

교란대기 지상 광무선 통신에서 변조방식에 따른 패킷 오류율 비교

홍 권 의*

Packet Error Rate comparison of Different Modulation Formats over Terrestrial Optical Wireless Communication in Turbulent Atmosphere

Kwon-Eui Hong*

요 약

지상 광무선 통신에서 대기의 교란 및 대기 입자에 의한 광의 감쇄가 있을 때, 대기교란의 강도 및 가시도가 수신 광 강도에 미치는 영향을 해석하였다. 광신호는 On-Off Keying(OOK), Pulse Position Modulation(PPM) 및 Digital Pulse Interval Modulation(DPIM)의 방식으로 변조하였다. 교란대기 하에서 각 변조방식에 대해 광 전송 거리에 따른 광수신 전력을 계산하고 이를 이용하여 전송거리에 따른 패킷 오류율(packet error rate: PER)을 계산하였다. 광신호를 전송하기 위한 광원의 파장은 850nm, 1310nm 및 1550nm를 선택하였다. 대기는 약 교란 상태로 가정하여 대기 굴절률 구조상수 $Cn_2 \approx 10\text{-}14\text{m-}2/3$, 대기의 가시도 $V=2\text{km}$ 로 하였다. 약교란 대기 상태에서 세 가지 변조방식 중 DPIM 방식이 우수하며, 광 신호의 전송을 위한 파장으로는 1550nm가 PER 성능이 우수함을 알 수 있었다.

Key Words : terrestrial OWC, atmospheric turbulence, optical wavelength, OOK, PPM, DPIM

ABSTRACT

In the terrestrial optical wireless communication(OWC), the performance is affected by atmospheric turbulence and particles in the air. The received signal power loss mainly is caused by turbulence and scattering. To minimize the adverse atmospheric effects, the OWC used optical signal modulation, such as OOK, PPM and DPIM. In this paper, the packet error rate(PER) was analyzed above three modulation methods to ground optical link in atmospheric turbulence, scattering and link distance. The OWC system used three wavelengths which are 850nm, 1310nm and 1550nm. I assumed the atmospheric turbulence intensity is weak, so the refractive index is $Cn_2 \approx 10\text{-}14\text{m-}2/3$ and the visibility is 2km. The numerical results shown that the L-DPIM scheme and the wavelength 1550nm are better than other modulation methods and wavelengths.

I. 서 론

보통신 수요의 급속한 증가에 따라 통신망 대역폭의 확대와 통신흐름의 향상이 주요한 문제로 대두되

고 있다. 통신의 시스템은 초고주파를 주로 이용하는 무선통신, 광을 신호원으로 하는 광섬유가 유선통신 시스템에 사용되고 있다. 초고주파를 이용하는 통신에서 사용하는 대역폭이 포화상태에 이르고 있으며,

* 본 연구는 2014년도 김포대학교의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

• First Author : Kimpo College Department of Information and Telecommunication, kehong@kimpo.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2014-10-328, Received October 1, 2014; Revised November 12, 2014; Accepted November 12, 2014

광섬유를 이용한 유선통신 시스템은 새로운 통신 수요를 충족하기 위해 통신선로를 포설하는데 큰 비용이 소요되는 어려운 점이 있다. 이에 비하여 광무선 통신 시스템은 초고주파 시스템의 대역폭 제한 및 사용료 문제가 없으며, 또한 광섬유를 이용하는 통신 시스템에 비하여 설치비용이 저렴하여 기존 시스템의 대안으로 대두되고 있다. 특히 광섬유 통신의 종단문제(last mile problem)를 해결하기 위한 방법으로 광무선 통신 시스템이 주목 받고 있다. 광무선통신은 유선 통신망의 보조 및 근거리 통신 시스템으로 이용되고 있다^{1,2}. 대기를 통한 광무선통신은 대기의한 광 에너지의 흡수, 대기의 부유 입자에 의한 산란과 대기의 굴절률이 불규칙하게 변동하여 발생하는 대기교란에 의해 광 에너지의 감쇄가 발생한다. 근거리 광무선 통신은 눈의 안전을 고려한 광의 세기 제한이 따르게 된다. 이러한 대기 광무선 통신 시스템의 대기에 의한 불리한 조건 및 광 전력의 제한을 극복하기 위해서는 적절한 광신호의 변조가 필요하다.

대기를 통한 광통신의 파장대역은 가시광선영역과 적외선 영역으로 구분할 수 있다^{3,4}. 본 논문에서는 적외선 파장영역의 광원에 대해 대기의 상태에 따른 수신 전력을 해석해보고 이러한 대기상태에 따라 광신호의 OOK, PPM 및 DPIM 변조방식에 대한 패킷 오류율(packet error rate)을 광의 전송거리 및 파장에 따라 해석한다.

