

코히런트 무선 광통신 시스템에서 펄스 재밍으로 인한 비트오류율 분석

박 휘 성*

BER Analysis of Coherent Free-Space Optical Systems with Pulsed Noise Jamming

Hwi-Sung Park*

요 약

본 논문에서는 펄스 재밍의 영향에 대해 코히런트 무선 광통신 시스템에서 비트오류율을 분석한다. 유도된 수식은 닫힌형태로 쉽게 코히런트 광 통신 시스템 성능을 확인할 수 있다. 또한 최적의 공격을 위한 재머를 작동시키는 심볼 시간 비율을 계산한다. 결과를 통해서, 유도된 비트오류율이 정확한 것을 확인한다.

Key Words : Bit Error Rate Analysis, Coherent Free-Space Optical System, Pulsed Noise Jamming

ABSTRACT

In this letter, we investigate the performance of coherent free-space optical(FSO) systems under pulsed noise jamming conditions. In particular, we derive the average bit error probability of the coherent FSO systems with the pulsed noise jamming in a closed-form. Also, we derive the optimal fraction of symbol time of the jammer. We confirm the derived average error probability expressions by the exactly matching Monte-Carlo simulation results.

I. 서 론

최근에 무선 광통신 시스템(Coherent Free Space

Optical System)은 많은 각광을 받고 있다. 무선 광통신 시스템은 기존의 RF 시스템과 다르게 비 허가 대역인 높은 주파수 대역을 사용하여 주파수 대역 사용에 제한이 없고, 넓은 주파수 대역을 사용할 수 있어 높은 전송률을 얻을 수 있다^[1]. 이러한 무선 광통신 시스템은 넓은 주파수 대역이 필요한 인공위성과 지상 단말사이 통신에 대해 많은 연구가 수행되었다. 인공위성과 지상 단말간의 통신을 하는 경우에 있어서 큰 문제 중 하나는 재머의 공격에 취약하다는 것이다. 이를 극복하기 위해 기존의 위성통신시스템에서는 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) 기법을 사용하여 재머의 영향을 감소시켰다. 펄스 재밍방식은 DSSS 기법을 사용하는 시스템을 효과적으로 재밍할 수 있는 기법이다^[2]. 따라서 본 논문에서는 재머의 영향을 분석하고 대비하기 위해 무선 광통신 시스템에서 펄스 재밍의 영향에 대한 비트오류율(BER: Bit Error Rate) 분석을 수행한다. 또한 펄스 재밍의 영향을 최대화하기 위한 심볼 시간 비율을 계산한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 코히런트 무선 광통신 시스템에서 펄스 재머가 동작하는 환경을 고려한다. 대기 난기류와 펄스 재머 환경에서 수신되는 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = x(t) + n(t) + j(t) \quad (1)$$

여기서 $x(t)$ 는 전송 신호이고, $n(t)$ 는 백색 가우시안 잡음 신호, $j(t)$ 는 백색 가우시안 잡음과 유사한 펄스 재머신호이다. 펄스 재머신호의 평균 전력의 세기는 J_0 이고, 최대 값은 J_0/β , 한 심볼 시간 중 β 동안 동작한다. 대기 난기류가 존재하는 상황에서 SJNR(Signal -to-Jamming and Noise Ratio)는 다음과 같이 정의한다.

$$\gamma = \gamma_0^{SJNR} |a_r + ja_i|^2 \quad (2)$$

여기서 $a_r + ja_i$ 는 대기 난기류로 인한 페이딩 상수로 $a_r \sim N(\bar{a}_r, \sigma_r^2)$, $a_i \sim N(\bar{a}_i, \sigma_i^2)$ 와 같은 가우시안 분포를 따른다^[3]. 그리고 γ_0^{SJNR} 은 대기 난기류를 제외한 SJNR이다. 논문^[2]에 따르면 γ 은 평균 SJNR이 γ_0^{SJNR} 일 때 다음과 같은 누적분포함수를 따른다.

* First Author : The 2nd R&D Institute-1, Agency for Defense Development, 7hwisung7@add.re.kr, 정회원
논문번호 : KICS2016-02-029, Received February 5, 2016; Revised March 15, 2016; Accepted March 23, 2016

$$F_\gamma(\gamma) = 1 - Q_1\left(\sqrt{2K}, \sqrt{\frac{2(1+K)}{\gamma_0^{SNR} a^2}} \gamma\right) \quad (3)$$

여기서 $Q_1(\cdot, \cdot)$ 는 Marcum Q-function이고, $\bar{a}^2 = \sigma_r^2 + \sigma_i^2 + a_r^2$, K 는 코히런트 성분과 비 코히런트 성분의 강도 비율로 다음과 같다.

$$\frac{1}{K} = \frac{\bar{a}^2}{\sqrt{a_r^4 + 2a_r^2(\sigma_i^2 - \sigma_r^2) - (\sigma_i^2 - \sigma_r^2)^2}} - 1 \quad (4)$$

