

서울 지역의 대기 환경이 미치는 무선 광통신 성능 예측과 분석

오태인, 김종민, 고영채

고려대학교

<logan10, botboy0441, koyc>@korea.ac.kr

Predicting and Analyzing Free Space Optical Communication Performance Affected by Weather Conditions in Seoul

Tae-In Oh, Jong-Min Kim, Young-Chai Ko

Korea Univ.

요약

본 논문은 2022년 12월 1일부터 2023년 11월 29일까지 서울의 기상 데이터를 기반으로 대기 굴절률 상수를 계산하고, 이를 활용하여 무선 광통신의 비트 에러율(BER)을 예측하였다. 계절별로 분석한 결과, 정오에 가까워질수록 통신 성능이 감소하며, 특히 여름이 다른 계절에 비해 낮 시간이 길어져 통신 성능이 떨어지는 것을 확인하였다. 또한 무선 광통신의 성능은 온도가 낮아짐에 따라 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 이러한 연구 결과를 토대로, 무선 광통신의 대기 환경 변화에 따른 성능 특성을 파악하고 최적화 방안을 모색하는데 기여할 것으로 기대된다.

I. 서론

무선 광통신 (Free Space Optics, FSO)란 유선 광통신과 대조적으로 광 섬유를 사용하지 않고 자유 공간 (free space)을 통해 통신하는 기술이다. 무선 광통신은 RF 통신과 달리 비면허 주파수 대역을 이용하기 때문에 넓은 대역폭과 높은 채널 용량을 지니고 있다. 하지만 무선 광통신은 자유 공간(free space)을 통해 통신을 하기 때문에 통신 성능이 대기의 상태에 영향을 많이 받는다. 본 논문은 2022년 12월 1일부터 2023년 11월 29일까지 서울의 온도, 풍속, 습도를 한 시간 간격으로 수집하여 대기 환경 및 계절에 따른 무선 광통신의 성능을 분석하였다. 이 데이터들을 통해 이론적인 무선 광통신의 비트 에러율 (bit error rate, BER)을 계산하고 계절에 따른 차이를 비교하였다.

II. 본론

1. 대기 난기류에 의한 무선 광통신 BER

대기의 난기류로 인해 무선 광통신은 신틸레이션 (scintillation)을 경험하게 된다. 랜덤한 신틸레이션의 방해로 인해 수신단에서의 신호 감쇠가 발생한다. 이러한 신틸레이션의 강함 정도를 표현하는 기준으로 Rytov variance가 있으며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (1)$$

L 은 통신 거리이며 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 는 광학 파수(optical wavenumber)로 λ 는 레이저의 파장이다. C_n^2 은 대기 굴절률 상수로 BKB 모델에 따르면 아래와 같이 표현된다. [1]

$$C_n^2 = 3.8 \times 10^{-14} W + f(T) + f(W_s) + f(RH) - 5.3 \times 10^{-13} \quad (2)$$

이 때 W 는 태양이 대기에 미치는 영향을 고려한 계

수로, 일출 시간과 일몰시간에 의해 하루의 W 가 결정된다. 예를 들어 일출 시간이 05:37 이고 일몰 시간이 19:39 라고 한다면 이를 12 등분한 1:10의 간격을 기준으로 05:37~06:47에는 $W = 0.05$ 이고 06:47~07:57에는 $W = 1$ 로 주어진다. $f(T)$, $f(W_s)$, $f(RH)$ 는 각각 온도, 풍속, 상대습도에 관한 함수로 식 (3)~(5)와 같다.

$$f(T) = 2 \times 10^{-15} T \quad (3)$$

$$f(W_s) = -2.5 \times 10^{-15} W_s + 1.2 \times 10^{-15} W_s^2 - 8.5 \times 10^{-17} W_s^3 \quad (4)$$

$$f(RH) = -2.8 \times 10^{-15} RH + 2.9 \times 10^{-17} RH^2 - 1.1 \times 10^{-1} RH^3 \quad (5)$$

