

# 광전치증폭기의 수신감도에 관한 연구

김선엽\*, 박형근\*\*

\*남서울대학교 정보통신공학과

\*\*남서울대학교 전자공학과

e-mail: sykim0599@.ac.kr

## A Study on Received Sensitivity of Optical Pre-amplifier

Sun-Youb Kim\*, Hyung-Geun Park\*\*

\*Dept of Information Communication Eng., Namseoul University

\*\*Dept of Electronics Eng., Namseoul University

### 요 약

본 논문에서는 WDM시스템에서 사용될 수 있는 광전치증폭기의 수신감도를 해석하였다.  $10^{-9}$ 의 에러확률에 대하여 FSK전송을 이용하여 비트당 광자수를 계산하였다.

결과로 일반적인 PIN 수신기의 수신감도는  $9.2 \times 10^4$  photon/bit이고, 광전치증폭수신기의 경우는  $7 \times 10^2$ 의 photon/bit를 갖음을 확인하였다. 또한 FSK전송의 경우에는 표준에러확률인  $10^{-9}$ 을 유지하기 위해 필요로 하는 비트당 광자의 수를 계산하였는데, 가우시안 근사해석법을 사용한 경우와 정확한 해석법( $\kappa$ 자승법)을 이용한 결과  $m = 30$ 인 경우  $\kappa$ 자승법의 경우는  $2.36 \times 10^2$  photon/bit, 가우시안 근사법의 경우에는  $4.01 \times 10^2$  photon/bit을 얻었다.

이를 통해 동일한 BER의 경우에 광전치증폭수신기가 PIN수신기에 비해 우수함을 확인하였다.

### 1. 서론

정보의 생성, 전송 그리고 활용에 관한 인간의 욕구는 1950년대 이후의 정보혁명의 원천이 되었다. 특히 마이크로전자공학, 광전자공학, 소프트웨어기술 그리고 네트워킹(networking) 등의 영역에서 급격한 기술의 진보는 정보고속도로에 의한 글로벌 지구촌 생성의 중요한 요소인 광통신시스템과 네트워크의 폭발적인 성장을 이끌었다. 이러한 광통신시스템네트워크는 지구촌의 곳곳에 음성, 영상과 데이터 정보 등을 실시간으로 정보의 왜곡이 없이 송·수신할 수 있다. 본 논문에서는 WDM시스템의 성능해석에서 수신부에 광전치증폭기를 포함시켜 수신된 신호 비트에 대한 에러한계 즉, 비트에러률(BER : Bit Error Rate)을 유지하기 위해 필요한 평균광전력을 비트당 포함되는 광자의 수로 나타낸다.

그리고 광검출기 앞에 광전치 증폭기를 사용하여 일반적인 핀(PIN) 다이오드(diode)를 채용한 수신기를 통해 얻을 수 있는 수신감도를 개선하는 방법에 대해 해석한다. 광전치증폭기는 코히어런트 레이저

기반 시스템에서 수신기의 감도를 개선하는데 사용되었지만, 본 논문에서는 유사잡음 인코히어런트(incoherent) WDM시스템에 광 전치증폭기를 포함시켜 수신부 결정회로에서 다양한 신호와 잡음항들에 대해 확률밀도함수를 적용하고, 에러가 존재하는 경우에 그에 해당하는 확률을 계산하여 시스템의 수신감도가 개선됨을 보인다.

### 2. 본 론

#### 2.1. FSK전송방식에 의한 수신기의 수신감도

가우시안 해석법과  $\kappa$ -자승분포를 이용하여 신호와 잡음전류가 동시에 존재하는 FSK방식의 전치증폭기의 해석에 대해 고찰한다.

FSK전송을 적용하기 위한 수신기의 개략도는 그림 1에 보이고 있다.

$$\mu_1 = 2\sigma_s^2 \quad \mu_0 = -\mu_1 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sqrt{var1} &= \sqrt{var0} \\ &= \sqrt{\frac{2}{m}(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2 + \frac{2}{m}(\sigma_n^2)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