II. 지상 교란 대기에서 수신 광전력

지상 광무선 통신 시스템에서 광 펄스는 대기를 채널로 하여 전파된다. 대기를 통하여 전파되는 광은 전송 거리에 따른 광의 감쇄, 대기의 부유 입자에 의한 감쇄 및 대기의 교란에 의한 감쇄 등 다양한 요인에 의해 감쇄가 발생한다. 광 링크 거리 Z와 광파장 λ에 따른 전송손실 L_{prop} 는 다음과 같다⁵.

$$L_{prop}dB = 10 \log \left(\frac{4\pi Z}{\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

대기교란은 대기의 온도차에 의해 대기의 굴절률이 변동하여 발생하며, 대기교란의 세기에 따라 약 교란 및 강교란 상태로 구분한다. 대기교란의 세기는 σ^2 로 나타내며 이 값이 1 이상인 경우는 강교란 상태이고, 1보다 작으면 약 교란 상태이다. 본 논문에서는 약 교란 하에서의 광무선 통신만을 고려한다.

약 교란대기를 통하여 광신호가 전파될 때, 대기교

란(atmospheric turbulence)의해 발생하는 교란 손실 L_{turb} 는 Andrew 모델을 이용할 때 다음과 같다⁶,

$$L_{turb}dB = 10 \cdot \log \left(1 - \sqrt{\sigma_I^2} \right) \quad (2)$$

위의 식에서 대기교란 강도 σ^2 는 다음 식으로 정의된다⁷.

$$\sigma_I^2 = 0.546 C_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^7 Z^{\frac{11}{6}} \quad (3)$$

식 (3)에서 C_n^2 는 대기굴절률 구조상수이다. C_n^2 의 강교란 시의 값은 $10^{-12} \sim 10^{-13} [m^{-2/3}]$ 의 범위를 갖으며, 약 교란에서는 $10^{-14} [m^{-2/3}]$ 보다 작은 값을 갖는다. 광무선 통신 링크에서 광전송 따른 손실 L_{go} 은 광학적 송신기에서 빔의 발산 각(θ), 광의 전송거리(Z), 그리고 수신기 개구면적(D_{rx})을 이용하여 다음 식으로 구해진다^{8,9}.

$$L_{go}dB = 10 \log \left(\frac{\theta Z}{D_{rx}} \right)^2 \quad (4)$$

근적외선 및 가시광선 파장에 대한 가시도 V(visibility/km)에 따른 광의 손실계수 β 는 실험적인 Kruse 공식을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다^{2,6}.

$$\beta dB/km = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550 \times 10^{-9}} \right)^{-0.585 (V)^{\frac{1}{3}}} \quad (5)$$

가시도의 값은 아주 맑은 날 50km 이상, 맑은 날은 18.1km 이상이며 이슬비가 0.25mm/h인 경우이다. 맑은 연무가 있는 날의 가시도는 5.9km이고 약간의 비가 2.5mm/h로 내리는 날이다. 연무가 있는 경우의 가시도는 2.8km이며 12.5mm/h의 강수가 있다. 얼은 안개가 있는 날의 가시도는 1.9km이며 비가 25mm/h로 내린다. 본 논문의 대기 환경은 얼은 안개가 있는 환경으로 설정하였으며, 가시도V를 2km로 설정하였다. 가시도와 파장 및 전송거리 Z에 따른 감쇄 τ 는 다음 식으로 구해진다¹⁰.

$$\tau dB = 4.34 \beta \frac{Z}{1000} \quad (6)$$

RF시스템의 송신 및 수신 안테나의 이득에서와 같

이 광무선 통신 시스템에서는 광송신을 위해 렌즈를 이용한 안테나와 광수신을 위한 광학계가 존재하여, 광 송신측의 렌즈 직경을 $D_{tx}[m]$ 수신측의 렌즈 직경이 $D_{rx}[m]$ 일 때 송신 안테나의 이득은 식(7), 수신안테나의 이득은 식(8)과 같이 구할 수 있다^[11].

$$G_{tx}dB = 10 \log \left(\frac{\pi D_{tx}}{\lambda} \right)^2 \quad (7)$$

$$G_{rx}dB = 10 \log \left(\frac{4\pi \left(\frac{D_{rx}}{2} \right)^2}{\lambda^2} \right) \quad (8)$$

전송거리에 따른 총 손실은 식 (2)~(6)으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$L_TdB = -L_{prop}dB - L_{turb}dB - L_{path}dB - \tau dB \quad (9)$$

광학계 안테나의 총 이득 식(7)과 (8)로 부터 다음과 같이 구해진다.

$$G_TdB = G_{tx}dB + G_{rx}dB \quad (10)$$

송신 광전력이 P_{TdBW} 이면 거리에 따른 광 수신전력은 $P_{RdBW} = P_{TdBW} + L_TdB + G_TdB$ 로 구해진다.

