

네거티브 지수 대기 난기류 채널이 고려된 시공간 블록 코딩 기반 자유 공간 광학 통신 시스템의 닫힌 형태의 비트 오류율 근사식 유도

정 성 아*, 이 후 진^o

A Closed-Form Approximate BER Expression for Space-Time Block Coding in Free-Space Optical Systems over Negative Exponential Atmospheric Turbulence Channels

Seongah Jeong*, Hoojin Lee^o

요 약

본 논문에서는 강한 대기 난기류 환경 하에서 피크 대 평균 광출력 비율 (PAOPR: Peak-to-Average Optical Power Ratio)의 증가로 오류 성능 향상을 가능케 하는 시공간 블록 코딩 (STBC: Space-Time Block Coding) 온 오프 키잉 (OOK: On-Off Keying) 송신 방식이 적용된 자유 공간 광학 (FSO: Free-Space Optical) 시스템에 대한 평균 비트 오류율 (BER: Bit Error Rate)의 새롭고 효율적인 닫힌 형태의 근사식을 유도하고, 높은 신호 대비 잡음 비 (Signal-to-Noise-Ratio: SNR) 상황에서의 점근적 분석을 수행한다. 본 논문에서 도출된 성능 분석의 정확성은 다양한 시뮬레이션을 통해 검증되었고, 이를 통해 시공간 블록 코딩이 활용되는 다양한 실제 통신 환경에서 달성 가능한 다이버시티 차수(diversity order) 및 코딩 이득(coding gain)에 대한 통찰력을 제공하고자 한다.

Key Words : free-space optical system, space-time block coding, atmospheric turbulence channel, negative exponential channel, bit error rate

ABSTRACT

In this paper, we derive a novel and effective approximate expression of bit error rate (BER) for space-time block coded (STBC) on-off keying (OOK) in free-space optical (FSO) systems, which is known to improve the BER performance with the increase of peak-to-average optical power ratio (PAOPR), especially over strong atmospheric turbulence channels. By using the derived BER formula, the corresponding asymptotic analysis on the BER in high signal-to-noise ratio (SNR) regime is also explored, the accuracy of which is verified via several numerical results. This further allows us to obtain the explicit insights on the achievable diversity order and coding gain.

* 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1G1A100626011).

* 본 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원과제임.

• First Author : Kyungpook National University, School of Electronics Engineering, seongah@knu.ac.kr, 정희원

◦ Corresponding Author : Hansung University, Division of IT Convergence Engineering, hjlee@hansung.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202101-011-A-RU, Received January 11, 2021; Revised January 18, 2021; Accepted January 23, 2021

I. 서 론

자유 공간 광학 (FSO: Free-Space Optical) 시스템은 기존 라이선스가 없는 광학 매체를 기반으로 넓은 대역폭을 사용할 수 있고, 설치가 용이하다는 장점 덕분에, 현재 무선 통신 분야에서 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻⁴⁾. 하지만, 실제 통신 환경에서 대기 난기류에 의한 페이딩 (fading)과 신틸레이션 (scintillation)으로 인한 성능 저하 문제로 자유 공간 광학 시스템 도입에 어려움을 겪고 있다. 이에 대한 해결책으로 시공간 블록 코딩 (STBC: Space-Time Block Coding) 기법이 많은 관심을 받고 있다^{3,5)}.

본 논문에서는 강한 대기 난기류 환경에서 시공간 블록 코딩이 적용된 자유 공간 광학 시스템의 오류 성능을 분석한다. 더 자세히는, 송신 신호의 complement를 이용하여 알라무티 코드 (Alamouti code)^{3, 4)}를 변형한 시공간 블록 코딩 온오프 키잉 (OOK: On-Off Keying) 방식을 고려한다. 이는 피크 대 평균 광출력 비율 (PAOPR: Peak-to-Average Optical Power Ratio)을 증가시켜 자유 공간 광학 시스템의 오류 성능을 향상케 한다. 비트 오류율을 적분 형태로 표현하였던 이전 연구³⁾와 다르게, 본 논문에서는 비트 오류율에 대한 닫힌 형태의 정확한 근사식을 도출하고, 분석된 비트 오류율을 기반으로 높은 신호 대비 잡음 비 상황에서의 점근적 분석을 수행한다. 시뮬레이션을 통해, 본 논문에서 제안된 비트 오류율에 대한 닫힌 형태의 수식의 정확도를 검증하고, 이를 통해 실제 통신 환경에서 달성 가능한 코딩 이득 (coding gain) 및 다이버시티 차수 (diversity order)에 대한 이해력을 향상시킨다.

