

실외 환경에서 측정된 무선 광통신 수신 전력의 로그노말 모델링과 Rytov 분산 분석

오태인, 고영채
고려대학교

<logan10, koyc>@korea.ac.kr

Log-Normal Modeling and Rytov Variance Analysis of Free-Space Optical Received Power Measured in an Outdoor Environment

Tae-In Oh, Young-Chai Ko

Korea Univ.

요 약

본 연구는 실외 환경에서 구성한 400m 무선 광통신(FSO) 링크를 통해 수신 전력의 시간적 변동성을 측정하고, 대기 난기류의 영향을 실험적으로 분석하였다. 측정된 수신 전력은 로그노말 분포 기반의 비선형 최소자승법(NLS)으로 피팅되었으며, 이를 통해 산출한 Rytov 분산과 섬광 지수(Scintillation Index)의 관계를 분석하였다. 실험 결과, 로그노말 모델이 다양한 난기류 조건에서 수신 전력의 확률 분포를 효과적으로 설명하였고, 시간대 및 기상 조건에 따라 Rytov 분산이 뚜렷한 변화를 보이는 것을 확인하였다. 본 연구는 실제 환경 기반 실험을 통해 난기류 모델의 유효성을 검증하였다.

I. 서 론

무선 광통신 (free space optical communication, FSO)란 레이저를 이용하여 자유 공간을 통해 정보를 전달하는 통신 방식으로 넓은 대역폭, 비 면허 대역 사용, 높은 보안성 등 장점을 지니고 있다[1]. 그러나 FSO 시스템은 전파 매체인 대기 상태에 민감하게 반응한다. 특히 대기 난기류(atmospheric turbulence)에 의한 레이저의 강도가 시간에 따라 변동하는 신틸레이션(scintillation) 현상이 발생해 성능 저하를 초래한다. 이러한 난기류는 통계적으로 모델링되며, 수신 전력은 흔히 로그노말분포를 따른다고 알려져 있다[2].

본 논문에서는 실제 환경에서 수신 전력을 측정해 이를 기반으로 난기류에 의한 영향을 실험적으로 분석한다. 측정된 신호를 비선형 최소자승법(NLS)을 통해 피팅하였고, 그 결과로부터 산출된 Rytov 분산과 측정된 신틸레이션 지수 간의 상관성을 분석하였으며, 시간에 따른 Rytov 분산의 변화 또한 확인하였다.

II. 본론

1. 대기 난기류 채널 모델

대기 난기류란 공기 중 온도, 압력 등의 변화에 의해 발생하는 대기 굴절률의 불규칙성을 말하며, 빛의 전파 경로를 무작위적으로 변화시킨다. 이 현상은 무선 광통신 시스템의 신호의 위상 및 강도의 불규칙한 변화를 일으켜, 통신 성능 저하를 초래한다. 이러한 난기류 현상을 수학적으로 모델링하기 위해 다양한 확률 분포가 사용되며, 약한 난기류 환경에서는 대기 난기류가 로그노말분포를 따른다고 알려져 있으며 아래와 같이 주어진다[3].

$$f_{h_a}(I) = \frac{1}{I\sqrt{2\pi\sigma_R^2}} \exp\left[-\frac{(\ln I + \sigma_R^2/2)^2}{2\sigma_R^2}\right] \quad (1)$$

이 때, σ_R^2 은 Rytov 분산(Rytov variance)로 수신 신호의 대기 난기류에 의한 영향의 정도를 의미한다. Rytov 분산은 아래 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2)$$

이 때, $k = 2\pi/\lambda$ 는 광학 파수, λ 는 파장, L 은 통신거리, C_n^2 은 굴절률 상수를 의미한다. 한편, 난기류로 인한 수신 전력의 변동성을 직접 측정할 수 있는 실험적 지표로 신틸레이션 지수(scintillation index, SI)가 있다. 신틸레이션 지수는 아래 식 (3)과 같이 주어진다.

$$SI = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (3)$$

이 때, I 는 수신 전력, $\langle \cdot \rangle$ 는 평균을 의미한다. 또한, Rytov 분산과 신틸레이션 지수는 일반적으로 식 (4)와 같은 관계를 지니고 있다고 알려져 있다[2].

