

대기 광 무선 LOS 통신링크에서 무중계 전송거리에 관한 연구

Repeaterless Transmission Length on the Atmospheric Wireless Optical LOS Communication Links

鄭 鎭 豪^{*}
(Jin-Ho Jung^{*})

요 약

대기 무선 광통신시스템은 레이저 광의 높은 지향 특성에 의해 저전력 통신이 가능하나, 대기공간을 전송채널로 사용하기 때문에 전송되는 광신호는 흡수, 산란, 교란 등의 대기효과에 의해 심각한 영향을 받는다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 대기효과를 고려하여 대기 광무선 LOS (line of sight) 통신링크의 링크방정식을 구한 후, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 무중계 전송거리를 구함으로써 시스템 성능을 평가하였다. 그 결과 주어진 데이터 전송율에서 무중계 전송 가능한 거리가 제시되었고, 주어진 비트 오류율에서 전송거리가 약간 증가함에 따라 데이터 전송율이 급격히 감소함을 알 수 있었다.

Abstract

In the atmospheric wireless optical communication system, the low power transmission can be accomplished by the high directivity of laser beam. But, the transmitted optical signal undergoes the serious influences by the atmospheric effects like absorption, scattering, and turbulence because the transmission channel is the atmospheric space. In this paper, therefore, we obtain the link equation for an atmospheric wireless optical LOS communication link under the atmospheric effects and find the repeaterless transmission length to estimate the system performance through the computer simulation. From the results of the computer simulation, we present the transmission length that is possible to transmit without a repeater at given data rates and know that data rate is decreased rapidly when the transmission length is increased slightly at given bit error rate.

I. 서론

미래의 통신은 전송할 정보의 양이 기하급수적으

로 증가될 것이며, 이러한 다량의 정보량을 지체없이 신속하게 처리하기 위해서는 가급적 많은 양의 정보를 신속, 정확하게 전송하여야만 할 것이다. 이를 위해서는 보다 넓은 대역폭과 다량의 정보를 초고속으로 전송할 수 있는 통신시스템이 필요할 것이다. 따라서, 이러한 통신시스템을 구축하기 위해서는 이미 포화상태에 도달한 현재의 주 전송매체인 마이크로파 보다는 대역폭이 넓은 레이저 광을 전송매체로 사용

* 湖西大學校 電氣電子制御工學部
(School of Electrical, Electronics, and Control and Instrumental Eng., Hoseo Univ.)

接受日: 1998년9월12일, 修正完了日: 1998년12월1일

하는 광통신시스템이 사용되어야만 한다[1].

광통신시스템은 유선 광통신 분야와 대기공간을 전송채널로 사용하는 무선 광통신 분야로 분류된다. 이들 중 유선 광통신 분야는 광 파이버를 이용하여 초고속 장거리 통신시스템이 이미 개발되어 LAN 망을 구축하여 실용화되었으나, 무선 광통신분야는 아직 미개척 분야라 할 수 있다. 특히, 무선 광통신시스템은 LAN 망을 구축하기 어려운 상황에서 이용될 수 있을 뿐만아니라 유사시 유선 광통신망의 보조시스템으로써 그 활용가치가 매우 높다고 할 수 있다. 또한, 유선 광통신망은 설치 및 유지관리, 보수에 막대한 자본과 시간이 소요되는 문제점을 가지고 있다[2].

대기를 전송채널로 사용하는 대기 무선 광통신시스템은 레이저 광의 높은 지향특성에 의해 저전력 통신이 가능하나, 대기 공간을 전송채널로 사용하기 때문에 흡수, 산란, 교란 등의 대기현상에 커다란 영향을 받는다[3]. 따라서, 본 논문에서는 이러한 대기현상의 영향하에서 근거리 대기 광 무선 LOS 통신링크의 링크방정식을 구하고 전송거리에 따른 성능을 평가하고자 한다.

II. 대기 효과

대기공간은 날씨상태와 대기조건에 따라 하루에도 매 시간마다 계속적으로 변하는 동적 채널이며, 이러한 대기공간을 통해 광신호가 전송될 때 광신호는 대기압력, 대기온도, 대기를 형성하고 있는 기체의 농도 등 대기채널의 상태에 따라 흡수, 교란, 산란 등의 영향을 동시에 받는다[3],[4].