II. 시공간 블록 코딩 기반 자유 공간 광학 시스템

이 장에서는 본 논문에서 고려하는 시공간 블록 코딩 기반 자유 공간 광학 시스템에 대해 간략히 소개하도록 하겠다. 본 논문에서 고려하는 자유 공간 광학 시스템은 마이크로파 시스템의 안테나 어레이와 비슷하게 광학 어레이를 사용하여 페이딩 효과에 강인한 통신을 가능케 한다. 더 자세히는, 강도가 변조된 (intensity-modulated) L 개의 레이저 소스 (laser sources)를 기반으로 한 어레이를 가정한다. 이 때, 레이저 소스는 모두 M 개의 광 검출기 (photodetectors)를 향하게 설치되어 있고, 광 검출기는 이상적으로 noncoherent (direct-detection) 수신기로 가정한다. 또한, 모든 레이저 소스가 각 검출기와 원활히 통신할

수 있도록 물리적으로 송수신기가 잘 배치되어 있다고 가정한다. 레이저 소스와 검출기 사이의 페이딩은 통계적으로 독립적이라고 (statistically independent) 가정한다. 입력 데이터는 서로 다른 펄스로 구성된 시공간 블록 코딩 온오프 키잉 형태로 송신된다. 본 논문에서는 고성능 저가적 시스템을 지향하는 IM/DD (Intensity Modulation/Direct Detection) 방식의 광 무선 통신 시스템을 고려한다.

검출기 j 에서 수신된 광 파워 (optical power)는 아래와 같다.

$$Y_{ji}(t) = I_{ji}(t)X_i(t) + N_{ji}(t). \quad (1)$$

수식 (1)에서, $X_i(t)$ 는 레이저 소스 i 에서 공급된 광 파워를 나타내고, $I_{ji}(t)$ 는 소스 i 와 검출기 j 간 신틸레이션을 의미하며, $N_{ji}(t)$ 는 앰비언트 라이트 (ambient light)로 발생한 샷 잡음 (shot noise)과 수신기에서 발생하는 열 잡음 (thermal noise)을 모두 포함하는 잡음신호를 나타낸다. 이 때, 라이트는 검출기 j 에서 수신 신호보다 훨씬 강하다고 가정한다. 이러한 경우, 잡음 $N_{ji}(t)$ 는 평균이 0이고 분산이 $N_0/2$ 인 Additive White Gaussian Noise (AWGN)으로 모델링될 수 있고, 수신된 비트의 온오프 상태에 모두 독립적이다²⁾. 이러한 방식으로, 강한 대기 난기류 (strong turbulence atmospheric) 채널 모델 또한 채널 조도 상수 (channel irradiances) $I_{ji}(t)_{1 \leq i \leq L, 1 \leq j \leq M}$ 가 곱해진 광신호의 형태로 구성된 다수 개의 잡음 채널 모델로 형성된다. 최악의 강한 대기 난기류 환경을 고려한다면, i.i.d (independently and identically distributed) 채널 조도 상수는 네거티브 지수 모델 (negative exponential model)로 가정할 수 있으며, probability density function (pdf)는 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$p_I(I) = \frac{1}{\bar{I}} \exp\left(-\frac{I}{\bar{I}}\right), I \geq 0 \quad (2)$$

수식 (2)에서 \bar{I} 는 평균 대기 신틸레이션을 의미한다. 이 때, 채널은 주파수 비선택적 지수 페이딩 (frequency-nonselctive exponential fading)으로 고려하고, 채널 이득은 코드워드 기간 동안 변하지 않는다고 가정한다.

