

시간-상관 Shadowed Rician 채널의 결합 아웃타이저 확률 분석

서정민, 고영채

고려대학교

<jmsuh904, koyc>@korea.ac.kr

Joint Outage Probability Analysis of Time-Correlated Shadowed Rician Channels

Suh Jung Min, Young-Chai Ko

Korea University

요약

본 논문은 저궤도 위성-지상 간 Shadowed Rician 페이딩 채널에서 시간 상관성을 고려한 전력 기반 결합 누적 분포 함수(Joint Cumulative Distribution Function, Joint CDF)를 도출하고, 이를 바탕으로 결합 아웃타이저 확률(Joint Outage Probability, JOP)을 분석한다. 기존 연구는 단일 랜덤변수 기반의 Shadowed Rician 채널을 다루거나, 비가시선(NLOS) 성분에만 상관성을 부여한 경우가 많았다. 본 연구에서는 저궤도 위성의 빠른 이동 특성을 반영하여 가시선(LOS)과 비가시선(NLOS) 성분 모두에 시간 상관성을 포함하는 채널 모델을 제안하고, 이를 통해 음영(shadowing) 강도와 시간 지연이 시스템 성능에 미치는 영향을 규명한다.

I. 서론

저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성을 활용한 비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN)는 지상 기반 통신 인프라의 공간적 한계를 극복하는 핵심 기술로 6G 시대에 큰 주목을 받고 있다.[1] 특히 LEO 위성-지상 간 채널에서는 고속 이동으로 인한 시간 선택적 페이딩과 음영(shadowing) 현상이 중첩되어 통신 품질을 저하시킬 수 있다. 이러한 환경을 정확히 모델링하고 분석하는 것은 차세대 NTN 설계와 성능 예측에 필수적이다.

기존 많은 연구들은 Shadowed Rician 페이딩 채널을 기반으로 링크 성능을 분석해왔으나, 대부분 단일 랜덤변수의 통계 특성에 집중하거나 비가시선(NLOS) 성분에만 상관성을 부여한 경우가 많았다.[2] 이로 인해 가시선(LOS) 성분과 NLOS 성분이 동시에 시간적으로 상관되는 현실적인 LEO 위성 채널 환경은 충분히 반영되지 못했다.

본 논문에서는 LEO 위성-지상 간 Shadowed Rician 채널에서 LOS와 NLOS 성분 모두에 시간 상관성을 포함하는 모델을 제안하고, 이를 기반으로 결합 누적 분포 함수(Joint Cumulative Distribution Function, Joint CDF)를 유도한다. 또한 이를 통해 결합 아웃타이저 확률(Joint Outage Probability, JOP)을 분석하고, 시간 지연 및 음영 강도가 시스템 성능에 미치는 영향을 규명한다.

II. 본론

1. 채널 모델

본 논문에서는 LEO 위성-지상 간 링크를 Shadowed Rician 페이딩 모델로 표현한다. τ 만큼 떨어진 서로 다른 두 시점에 대해 시간 인덱스 k 를 포함한 채널 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_k = R_k + Y_k e^{j\beta_k}, \quad k = 1, 2 \quad (1)$$

여기서 R_k 는 평균 전력이 $2b$ 인 복소 가우시안 분포 $CN(0, 2b)$ 를 따르는 NLOS 성분이며, Y_k 는 평균 전력이 Ω 인 Nakagami- m 분포를 따르는 LOS 진폭 성분이다.

NLOS 성분과 LOS 성분의 진폭의 시간 상관 계수는 각각 다음과 같이 정의된다.[3]

$$\rho_R(\tau) = J_0(2\pi f_D \tau) \quad (2)$$

$$\rho_Y(\tau) = \frac{\frac{1}{m} \left(\frac{\Gamma(m+0.5)}{\Gamma(m)} \right)^2 [{}_2F_1(-0.5, -0.5, m, \rho_R(\tau)) - 1]}{1 - \frac{1}{m} \left(\frac{\Gamma(m+0.5)}{\Gamma(m)} \right)^2} \quad (3)$$

여기서 $f_D = v f_c / c$ 는 위성의 이동 속도 v , 반송파 주파수 f_c 와 빛의 속도 c 로 계산되는 최대 도플러 주파수이고, m 은 낙카가미 파라미터이다. ${}_2F_1(\cdot)$ 는 가우스 하이퍼지오메트릭 함수이다. 마지막으로, 위상 β_k 는 링크 거리 d_k 에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$\beta_k = \frac{2\pi f_c d_k}{c} \quad (4)$$

위상차 $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ 는 시간 지연 τ 와 궤도 기하에 의해 결정된다.