무선 광통신에 사용되는 레이저가 plane wave 라고 가정하면 대기의 방해가 없을 때 자유 공간에서 Z 축으로 거리 L 만큼 진행하는 레이저의 파동 방정식은 아래와 같다. [2]

$$U_0(r, L) = A_0(r) e^{i\phi_0(r) + ikL} \quad (6)$$

이 때 A_0 은 난기류가 없을 때 레이저의 진폭(amplitude)이고 ϕ_0 는 이 때의 위상(phase)이다. k 는 앞서 언급한 optical wavenumber 이다. 난기류에 의한 refractive index의 변화가 있을 때의 파동 방정식은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$U(r, L) = A(r) \exp[i\phi(r) + ikL] = U_0(r, z) \exp(\Phi) \quad (7)$$

이 때 $\Phi = \ln \left[\frac{A(r)}{A_0(r)} \right] + i[\phi(r) - \phi_0(r)] = \chi + iS$ 로 주어진다. χ 는 대기 난기류에 의한 log-amplitude fluctuation 이며 $\langle \chi^2 \rangle = \frac{1}{4} \sigma_R^2$ 이다. $A_i(r)$ 을 noise의 amplitude 라고 하면, $\chi = \ln \left[\frac{A(r)}{A_0(r)} \right] = \ln \left[\frac{A_0(r) + A_i(r)}{A_0(r)} \right]$ 이다.

무선 광통신의 신호 대 잡음 비 (signal to noise ratio) $SNR = \frac{I_0}{\langle I_i \rangle}$ 으로 주어지며, I_0 는 신호의

intensity 이고 $\langle I_i \rangle$ 는 noise 의 평균이다. $\frac{I_0}{\langle I_i \rangle} = \frac{\langle A_0^2(r) \rangle}{\langle A_i^2(r) \rangle}$ 를 만족하므로 SNR은 식 (8)과 같이 주어진다. [3]

$$SNR = \frac{1}{e^{\langle \chi^2 \rangle} - 1} = \frac{1}{e^{\sigma_R^2/4} - 1} \quad (8)$$

Non return-to-Zero On-Off keying (NRZ-OOK) 변조기법을 사용하는 무선 광통신의 BER 은 식 (9)와 같이 주어진다.

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2} \sqrt{SNR/2} \right) \quad (9)$$

2. 시뮬레이션 결과

수집한 일출, 일몰 시간을 활용해 계산한 W 와 기온, 풍속, 습도를 통해 σ_R^2 을 계산하고 이를 기반으로 식 (9)를 사용해 BER 을 도출한다. 그림 1 은 이를 통해 계절별로 시간에 따라 나타낸 BER 그래프와 전진 에러 수정 (FEC) 코딩의 기준치인 3.8×10^{-3} 이다. 사용한 파장 $\lambda = 1550.22 \text{ nm}$ 이며 통신거리 $L = 500 \text{ m}$ 이다.

결과적으로, 모든 계절에서 정오에 가까워질수록 통신 성능이 감소하며, 동일 시간대에서 성능 간 편차가 다른 시간대에 비해 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 일출 후 햇빛의 영향이 점차 증가함에 따라 C_n^2 이 증가하기 때문으로 보인다.

FEC 코딩 기준치를 넘은 아웃티지 상황은 각 계절별로 봄에는 5.2%, 여름에는 23.4%, 가을에는 6.1%, 겨울에는 0% 발생했다. 여름에 아웃티지가 가장 많이 발생한 이유로는 여름이 낮 시간이 가장 길고 온도가 높기 때문으로 보인다. 반면에 겨울은 낮 시간이 짧고 기온이 낮기 때문에 아웃티지가 발생하지 않은 것으로 보인다.

그림 2 는 식 (9)에 의해 계산된 BER 을 온도에 대해 나타낸 그래프이다. 이를 통해 온도가 낮을수록 무선 광통신의 통신 성능이 증가한다는 사실을 확인할 수 있다. 5

그림 1 과 그림 2 를 통해 시간과 대기 환경이 무선 광통신 성능에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 이를 활용해 대기 환경을 통해 무선 광통신의 아웃티지 가능성과 통신 성능을 미리 예측하고 이를 대비할 수 있다.