본 논문에서는 시공간 블록 코딩 온오프 키잉 기법³⁾을 고려한다. 감소된 듀티 사이클과 펄스 형태에 구

애받지 않는 시공간 블록 코딩 온오프 키잉 기법은 송신 신호의 complement를 이용하여 알라무티 코드 (Alamouti code)^[4]를 변형한 방식이다. 여기서, complement는 신호의 파형이 반대가 되는 것을 의미하는 것으로써, 온/오프 상태가 바뀌는 것을 의미한다. 감소된 듀티 사이클로 인해, 피크 대 평균 광출력 비율을 증가시켜 오류 성능 효과 개선을 얻을 수 있다. 본 논문은 시공간 블록 코딩 방식을 광신호에 적용하여, OOK를 위한 새로운 기저 함수 (basis function) $\phi(t) = g(t)/\sqrt{E_g}$ 를 고려한다. 이 때, $g(t)$ 는 비트 기간 동안 non-negative constraint ($0 \leq g(t) \leq 1$)를 만족하는 정규화된 (normalized) 펄스를 나타내고, 펄스 에너지는 $E_g = \int_{-\infty}^{\infty} g^2(t)dt$ 이다. 이 때, 비부호화 광 강도 (uncoded optical intensity)는 다음과 같이 계산된다.

$$X(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \frac{T_b P}{p(a_k G(\omega=0))} g(t - kT_b) \quad (3)$$

수식 (3)에서 $G(\omega=0)$ 은 $\omega=0$ 일 때의 $g(t)$ 의 푸리에 변환을 나타내고, T_b 는 한 비트의 길이이며, probability mass function (pmf) $p(a_k)$ 를 가지는 랜덤 변수 a_k 는 비트 0을 나타낼 때는 0 값을 가지고 (off pulse), 비트 1을 나타낼 때는 1 값을 가진다 (on pulse). 이러한 펄스 성격 때문에, 수식 (3)의 정의를 통해 평균 전송 광 파워는 P 이고, 콘스틀레이션 (constellation) C 는 $p(a_k) = 1/2$ 를 가지는 비부호화 OOK 포맷으로 정의된다. 이 때, 1차원상에서의 두 점 사이의 거리, 즉 유클리드 거리 (Euclidean distance)는 아래와 같이 정의된다.

$$d = \frac{2PT_b\sqrt{E_g}}{G(\omega=0)} = 2P\sqrt{T_b\xi} \quad (4)$$

수식 (4)에서, $\xi = T_b E_g / G^2(\omega=0)$ 은 높은 PAOPR에서 직각 펄스 대신 새로운 펄스 사용으로 인해 발생된 유클리드 거리 증가량의 제곱 값을 나타낸다. 광무선통신시스템에서 펄스 형태 제약 없이 시공간 블록 코딩 온오프 키잉 기법을 사용하기 위해서, 신호 x_i 의 complement는 $\bar{x}_i = -x_i + d\phi(t)$ 로 정의한다^[4].

III. 비트 오류율 분석

이번 장에서는 전 장에서 소개된 시공간 블록 코딩 온오프 키잉 방법이 적용된 자유 공간 광학 시스템의 비트 오류율을 분석한다. 먼저, 비트 오류율에 대한 닫힌 형태의 정확한 근사식을 유도하고, 높은 신호 대 잡음 비 상황에서의 점근적 분석을 수행하도록 하겠다.

3.1 닫힌 형태의 비트 오류율 근사식 유도

여기서 고려하는 시공간 블록 코딩은 모든 레이트와 모든 다이버시티 차수를 사용하는 real orthogonal 디자인 기반의 송신 행렬을 고려한다. L 개의 레이저 소스로 구성된 어레이와 M 개의 광 검출기로 구성된 어레이를 고려하고, 모든 레이저 소스는 광 검출기를 향하고 있다고 가정한다. 이 때, 다이버시티 차수는 LM 이고, 조건부 비트 오류율은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} P_b(E | I_{j_i}^2) &= Q \left(\sqrt{\frac{d^2}{2N_0} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^L I_{j_i}^2} \right) \\ &= Q \left(\sqrt{\xi \frac{\bar{\gamma}}{LM} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^L I_{j_i}^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

수식 (5)에서 $Q(\cdot)$ 는 Gaussian-Q 함수를 나타내고, 마지막 수식은 수식 (4)의 유클리드 거리를 이용하여 정리된다. 또한, 난기류가 존재할 때의 전체 평균 수신 신호 대 잡음 스펙트럼 밀도 비 (SNR: signal-to-noise spectral density ratio) $\bar{\gamma}$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\bar{\gamma} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^L \frac{P^2 T_b}{L^2 N_0} \bar{I}_{j_i}^2 \quad (6)$$