III. 변조방식에 따른 PER

광무선 통신에서는 Intensity Modulation/ Direct Detection(IM/DD) 방식이 송신 및 수신 시스템을 구축하기 쉽기 때문에 주로 사용되고 있다. 교란대기 및 대기의 부유물에 의한 가시도가 수신 광전력에 영향을 미치는 상태에서 광무선 통신 위한 변조 방식으로 OOK 방식과 L-PPM 및 L-DPIM 방식 및 다양한 변조방식이 이용되고 있다^[12]. 본 논문에서는 OOK 방식과 L-PPM 및 L-DPIM 방식을 이용한 지상 광 무선 통신의 성능을 비교 분석 한다. 그림 1에서 변조에 사용한 신호의 형태를 보여준다. 그림 1에서 데이터 비트, 심벌 구간, OOK, 16-PPM과 16-DPIM의 심벌의 형태를 보여준다. L-DPIM 신호는 1개의 보호 슬롯을 이용한다. 이는 데이터 비트 '0'을 반복하여 수신하는 경우 펄스 패턴을 구분하여 연속적으로 심벌의 슬롯에 펄스가 연속해서 나타나는 것을 방지한다. DPIM에서 첫 슬롯의 펄스를 기준으로 동기를 맞추게 된다.

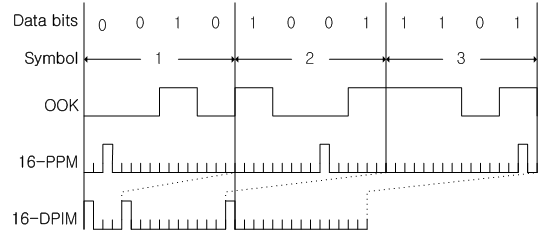


그림 1. 데이터 비트와 전송되는 심벌 OOK, 16-PPM과 16-DPIM

Fig. 1. Mapping of data bits to transmitted symbols for OOK, 16-PPM and 16DPIM

3.1 OOK 방식의 변조

광신호의 송수신에서 오류의 확률을 최소화하기 위해서는 광신호 수신기에서 수신 신호전력과 잡음전력에 따른 최적의 문턱 값을 정해야 한다. 그러나 광 신호전력과 잡음전력을 정확하게 측정하는 것이 어렵기 때문에 '1'과 '0'의 분포에서 문턱 값을 '0'과 '1' 사이에 고정된 값을 이용한다^[13]. 신호에서 '1'과 '0'이 동등하게 발생하여 대칭적 확률밀도를 갖는다고 하면, 수신 장치에서 문턱 값은 '1'과 '0'의 사이의 중앙에 위치하게 된다. OOK 신호의 수신에서 '1'을 송신하였을 때 '0'으로 수신하는 확률이 P_{01} 이고, '0'을 송신하였을 때 '1'로 수신할 확률을 P_{10} 이라하면 비트오류를 BER_{ook}는 식 (11)과 같다^[14].

$$BER_{ook} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{R_p R \sqrt{BW_{ook}}}{\sqrt{2qRP_B}} \right) \quad (11)$$

여기서 R_p 는 광 링크의 거리가 Z 일 때 수신되는 평균 광 수신전력이며, R_b 가 OOK 신호의 비트율일 때 대역폭 $BW_{ook} = R_b$ 이며, R 은 광 수신소자의 응답도, q 는 전자의 전하량이고 P_B 는 평균 배경잡음전력이다. 문턱 값을 신호가 수신되는 순간 '1'과 '0'의 중간 값으로 하는 경우 패킷 오류율은 식 (12)와 같다^[15]. 식 (12)에서 L_p 는 패킷의 길이 이다.

$$PER_{ook} = 1 - ((1 - P_{1/0})(1 - P_{0/1}))^{L_p/2} \quad (12)$$

3.2 펄스위치변조

펄스위치변조는 전력효율이 OOK 방식 보다 좋아 광무선 통신에서 쓰이고 있다. 그림 1에서와 같이, L-PPM 심벌은 슬롯에 하나의 펄스와 L-1의 빈 슬롯으로 구성된다. 펄스위치변조 방식은 각각의 광 펄스가 정보비트를 포함하는 주기에서 심벌의 시작점으로부터 상대적 위치로 데이터 비트 정보를 나타내는데

