

# 디지털 전송 시스템을 위한 광 수신시스템에 관한 연구

김선엽<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>남서울대학교 정보통신공학과

## A Study on the Optical Receiver System for Digital Transmission System

Sun-Yeob Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Information Communication, Namseoul University

**요 약** 광시스템에서 신호와 부가적인 잡음의 통계적인 특성에 대해 다양한 방법으로 평가하는 것은 시스템의 성능 최적화를 위해 필수적인데, 본 논문에서는 스펙트럼분할된 광시스템의 성능해석에서 수신부에 광전지증폭기를 포함시켜 수신된 신호 비트에 대한 에러한계 즉, 비트에러률을 유지하기 위해 필요한 평균광전력을 비트당 포함되는 광자의 수로 나타낸다.본 논문에서는 신호가 디지털 형태를 띠는 경우 수신기의 감도를 계산하는 방안에 대하여 계산을 수행하였다. 이를 통해 일반 강도변조된 신호의 전송시와 디지털 신호의 전송시에 필요한 광전력의 비교를 보였다. 그림 3에서 보인 것처럼 디지털 신호 전송 시스템이 일반 강도변조된 신호의 전송 시에 비해 최소 10dB 정도 개선이 됨을 확인할 수 있었다.

**Abstract** In optical system, the signal and additive noise for statistical properties of a variety of ways to evaluate the performance of the system is essential for the optimization. In this paper, performance analysis of spectrum-sliced optical system in the optical pre-amplifier in the receiver the received signal by including the error limits for the bit that is, the bit error rate (BER: Bit Error Rate) required to maintain the average optical power represents the number of photons per bit is included in this paper to digital form, noticeable signal the receiver to calculate the sensitivity of the method for the calculation was performed. The general strength of the transmission of the modulated signal and digital signal transmission was required for the comparison of optical power. As shown in Figure 3, the general strength of the digital signal transmission system for transmitting a modulated signal compared with the case is improved by at least 10dB.

**Key Words** : Digital signal, Transmission, Optical power

### 1. 서론

광전자공학, 소프트웨어기술 그리고 네트워킹(networking) 등의 영역에서 급격한 기술의 진보는 정보 고속도로에 의한 글로벌 지구촌 생성의 중요한 요소인 광통신시스템과 네트워크의 폭발적인 성장을 이끌어 현재는 언제, 어디서나 정보를 가공 및 이용을 할 수 있는 유비쿼터스의 시대로 접어들었다. 이러한 대용량의 정보량을 주고 받는 사회에서 광통신시스템네트워크는 지구

촌의 곳곳에 음성, 영상과 데이터 정보 등을 실시간으로 정보의 왜곡이 없이 송·수신하는 기간 시스템망으로 자리잡고 있다. 광시스템에서 광신호는 양방향의 멀티미디어와 영상회의 같은 큰 대역폭을 요구하는 현재의 사용자 서비스들은 보다 더 큰 대역폭을 필요로 하므로 광통신시스템의 용량의 증가가 필연적이다.

광시스템에서 신호와 부가적인 잡음의 통계적인 특성에 대해 다양한 방법으로 평가하는 것은 시스템의 성능 최적화를 위해 필수적인데, 본 논문에서는 스펙트럼분할

이 논문은 2013년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음

\*Corresponding Author : Sun-Yeob Kim(Namseoul Univ.)