III. 비트오류율 분석

본 장에서는 무선광통신 시스템에서 펄스 재밍이 있는 경우 BER을 수식적으로 분석한다. 펄스 재밍의 영향을 받는 경우 BER 성능을 다음과 같다.

$$P_e^{PJ} = \beta \times P_e\{\gamma_0^{SNR}\} + (1 - \beta) \times P_e\{\gamma_0^{SNR}\} \quad (5)$$

여기서 P_e 는 펄스 재밍이 없는 경우의 BER 성능이고, γ_0^{SNR} 과 γ_0^{SNR} 은 난기류(Turbulence)가 없을 때의 SJNR과 SNR(Signal-to-Noise Ratio)이다. 또한 β 는 재밍이 작동되는 심볼 시간의 비율로 0부터 1사이의 값을 갖는다. SNR이 높은 경우에 수식 (5)는 수식 (6)과 같이 근사화가 가능하다.

$$P_e^{PJ} \approx \beta \times P_e\{\beta\gamma_0^{SNR}\} \quad (6)$$

$$\gamma_0^{SNR} = E_S / (N_0 + J_0 / \beta) \approx \beta E_S / J_0 = \beta\gamma_0^{SNR} \quad (7)$$

여기서 γ_0^{SNR} 은 난기류가 없을 때의 SJR(Signal-to-Jamming Ratio)이다. 그리고 E_S 는 심볼 에너지, N_0 는 잡음의 전력 스펙트럼밀도이다. $P_e\{\beta\gamma_0^{SNR}\}$ 는 평균 SNR이 $\beta\gamma_0^{SNR}$ 인 경우의 BER로 BPSK(Binary Phase-Shift Keying)와 QPSK(Quadrature Phase-Shift Keying)를 사용하는 경우에 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_e\{\beta\gamma_0^{SNR}\} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty F_\gamma\left(\frac{t^2}{\delta}\right) e^{-t^2/2} dt \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \left(1 - Q_1\left(\sqrt{2K}, t\sqrt{\frac{2(1+K)}{\beta\gamma_0^{SNR} a^2 \delta}}\right)\right) e^{-t^2/2} dt \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 BPSK를 사용하는 경우에는 δ 가 2이고, QPSK를 사용하는 경우에는 δ 가 1이 된다. 펄스 재밍이 영향을 주는 최악의 BER을 구하기 위해서는 수식

(8)을 미분한 값을 0으로 만드는 β^* 을 계산해야 한다. 수식 (8)을 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial P_e^{PJ}}{\partial \beta} = P_e\{\beta\gamma_0^{SNR}\} + \beta \frac{\partial P_e\{\beta\gamma_0^{SNR}\}}{\partial \beta} \quad (9)$$

여기서 $P_e\{\beta\gamma_0^{SNR}\}$ 의 미분 값은 라이프니츠 적분공식에 따라 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_e\{\beta\gamma_0^{SNR}\}}{\partial \beta} &= \frac{\partial}{\partial \beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \left(1 - Q_1\left(\sqrt{2K}, t\sqrt{\frac{2(1+K)}{\beta\gamma_0^{SNR} a^2 \delta}}\right)\right) e^{-t^2/2} dt \\ &= -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \left(\frac{\partial}{\partial \beta} Q_1\left(\sqrt{2K}, t\sqrt{\frac{2(1+K)}{\beta\gamma_0^{SNR} a^2 \delta}}\right)\right) e^{-t^2/2} dt \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 Marcum Q-function의 미분 값은 수식 (11)과 같이 계산할 수 있다⁴¹.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \beta} Q_1\left(\sqrt{2K}, t\sqrt{\frac{2(1+K)}{\beta\gamma_0^{SNR} a^2 \delta}}\right) &= -\frac{1+K}{\beta^2 \gamma_0^{SNR} a^2 \delta} I_0\left(t\sqrt{\frac{4K(1+K)}{\beta\gamma_0^{SNR} a^2 \delta}}\right) \exp\left(-K - \frac{(1+K)t^2}{\beta\gamma_0^{SNR} a^2 \delta}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $I_0(\cdot)$ 는 수정 베셀 함수이고, 수식 (10)에 수식 (11)의 결과를 대입하여 $P_e\{\beta\gamma_0^{SNR}\}$ 의 미분 값을 다음과 같이 계산할 수 있다^{15-31,618-41}.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_e\{\beta\gamma_0^{SNR}\}}{\partial \beta} &= -\frac{1+K}{2\beta \sqrt{(\beta\gamma_0^{SNR} a^2 \delta)(2(1+K) + \beta\gamma_0^{SNR} a^2 \delta)}} \\ &\times I_0\left(\frac{K(1+K)}{2(1+K) + \beta\gamma_0^{SNR} a^2 \delta}\right) \\ &\times \exp\left(-K + \frac{K(1+K)}{2(1+K) + \beta\gamma_0^{SNR} a^2 \delta}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