그리고 FSK 시스템의 경우에는  $Q$ 는 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

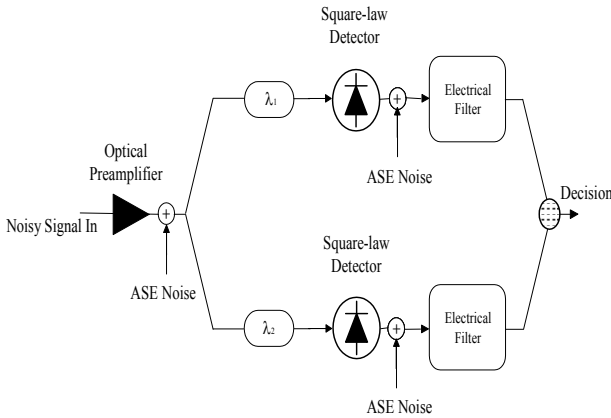


그림 1. FSK전송을 위한 수신기의 개략도

$$Q = \frac{2(2\sigma_s^2)}{2\sqrt{\frac{2}{m}(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2 + \frac{2}{m}(\sigma_n^2)^2}} \quad (3)$$

여기서,

$$\sigma_s^2 = \frac{\overline{N_p}}{2} \eta q R_0 G$$

$$\sigma_n^2 = n_{sp} \eta q (G-1) B_o$$

그러므로 위 식들을 이용하여 수신기의 감도는 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

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

식 (4)에 나타나있는 일반적인 수신기의 파라미터인  $n_{sp} = 2$  와  $P_e = 10^{-9}$ 을 대입하면 평균 수신기 감도는  $m$ 의 함수로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{N_p} = \frac{72m}{m-18} \left[ 1 + \frac{1}{3} \sqrt{2m-18} \right] \quad (5)$$

식 (5)의  $m$ 에 따른 대한 결과는 그림 2와 같다. 그림 2에서 실선은 스펙트럼분할된 광원을 이용한

FSK 시스템의 수신기의 감도  $\overline{N_p}$ 를 나타내고, 점선은 본 논문에서  $\overline{N_p}$ 와 비교하기 위한 코히어런트 레이저를 이용한 결과이다. 그림 2를 통해 다음과 같은 결과를 알 수 있다. 즉, 스펙트럼 분할된 광원과 코히어런트 레이저를 이용하는 경우 모두, 수신기의 감도는  $m$ 에 의존적으로 나타나면서 스펙트럼 분할된 광원의 경우에는  $m$ 값이 적은 경우에는 성능이 코히어런트 광원인 레이저를 이용하는 경우보다 성능이 저하된다. 그리고  $m$ 이 증가될 때 코히어런트 레이저 광원을 이용한 경우의 수신기 감도가 증가하지만, 스펙트럼 분할된 광원의 경우에는 수신기 감도가 최저로 되는 곳에서 최적의  $m$ 이 존재함을 나타낸다. 이러한 최적의 값은 앞 장에서 논의한 바와 같이 신호에너지의 변동은 낮은  $m$ 값에서 우세한 값이고, 광전치증폭기의 ASE 잡음은 높은  $m$ 값에서 우세하므로 나타나는 결과이다.

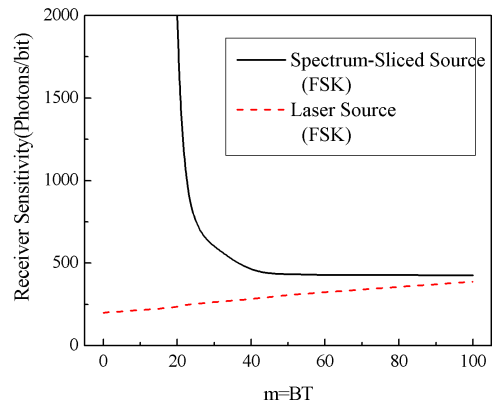


그림 2. 가우시안근사를 이용한 수신기감도

그림 1의 각각의 출력에 관련된  $k$ -자승 확률밀도 함수는 식 (6)와 같이 쓸 수 있다.

$$P(S) = \frac{\left(\frac{m}{\sigma^2}\right)}{(2m-1)!} S^{2m-1} \exp\left(-\frac{mS}{\sigma^2}\right) \quad (6)$$

비트 값이 '1'인 신호가 전송된다고 가정하면 에리 확률은 식 (7)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} P_e &= \Pr \left\{ S_1 - S_0 < 0 \right\} \\ &= \Pr \left\{ S_1 < S_0 \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $S_1, S_0$ 는 각각 두 채널의 출력이다. 수신기에서 수신된 신호의 판별은 두 채널의 출력 신호

의 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  $S_1$  과  $S_0$  의 확률밀도함수로 표현하면 식 (9)와 같이 표현된다.

$$P_e = \int \int_{y < x} \Pr(S_1 = y, S_0 = x) dx dy \quad (9)$$

$S_1$  과  $S_0$  는 서로 독립적이므로 식 (9)는 식 (10)과 같이 쓸 수 있다.