Gaussian-Q 함수의 alternative 형태^[6]와 채널 조도 상수의 통계적 독립성을 활용하여, 수식 (5)에서 채널 조도 상수의 pdf에 대하여 평균을 취하면 아래와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} P_b(E) &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} \frac{1}{\pi} \\ &\times \int_0^{\pi/2} \prod_{j=1}^M \prod_{i=1}^L \left[\exp \left(\frac{\xi \bar{\gamma} I_{j_i}^2}{2LM \sin^2 \theta} \right) p_{I_{j_i}}(I_{j_i}) \right] \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} D(\theta, \bar{\gamma}, \xi) L^M d\theta \end{aligned} \quad (7)$$

수식 (7)에서 피적분 함수들은 모두 적분 가능하기 때문에 피적분 함수들의 순서가 바뀌어도 상관없다. 따라서, 인덱스 ji 끼리 그룹을 지어 수식 (8)의 $D(\theta, \bar{\gamma}, \xi)$ 을 사용하여 정리할 수 있다.

$$D(\theta, \bar{\gamma}, \xi) = \int_0^\infty \exp\left(\frac{\xi \bar{\gamma} I^2}{2LM \sin^2 \theta}\right) p_I(I) dI \quad (8)$$

수식 (7)의 $D(\theta, \bar{\gamma}, \xi)$ 을 계산하여 정리하면 다음과 같다.

$$P_b(E) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left[\sqrt{\pi} \sqrt{\frac{\alpha \sin^2 \theta}{2\bar{\gamma}}} e^{\frac{\alpha \sin^2 \theta}{2\bar{\gamma}}} 2Q\left(\sqrt{\frac{\alpha \sin^2 \theta}{\bar{\gamma}}}\right) \right]^{LM} d\theta \quad (9)$$

$$= \pi^{\frac{LM}{2}-1} \left(\frac{2\alpha}{\bar{\gamma}}\right)^{\frac{LM}{2}} \times \int_0^{\pi/2} \left[\sin \theta e^{\frac{\alpha \sin^2 \theta}{2\bar{\gamma}}} Q\left(\sqrt{\frac{\alpha}{\bar{\gamma}}} \sin \theta\right) \right]^{LM} d\theta$$

수식 (9)에서 $\alpha = \frac{LM}{\xi \bar{I}^2}$ 이다. 이 때, $\eta = \sin \theta$ 치환을 사용하여 수식 (10)과 같이 재정리할 수 있다.

$$P_b(E) = \pi^{\frac{LM}{2}-1} \left(\frac{2\alpha}{\bar{\gamma}}\right)^{\frac{LM}{2}} \times \int_0^1 \eta^{LM} e^{\frac{LM\alpha}{2\bar{\gamma}} \eta^2} Q^{LM}\left(\sqrt{\frac{\alpha}{\bar{\gamma}}} \eta\right) \frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}} d\eta \quad (10)$$

이 때, Gaussian-Q 함수의 지수승은 수식 (11)과 같이 계산될 수 있다⁷⁾. 수식 (11)에서, $A=1.98$ 이고, $B=1.135$ 이다.

$$Q^n(x) \approx \frac{1}{2^{\frac{n}{2}}} \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (-1)^{n-k} \times e^{-A(n-k) \frac{x}{\sqrt{2}}} \frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{(B\sqrt{\pi} x)^n} \quad (11)$$

따라서, 수식 (11)을 활용하여, 수식 (10)을 계산하게 되면, 최종적으로 닫힌 형태의 비트 오류율 근사식을 도출할 수 있다.

$$P_b(E) = \frac{1}{\pi B^{LM}} \sum_{k=0}^{LM} \binom{LM}{k} (-1)^{LM-k} \times \int_0^1 \frac{e^{-A(LM-k) \sqrt{\frac{\alpha}{2\bar{\gamma}}} \eta}}{\sqrt{1-\eta^2}} d\eta \quad (12)$$

$$= \frac{1}{2B^{LM}} \sum_{k=0}^{LM} \binom{LM}{k} (-1)^{LM-k} \times \left[I_0\left(A(LM-k) \sqrt{\frac{\alpha}{2\bar{\gamma}}}\right) - L_0\left(A(LM-k) \sqrt{\frac{\alpha}{2\bar{\gamma}}}\right) \right]$$

수식 (12)에서 $I_0(\cdot)$ 는 제 1종 modified Bessel 함수를 나타내고, $L_0(\cdot)$ 는 modified struve 함수이다.