Tel: +82-10-6788-9377 email: sykim0599@nsu.ac.kr

Received August 10, 2013

Revised September 5, 2013

Accepted September 6, 2013

된 광시스템의 성능해석에서 수신부에 광전치증폭기를 포함시켜 수신된 신호 비트에 대한 에러한계 즉, 비트에러률(BER : Bit Error Rate)을 유지하기 위해 필요한 평균 광전력을 비트당 포함되는 광자의 수로 나타낸다. 이러한 수신시스템에서 최근의 많은 연구는 전송기법으로 일반적인 디지털전송기법을 전송을 이용하여 표준에러확률을 유지하기 위해 필요로 하는 비트당 광자의 수를 계산하는 방법에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 또한 수신기에서 광신호와 전기신호의 다양한 대역폭 비가 변화하는 경우에 대하여 도 많은 연구가 진행되고 있으므로 따라서 다양한 형태의 디지털 신호가 전송되는 시스템에서 신호를 제대로 수신할 수 있는 시스템에 관한 시스템의 해석은 필수적이라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 신호가 디지털 형태를 띠는 경우 수신기의 감도를 계산하는 방안에 대하여 계산을 수행하였고, 각각의 형태의 수신 시스템의 페널티를 계산하였다.

## 2. 디지털 전송시스템

광시스템 환경에 일반적인 디지털 전송방식들에 관한 방식들에 관해서는 여러 가지 비교가 필요한데, 그 이유는 예상 전력, 필요한 침투전력등으로 표현되는 전송 품질에 대한 비교를 위해서이다. 광통신 시스템에서는 변조방식으로 본 논문의 앞 절에서 고찰한 바와 같이 주로 신호의 세기에 따른 변조방식을 사용한다. 그러나 스펙트럼 분할신호와 같은 광대역 유사잡음신호들을 이용하는 시스템의 환경에서는 유사잡음신호의 처리가 신호의 세기에 따른 변조방식에서는 어렵다는 단점이 존재한다. 먼저 가우시안 분포를 적용한 경우에 대해 고려할 경우, 디지털 전송 시스템에서 광전류의 실효치는 식(1)과 같이 주어진다.

$$\mu_1 = 2\sigma_s^2 \quad (1)$$

이러한 시스템에서  $Q$ 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$Q = \frac{2(2\sigma_s^2)}{2\sqrt{\frac{2}{m}(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2 + \frac{2}{m}(\sigma_n^2)^2}} \quad (2)$$

그러므로 위 식들을 이용하여 디지털 전송시스템에서 수신기의 감도는 식 (3-25)와 같이 쓸 수 있다.

$$\overline{N_p} = \frac{2n_{sp}mQ^2}{2m-Q} \left[ 1 + \frac{1}{Q} \sqrt{4m-Q^2} \right] \quad (3)$$

출력에 관련된 확률밀도함수는 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$P(S) = \frac{\left(\frac{m}{\sigma^2}\right)}{(2m-1)!} S^{2m-1} \exp\left(\frac{mS}{\sigma^2}\right) \quad (4)$$

비트 값이 '1'인 신호가 전송된다고 가정하면 에러확률은 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$P_e = \Pr \left\{ S_1 - S_0 < 0 \right\} \\ = \Pr \left\{ S_1 < S_0 \right\} \quad (5)$$

여기서,  $S_0$ ,  $S_1$ 는 각각 두 채널의 출력이다. 수신기에서 수신된 신호의 판별은 두 채널의 출력 신호의 차에 따른다. 여기서 임의로  $S_0 = x$ 와  $S_1 = y$ 라 한다면 비트 값이 1인 신호가 전송되는 동안에 에러는  $y < x$  동안에 발생한다. 이것을  $S_0$ 과  $S_1$ 의 확률밀도함수로 표현하면 식 (6)과 같이 표현된다.

$$P_e = \int \int_{y < x} \Pr(S_1 = y, S_0 = x) dx dy \quad (6)$$

$S_0$ 과  $S_1$ 는 서로 독립적이므로 식 (6)은 식 (7)와 같이 쓸 수 있다.

$$P_e = \int \int_{y < x} \Pr(S_1 = y) \Pr(S_0 = x) dx dy \quad (7) \\ = \int_0^\infty \left[ \int_0^x \Pr(S_1 = y) dy \right] \Pr(S_0 = x) dx$$

따라서 확률밀도함수는 식 (8)과 같이 주어진다.