2.1 흡수

대기공간을 통해 전파되는 광신호는 대기를 이루고 있는 분자들의 에너지 흡수에 의해 광신호의 에너지가 감소된다. 광은 파장대에 따라 다른 전송도를 가지므로 낮은 대기전송영역(absorption bands)을 피하고 높은 대기전송영역(atmospheric windows)을 갖는 파장대를 선택하면 흡수에 의한 광 에너지 손실을 줄일 수 있다[1],[4].

이때, i 번째 윈도우에서 흡수에 의한 전송도는 다음 식으로 표현될 수 있다[5][6].

$$\begin{aligned}\tau_{ai} &= \exp(-A_i \cdot W^{1/2}), & W < W_i \\ &= k_i \cdot \left(\frac{W_i}{W}\right), & W > W_i\end{aligned}\quad (1)$$

여기서,

$$W = 0.01 \cdot RH \cdot x \cdot R \times \exp(18.9766 - 14.9545 \cdot x - 2.4388 \cdot x^2) \quad (2)$$

이고, $x = 273 / T_A$, T_A 는 대기온도 [$^{\circ}\text{K}$], RH 는 상대습도 [%], R : 전송거리 [km] 이고, A_i , k_i , β_i , W_i 는 윈도우별 대기 흡수상수으로써 파장이 1.55 [μm]인 경우 순서대로 0.211, 0.802, 0.111, 1.1 이다 [5][6].

2.2 산란

산란현상은 대기를 구성하고 있는 분자상태의 입자에 의해 발생하는 Rayleigh 산란과 안개, 연무, 비 등 주로 광 파장에 비해 큰 입자에 의해 발생하는 Mie 산란으로 분류되며, 이러한 산란에 의한 광 전송도는 다음 식으로 표현될 수 있다[5].

$$\tau_{si} = \exp[-\beta_s(\lambda_i) \cdot R] \quad (3)$$

여기서, Rayleigh 산란 및 Mie 산란인 경우 파장별 $\beta_s(\lambda_i)$ 는 각각 다음 식과 같다[5][7][8].

$$\begin{aligned}\beta_s(\lambda_i) &= 1.16 \cdot 10^{-6} \left(\frac{0.55}{\lambda_i}\right)^4 \\ \beta_s(\lambda_i) &= \frac{3.91}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda_i}\right)^q\end{aligned}\quad (4)$$

여기서,

$$\begin{aligned}q &= 0.585 V^{1/3}, & V \leq 7 [\text{km}] \\ &= 6.583 \times 10^{-3} V + 1.07, & V > 7 [\text{km}]\end{aligned}$$

이고, V 는 가시도이다.

2.3 교란

태양에 의한 대기가열, 바람과 대류현상에 의한 공기의 와류에 의해 1~2 [$^{\circ}\text{C}$] 정도의 적은 온도변

화에 따라 대기공간의 공기 굴절율이 연속적으로 불규칙하게 변화되는 상태를 교란상태라 하며, 일반적으로 교란상태는 다음 식과 같이 대기 굴절을 구조함수 $Cn^2(h)$ 로 표시되며[8],[9], $10^{-13} [m^{-2/3}] \sim 10^{-17} [m^{-2/3}]$ 의 범위를 갖는다[3].

$$Cn^2(h) = 4.2 \times 10^{-14} \cdot h^{-1/3} \cdot \exp(-h/h_o) \quad (5)$$

여기서, h 는 고도이고, $h_o = 3200 [m]$ 이다.

이러한 상태를 광신호가 전파될 때 광신호는 진폭 및 위상의 불규칙한 변동으로 인해 다음 식으로 표현되는 공간 위상 가간섭거리에 영향을 미쳐 대기 무선 광통신시스템의 성능에 영향을 미치게 된다[5].

$$r_o^{-5/3} = 0.1587 k^2 Cn^2(h) R \quad (6)$$

III. 광 무선 LOS 통신링크

그림 1의 지상 대기 광 무선 LOS 통신링크[2]에서 광원으로부터 전송된 광신호는 대기공간을 통해 전송됨에 따라 대기의 영향을 받아 다음과 같은 전송 손실들이 발생한다.