$$SI = \exp \sigma_R^2 - 1 \quad (4)$$

2. 실험 설계

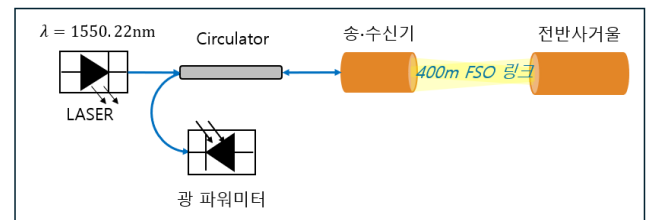


그림 1 실험 다이어그램

본 연구에서는 그림 1 과 같이 실외 환경에서 400m 길이의 무선 광통신(FSO) 링크를 구성하여 수신 전력의 변동성을 측정하였다. 사용된 레이저의 중심 파장 $\lambda = 1550.22 \text{ nm}$ 이며, 송신한 빛은 광 순환기 (circulator)를 통해 송신기로 전달된다. 송신된 신호는 송신기로부터 200 m 거리에 위치한 전반사거울을 통해 반사되어 다시 수신된다. 이 수신된 신호는 광 순화기를 거쳐 광 파워미터로 전달된다. 수신 전력은 1 분간격으로 5 초간 샘플링 했으며 실험은 2024 년 11 월 6 일부터 2025 년 3 월 5일까지 총 약 4 개월간 진행되었다. 이 기간 동안 총 89,031 회의 수신 전력 측정이 이루어졌다.

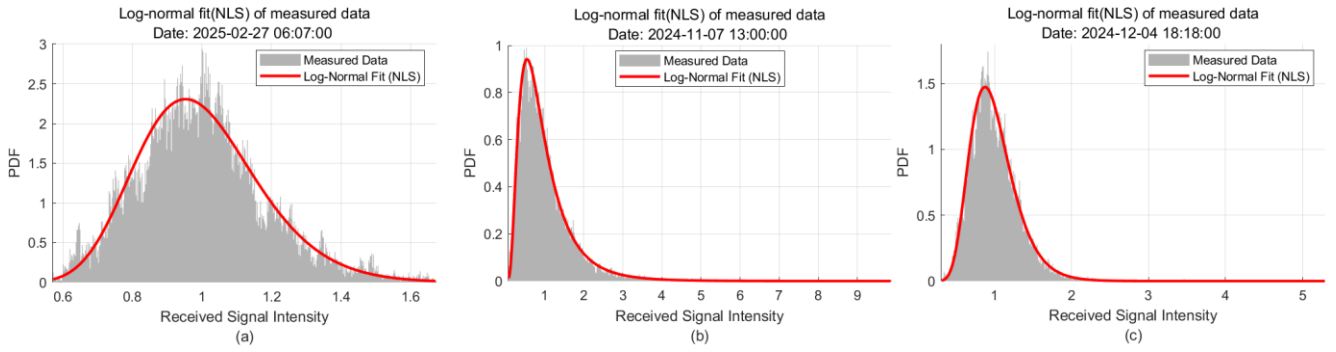


그림 2 측정 데이터와 로그노말 분포 피팅 결과 (a): 아침, (b): 점심, (c): 저녁

3. 측정 결과 분석

측정된 수신 전력 데이터에 대해 로그노말 분포로 NLS 피팅을 수행했다. 그림 2는 그 결과 중 세 예시 결과로, 각 히스토그램은 측정된 데이터의 확률밀도 함수를 나타내며, 붉은색 곡선은 로그노말 분포에 대한 피팅 결과이다. 다양한 난기류 조건에서 로그노말 모델이 수신 전력의 확률 분포를 잘 근사함을 확인할 수 있다.

