$$d_i = \left(10^{\frac{124.5 + 2.5(i-7) - 3 \log_2 \left(\frac{B}{125} \right) GP_t}{10}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (3)$$

$$\times \mathbb{1}(i \in 7, 8, \dots, 12)$$

위의 수식 (3)에서 G 는 안테나 이득, P_t 는 송신 전력, B 는 채널 주파수 (단위는 kHz) 이며, $\mathbb{1}(\cdot)$ 은 지시 함수 (Indicator Function) 이다. 그림 2는 A_i 는 사용자의 위쪽에서 바라본 모습을 나타낸다. 또한, 사용자로부터 d_i 가 넘는 거리에 있는 위성들은 볼 수 없다고 가정하자. 이는 위성을 바라볼 때 최소 고도각 (Minimum Elevation Angle) 바깥에 있는 위성들은 볼 수 없다는 내용과 일관성이 있다.

2.3 가시성과 연결성

2.1과 2.2의 모델 하에서 본 절에서는 지상의 사용자가 바라보는 저궤도 위성 네트워크에 대한 가시성과 연결성에 대해 분석한다.

다음 정리는 사용자 입장에서 얼마나 많은 위성들이 확산 계수 i 로 통신이 가능한지에 대한 결과를 제시해준다. A_i 에 있는 위성들은 사용자와 확산 계수 i 로 통신을 하기에 해당 영역에 있는 위성의 개수에 대한 분포를 구해준다.

정리1. $i = 7, 8, \dots, 12$ 에 대하여 사용자가 바라보는 영역 A_i 안에 있는 저궤도 위성의 개수는 포아송 분포를 따르며, 평균값은 식 (4)와 같다.

$$\pi \lambda R \frac{(d_i^2 - d_{i-1}^2 + (2R_E R - R_E^2 - R^2) \mathbb{1}(i=7))}{R_E} \quad (4)$$

증명: 우선, A_i 의 넓이를 구해준다. 구면체의 넓이

는 아르키메데스 정리에 의하여 다음과 같이 얻게 된다.

$$|A_7| = \pi R \frac{2R_E R - R_E^2 - R^2 + d_7^2}{R_E} \quad (5)$$

$$|A_i| = \pi R \frac{d_i^2 - d_{i-1}^2}{R_E} \quad (i = 8, 9, \dots, 12) \quad (6)$$

위성의 위치를 균일한 포아송 포인트 프로세스로 모델링하였기 때문에, A_i 에 있는 위성의 개수는 $\lambda |A_i|$ 를 평균으로 가지는 포아송 분포를 따르게 된다.

정리 1로부터 다음 두 개의 따름정리를 얻게 된다. 각 따름정리는 1) SF= i 로 통신을 하는 위성이 없을 확률, 2) 통신을 할 수 있는 위성이 없을 확률을 의미한다.

따름정리 1. $i = 7, 8, \dots, 12$ 에 대하여 사용자가 A_i 위에 하나의 위성도 보지 못할 확률은 식 (7)와 같다. (단, $d_0 = R_E$ 라 하자.)

$$\exp \left(-\pi \lambda R \frac{(d_i^2 - d_{i-1}^2 + (d_{i-1}^2 + 2R_E R - R_E^2 - R^2) \mathbb{1}(i=7))}{R_E} \right) \quad (7)$$

증명: 평균이 ρ 인 포아송 분포가 0일 확률은 $\exp(-\rho)$ 이므로 식 (7)를 얻을 수 있다.

따름정리 2. 사용자가 하나의 위성도 보지 못할 확률은 식 (8)와 같다.

$$\exp \left(-\pi \lambda R \frac{(d_{i2}^2 + 2R_E R - R_E^2 - R^2)}{R_E} \right) \quad (8)$$

증명: 사용자가 볼 수 있는 반지름이 R 인 구면상의 영역은 $A_7 \cup A_8 \cup \dots \cup A_{i2}$ 이고 A_i 끼리는 서로 겹치지 않게 되므로 사용자가 볼 수 있는 영역의 넓이는 식 (9)와 같이 된다.

$$| \cup_{i=7, \dots, 12} A_i | = \pi R \frac{(d_{i2}^2 + 2R_E R - R_E^2 - R^2)}{R_E} \quad (9)$$

위성의 위치를 구면상의 균일한 포아송 포인트 프로세스로 모델링하였기 때문에, 하나의 위성도 보지 못할 확률은 식 (8)과 같이 얻게 된다.