사용된다. 펄스위치변조는 광통신에 대한 IEEE 802.11의 적외선 물리계층의 표준으로 적용되고 있다^[16]. 그림 1에서 펄스위치변조는 데이터의 ‘M’ 비트를 ‘L=2^M’의 광학적 펄드로 전송한다. 여기서 ‘L’은 PPM에서 데이터의 ‘M’비트 정보에 대한 가능한 펄스의 위치다. 문턱 값 탐지를 이용한 수신기에서 P₀₁은 정확한 펄스가 수신되지 않았을 확률이고, P₁₀는 빈 슬롯이어야 하는데 슬롯에 ‘1’이 수신되었을 때 확률이다. 두 오류의 확률이 같다고 가정하면, 샘플링 시간에서 문턱 값을 수신된 PPM 신호 진폭의 반으로 하는 경우 슬롯 오류율(slot error rate) SLR_{ppm}은 식 (13)과 같다^[17,18].

$$SLR_{ppm} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{L R_P R \sqrt{BW_{ppm}}}{4 \sqrt{2qRP_B}} \right] \quad (13)$$

식 (13)의 PPM 변조방식에서의 슬롯 오류율은 OOK변조 방식과 같은 비트율을 갖기 위해 식 (11)의 BW_{ook}는 BW_{ppm}= L · R_b/log₂^L로 계산된다^[19]. 식 (13)으로부터, 문턱 값을 사용하는 PPM시스템의 심벌 오류율(symbol error rate) SER_{ppm}은 식 (14)와 같다^[16].

$$SER_{ppm} = 1 - \left[\frac{1}{L} P_{01} (1 - P_{10})^{L-1} + \sum_{n=1}^L \frac{1}{n} (1 - P_{01}) P_{10}^{n-1} (1 - P_{10})^{L-n} \right] \quad (14)$$

식 (14)에서 대괄호의 첫째항은 펄스가 검출되지 않고 슬롯 안에 펄스가 임의로 부여된 펄스가 정확한 슬롯에 있을 확률이다. 두 번째 항에서 n=1인 경우는 슬롯에서 펄스가 정확한 위치에 있으며 다른 펄스가 슬롯 안에 없을 확률이다. n>1 인 경우는 정확한 펄스와 n-1개의 부정확한 펄스가 검출되어 검출된 펄스들로부터 정확한 펄스가 선택된 경우이다. PPM에서 P₀₁=P₁₀으로 같고 심벌 오류율이 식 (14)와 같을 때 패킷 오류율 PER_{ppm}은 식 (15)와 같다^[15]. 식(15)에서 L_p는 패킷의 길이를 나타낸다.

$$PER_{ppm} = 1 - (1 - SER_{ppm})^{L_p/M} \quad (15)$$

3.3 디지털 펄스 간격 변조

DPIM 방식에서는 그림 1에서와 같이 펄스는 심벌의 시작을 나타내는데 사용된다. 시작 펄스 바로 다음의 슬롯에는 비어있는 보호 슬롯이 따라온다. 정확한

심벌을 수신하기 위해서는 펄스 다음의 슬롯은 전부 ‘0’으로 채워진다. 심벌의 길이가 가변적이기 때문에 심벌의 길이가 증가하면 심벌 오류율이 높아진다. DPIM 방식에서는 PPM 방식과는 달리 최대 심벌 길이에서 하나 이상의 펄스가 수신된 경우는 또 다른 심벌이 있는 것으로 판단된다. 문턱 값을 이용하는 DPIM 시스템에서 P₀₁와 P₁₀의 확률이 같고 문턱 값을 신호의 샘플링 순간에 펄스 진폭의 반으로 하는 경우 DPIM 변조 방식에서 슬롯 오류율 SER_{dpim}은 식 (16)과 같다^[20].

$$SER_{dpim} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{L_{dpim} R_P R \sqrt{BW_{DPIM}}}{2 \sqrt{2qRP_B}} \right] \quad (16)$$

식 (16)식의 DPIM 변조방식에서의 슬롯 오류율에 서 OOK변조 방식과 같은 비트율을 갖기 위해 식(11)의 BW_{ook}는 BW_{DPIM}=(L+3)R_b/2log₂^L로 대체되며, 식 (13)에서 심벌의 폭은 DPIM 변조 방식에서는 평균 심벌 폭 L_{dpim}은 (L+3)/2으로 해야한다^[21]. DPIM 방식에서 식 (16)으로 P₀₁과 P₁₀의 확률이 주어지면 DPIM의 패킷 오류율은 다음 식으로 계산할 수 있다. 식(17)에서 N=(2M+2n+1)/2이며 DPIM에서 심벌당 평균 슬롯의 수이며, n은 그림 1의 DPIM에서와 같이 가드 슬롯의 갯수다^[15].