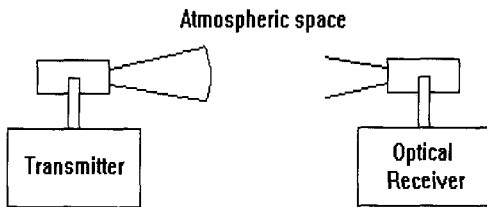


그림 1. 대기 광 무선 LOS 통신 링크

Fig. 1. Wireless optical LOS communication links in atmosphere.

3.1 자유공간 전송손실

광신호는 자유공간을 통해 전송될 때 전송거리 R 에 따라 다음 식으로 표현되는 자유공간 전송손실이 발생한다[10].

$$L_F = 10 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 [dB] \quad (7)$$

여기서, λ 는 광원의 파장이다.

3.2 포인팅 에러 손실

광신호가 대기공간을 통해 전송될 때 광신호의 빔은 빔폭이 확산되며, 그림 2에서처럼 수신기의 위치가 시정선으로부터 벗어날 때 다음 식과 같이 입사 광신호의 빔 포인팅 에러 손실이 발생한다[11].

$$L_P = 10 \log \left(\exp \left[- \left(\frac{2\phi_e(R)}{\phi_b} \right)^2 \right] \right) [dB] \quad (8)$$

여기서, $\phi_e(R)$ 은 포인팅 에러이고, ϕ_b 는 광의 빔폭으로 각각 다음 식으로 표현된다[11].

$$\phi_e(R) = \frac{\lambda}{2\sqrt{2} r_o(R)} [rad] \quad (9)$$

$$\phi_b = 1.27 \frac{\lambda}{d_t} [rad] \quad (10)$$

여기서, $r_o(R)$ 는 식 (6)으로 표현되는 공간가간섭거리이고, d_t 는 광 송신안테나 직경이다.

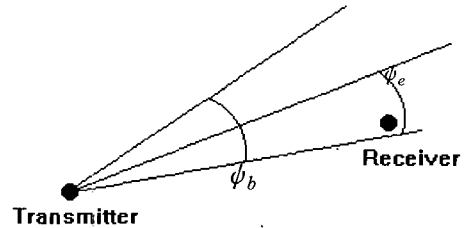


그림 2. 빔 폭과 포인팅 에러

Fig. 2. Beamwidth and pointing error.

3.3 대기 흡수 손실

대기현상 II-1에 의한 손실로써 전송손실은 다음 식으로 표현된다[5][6].

$$L_A = 10 \log (\tau_{ai}) [dB] \quad (11)$$

3.4 대기 산란 손실

대기현상 II-2에 의한 손실로써 전송손실은 다음 식으로 표현된다[5][8].

$$L_S = 10 \log (\tau_{si}) [dB] \quad (12)$$

3.5 대기 교란 손실

대기현상 II-3에 의한 손실로써 전송손실은 다음 식으로 표현된다[5][8][12].

$$L_T = 10 \log \left(\exp \left[-3.44 \left(\frac{\lambda \cdot \nu}{r_o(R)} \right)^{5/3} \right] \right) [dB] \quad (13)$$

여기서, $\nu = 0.6 \frac{d_r}{\lambda}$ 이고, d_r 은 광 수신안테나 직경이다.

3.6 파두면 손실

전송경로상에서 광학소자들의 광수차에 의해 발생하는 광손실로 다음 식으로 주어진다[10].

$$L_W = 10 \log \left(\exp \left[- \left(\frac{2\pi n}{\lambda} \right)^2 \right] \right) [dB] \quad (14)$$

여기서, $n = \lambda/5$ 이다.

그림 1의 지상 대기 광 무선 LOS 통신링크에서 광 송·수신안테나로 카세그레인 망원경을 사용하였을 때 광 송·수신안테나 이득은 각각 다음 식으로 표현된다[10][13].

$$G_T = 10 \log \left(\frac{4\pi A_t}{\lambda^2} g_T \right) [dB] \quad (15)$$

$$G_R = 10 \log \left(\frac{4\pi A_r}{\lambda} (1 - r^2) \right) [dB] \quad (16)$$

여기서, A_t 와 A_r 은 각각 송·수신 망원경의 유효 단면적이고, 차단비율 $r = b/a$ (a : 망원경의 1차 렌즈 반경, b : 망원경의 2차 렌즈 반경)이며, 송신 망원경 전송효율인자인 g_T 는 다음 식으로 주어진다[10][13].

$$g_T = \frac{2[\exp(-a^2) - \exp(-\gamma^2 a^2)]^2}{a^2} \quad (17)$$

여기서, $\alpha = 1.12 - 1.30 \gamma^2 + 2.12 \gamma^4$ 이다.