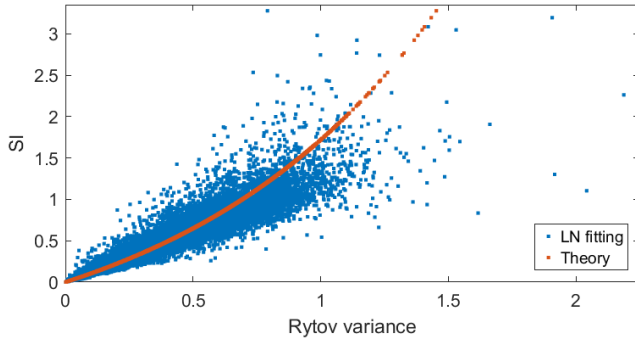


그림 3 Rylov 분산에 따른 신틸레이션 지수

그림 3은 NLS 피팅을 통해 획득한 Rylov 분산과 식 (3)을 통해 측정된 신틸레이션 지수(파란 점)와 측정된 신틸레이션 지수로부터 식 (4)에 의해 계산된 이론적인 Rylov 분산(빨간 점)을 나타낸다. 이 그래프를 통해 두 값이 강한 상관 관계를 보이며 이론 모델과 실제 데이터가 잘 일치함을 확인했다.

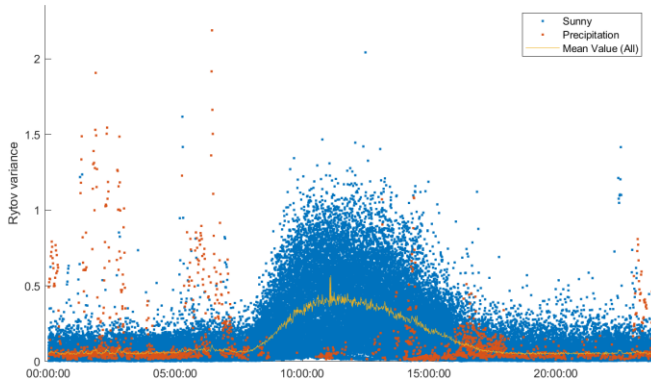


그림 4 시간에 따른 Rylov 분산 변화

그림 4는 하루 동안 시간의 흐름에 따라 측정된 Rylov 분산이다. 파란 점은 맑은 날씨일 때, 주황색 점은 강수(눈 또는 비) 발생 시를 나타내며, 노란 색 선은 각 시간의 평균값이다. Rylov 분산은 주간 시간대, 특히 햇빛의 영향이 가장 강한 정오 부근에서 가장 크게 나타났으며, 이는 태양 복사가 무선 광통신의 통신 성능에 주요하게 영향을 미치고

있음을 의미한다. 반면, 야간이나 새벽 시간대에는 난기류가 현저히 감소해 시간에 따른 변화가 크게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 강수 환경에서는 시간에 관계없이 강수 정도에 따라 강한 난기류가 관측되었다. 이는 비나 눈이 직접 레이저 신호에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 보인다.

이러한 분석을 통해 로그 노말 모델이 다양한 시간대 및 기상 조건 하에서도 무선 광통신의 수신 전력의 확률 분포를 효과적으로 설명할 수 있음을 알 수 있다.

III. 결론

본 연구에서는 약 4 개월간 실외 환경에서 400m 무선 광통신 링크를 구성하여, 수신 전력의 시간적 변동성을 측정하고 대기 난기류의 영향을 실험적으로 분석하였다. 측정된 데이터는 로그노말 분포에 기반한 비선형 최소자승법(NLS)으로 피팅되었으며, 이를 통해 도출된 Rylov 분산과 실측된 섬광 지수(Scintillation Index) 간의 관계를 검토하였다.

실험 결과, 로그노말 모델은 다양한 난기류 조건 하에서 수신 전력의 통계적 특성을 효과적으로 근사하였으며, Rylov 분산과 SI 간에도 이론적으로 예측 가능한 상관성을 보였다. 또한, Rylov 분산은 시간대와 기상 조건에 따라 뚜렷한 변화를 보였으며, 특히 정오 무렵 태양 복사에 의해 난기류가 극대화되는 현상이 관측되었다.

이러한 결과는 무선 광통신 시스템의 채널 모델링 및 성능 예측에 있어, 로그노말 기반 통계 모델의 실효성을 실험적으로 입증한 사례로서, 향후 FSO 시스템 설계 및 기후 대응 전략 수립에 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2021-II211810)

참 고 문 헌

- [1] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 19, no. 1, pp. 57–96, 2016.
- [2] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2013.
- [3] M. T. Dabiri, M. J. Saber, and S. M. S. Sadough, "On the performance of multiplexing FSO MIMO links in log-normal fading with pointing errors," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 9, no. 11, pp. 974–983, 2017.