$$P_e = \int \int_{y < x} \Pr(S_1 = y) \Pr(S_0 = x) dx dy \quad (10)$$

$$= \int_0^\infty \left[ \int_0^x \Pr(S_1 = y) dy \right] \Pr(S_0 = x) dx$$

따라서  $\kappa$ -자승 분포의 확률밀도함수는 식 (11)과 같이 주어진다.

$$P_e = \frac{m^{4m}}{[(2m-1)!]^2} \int_0^\infty \left[ \int_0^x \frac{1}{\sigma_1^{4m}} y^{2m-1} \exp\left(-\frac{my}{\sigma_1^2}\right) dy \right] \times \frac{1}{\sigma_0^{4m}} x^{2m-1} \exp\left(-\frac{mx}{\sigma_0^2}\right) dx \quad (11)$$

식 (11)을 간단히 표현하기 위해 다음과 같이 정의하면 식 (15)와 같이 쓸 수 있다.

$$u = \frac{my}{\sigma_1^2} \quad (12)$$

$$\nu = \frac{mx}{\sigma_0^2} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} \quad (14)$$

$$P_e = \frac{1}{[(2m-1)!]^2} \int_0^\infty \nu^{2m-1} \exp(-\nu) d\nu \int_0^{\nu\beta} u^{2m-1} \exp(-u) du \quad (15)$$

식 (15)의 형태는 Jacobs에 의한 결과이다. 식 (15)를 식 (16)과 같은 급수형태로 변환할 수 있다.

$$P_e = 1 - \frac{1}{(1+\beta)^{2m}} \sum_{i=0}^{2m-1} {}^{2m-1+i} C_i \left( \frac{\beta}{1+\beta} \right)^i \quad (16)$$

윗 식은 다음과 같은 조합함수를 사용한 것이다.

$${}^n C_r = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (17)$$

식 (16)의 근사적인 표현은 식 (18)와 같이 표현된다.<sup>[61]</sup>

$$P_e \approx \frac{1}{\sqrt{8\pi m}} \frac{(4\beta)^{2m}}{(1+\beta)^{4m-1}} \quad (18)$$

신호가 채널 1에 있다고 가정하고, FSK 전송에 대해 표현하면 식 (19)과 같이 광전류의 분산을 표현할 수 있다.

$$\sigma_1^2 = \sigma_s^2 + \sigma_n^2 \quad \sigma_0^2 = \sigma_n^2 \quad (19)$$

식 (19)에서 첨자  $s$ 와  $n$ 은 신호와 잡음 광전류를 각각 의미한다. 그러므로 식 (14)을 이용하면  $\beta$ 는 다음식과 같이 표현된다.

$$\beta = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2 + \sigma_n^2} \quad (20)$$

$$= \frac{1}{1 + \left( \frac{N_p}{4m} \right)}$$

### 3. 모의실험

WDM 환경의 코히어런트 광섬유시스템은 직접 검출법이나 인코히어런트 수신기에 비해 높은 수신기 감도를 갖게되는데, 이것은 수신기의 열잡음을 무시할 수 있을 정도로 큰 고출력 국부발진기로부터의 산탄잡음과 매우 높은 주파수 선택도를 갖는 필터에 의한 것이다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 현재 많은 시스템들은 이론적인 검출감도가 우수하지 못하고 코히어런트 광원이 필요한 직접검출방식을 이용한다.

표 1에는 FSK의 전송효율을 계산하기 위해 사용한 파라미터를 나타내었다.

표 1의 파라미터와 식(20)을 이용하여 수신기의 감도를 계산한 결과가 그림 3에 나타나 있는데, 에러확률이  $10^{-9}$ 일 때, 평균수신기감도는 240 광자/비트이다.

그림 4에  $m$ 의 최적값과 이에 대응되는 수신기의 감도를 에러 확률 함수로 보였다.

그림 5는 수신기의 감도를 가우시안 분포와 정확한 계산값으로 이용된  $\kappa$ -자승 분포를 이용하여 표현한 것이다. 가우시안 분포를 사용한 경우의 결과값은  $m$ 이 작은 값에서는 대략적인 값을 갖게 되나  $m$  값이 증가되면 정확한 값에 접근하게 된다.

#### 4. 결론

WDM 시스템에 광전치증폭기를 도입하여 이에 대한 해석을 수행하였다. 그 결과  $m = 20$ 인 경우, PIN 수신기의 경우  $7 \times 10^2$  photon/bit 정도의 값을 갖을 수 있음을 확인하였다.