$$PER_{DPIM} = 1 - (1 - P_{0/1})^{L_p/M} (1 - P_{1/0})^{(N-n-1)L_p/M} \quad (17)$$

IV. 수치해석

광무선 통신에서 대기의 교란, 대기의 산란입자 분포, 광학계의 구조, 통신에서 사용하는 광의 파장 등이 수신되는 광의 세기에 영향을 준다. 광통신에서 대기의 광전송도가 가시광보다 높은 적외선 파장대역을 사용하며 전기적으로 광의 변조가 편리한 적외선 다이오드 레이저를 사용한다. 광섬유를 이용하는 광통신에서는 파장이 850nm, 1310nm, 1550nm의 광을 주로 사용하며, 이러한 파장의 광을 이용하는 무선통신에 대하여 수치해석을 한다. 광무선 통신 위해 수신 광학계로 광 카세그리안 형태의 수신기를 사용하는 경우 수신광을 더 수신할 수 있으나 크기가 크며 구성비용이 비싸다. 그러므로 구조가 간단한 갈릴리안 형태의 광학계를 사용한다. 송신광학계의 렌즈 직경은 0.1m, 수신광학계의 직경은 0.2m로 한다. 광 전송거리는 건물과 건물 사이, 유선 광통신 시스템의 중단으로부터

수요자까지의 거리를 감안하여 최대 2.5km로 설정한다. 대기 부유물에 의한 광의 감쇄는 ‘미들턴’의 정의에 따른 기상학적 가시도를 이용하여 수신광의 세기 계산 시 적용하였으며 가시도 V는 2km로 하였다. 광수신에는 광신호 이외에 주위의 광이 수신되며 이로 인해 배경잡음(background noise) 발생한다. 수신되는 배경 잡음 전력은 10nW로 설정하였다. 광수신소자로는 사용되는 것은 APD(avalanche photo diode) 또는 PIN 다이오드를 사용하는데, 본 논문에서는 PIN 다이오드를 사용하는 것으로 하였고, PIN 다이오드의 응답도(responsivity)는 0.5A/W로 하였다. 전송광의 전력은 10mW, 송신되는 광신호의 비트율 R_b는 1Gbps로 하였다. 광통신의 변조방식으로는 OOK, L-PPM, L-DPIM의 방식을 사용한다.

이러한 조건에서 광의 파장 및 변조방식 및 전송 거리에 따른 비트오류율의 수치 해석하였다.

4.1 광 전송거리 및 파장에 따른 OOK 방식 시스템의 비트오류율

대기의 교란 상태는 대기 굴절률 구조상수 C_n² ≈ 10⁻¹⁴m^{-2/3}, 대기의 가시도 V=2km인 약 교란 대기에 의한 광의 감쇄에서 변조방식을 OOK 방식을 취하여 광신호를 전송하였을 때 거리에 따른 PER은 그림 2와 같다. 패킷의 길이 L_p는 1024 비트로 하였다. 그림 2에서 광파장이 긴 1550nm 및 1310nm파장의 광이 850nm보다 전송 거리에 따른 성능이 좋음을 알 수 있다.

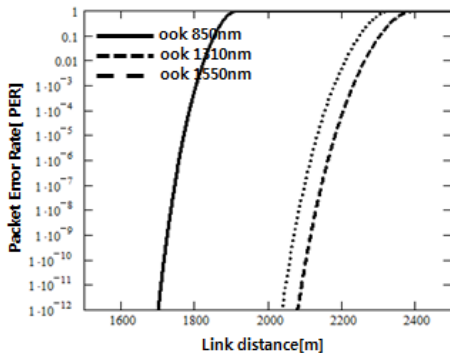


그림 2. OOK 변조 시스템에서 광파장 및 대한 전송거리에 따른 패킷 오류율.
Fig. 2. Packet error rate for OOK modulation and Link distance.