이상과 같이 대기공간 전송시 발생하는 이득과 손실들을 고려할 때 그림 1의 지상 대기 광 무선 LOS 통신링크에서의 링크방정식은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$P_R = 10 \log (P_t) + G_T + G_R + L_F + L_P + L_A + L_S + L_T + L_W - M [dB] \quad (18)$$

여기서, P_R 은 수신가능전력, P_t 는 레이저 송신전력, M 은 이득여유이다.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과 고찰

지상 대기 광 무선 LOS 통신링크에서 전송거리에 따른 시스템 성능을 분석하기 위해 본 논문에서는 광 FSK 변조방식과 광 헤테로다인 수신방식을 사용하였으며, 이 경우 신호 대 잡음비와 비트오류율은 각각 다음 식과 같다[10][11].

$$SNR = \frac{2\eta\lambda 10^{[0.1 P_R(R)]}}{h c R_b} \quad (19)$$

$$BER = \frac{1}{2} \exp \left[- \frac{SNR}{2} \right] \quad (20)$$

여기서, η 는 수신기 양자효율, h 는 Planck 상수, c 는 광속, R_b 는 데이터 전송율이다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 사용된 변수 및 변수값들은 표 1에, 결과들은 그림 3, 4, 5에 나타나 있다.

표 1. 컴퓨터 시뮬레이션 변수 및 변수값

Table 1. Parameters and their values for the computer simulation.

광원 파장	1.55[μ m]	광원 송신 전력	100[mW]
고도	100[m]	상대습도	5[%]
가시도	10[km]	양자효율	0.7
송·수신 망원경 직경	8[in]	송·수신 망원경 차단비율	0.3
BER	10^{-9}	시스템 마진	3 [dB]

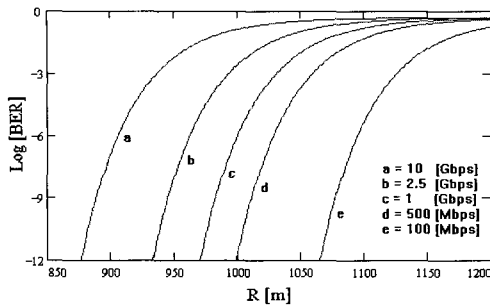


그림 3. 전송거리에 따른 비트오류율
Fig. 3. BER vs. transmission length.

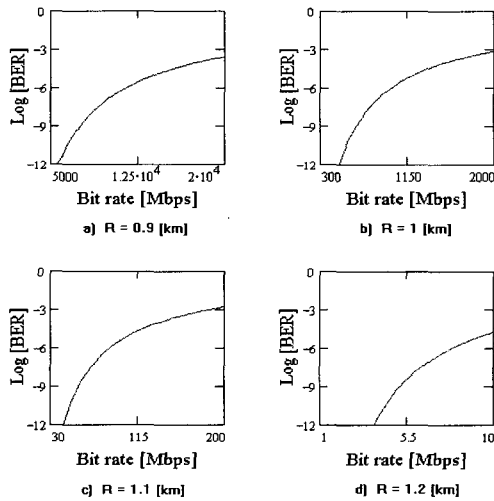


그림 4. 비트 전송율에 대한 비트오류율
Fig. 4. BER vs. bit rate.

컴퓨터 시뮬레이션 결과, 그림 3은 주어진 비트오류율에서 데이터 전송율이 감소할수록 전송거리가 얼마나 증가되는지를 나타내며, 그림 4는 전송거리의 증가에 따라 주어진 비트오류율을 만족하는 데이터 전송율을 나타내고, 그림 5는 비트오류율이 10^{-9} 일 때, 전송 거리에 따른 데이터 전송율을 나타낸다. 이들 결과로부터 원하는 비트오류율에서 전송거리가 약간 증가함에 따라 데이터 전송율이 급격히 감소하고, 주어진 데이터 전송율에서 전송 가능한 무중계 전송거리 알 수 있다.