2. 전력 기반 결합 누적 분포 함수

전력 기반 Joint CDF는 먼저 채널 계수에서 LOS 성분을 조건부로 고정한 후, 조건부 결합 모멘트생성함수(Joint MGF)를 구하고, 이를 평균화하여 Joint MGF를 얻는 방식으로 도출하였다. 이후 2차원 라플라스 역변환을 통해 Joint CDF를 다음과 같이 4종 무한급수 형태로 표현할 수 있다.

$$F_P(p_1, p_2) = \sum_{i,j,k,r=0}^{\infty} C_{i,j,k,r} (\rho_R, \rho_Y, \Delta\beta; b, m, \Omega) K_{n_1}(p_1) K_{n_2}(p_2) \quad (5)$$

여기서 $p = |H|^2$ 는 전력, $n_1 = i+k+r$, $n_2 = j+k+r$ 이고, $C_{i,j,k,r}$

는 감마함수와 하이퍼지오메트릭 함수의 조합으로 정의되는 계수이며, $K_n(p)$ 는 라게르 다항식과 지수함수로 구성된 함수이다.

3. 결합 아웃타지 확률

두 시점에서의 순간 SNR(Signal-to-Noise Ratio)이 동시에 임계 SNR 미만으로 떨어질 확률을 JOP로 정의하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Pr(\gamma_1 < \gamma_{th}, \gamma_2 < \gamma_{th}) = F_P\left(\frac{2b + \Omega}{\bar{\gamma}}(2^R - 1), \frac{2b + \Omega}{\bar{\gamma}}(2^R - 1)\right) \quad (6)$$

순간 및 평균 SNR, 데이터 전송률 R 에 따른 임계 SNR은 각각 다음과 같다. 여기서 c 는 상수이다.

$$\gamma_k = c|H_k|^2, \quad k = 1, 2 \quad (7)$$

$$\bar{\gamma} = E[\gamma_k] = c(2b + \Omega), \quad k = 1, 2 \quad (8)$$

$$\gamma_{th} = 2^R - 1 \quad (9)$$

4. 수치 결과 및 논의

본 연구에서는 Joint CDF의 4종 무한급수를 표 1의 절단 계수를 이용하여 유한합으로 계산하였다. 그림 1은 중간 음영 강도 조건에서 시간 지연 τ 변화에 따른 JOP를 나타낸다. 본 실험 범위에서는 τ 가 증가하면 상관계수 ρ_R, ρ_Y 가 커지면서 두 시점의 전력이 더 유사해져 동일한 평균 SNR에서 JOP가 상승하는 경향을 보인다. 특히 $\tau = 6\mu\text{s}$ 일 때는 $\tau = 5\mu\text{s}$ 에 비해 $JOP = 10^{-3}$ 을 달성하기 위해 약 3 dB의 평균 SNR이 더 요구된다.

그림 2는 $\tau = 6\mu\text{s}$ 에서 데이터 전송률 R 과 음영 강도에 따른 JOP 변화를 보여준다. 일반적으로 음영 강도가 강해질수록 LOS 성분의 평균 전력이 급격히 감소하고 불확실성이 증가하여 JOP가 전반적으로 커지는 경향을 보인다. 예를 들어, $R = 1$ 일 때 음영 강도가 강할 때는 약할 때보다 $JOP = 10^{-3}$ 을 달성하기 위해 약 5 dB의 평균 SNR이 더 요구된다. 주목 할 점은 평균 SNR = 13 dB 부근에서는 $R = 1$ 일 때 음영 강도가 강할 때와 $R = 2$ 에서 음영 강도가 약할 때 JOP 곡선이 교차하는 현상이다. 이는 데이터 전송률을 절반으로 감소시켜도 음영 강도가 강해지면 더 큰 성능 열화를 유발할 수 있음을 의미한다. 즉, 특정 상황에서는 음영 강도가 데이터 전송률보다 JOP 성능에 더 큰 영향을 줄 수 있음을 시사한다.

그림 1과 그림 2 모두에서 JOP 곡선의 해석식과 몬테카를로 결과가 전 구간에서 정합하여 제안 모델의 정확성을 확인하였다.

III. 결론

본 논문은 LEO 위성-지상 간 Shadowed Rician 채널에서 LOS 및 NLOS 성분 모두의 시간 상관성을 반영한 현실적인 페이딩 모델을 제안하였다. 이를 기반으로 Joint CDF를 유도하고, 두 시점에서의 수신 신호 품질을 동시에 고려하는 JOP를 분석하였다.