4.2 L-PPM에서 광파장 및 전송거리에 따른 패킷 오류율(PER)

대기의 교란 상태는 대기 굴절률 구조상수 C_n² ≈ 10⁻¹⁴m^{-2/3}, 대기의 가시도 V=2km인 대기 상태에서 광

의 파장 및 전송 거리에 따른 PER은 그림 3, 4 및 5와 같다. 패킷의 길이는 1024 비트로 하였을 때, 그림 3는 L=4인 PPM과 OOK 신호에 대한 광의 파장 850nm, 1310nm 및 1550nm인 광을 사용하였을 때 패킷 오류율 보여준다. 그림 4은 L=8인 PPM과 OOK 신호에 대한 광의 파장 850nm, 1310nm 및 1550nm인 광을 사용하였을 때 패킷 오류율 보여준다. 그림 5는 L=16인 PPM과 OOK 신호에 대한 광의 파장 850nm, 1310nm 및 1550nm인 광을 사용하였을 때 패킷 오류율을 보여준다. 그림 3, 4 및 5에서 PPM 변조와 OOK 변조 방식의 전송거리에 따른 PER을 비교해 보았다. PPM PER 그림에서와 같이 L=4의 OOK방식이 파장별로 PPM 방식보다 PER 성능이 우수하다. L=8의 경우는 PPM의 PER 성능이 OOK의 PER 보다 약간 우수하다. L=16의 경우가 PPM이 OOK보다 PER 성능이 우수함을 보여준다.

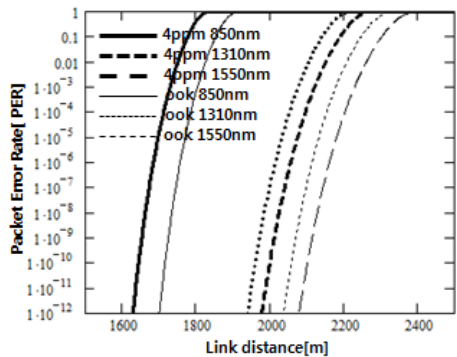


그림 3. λ=850nm, 1310nm, 1550nm에 대한 4-PPM 과 OOK 방식의 PER 비교
Fig. 3. 4-PPM and OOK PER for λ=850nm, 1310nm and 1550nm.

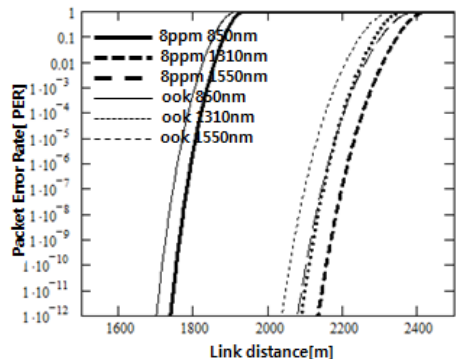


그림 4. λ=850nm, 1310nm, 1550nm에 대한 8-PPM과 OOK 방식의 PER 비교
Fig. 4. 8-PPM and OOK PER for λ=850nm, 1310nm and 1550nm.

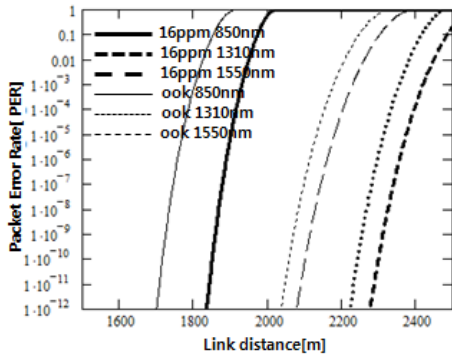


그림 5. $\lambda=850\text{nm}$, 1310nm , 1550nm 에 대한 16-PPM과 OOK 방식의 PER 비교
Fig. 5. 16PPM and OOK PER for $\lambda=850\text{nm}$, 1310nm and 1550nm .

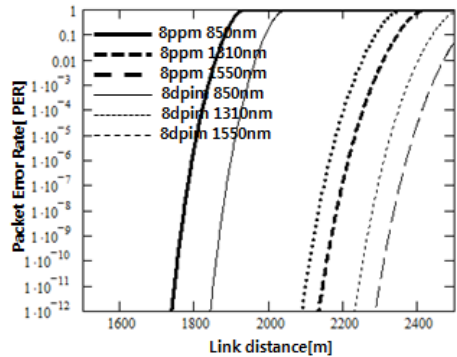


그림 7. $\lambda=850\text{nm}$, 1310nm , 1550nm 에 대한 8-DPIM과 8-PPM 방식의 PER 비교
Fig. 7. 8-DPIM and 8-PPM PER for $\lambda=850\text{nm}$, 1310nm and 1550nm .