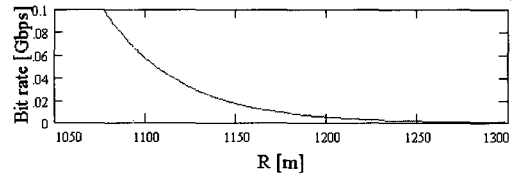
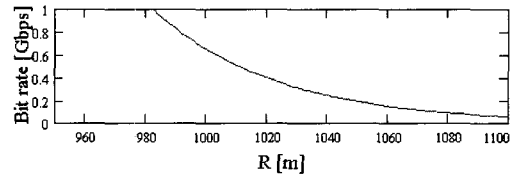
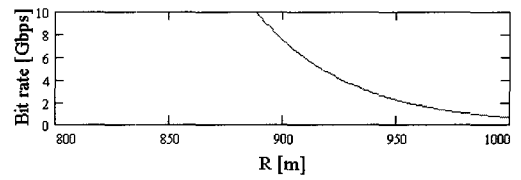


그림 5. 전송 거리에 따른 비트 전송율
Fig. 5. Bit rate vs. transmission length.

V. 결 론

본 논문에서는 광정보신호가 대기공간을 통해 전송될 때 겪게 되는 대기효과를 고찰하고, 이를 고려한 지상 대기 광 무선 LOS 통신링크를 모델링하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 정보 전송 거리에 따른 시스템 성능 평가에 대해 고찰하였다. 이를 위해 본 논문에서는 광원으로 파장 $1.55[\mu\text{m}]$, 송신전력 $100[\text{mW}]$ 인 범용 반도체 레이저를 사용하였고, 차단비율 $r = 0.3$ 인 $8[\text{in}]$ 직경의 광 카세그레인 안테나를 사용하였으며, 변조방식은 FSK 방식을 수신방식은 광 헤테로다인 방식을 사용하였다.

그 결과 원하는 비트오류율에서 전송거리가 약간 증가함에 따라 데이터 전송율이 급격히 감소하고, 주어진 데이터 전송율에서 전송 가능한 무중계 전송거리를 알 수 있었으며, 본 논문은 장차 광 무선 통신 시스템 구축시 설계 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] K. A. Winick, "Atmospheric Turbulence -Induced Signal Fades on Optical Heterodyne Communication Links," *Applied Opt.*, Vol. 25, pp.1817-1825, June 1986.
- [2] John R. Barry, *Wireless Infrared Communications*, Kluwer Academic Publishers, 1994
- [3] V. I. Tartarski, *Wave Propagation in a Turbulent Medium*, McGraw-Hill, 1961.
- [4] 한종석, 정진호, 김영권 "정지궤도 위성과 지구국 간 광통신 링크의 전송속도 해석," *Journal of IEEE Korea Council*, Vol. 1, No. 1, pp 120-137, 1977.
- [5] Gary Waldman and John Wootton, *Electro-Optical Systems Performance Modeling*, Artech House, 1993.
- [6] P. W. Kruse, L. D. McLaughlin, and R. B. McQuistan, *Elements of Infrared Technology*, John Wiley & Sons, New York, 1963.
- [7] Raymond M. Measures, *Laser Remote Sensing*, John Wiley & Sons, 1984.
- [8] K. Seyrafi and S. A. Hovanessian, *Introduction to Electro-Optical Imaging and Tracking Systems*, Artech House, 1993.
- [9] R. E. Hufnagel, and N. R. Stanley, "Modulation Transfer Function Associated with Image transmission through Turbulent media," *J. Opt. Soc. Amer.*, No. 54, 1964.
- [10] Stephen G. Lambert and William L. Casey, *Laser Communications in space*, Artech House, 1995.
- [11] Rober M. Grgliardi, Sherman Karp, *Optical Communications*, John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [12] Frederic G. Smith, *Atmospheric Propagation of Radiation*, SPIE Optical Eng. Press, 1993.
- [13] Morris Katzman. Ed, *Laser Satellite Communication*, Prentice-Hall, 1987.

— 저 자 소 개 —

鄭 鎮 豪 (正會員)

第1卷 第1號 論文 97-01-06 參照.

現在 湖西大學校 電氣電子制御工學部 副教授.