$$P_e = \frac{m^{4m}}{[(2m-1)!]^2} \times \\ \int_0^\infty \left[ \int_0^x \frac{1}{\sigma_1^{4m}} y^{2m-1} \exp\left(\frac{-my}{\sigma_1^2}\right) dy \right] \times \\ \frac{1}{\sigma_0^{4m}} x^{2m-1} \exp\left(\frac{-mx}{\sigma_0^2}\right) dx \quad (8)$$

식 (8)을 간단히 표현하기위해 다음과 같이 정의하면 식 (12)와 같이 쓸 수 있다.

$$u = \frac{my}{\sigma_1^2} \quad (9)$$

$$v = \frac{mx}{\sigma_0^2} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} \quad (11)$$

$$P_e = \frac{1}{[(2m-1)!]^2} \times \int_0^\infty \nu^{2m-1} \exp(-\nu) d\nu \times \int_0^{\nu\beta} u^{2m-1} \exp(-u) du \quad (12)$$

식 (12)를 식 (13)과 같은 급수형태로 변환할 수 있다.

$$P_e = 1 - \frac{1}{(1+\beta)^{2m}} \sum_{i=0}^{2m-1} {}^{2m-1+i} C_i \left( \frac{\beta}{1+\beta} \right)^i \quad (13)$$

윗 식은 다음과 같은 조합함수를 사용한 것이다.

$${}^n C_r = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (14)$$

식 (13)의 근사적인 표현은 식 (15)와 같이 표현된다.<sup>[61]</sup>

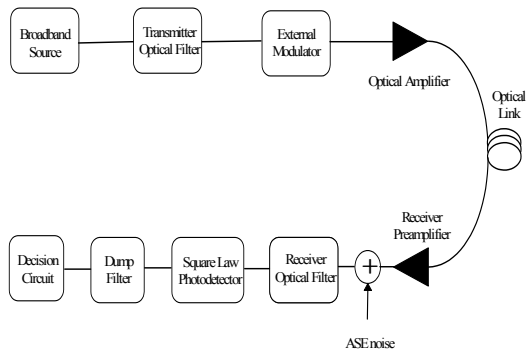
$$P_e \approx \frac{1}{\sqrt{8\pi m}} \frac{(4\beta)^{2m}}{(1+\beta)^{4m-1}} \quad (15)$$

신호가 채널 1에 있다고 가정하고, FSK 전송에 대해 표현하면 식 (16)과 같이 광전류의 분산을 표현할 수 있다.

$$\sigma_1^2 = \sigma_s^2 + \sigma_n^2 \quad (16)$$

### 3. 시뮬레이션

본 논문에서 고려한 디지털 전송 시스템의 블록도는 Fig. 1과 같다.



[Fig. 1] Schematic diagram of digital transmission system in optical system.

Fig. 1에서 보이는 시스템은 비트당 전송되어지는 광자의 평균수가 최소가 되도록 한 것으로 정보신호의 단위전력은 식 (16)과 같다.

$$I = \frac{1}{2T} \int_0^T [x^2(t) + y^2(t) + \tilde{x}^2(t) + \tilde{y}^2(t)] dt \quad (16)$$

여기서,  $x(t), y(t), \tilde{x}(t), \tilde{y}(t)$ 는 대역폭  $B_o/2$  를 갖는 가우시안 프로세서이다. 광 전치증폭수신기의 경우에 수신기가 ON상태에서는  $x, y, \tilde{x}$  그리고  $\tilde{y}$ 에 유사잡음신호와 전치증폭기의 ASE잡음이 더해진 성분을 갖고, 수신기가 OFF상태일 때는 위의 값들은 전치증폭기의 ASE잡음성분만 존재하게 된다. 전치증폭기의 이득이 전기적인 열잡음을 무시할 수 있을 정도로 충분히 크다고 가정하여 이를 통해 수신기의 수신감도를 계산하기 위한 가우시안과  $\kappa$ -자승 분포에 대한  $I$ 의 두 모멘트를 결정한다. 여기서  $I$ 의 평균치는 식 (4-2)와 같이 주어진다.