3.2 높은 신호 대비 잡음 비 상황에서의 점근적 비트 오류율 분석

이번 장에서는 높은 신호대 잡음 비 상황에서의 점근적 비트 오류율 분석을 통해, 시공간 블록 코딩의 코딩 이득 및 다이버시티 차수에 대한 이해를 돕는다.

먼저, 점근적 분석을 위해 모멘트 생성 함수 (MGF: Moment Generating Function)를 활용한다. 더 자세히는 네거티브 지수 채널 모델 환경에서의 모멘트 생성 함수 기반 비트 오류율 분석을 수행한다. 네거티브 지수 모델의 대기 난기류 환경의 채널 조도 상수는 수식 (2)에서 정의된 pdf에 따라, 모멘트 생성 함수가 다음과 같이 정의된다⁸⁾.

$$M_U(s) = \sqrt{\frac{\pi}{4s \bar{I}^2}} \exp\left(\frac{1}{4s \bar{I}^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{1}{4s \bar{I}^2}}\right) \quad (13)$$

$$= \sqrt{\frac{\pi}{s \bar{I}^2}} \exp\left(\frac{1}{4s \bar{I}^2}\right) Q\left(\sqrt{\frac{1}{2s \bar{I}^2}}\right)$$

수식 (13)에서 $U = I^2$ 을 나타내고, $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-z^2) dz$ 로 정의되는 complementary error 함수이다. 모멘트 생성 함수 정의에 따라, 수식 (8)에서의 $D(\theta, \bar{\gamma}, \xi)$ 를 수식 (14)와 같이 모멘트 생성 함수로 표현할 수 있다.

$$D(\theta, \bar{\gamma}, \xi) = M_U\left(\frac{\xi \bar{\gamma}}{2LM \sin^2 \theta}\right) \quad (14)$$

이 때, 상수 β 에 대해, 모멘트 생성 함수의 극한은 $\lim_{s \rightarrow \infty} M_U(\beta s) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\beta \bar{I}^2}} \sqrt{\frac{1}{s}}$ 과 같은 성질을 가진다.

이러한 성질을 수식 (14)에 활용하면, 높은 신호대 잡음 비 상황에서의 점근적 비트 오류율을 수식 (15)과 같이 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_b^\infty(E) &= \lim_{\gamma \rightarrow \infty} P_b(E) \\
 &= \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left(M_U \left(\frac{\xi \bar{\gamma}}{2LM \sin^2 \theta} \right) \right)^{LM} d\theta \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left(\lim_{\gamma \rightarrow \infty} M_U \left(\frac{\xi \bar{\gamma}}{2LM \sin^2 \theta} \right) \right)^{LM} d\theta \quad (15) \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi 2LM \sin^2 \theta}{\xi \bar{\gamma}^2}} \sqrt{\frac{1}{\gamma}} \right)^{LM} d\theta \\
 &= \pi^{\frac{LM}{2}-1} \left(\frac{LM}{2\xi \bar{\gamma}^2} \right)^{\frac{LM}{2}} \left(\frac{1}{\gamma} \right)^{\frac{LM}{2}} \int_0^{\pi/2} (\sin \theta)^{LM} d\theta
 \end{aligned}$$

수식 (15)에서, 적분값은 아래 수식 (16)과 같이 정리될 수 있다.

$$\int_0^{\pi/2} (\sin \theta)^{LM} d\theta = \frac{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{LM+1}{2}\right)}{2\Gamma\left(\frac{LM}{2}+1\right)} \quad (16)$$

따라서, 높은 신호대 잡음 비 상황에서의 점근적 비트 오류율 $P_b^\infty(E)$ 는 다음과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned}
 P_b^\infty(E) &= \pi^{\frac{LM-1}{2}} \Gamma\left(\frac{LM+1}{2}\right) \left(\frac{LM}{2\xi \bar{\gamma}^2} \right)^{\frac{LM}{2}} \left(\frac{1}{\gamma} \right)^{\frac{LM}{2}} \quad (17) \\
 &= \frac{\pi^{\frac{LM-1}{2}} \Gamma\left(\frac{LM+1}{2}\right)}{2\Gamma\left(\frac{LM}{2}+1\right)} \left(\frac{LM}{2\xi \bar{\gamma}^2} \right)^{\frac{LM}{2}} \left(\frac{1}{\gamma} \right)^{\frac{LM}{2}}
 \end{aligned}$$