또한 FSK전송의 경우에는 표준에러확률인  $10^{-9}$ 을 유지하기 위해 필요로 하는 비트당 광자의 수를 계산하였는데, 가우시안 근사해석법을 사용한 경우와 정확한 해석법( $\kappa$ 자승법)을 이용한 결과  $m = 30$ 인 경우  $\kappa$ 자승법의 경우는  $2.36 \times 10^2$  photon/bit, 가우시안 근사법의 경우에는  $4.01 \times 10^2$  photon/bit을 얻었다.

향후 연구되어야 할 과제는 본 논문에서는 채널간 상호간섭과 펄스분산의 효과가 없는 것으로 고려하였는데, 이 두가지의 현상은 시스템의 성능에 커다란 영향을 미치므로 이에 대한 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] A. M. Vengsarkar and C. R. Davidson, "Long-period fiber-grating-based gain equalizers," *Optics Letters*, vol. 21, no. 5, pp. 336-338, Mar. 1996.
- [2] H. Onaka et al. "1.1 Tb/s WDM transmission over a 150 km 1.3  $\mu$ m zero-dispersion singlemode fiber," *Optical Fiber Communications Conference*, paper PD-19, San Jose (CA), Feb. 1996.
- [3] L. T. Blair and S. A. Cassidy, "Impact of new optical technology on spectrally-sliced access and data networks," *BT Technology Jnl.*, vol. 11, no. 2, pp. 46-55, Apr. 1993.
- [4] S. Pendleton-Hughes et al., "Forty channel wavelength division multiplexing for short haul wideband communication networks," *Proc. IOOC-ECOC*, 1985.
- [5] M.H. Reeve et al., "LED spectral slicing for singlemode local loop applications," *Electronics Letters*, vol. 24, no. 7, pp. 389-390, 1988.

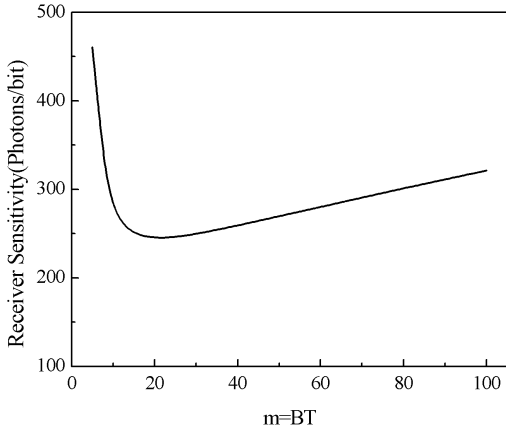


그림 3. 광전치 증폭 수신기의 감도

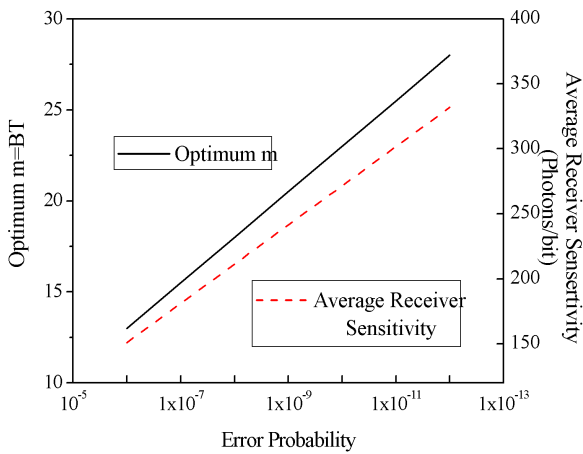


그림 4. 다양한 에러확률에 대해 계산된 최적의  $m$ 과 최소 수신기 평균감도

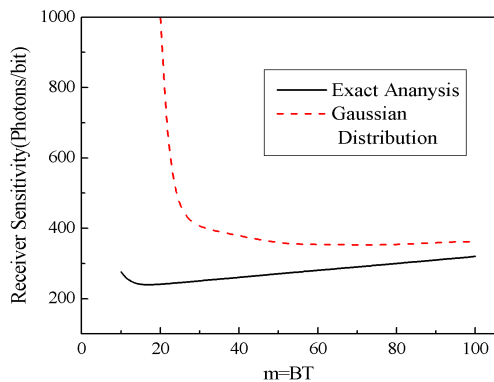


그림5. FSK 전송에서의 수신기 감도의 결과 비교