$$\langle I \rangle = \frac{1}{2T} (4\sigma^2 T) = 2\sigma^2 \quad (17)$$

$I$ 의 분산을 계산하기 위하여, Jacobs에 의해 개발된 해석을 이용하면  $I$ 의 분산은 식 (4-3)과 같이 주어진다.<sup>[61]</sup>

$$var I = \langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2 \quad (18)$$

광대역인 광원의특성을 포함하여 윗 식을 계산하기 위하여 다음의 특성을 사용한다.

$$\begin{cases} \langle x \rangle = \langle y \rangle = 0 \\ \langle x^2(t) \rangle = \langle y^2(t) \rangle = \sigma_N^2 \\ \langle x(t)x(t') \rangle = \langle y(t)y(t') \rangle = R(\tau) \\ \langle x^2(t)y^2(t) \rangle = \langle x^2(t')y^2(t') \rangle = \sigma_N^2 \end{cases} \quad (19)$$

이를 통해 다음 식을 얻을 수 있다.

$$var I = \frac{2}{T^2} \left[ \int_0^T \int_0^T dt dt' \sigma_N^4 \hat{R}^2(t-t') \right] \quad (20)$$

윗 식에서  $\sigma_N^2 = R(0)$ 이라 가정하면 식 (21)을 얻을 수 있다.

$$var I = \frac{4}{T^2} \left[ \int_0^T d\tau (T-\tau) R^2(\tau) \right] \quad (21)$$

FSK 시스템의 경우, 광전류의 침투치와 평균치가 동일하므로 식 (2-41)과 같이 쓸 수 있다.

$$2\sigma^2 = \overline{N_p} \eta q R_b \quad (22)$$

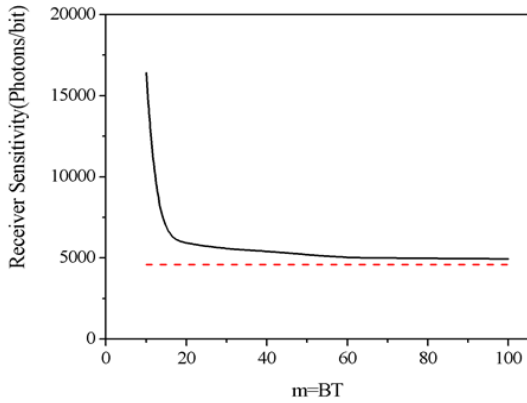
그러므로 식 (23)과 같이 비트당 광자수로 수신기의 평균 감도에 대한 해를 얻을 수 있다.

$$\overline{N_p} = \frac{2 \frac{B_c}{R_b} \left( \frac{Q}{\sqrt{2} \eta} \sqrt{\frac{8\pi V_T C_T}{q}} \right)}{\sqrt{1 - \frac{Q^2}{2m}}} \quad (23)$$

그리고  $B_c = R_b/2$ 라 가정하면 식 (2-42)는 다음 식과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\overline{N_p} = \frac{\left( \frac{Q}{\sqrt{2} \eta} \sqrt{\frac{8\pi V_T C_T}{q}} \right)}{\sqrt{1 - \frac{Q^2}{2m}}} \quad (24)$$

식 (24)과 같이 주어지는 디지털 전송에 대한 수신기 감도를보였다.



[Fig. 2] A sensitivity for a receiver using digital signal

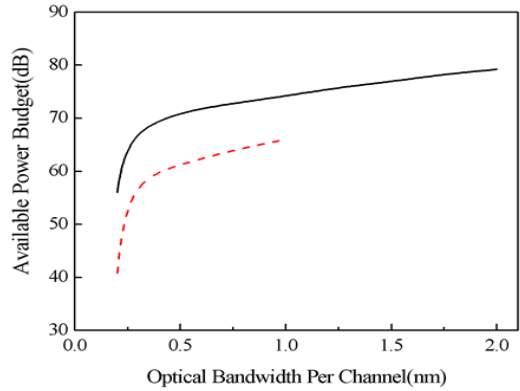
채널당 데이터 전송율이 2.5Gb/s이고 스펙트럼분할된 소스의 경우 전력스펙트럼밀도가 4mW/nm라 가정하면, 채널당 전송전력은 에러확률밀도와 채널광대역폭의 곱으로 주어지는데 이를 로그항으로 표현하면 식 (25)처럼 주어진다.