수식 (9)를 0으로 만드는 β^* 은 $P_e\{\beta\gamma_0^{SNR}\}$ 와 $P_e\{\beta\gamma_0^{SNR}\}$ 의 미분 값 모두 닫힌형태(Closed-Form)이므로, 다양한 수치해석 방법을 통해 계산할 수 있다. β^* 을 계산한 후에는 수식 (9)로부터 $P_e\{\beta^*\gamma_0^{SNR}\} = -\beta^* \partial P_e\{\beta\gamma_0^{SNR}\} / \partial \beta$ 을 유도할 수 있기 때문에, 다음과 같이 펄스 재밍이 있는 경우 최악의 BER 성능을 계산할 수 있다.

$$P_e^{PJ} \approx \beta^* \times P_e\{\beta^* \gamma_0^{SJR}\} = -(\beta^*)^2 \times \frac{\partial P_e\{\beta \gamma_0^{SJR}\}}{\partial \beta} \quad (13)$$

IV. 시험 분석

본 장에서는 3장에서 분석한 BER 수식을 몬테카를로 방법과 비교분석한다. 시험 분석을 위한 파라미터는 논문^[3]과 유사하고, 표 1로 정리하였다.

시험을 위한 β^* 는 수식 (9)를 0으로 하는 값을 수치해석 알고리즘인 이분법을 사용하여 구하였다. 주어진 γ_0^{SJR} 에 대한 β^* 은 표 2에 정리하였다.

그림 1은 SNR이 20dB인 경우 다양한 SJR에 대해 몬테카를로 시뮬레이션결과와 3장의 수식을 비교하였다. 시험을 위한 β^* 의 값은 표 2의 값을 사용하였다. 그림 1에서 파랑 점선은 몬테카를로 시뮬레이션 결과를 나타내고, 녹색 실선은 수식 (13)으로 계산한 값을 나타낸다. 그리고 붉은 실선은 펄스 재머가 존재하지 않는 경우의 BER 성능을 나타낸다. 그림 1에서 확인할 수 있듯이 몬테카를로 시뮬레이션 결과와 수식 (13)이 유사한 것을 확인할 수 있다. 그림 1에서 두 값의

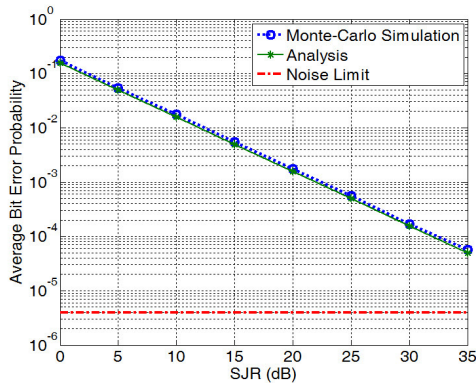


그림 1. 몬테카를로 시뮬레이션 및 수식(13)의 BER 성능
Fig. 1. Average bit error probability of Monte-Carlo simulation and formula (13).

표 1. 시험 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Parameters	Values
Modulation scheme	BPSK
\bar{a}_r	0.6054
σ_r^2	0.0153
\bar{a}_i	0
σ_i^2	0.0245
\bar{a}^2	0.4063
K	12.1568

표 2. γ_0^{SJR} 에 따른 재밍 심볼 시간 비율 β^*

Table 2. The optimal fraction of symbol time given γ_0^{SJR}

γ_0^{SJR}	β^*
0 dB	7.803×10^{-1}
5 dB	2.468×10^{-1}
10 dB	7.803×10^{-2}
15 dB	2.468×10^{-2}
20 dB	7.803×10^{-3}
25 dB	2.468×10^{-3}
30 dB	7.803×10^{-4}
35 dB	2.468×10^{-4}

차이가 약 0.3dB 정도인 것을 확인할 수 있는데, 이는 본 논문에서 높은 SNR 근사화로 발생하는 오차이다.

V. 결론

본 논문에서는 무선 광통신 시스템에서 펄스재머가 있는 경우에 최악의 BER과 이를 얻기 위한 최적의 재밍 심볼 시간 비율을 분석하였다. 시험 결과를 통하여 분석한 수식이 몬테카를로 시뮬레이션과 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과를 활용하여 펄스재머가 있는 경우 최악의 BER을 예측할 수 있을 것이다. 또한 논문의 결과를 확장하여 DSSS를 사용하는 시스템이 펄스재머의 공격을 받는 경우에 대해서도 BER을 분석할 수 있을 것이다.

References

- [1] 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.
- [2] R. A. Poisel, *Modern Communications Jamming: Principles and Techniques*, Artech House Publisher, 2006.
- [3] J. Park, E. Lee, C.-B. Chae, and G. Yoon, "Performance analysis of cohernet free-space optical systems with multiple receivers," *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol. 27, no. 9, pp. 1010-1013, May 2015.
- [4] W. K. Pratt, "Partial differential of Marcum's Q function," in *Proc. IEEE*, vol. 56, no. 7, pp. 1220-1221, Jul. 1968.
- [5] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, D. Zwillinger and A. Jeffrey, Eds., 7th Ed. New York, NY, USA: Academic, 2007.