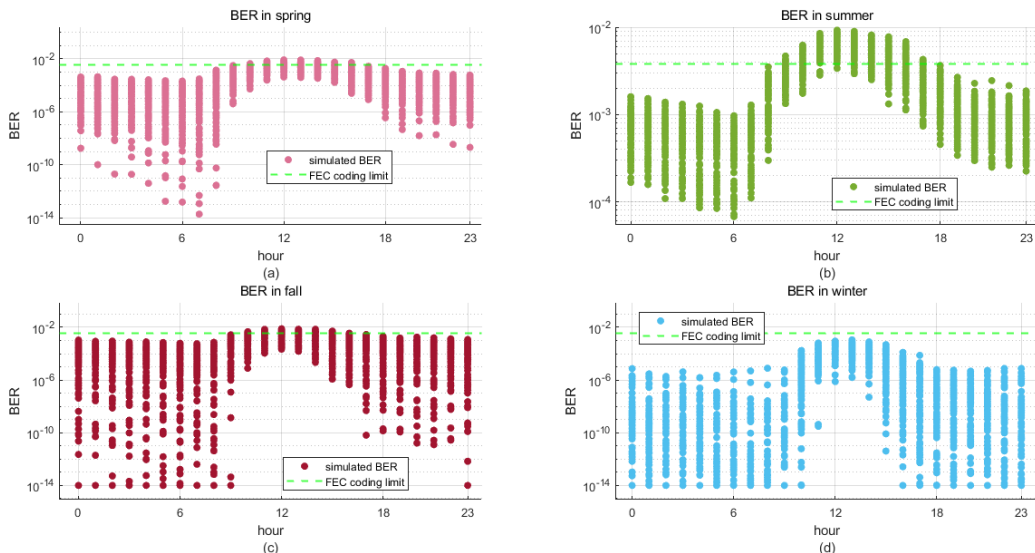


그림 1 (a)봄 (b)여름 (c)가을 (d)겨울의 시간에 따른 BER

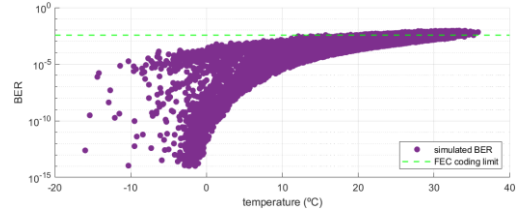


그림 2 온도에 따른 BER

III. 결론

본 논문은 2022 년 12 월 1 일부터 2023 년 11 월 29 일까지 기상 데이터를 수집해 대기 굴절률 상수를 계산하여 무선 광통신의 BER 을 예측하였다. 이를 통해 계절별로 무선 광통신의 시간에 따른 BER 성과 아웃티지 발생 횟수를 분석하였다. 하루 단위로 BER 을 보았을 때, 정오에 가까운 시간일수록 무선 광통신의 성능이 저조한 것을 확인할 수 있었다. 특히 여름의 경우 다른 계절에 비해 특히 저조한 것을 확인했다. 이러한 결과를 통해 대기 환경이 무선 광통신에 미치는 영향을 확인할 수 있었으며 추가적인 연구를 통해 대기 환경 변화에 따른 통신 시스템의 최적화 방안을 모색할 수 있는 것으로 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2024-2021-0-01810)

참 고 문 헌

- [1] S. Bendersky, N. S. Kopeika, and N. Blaunstein, "Atmospheric optical turbulence over land in middle east coastal environments: prediction modeling and measurements," *Appl. Opt.*, vol. 43, no. 20, pp. 4070–4079, 2004.
- [2] A. K. Majumdar, *Advanced Free Space Optics (FSO): A Systems Approach*, vol. 186. in Springer Series in Optical Sciences, vol. 186. New York, NY: Springer New York, 2015. doi: 10.1007/978-1-4939-0918-6.
- [3] G. Xu, X. Zhang, J. Wei, and X. Fu, "Influence of atmospheric turbulence on FSO link performance," in *Optical Transmission, Switching, and Subsystems*, SPIE, May 2004, pp. 816–823. doi: 10.1117/12.523470.