수식 (17)에서 보는 바와 같이, 평균 비트 오류율은 $1/\bar{\gamma}^{LM/2}$ 에 따라 점근적으로 변화하는 것을 알 수 있으며, 다이버시티 차수는 $LM/2$ 인 것을 확인할 수 있다. 특히, 비트 오류 성능은 $10\log_{10}\xi$ 의 증가에 따라 향상된다. 즉 신호의 펄스 형태의 영향을 받는다. 따라서, 비트 오류율을 향상시키기 위해서는, 높은 피크 대 평균 광출력 비율의 펄스를 사용해야 한다. 예를 들어, $0 < \kappa \leq 1$ 일 때 너비가 κT_b 인 직각 펄스 (rectangular pulse)의 경우, $\xi = 1/\kappa$ 이 되고, 너비가 κT_b 이고 $\sigma = \kappa T_b/8$ 인 가우시안 펄스 (Gaussian pulse)의 경우 ($g(t) = \exp(-t^2/(2\sigma^2))$), $\xi = 4/\kappa \sqrt{\pi}$ 가 되어 동일한 펄스 너비더라도 오류 성

능은 다른 것을 확인할 수 있다.

IV. 모의 실험 및 결과

이 장에서는 본 논문에서 제안된 시공간 블록 코딩 기반 자유 공간 광학 시스템의 단편 형태의 비트 오류율 수식과 점근적 분석을 실험을 통해 확인한다. 먼저, 제안된 수식 (12)에서의 단편 형태의 비트 오류율 근사식 $P_b(E)$ 은 비트 오류율 정의에 따라 적분 형태로 표현된 정확한 수식 (7)과 비교하여 정확도를 확인한다. 또한, 점근적 분석인 수식 (17)의 $P_b^\infty(E)$ 는 신호 대 잡음 비 증가에 따라, 수식 (7)과 수식 (12)과의 비교를 통해, 정확도를 확인한다. 본 실험에서는 레이저 소스 $L=1, 2, 4$ 개로 구성된 어레이와 광 검출기 $M=1, 2$ 개로 구성된 어레이를 고려한다. 평균 채널 조도 상수 $\bar{\gamma}=1$ 로 가정하였고, $\kappa=1$ 인 직각 펄스와 $\kappa=0.5$ 인 가우시안 펄스를 고려한다.

그림 1과 그림 2에서 모두 확인할 수 있듯이, 비트 오류율 정의를 표현한 수식 (7)과 본 논문에서 제안한 단편 형태의 비트 오류율 근사 수식 (12)가 잘 근사하는 것을 확인할 수 있고, 이를 통해 분석한 오류 성능 값의 높은 정확성을 증명하였다. 또한, 신호 대 잡음 비가 증가함에 따라 점근적 근사값인 수식 (17)가 수식 (7)과 수식 (12)에 근접함을 알 수 있고, 신호 대 잡음비가 30 dB 이상에서는 근사값이 굉장히 정확함을 확인하였다. 더 나아가, 오류율 성능 곡선 기울기의 느린 변화를 통해 알 수 있듯이, 강한 대기 난기류 환경에서 페이딩을 제거하기 위해 전력을 증가시키는

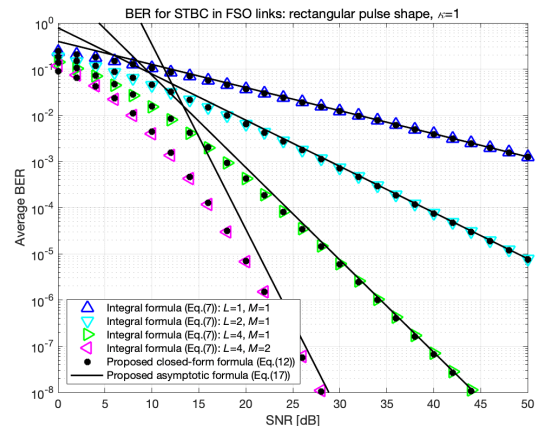


그림 1. 강한 대기 난기류 환경 하, 직각 펄스가 적용된 시공간 블록 코딩 기반 자유 공간 광학 시스템의 비트 오류율 Fig. 1. Average BER for STBC FSO links with rectangular pulse shape