위의 두 따름정리의 결과인 식 (7), (8)을 1에서 뺀

으로써 각각 1) 적어도 한 개 이상의 SF = i로 통신을 할 수 있는 위성이 있을 확률, 2) 적어도 한 개 이상의 통신을 할 수 있는 위성이 있을 확률을 얻을 수 있다.

다음 정리는, 사용자 입장에서 A_i 상에 존재하는 가장 가까운 위성과의 거리에 대한 분포를 구해준다.

정리 2. $i = 7, 8, \dots, 12$ 에 대하여 적어도 한 개 이상의 위성이 A_i 상에서 보이는 경우, 사용자 입장에서 가장 가까운 위성과 사용자 사이의 거리를 I_i 라고 할 때 I_i 의 분포는 다음과 같다.

$$f_{I_i}(r) = 2\lambda\pi r \frac{R}{R_E} \exp\left(-\frac{\lambda\pi(r^2 - d_{i-1}^2)R}{R_E}\right) / \left(1 - \exp\left(-\pi\lambda R \frac{(d_i^2 - d_{i-1}^2 + (2R_E R - R_E^2 - R^2))}{R_E}\right)\right) \quad (10)$$

증명: $d_{i-1} \leq r \leq d_i$ 인 r 에 대하여 A_i 를 A_i 상에서 사용자로부터 거리가 r 보다 작은 영역이라 정의하자. A_i 상에 적어도 한 개의 위성이 존재하면서 A_i 상에 위성이 존재하지 않을 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \mathbb{P}[\Phi(A_r) = 0 | \Phi(A_i) > 1] \\ &= \frac{\mathbb{P}[\Phi(A_r) = 0, \Phi(A_i \setminus A_r)]}{\mathbb{P}[\Phi(A_i) > 1]} \quad (11) \end{aligned}$$

(11)의 분자와 분모는 각각 (12), (13) 이 된다.

$$\frac{\exp\left(-\pi\lambda R \frac{r^2 - d_{i-1}^2}{R_E}\right)}{\exp\left(-\pi\lambda R \frac{(d_i^2 - d_{i-1}^2 + (2R_E R - R_E^2 - R^2))}{R_E}\right)} \quad (12)$$

$$1 - \exp\left(-\pi\lambda R \frac{(d_i^2 - d_{i-1}^2 + (2R_E R - R_E^2 - R^2))\mathbb{1}(i=7)}{R_E}\right) \quad (13)$$

(10)은 r 에 대한 상보적 누적 분포 (CCDF: Complimentary Cumulative Distribution Function)와 동치이므로 (11)을 미분함으로써 I_i 의 분포를 (10)와 같이 얻을 수 있다.

일반적으로 사용자가 경험하는 네트워크의 성능을 분석할 때 많이 쓰는 지표로 커버리지 확률 (Coverage Probability)를 활용한다⁷⁾. 커버리지 확률이란 식 (14)와 같이 특정 위치 (혹은 사용자)에서 경험하는 무선 채널의 품질이 특정 값을 넘길 확률을 의미한다.

$$\mathbb{P}[SINR > \tau] \quad (14)$$

식 (14)에서 SINR (Signal to Interference and Noise Ratio)은 무선 채널의 품질을 나타내는 지표이며 τ 는 특정 품질의 문턱값 (Threshold)를 의미한다. 본 논문에서는 빔 폭이 충분히 좁다고 가정하고 식 (15)와 같이 SNR (Signal to Noise Ratio)를 기반으로 한 커버리지 분석을 한다.

$$\mathbb{P}[SNR > \tau] \quad (15)$$

정리 3. $i = 7, 8, \dots, 12$ 에 대하여 사용자가 A_i 상의 가장 가까운 위성과 통신할 때 경험하는 SNR 값을 SNR_i 라 할 때, 커버리지 확률 $\mathbb{P}[SNR_i > \tau]$ 는 식 (14)와 같다. (단, σ^2 는 잡음 전력 세기이다.)

$$\mathbb{P}[SNR_i > \tau] = \int_{d_{i-1}}^{d_i} \exp\left(-\frac{tr^\alpha \sigma^2}{GP_t}\right) f_{I_i}(r) dr \quad (16)$$