$$P_{Tr}(\text{dBm}) = 10 \log_{10}(4) + \log(B_{o,nm}) \quad (25)$$

그러므로 사용가능한 광전력이 식 (27)처럼 쉽게 계산 될 수 있다.

$$PB(\text{dB}) = 100.97 + 10 \log_{10} \left( \frac{B_{o,nm}}{\overline{N_p}} \right) \quad (27)$$

Fig. 3에 일반 강도변조된 신호의 전송시와 디지털 신호의 전송시에 필요한 광전력의 비교를 보였다. Fig. 3에서 보인 것처럼 디지털 신호 전송 시스템이 일반 강도변조된 신호의 전송 시에 비해 최소 10dB 정도 개선이 된다. 또한 필요한 광전력 증가에 따라 채널의 광대역폭이 증가되어짐을 Fig. 3에서 확인할 수 있다.



[Fig. 3] A sensitivity for a receiver using digital signal

#### 4. 결론

일반적인 디지털 전송기법을 전송을 이용하여 표준에 적합성을 유지하기 위해 필요로 하는 비트당 광자의 수를 계산하는 방법에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 또한 수신기에서 광신호와 전기신호의 다양한 대역폭 비가 변화하는 경우에 대하여도 많은 연구가 진행되고 있으므로 따라서 다양한 형태의 디지털 신호가 전송되는 시스템에서 신호를 제대로 수신할 수 있는 시스템에 관한 시스템의 해석은 필수적이라 할 수 있다. 이에 본 논문에서는 신호가 디지털 형태를 띠는 경우 수신기의 감도를 계산하는 방안에 대하여 계산을 수행하였다. 이를 통해 일반 강도변조된 신호의 전송시와 디지털 신호의 전송시에 필요한 광전력의 비교를 보였다. Fig. 3에서 보인 것처럼 디지털 신호 전송 시스템이 일반 강도변조된 신호의 전송 시에 비해 최소 10dB 정도 개선이 됨을 확인할 수 있었다.

## References

- [1] Clifford R. Pollock. " Fundamentals of Optoelectronics", Irwin, 1995. 853-858, July 1991.
- [2] E. A.Kuzin, B. Ibarra Escamilla, P. Rojas Laguna, J. Sanchez Momdragon "Nonlinear Optical loop mirror with low birefringence twisted fiber in the loop", Optics Comm., 1998  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0030-4018\(98\)00011-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0030-4018(98)00011-X)
- [3] <http://www.lfw.com>
- [4] Paul E. Green, *Fiber Optic Networks*. Prentice Hall: New Jersey, 1993.
- [5] I. Jacobs, "Optical fiber communications technology and system overview," Trends in Optical Fibre Metrology and Standards, *O.D.D. Soares Ed., NATO ASI Series, Series E-Vol. 285*, pp. 567-591, Kluwer Academic Publishers, 1995.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0035-9\\_29](http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0035-9_29)
- [6] S. D. Personick, "Receiver design for digital fiber-optic communication systems" *Bell Systems Technical Journal*, vol. 52, no. 6, pp. 843-874, 1973.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1973.tb01994.x>
- [7] B. E. Saleh and M.C. Teich, *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/0471213748>

---

김 선 엽(Sun-Youb Kim)

[정회원]



- 1993년 2월 : 원광대학교 전자공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 원광대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 원광대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 남서울대학교 정보통신공학과 조교수

<관심분야>

초고주파 통신용 회로, 광통신응용