본 연구의 시뮬레이션 결과에 따르면, 시간 지연 τ 가 증가할수록 상관성이 강화되어 JOP가 상승하였으며, 음영 강도가 커질수록 JOP가 전반적으로 악화되는 경향을 확인하였다. 또한 특정 조건에서는 음영 강도가 데이터 전송률 변화보다 JOP를 더 크게 좌우하는 교차 현상이 관찰되었다. 이러한 결과는 LEO 위성-지상 링크 설계 시 시간 상관성과 음영 강도의 복합적 영향을 반드시 고려해야 함을 보여주는 중요한 통찰을 제공한다.

향후 연구에서는 본 논문에서 제시한 모델을 기반으로 레벨 교차율 (Level Crossing Rate, LCR)과 평균 페이드 지속시간(Average Fade Duration, AFD)과 같은 동적 성능 지표로 확장하여 6G NTN 시나리오 전반의 성능을 포괄적으로 평가할 계획이다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

* 음영 강도

파라미터	기호	단위	값
반송파 주파수	f_c	GHz	20
위성 고도	H	km	550
위성 속도	v	km/s	7.8
NLOS 평균 전력 (강/중/약)*	$2b$	-	{0.126, 0.252, 0.316}
LOS 평균 전력 (강/중/약)	Ω	-	{8.97·10 ⁻⁴ , 0.835, 1.29}
나카가미 파라미터 (강/중/약)	m	-	{0.739, 10.1, 19.4}
데이터 전송률	R	bps/Hz	{1, 2}
절단 계수	tr_i, tr_j, tr_k, tr_r	-	30
MC 샘플 수	-	-	10^7

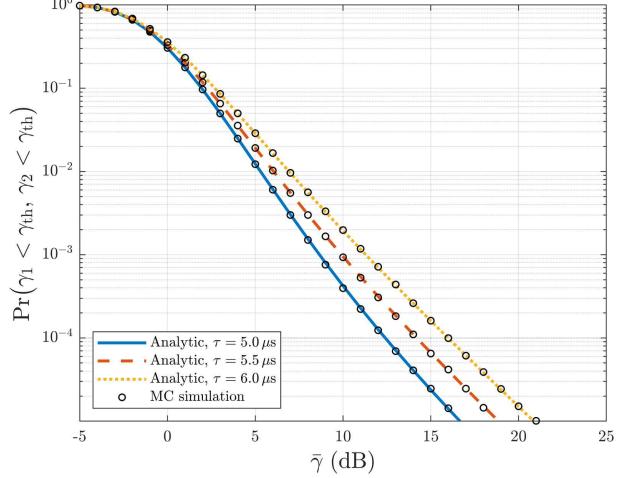


그림 1. 평균 SNR과 시간에 따른 JOP (중간 음영 강도)

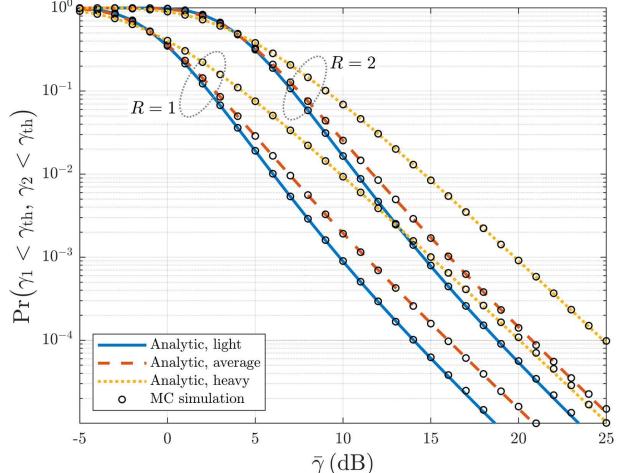


그림 2. 평균 SNR과 음영 강도에 따른 JOP ($\tau = 6\mu\text{s}$)

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 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] Z. M. Bakhsh et al, "Multi-Satellite MIMO Systems for Direct Satellite-to-Device Communications: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 27, no. 3, pp. 1536-1564, June 2025, doi: 10.1109/COMST.2024.3449430
- [2] J. Lopez-Fernandez, J. F. Paris and E. Martos-Naya, "Bivariate Rician Shadowed Fading Model," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 1, pp. 378-384, Jan. 2018, doi: 10.1109/TVT.2017.2744800
- [3] C.-D. Iskander and P. T. Mathiopoulos, "Analytical envelope correlation and spectrum of maximal-ratio combined fading signals," *2003 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing*, Victoria, BC, Canada, 2003, pp. 446-449 vol.1, doi: 10.1109/PACRIM.2003.1235812