증명: 사용자가 A_i 상의 가장 가까운 위성간의 거리 I_i 를 r 로 고정하였을 때 SNR_i 는 $HGP_t r^{-\alpha}$ 가 된다. 따라서,

$$\begin{aligned} \mathbb{P}[SNR_i > \tau | I_i = r] &= \mathbb{P}[HGP_t r^{-\alpha} > \tau] \\ &= \mathbb{P}\left[H > \frac{tr^\alpha \sigma^2}{GP_t}\right] = \exp\left(-\frac{tr^\alpha \sigma^2}{GP_t}\right) \quad (17) \end{aligned}$$

가 된다. 식 (17)를 r 에 대하여 조건을 풀어주면 (Deconditioning) 식 (16)을 얻게 된다.

III. 모의실험

본 챗터에서는 시뮬레이션을 통하여 위의 챗터에서 얻은 결과에 대한 수식들을 검증하며, 네트워크 성능에 대하여 해석한다. 이를 위하여 네트워크 파라미터는 다음과 같이 값을 정한다.

표 2의 네트워크 파라미터를 사용하였을 때, (3)에 의해 d_7, d_8, \dots, d_{12} 는 각각 1062, 1416, 1888, 2517, 3358, 4477(km)가 된다. 또한, 본 모의실험에서 표 2의 파라미터 하에서 유의미한 경향성을 보여주는 SF 7, 8, 9에 대하여 제시한다.

그림 3은 표 2의 네트워크 파라미터를 사용하였을 때, I_7 과 I_8 의 분포에 대한 모의 실험 결과와 식 (10)을 비교한 결과이다. 저궤도 위성의 밀도, λ 가 늘어날 때 더 짧은 길이에서의 밀도가 높아진다. 이는, 네트워크 모델링에 있어, 더 가까운 곳에 위성이 배치될 수 있

표 2. 모의 실험에서 사용한 네트워크 파라미터에 대한 설명 및 값
 Table 2. Descriptions and values of network parameters used in the simulation

Parameters	Description	Values
R_E	Radius of the Earth	6371 (km)
R_h	Altitude of LEO satellites	500 (km)
α	Path-loss exponent	2
λ	Density of LEO satellites	0.0005, 0.00005
i	Spreading factor	7,8,9,10,11,12
P_t	Transmit Power	10 (dBm)
G	Antenna Gain	10 (dBi)
B	Bandwidth	125 (kHz)
σ^2	Noise power	-100(dBm)

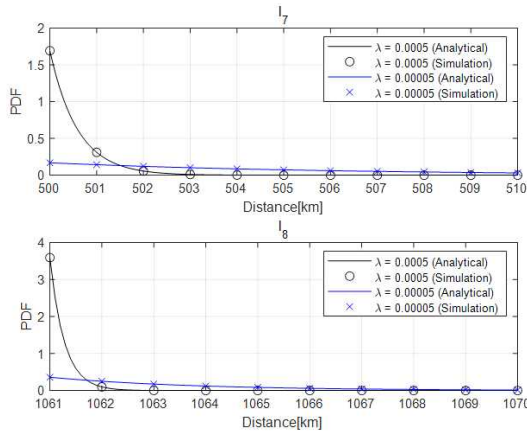


그림 3. h_7, h_8 에 대한 분포 함수 그래프
 Fig. 3. Illustrations on the distributions of h_7, h_8

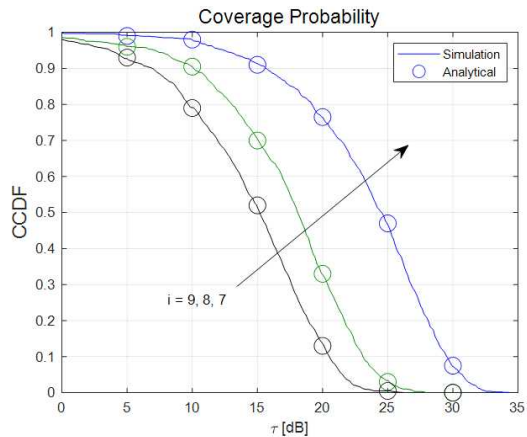


그림 4. $\lambda = 0.0005$ 에 대한 커버리지 확률
 Fig. 4. Illustrations on the coverage probability when $\lambda = 0.0005$

다는 점과 연결이 될 수 있다.