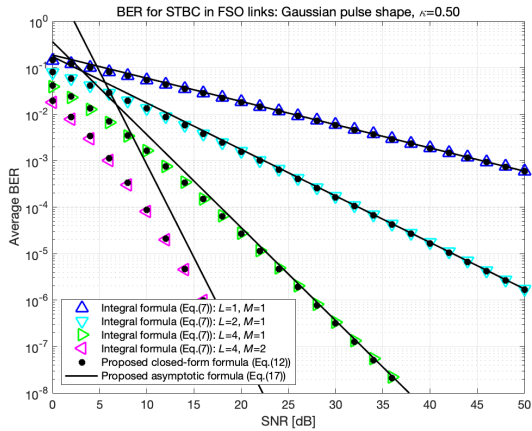


그림 2. 강한 대기 난기류 환경 하, 가우시안 펄스가 적용된 시공간 블록 코딩 기반 자유 공간 광학 시스템의 비트 오류율
 Fig. 2. Average BER for STBC FSO links with Gaussian pulse shape

것은 실용적이지 않다는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 강한 대기 난기류 환경에서 시공간 블록 코딩 기반 자유 공간 광학 시스템의 비트 오류율에 대한 닫힌 형태의 효율적인 근사 수식을 유도하고 점근적 근사값을 수학적으로 분석하였다. 제안된 비트 오류 성능 수식 및 분석은 장황한 시뮬레이션을 요구하지 않음과 동시에 높은 신뢰성을 제공한다. 더 나아가, 실제 통신 환경에서 자유 공간 광학 시스템이 제공 가능한 코딩 이득과 다이버시티 차수에 대한 이해도를 증가시킨다.

References

[1] H. Park, "BER analysis of coherent free-space optical systems with pulsed noise jamming," *J. KICS*, vol. 41, no. 3, pp. 304-306, Mar. 2016.
 [2] X. Zhu and J. M. Kahn, "Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 8, pp. 1293-1300, Aug. 2002.
 [3] A. Garcia-Zambrana, "Error rate performance for STBC in free-space optical communications through strong atmospheric turbulence," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 11, no. 5, pp. 390-392, May 2007.

[4] M. Simon and V. Vlnrotter, "Alamouti-type space-time coding for free space optical communication with direct detection," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, no. 1, pp. 35-39, Jan. 2005.
 [5] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 45, no. 5, pp. 1456-1467, Jul. 1999.
 [6] J. W. Craig, "A new, simple and exact result for calculating the probability of error for two-dimensional signal constellations," in *Proc. IEEE MILCOM*, pp. 25.5.1-25.5.5, Nov. 1991.
 [7] J. S. Dyer and S. A. Dyer, "Corrections to, and comments on, "An improved approximation for the Gaussian Q-function," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 4, p. 231, Apr. 2008.
 [8] X. Song and J. Cheng, "Subcarrier intensity modulated optical wireless communications using noncoherent and differentially coherent modulations," *J. Lightwave Tech.*, vol. 31, no. 12, pp. 1906-1913, May 2013.

정성아 (Seongah Jeong)



2010년 2월: 한국과학기술원 정보통신공학과 졸업
 2012년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석사 졸업
 2015년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 박사 졸업
 2015년 9월~2016년 2월: 한국과학기술원 정보전자연구소 박사후 연구원
 2016년 3월~2017년 8월: Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences 박사후 연구원
 2017년 9월~2019년 8월: Samsung Research 책임 연구원
 2019년 9월~현재: 경북대학교 전자공학부 조교수 <관심분야> 통신공학, 신호 처리
 [ORCID:0000-0002-9737-0432]

이 후 진 (Hoojin Lee)



1997년 2월: 서울대학교 전기
공학부 졸업

2002년 6월: The University of
Texas at Austin ECE 석사 졸업

2007년 12월: The University of
Texas at Austin ECE 박사 졸업

2008년 1월~2009년 6월: Freescale
Semiconductor, Inc. Systems
& Architecture Engineer

2009년 9월~현재: 한성대학교 IT융합공학부 교수
<관심분야> 통신 및 네트워크, 멀티미디어 신호처리,
사이버 보안

[ORCID:0000-0003-2450-9234]