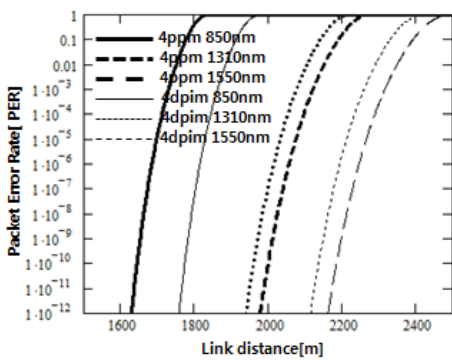


그림 6. $\lambda=850\text{nm}$, 1310nm , 1550nm 에 대한 4-DPIM과 4-PPM 방식의 PER 비교
Fig. 6. 4-DPIM and 4-PPM PER for $\lambda=850\text{nm}$, 1310nm and 1550nm .

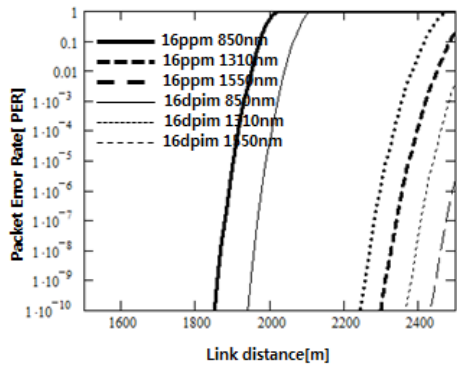


그림 8. $\lambda=850\text{nm}$, 1310nm , 1550nm 에 대한 16-DPIM과 16-PPM 방식의 PER 비교
Fig. 8. 16-DPIM and 16-PPM PER for $\lambda=850\text{nm}$, 1310nm and 1550nm .

V. 결 론

본 논문에서는 교란대기를 통한 대기광무선통신에서 대기의 상태에 따른 광신호의 감쇄를 광파장 850nm, 1310nm 및 1550nm에 대하여 대기교란 강도 및 가시도를 통하여 구하였다.

광신호는 디지털 광강도 변조 중 OOK, L-PPM 및 L-DPIM에 대하여 광전송거리에 따라 패킷 오류율 (PER)을 구하였으며, L-PPM과 L-DPIM은 심벌에서 표본된 신호의 '0'과 '1'을 판단하기 위해 문턱 값을 고정된 값을 취하여 결정하였으며 패킷의 길이는 1024비트로 하였다. 그림 2에서는 대기의 교란 상태는 대기 굴절률 구조상수 $C_n^2 \approx 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$, 대기의 가시도 $V=2\text{km}$ 인 약 교란 대기에 의한 광의 감쇄에서 변조방식을 OOK, 방식을 취하여 광신호를 전송하였을 때 거리에 따른 PER보여주며 광파장 1550nm가 가장

효율적임을 보인다.

그림 3, 4 및 5에서 $L=4$ 인 경우는 광의 파장에 관계없이 OOK 방식이 성능이 PPM 보다 좋음을 보여 주고 있다. 그러나 $L=8$ 에서는 OOK 방식과 PPM 방식의 PER이 전송거리에 따라 PER의 차이가 없으나 $L=16$ 인 경우에 PPM 방식의 PER 성능이 좋으며, 또한 광파장 1550nm의 PER이 우수함을 볼 수 있다.

그림 6, 7 및 8에서 L-PPM과 L-DPIM의 전송거리 및 파장에 대한 PER을 보여주고 있다. 그림 6, 7 및 8에서는 L-DPIM 방식이 L-PPM 방식보다 성능이 우수하다.

그림 2에서 그림 8까지 변조방식, 광파장 및 광 전송거리에 따른 PER의 성능을 비교하였다. 비교 결과 위의 세가지 변조방식에서 L-DPIM이 우수하며, 광 전송을 위한 광원의 파장으로는 1550nm가 적합함을 알 수 있었다.

향 후 이론적으로 연구된 광변조 및 광과장에 대한 해석을 구현할 수 있는 시스템을 설계하여 실험적으로 검증하는 작업이 필요할 것이다. 또한 대기의 교란 강도 측정 및 PER을 동시에 측정할 수 있는 시스템의 설계가 필요하다.