그림 4는 표 2의 네트워크 환경 하에서 커버리지 확률에 대하여 시뮬레이션과 식 (13)을 비교한 그림이다. 커버리지 확률은 SNR_i 의 상보적 누적 분포값으로 정의되어 있어 문턱값 τ 에 따라 감소함을 알 수 있다. 확산 계수 값인 i 에 대하여 감소할수록 커버리지 확률이 향상됨을 알 수 있다. 이는 i 가 작을수록 높은 수신 감도를 요구하는 작은 값의 확산 계수로 통신을 하며, SNR 기반의 커버리지 확률에서는 통신하는 위성이 가까울수록 성능이 향상되기에 그림 4와 같은 경향이 나옴을 이해할 수 있다.

IV. 결론

본 논문은 LoRa 프로토콜을 사용하는 저궤도 위성 네트워크에서 지상의 사용자가 경험하는 가시성과 연결성에 대하여 분석하였다. 확률기하학을 기반으로 성능 및 기하 관련 파라미터를 네트워크 파라미터들의 닫힌 형태의 함수로 제공을 하였으며, 네트워크 파라미터와 성능간의 관계에 대한 직관성을 제공하였다. 시뮬레이션을 통하여 검증을 하였으며, 파라미터가 미치는 영향에 대한 해석을 제공하였다.

향후 가능한 연구 발전 방향은 다음과 같다. 일반적인 페이딩 모델을 고려한 커버리지 분석을 진행한다. 더불어 LoRa 프로토콜과 주어진 네트워크 모델하에서 데이터 전송률에 대한 연구로 확장 가능하다. 추가적으로, 각 성능에 대한 최적화 문제를 푸는 연구 방향으로 확장이 가능하다

References

- [1] S. Chen, et al., "Vision, requirements, and technology trend of 6G: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 218-228, Feb. 2020. (<https://doi.org/10.1109/mwc.001.1900333>)
- [2] B. Lee, N. Lee, J. Kim, and W. Shin, "A survey of LEO satellite networks for 5G and beyond: Channel modeling, research trends, and open challenges," *J. KICS*, vol. 46, no. 7, pp. 1097-1108, Jul. 2021. (<https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.7.1097>)
- [3] B. Al Homssi, et al., "Next generation mega

satellite networks for access equality: Opportunities, challenges, and performance,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 60, no. 4, pp. 18-24, Apr. 2022.

(<https://doi.org/10.1109/mcom.001.2100802>)

- [4] W. Ayoub, et al., "Internet of mobile things: Overview of LoRaWan, DASH7, and NB-IoT in LPWANs standards and supported mobility," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 21, no. 2, pp. 1561-1581, Oct. 2018.

(<https://doi.org/10.1109/comst.2018.2877382>)

- [5] F. Baccelli and B. Błaszczyszyn, "Stochastic geometry and wireless networks: Volume 1: THEORY," Now Publishers Inc., 2009.

(<https://doi.org/10.1561/9781601982650>)

- [6] M. Haenggi, et al., "Stochastic geometry and random graphs for the analysis and design of wireless networks," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 27, no. 7, pp. 1029-1046, Aug. 2009.

(<https://doi.org/10.1109/jsac.2009.090902>)

- [7] M. Haenggi, "Stochastic geometry for wireless networks," Cambridge University Press, 2012.

(<https://doi.org/10.1017/cbo9781139043816>)

정수엽 (Sooyeob Jung)



2009년 2월 : 경북대학교 학사 졸업

2011년 2월 : KAIST 석사 졸업

2011년 3월~현재 : 한국전자통신연구원 위성통신인프라연구실 선임연구원

<관심분야> 위성통신, 디지털통신

유준규 (Joon Gyu Ryu)



2001년 2월 : 충남대학교 전과 공학 석사 졸업

2014년 2월 : 충남대학교 전과 공학 박사 졸업

2001년 3월~현재 : 한국전자통신연구원 위성통신인프라연구실 책임연구원

<관심분야> 위성통신, RF통신

이준세 (Junse Lee)



2011년 2월 : KAIST 석사 졸업

2018년 2월 : UT Austin Electrical and Computer Engineering 박사 졸업

2021년 3월~현재 : 성신여자대학교 조교수

<관심분야> 네트워크 분석, 인공지능