References

- [1] H. Henniger and O. Wilfert, "An introduction to free-space optical communications," *Radioengineering*, vol. 19, no. 2, pp. 203-212, Jun. 2010.
- [2] R. Srinivasan and D. Sridharan, "The climate effects on line of sight (LOS) in FSO communication," *2010 IEEE Int. Conf. Computat. Intell. Comput. Res.*, <http://www.itfrindia.org/ICCCIC>
- [3] T.-H. Yeom, S.-M. Park, H.-I. Kwon, D.-K. Hwang, and J. Kim, "A smart farming system based on visible light communications," *J. KICS*, vol. 38C, no. 5, pp. 479-485, May 2013.
- [4] Y. Cheng and S.-H. Hwang, "Subcarrier intensity modulation-spatial modulation for optical wireless communications," *J. KICS*, vol. 38A, no. 12, pp. 1086-1093, Dec. 2013.
- [5] H. Manor and S. Arnon, "Performance of an optical wireless communication system as a function of wavelength," *Applied Optics*, vol. 42, no. 21, pp. 4285-4294, 2003.
- [6] Z. Kolka, O. Wilfert, and V. Biolkova, "Reliability of digital FSO links in Europe," *Int. J. Electrical, Robotics, Electron. Commun. Eng.*, vol. 1 no. 10, pp. 1494-1497, 2007.
- [7] L. Dordová and O. Wilfert, "Calculation and comparison of turbulence attenuation by different methods," *Radioengineering*, vol. 19, no. 1, pp. 162-167, Apr. 2010.
- [8] Z. Ghassemlooy and W. Popoola, Oyewole, "Terrestrial free-space optical communications," *Terrestrial Free-Space Optical Commun., In: Mobile and Wirel. Commun. Netw. Layer and Circuit Level Design*, Intech, ISBN 978-953-307-042-1 pp. 355-390, 2010.
- [9] S. Arnon, S. R. Rotman, and N. S. Kopeika, "Performance limitations of free-space optical communication satellite networks due to vibrations: direct detection digital mode," *Opt. Eng.*, vol. 36, no. 11, pp. 3148-3157, Nov. 1997.
- [10] Z. Hajjarian, J. Fadlullah, and M. Kavehrad, "MIMO free space optical communications in turbid and turbulent atmosphere (invited paper)," *J. Commun.*, vol. 4, no. 8, pp. 524-532, Sept. 2009.
- [11] S. Arnon, "Optical wireless communications," *Encyclopedia of Optical Eng.*, pp. 1866-1886, 2003.
- [12] D. Kwon, S. Yang, H. Kim, Y. Son, and S. Han "Performance improvement for visible light communications using pre-equalizer and optical design," *J. KICS*, vol. 39, no. 6, Jun. 2013.
- [13] M. I. Petković, G. T. Đorđević, and D. N. Milić, "BER Performance of IM/DD FSO system with OOK using APD Receiver," *Radioengineering*, vol. 23, no. 1, pp. 480- 487, Apr. 2014.
- [14] G. A. Mahdiraji and E. Zahedi, "Comparison of selected digital modulation schemes (OOK, PPM and DPIM) for wireless optical communications," *Research and Development*, pp. 5-10, 2006.
- [15] Y. Jiang, K. Tao, Y. Song, and S. Fu, "Packet error rate analysis of OOK, DPIM, and PPM modulation schemes for ground-to-satellite laser uplink communications," *Applied Optics*, vol. 53, no. 7, pp. 1268-1273, 2014.
- [16] N. A. Mohammed, M. R. Abaza, and M. H. Aly, "Improved performance of M-ary PPM in different free-space optical channels due to reed solomon code using APD," *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 1-4, Apr. 2011.
- [17] A. R. Hayes, Z. Ghassemlooy, and N. L. Seed, "Optical wireless communication using digital pulse interval modulation," in *Proc. SPIE 3532, Optical Wirel. Commun.*, 61, Jan. 27, 1999.
- [18] D. K. Borah, A. C. Boucouvalas, C. C. Davis, S. Hranilovic, and K. Yiannopoulos, "A

review of communication-oriented optical wireless systems,” *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*,” Mar. 2012, <http://jwcn.eurasipjournals.com>

- [19] G. Yan and W Min, “Performance research of modulation for optical wireless communication,” in *Proc. 3rd Int. Symp. Comput. Sci. Computat. Technol.(ISCST '10)*, pp. 357-360, Aug. 2010.
- [20] F. J. Mendieta, “Advanced trends in wireless communications,” ch.16, ‘*Trends of the Optical Wirel. Commun.*,’ InTech, pp. 303-326, Feb. 2011.
- [21] Z. Ghassemlooy, A. R. Hayes, N. L. Seed, and E. D. Kaluarachchi, “Digital pulse interval modulation for optical communications,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 12, Dec. 1998.

홍 권 의 (Kwon-Eui Hong)



1983년 2월: 건국대학교 전자공학과 졸업
1985년 2월: 건국대학교 전자공학과 석사
1997년 2월: 건국대학교 전자공학과 공학박사
1997년 3월~현재: 김포대학교수
<관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학